

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIJ TA‘LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI**

B. Q. TILABOV

**PLASTIK
DEFORMATSIYA**

*O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligi
tomonidan talabalar uchun darslik sifatida tavsiya etilgan*

TOSHKENT – 2023

UO‘K 621.017; 669.011; 621.78.011

KBK 40

T-50

B. Q. Tilabov. Plastik deformatsiya. [Darslik]. – T.: «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi», 2023. bet.

ISBN 978–9943–

Mazkur darslikda plastik deformatsiyaning asosiy tabiati, plastik tekisligi davomiyligining nazariy asoslari, materiallarni presslash va shtamplash, pastki va yuqori baholash haqidagi teoremlari keltirilgan. Metallarning tuzilishi, plastik deformatsiyalar haqida tushincha, deformatsion kuchlarni aniqlash usullari, elastik va plastik deformatsiyalar, metallar va qotishmalarning o‘ta yuqori plastikligi, deformatsiyani bartaraf etish, listli materiallarni shtampovkalash va plastik deformatsiyani asosiy qonunlari tavsiya etilgan. Deformatsiyalanish jarayoniga tezlik va haroratlar ta‘siri tahlillari ko‘rsatilgan. Bundan tashqari, darslikda talabalar mustaqil ravishda tayyorlanishlari uchun nazorat savollari ham berilgan.

Darslik 70720803 - «Metallarga bosim bilan ishlov berish (metallarni prokatli ishlab chiqarish)» magistratura mutaxassisligi va boshqa yaqin ta‘lim yo‘nalishlarida tahsil olayotgan talabalar uchun mo‘ljallangan. Shuningdek, u texnika OTM ilmiy xodimlari va mustaqil izlanuvchilari hamda ishlab chiqarish korxonalarining muhandis-texnik xodimlari uchun ham mo‘ljallangan.

В настоящем учебнике приведены основная природа пластической деформации, основы теории плоского пластического течения, прессования и штамповки материалов, теоремы о нижних и верхних оценках. Представлены строение металлов, понятие о пластической деформации, методы определения деформационных сил, упругая и пластическая деформация, сверхпластичность металлов и сплавов, устранение деформации, штамповки листовых материалов и основные законы пластической деформации. Показано влияние температуры и скорости на процесс деформирования. Кроме этого, в учебнике даны контрольные вопросы для самоподготовки студентов.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям образования 70720803 - «Обработка металлов под давлением (производство прокатных металлов)» и другим близким направлениям. Он также рассчитан для научных сотрудников и соискателей технических ВУЗов и производственных предприятий.

This textbook presents the basic nature of plastic deformation, the basics of the theory of plane plastic flow, pressing and stamping of materials, theorems on lower and upper bounds. The structure of metals, the concept of plastic deformation, methods for determining deformation forces, elastic and plastic deformation, superplasticity of metals and alloys, elimination of deformation, stamping of sheet materials and the basic laws of plastic deformation are presented. The effect of temperature and speed on the deformation process is shown. In addition, the textbook contains control questions for self-training of students.

The textbook is intended for students of higher educational institutions studying in the specialties of education 70720803 - "Processing of metals under pressure (production of rolled metals)" and other related areas. It is also designed for researchers and applicants for technical universities and industrial enterprises.

UO‘K 621.017; 669.011; 621.78.011

KBK 40

Taqrizchilar:

D.M.Berdiev – Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti «Metallarga bosim bilan ishlov berish» kafedrasi mudiri, texnika fanlari doktori, professor;

J.A.Xo‘jaev – Toshkent «Agregat zavodi» AJ boshqaruv raisi o‘rinbosari, bosh muxandis.

ISBN 978–9943–

© **B.Q.Tilabov, 2023**

©

© «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi», 2023.

KIRISH

Mashinasozlik sanoatlarida xilma-xil materiallardan foydalaniladi, bular ichida metallar va ularning qotishmalari asosiy konstrukcion materiallar bo'lib hisoblanadi. Shuning uchun fanning asosiy mazmuni va mohiyati plastik deformatsiyaga bag'ishlangan metall materiallarini o'rganishga qaratilgan.

Metallarning deformatsiyasi deb jismga qo'yilgan kuch P ta'siri ostida jismning shakli va o'lchamlarining o'zgarishiga aytiladi. Metallar fizik-kimyoviy, allotropiya hodisalari ta'siri ostida ham deformatsiyalanishi mumkin. Odatda, deformatsiya jismga qo'yilgan tashqi kuchlarning ta'siri bilan yoki jismning o'zida sodir bo'ladigan turli fizik-mexanikaviy jarayonlar bilan chaqiriladi. Qandaydir bir F maydonga qo'yilgan kuch P odatda unga perpendikulyar bo'lmaydi, nisbatan qandaydir bir burchak ostida yo'naladi, shu sababli jismda normal va urinma kuchlanishlar vujudga keladi. Bu kuchlanishlar haqiqiy kuchlanishlar bo'lishi mumkin – qachonki, kuch berilgan deformatsiya momentida mavjud bo'lgan kesimga nisbatlanadi, shartli kuchlanishlar bo'lishi mumkin – qachonki, kuch kesimning boshlang'ich maydoniga nisbatlanadi. Haqiqiy urinma kuchlanishlar t bilan va normal kuchlanishlar S bilan, shartli kuchlanishlar esa mos ravishda τ va σ bilan belgilanadi. Normal kuchlanishlar cho'zuvchi (musbat) va siquvchi (manfiy) kuchlanishlarga bo'linadi.

Ma'lumki, sinovdan o'tkaziladigan namuna yoki detalda mexanik qir qilishlar, yoriqlar, metallar va ular qotishmalarining ichki nuqsonlari (metallurgik, texnologik yoki ekspluatatsion kelib chiqishli), boshdan-oyoq teshiklar, qalin kesimdan ingichka kesimga keskin o'tishlarning bo'lishi kuchlanishlarning notekis taqsimlanishiga olib keladi, qir qilishning asosida normal kuchlanishlarning eng yuqori cho'qqi konsentratsiyasini hosil qiladi. Normal kuchlanishlarning bunday manbalari kuchlanishlar konsentratorlari deb ataladi. Bu σ_k kuchlanishlar cho'qqisi, kuchlanish konsentratorining radiusi qanchalik ko'p bo'lsa, s qir qilishning chuqurligi shunchalik kichik bo'ladi: $\sigma_k = 2 \sigma_n c/r$, bu yerda σ_n – nominal o'rtacha kuchlanish.

Kuchlanishlar turli sabablar bilan chaqirilishi tufayli, tashqi yuklamaning ta'siri bilan shartlanadigan va yuklama olinganda yo'qoladigan vaqtinchalik kuchlanishlar va tashqi yuklamaning ta'sirisiz vujudga keladigan va jismda muvozanatlanadigan ichki qoldiq kuchlanishlarga bo'linadi (yuklama metall namunalari yoki detallarda bo'lishi mumkin).

Shu bilan birgalikda metallarda ichki qoldiq kuchlanishlar ham uchraydi. Ichki qoldiq kuchlanishlar metallni tezkor qizdirish yoki sovutish jarayonida yuza va ichki qatlamlarning notekis kengayishi yoki siqilishi oqibatida vujudga keladi. Bu kuchlanishlar *issiqlik kuchlanishlari* yoki *termik kuchlanishlar* deb ataladi.

Bundan tashqari, kuchlanishlar kristallanish jarayoni, notekis deformatsiyalanish, termik ishlov berishda faza aylanishlarining hajm bo'yicha notekis kechishi oqibatida paydo bo'ladi, ularni odatda *faza kuchlanishlari* yoki *struktura kuchlanishlari* deb ataladi. Metallarda bunday holatlar faza va struktura kuchlanishlari deb yuritiladi. Fazaviy va strukturaviy tuzilishlar asosan metallar va ularning qotishmalarida bo'ladi.

Mazkur fanning asosiy vazifasi plastik deformatsiyaning tabiatini o'rganish, metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlarini bosqichma-bosqich tahlil qilish va bu jarayonlarni ratsional qurishning umumiy prinsiplarini ishlab chiqish, bunda ishlov berishlar faqatgina zagotovkalarini emas, balki ko'pincha talab qilinadigan shakl va o'lchamlardagi tayyor buyumlarni olish imkonini berish bilan bir qatorda metallarda bir qator sifat o'zgarishlari chaqirilishini hisobga oladi. Shu bois plastik deformatsiya yangi innovatsion texnologiyalarning ilmiy bazasi bo'lib hisoblanadi.

Turli operatsiyalarda zagotovkalar shaklining o'zgarish texnologik xarakteri, dastlabki zagotovkaning shakli va o'lchamlari hamda bosim bilan ishlov berishdan keyin olinadigan zagotovkalar va detallarning shakli va o'lchamlari o'rtasidagi ko'proq qo'l keluvchan nisbatlarni qidirish, xususan, buyumlar sifatini yaxshilanishiga hamda metall va elektr energiyasi sarfining qisqarishiga olib keluvchi nisbatlarni qidirish ko'zda tutiladi.

Bosim bilan ishlov berish operatsiyalarida metallning plastik deformatsiyalarga qarshiligi, ya'ni kuchlanishlarning taqsimlanishi, priborlar va asbob-uskunalarni to'g'ri tanlash hamda ishchi uskuna yoki detallarning mustahkamlik hisobini to'g'ri bajarish maqsadida bu operatsiyalarni amalga oshirish uchun zarur bo'ladigan sa'y-harakatli ishlar bajariladi.

Shu bois metallarga bosim bilan ishlov berishning asosiy bazasi metallarning plastik deformatsiyasi to'g'risidagi fan hisoblanadi. Bu fan metallarga bosim bilan ishlov berish va metall materiallarining plastik deformatsiyasi uchun bir xil muhim ahamiyatga ega bo'lgan quyidagi o'zaro bog'langan uchta asosiy yo'nalish bo'yicha rivojlanib bormoqda:

1 - metallning plastik deformatsiyalanish jarayonining fizikasi. Bu yo'nalish nazariy va eksperimental tarzda metallning plastik shakl o'zgarishi mexanizmini o'rganadi, turli omillarning, asosan qizdirish harorati, deformatsiya darajasi va tezligi, kuchlanganlik holati turining bu jarayonga ta'sirini aniqlaydi, metall elastik holatdan plastik holatga o'tadigan shart-sharoitlarni aniqlaydi;

2 - deformatsiya jarayonining fizik-kimyosi, plastik deformatsiyaning metallni kimyoviy tarkibi va faza holatiga bog'liqligini ko'rib chiqadi;

3 - plastik deformatsiyaning mexanikasi - kuchlanishli va deformatsiyalangan holat, kuchlanishlarning kattaliklari va ularning plastik deformatsiyalangan jismda taqsimlanishi masalalarini matematik jihatdan ishlab chiqadi va jismning plastik holatga o'tish shart-sharoitlarini tahlil qiladi.

Yuqorida aytilganlardan anglash mumkinki, plastik deformatsiyalar nazariyasi nisbatan yangi fan bo'lib hisoblanadi. Metallarga bosim bilan ishlov berish va metallarni prokatlash nazariyasi yanada ko'proq yangi innovatsion texnologiya bo'lib hisoblanadi, ishlab chiqarish korxonalarida bunday ishlov berishning ahamiyati keskin oshganligi bois ularni ishlab chiqish yaqindagina boshlangan.

Rossiya federatsiyasining taniqli olimlari umuman plastik deformatsiyalar to'g'risidagi fanga va xususan, metallarga bosim

bilan ishlov berish hamda listli metall materiallarni prokatslash nazariyasiga juda katta hissa qo'shganlar.

Masalan, plastik deformatsiyaning fizikasi va fizik-kimyosi sohasida ulkan ishlar qilingan, xususan, V.D.Kuznetsov tomonidan qattiq jismning fizikasi, deformatsiyaning fizikaviy-kimyoviy nazariyasining asoschisi bo'lib hisoblanadigan N.S.Kurnakov tomonidan bosim oqimi va plastik jismlarning qattiqligi, N.N.Davidenkov va boshqa bir qator olimlar tomonidan deformatsiya tezligining deformatsiya jarayoniga ta'siri o'rganilgan.

Bundan tashqari, plastik deformatsiyaning mexanikasi sohasida ham ko'p ishlar bajarilgan bo'lib, ularga rossiyalik olimlar yetakchilik qiladi va uni ko'pincha «Plastiklikning matematik nazariyasi» deb atashadi. Mohiyatiga ko'ra, ular plastik deformatsiya jarayonini matematik tahlil qilish tizimining yaratuvchilari bo'lib hisoblanadi. Bu yo'nalishlar bo'yicha S.A.Xristianovich, L.S.Leybenzon, A.A.Ilyushin, V.V.Sokolovskiy va boshqalar kabi yetakchi olimlar shug'ullanishgan.

Butun dunyoga mashhur Rossiyalik olim D.K.Chernov metallarga bosim bilan ishlov berish nazariyasining asoschisi hisoblanadi, u nafaqat metallarga bosim bilan ishlov berishning mohiyatiga tegishli bo'lgan bir qator masalalarni kun tartibiga qo'yib qolmasdan, ularni asoslab bergan va ilmiy jihatdan hal qilgan hamda kelajakda ularni hal qilish yo'nalishlarini ko'rsatib bergan. D.K.Chernov o'zining ishlaridan birida «Metallarni bosqichma-bosqich qizdirish shuni uchun kerakki, metallni qizdirish rejimlari tashqi va ichki qatlamlarning deformatsiyasida katta farq bo'lmasligi zarur» deb yozgan. Boshqa bir ishida esa plastik deformatsiyada sirpanish chizig'ini ko'rsatib berganki, u ishlarni o'rganish plastiklikning matematik nazariyasi uslublaridan birining asosiga kirgan.

Metallarga bosim bilan ishlov berish va plastik deformatsiya nazariyasi ko'pgina zamonaviy rossiyalik olimlarning ilmiy mehnatlari bilan yaratilgan. Ularning orasidan birinchi navbatda quyidagilarni eslatib o'tish o'rinli bo'ladi: A.A.Bochvar, S.I.Gubkin, N.I.Bezuxov, Ye.P.Unksov, G.A.Smirnov-Alyaev, I.M.Pavlov, N.I.Korneev, A.D.Tomlenov, L.A.Shofman, V.T.Mesherin,

I.A.Noritsin, I.Ya.Tarnovskiy, L.G.Stepanskiy, M.V.Storojev, Ye.A.Papov, S.P.Timoshenko, A.K.Chertavskiy, A.F.Golovin va boshqalar, xorijlik olimlar orasidan esa - U.Unekel, P.Xill, A.Zscheile, E.Shmid, B.Boas va boshqalar.

Amaldagi sanoatlarda fanning kelgusidagi roli, yangi innovatsion texnologiyalar bo'yicha ishlaydigan ishlab chiqarish korxonalarining rivojlanishi bilan shubhasiz ortadi. Ishlab chiqarish korxonalarida davlat standartlariga mos ravishda ishlab chiqarilayotgan barcha metall mahsulotlari, ya'ni detallar va buyumlarning plastiklik holati yoki sifati talab doirasida bo'ladi.

Yuqorida aytilganlardan shunday xulosaga kelish mumkinki, bugungi kunda Islom Karimov nomli Toshkent davlat texnika universiteti «Metallarga bosim bilan ishlov berish» kafedrasining alohida olimlari tomonidan ham, kafedra jamoasi tomonidan ham bajarilgan metallarga bosim bilan ishlov berish va plastik deformatsiya nazariyasi bo'yicha ko'p sonli nazariy va amaliy eksperimental ishlar o'z aksini topgan hamda juda keng ma'nodagi ma'lumotlar, materiallar va adabiyotlar ommaga taqdim qilingan.

1-BOB. PLASTIK DEFORMATSIYANING ASOSIY TABIATI

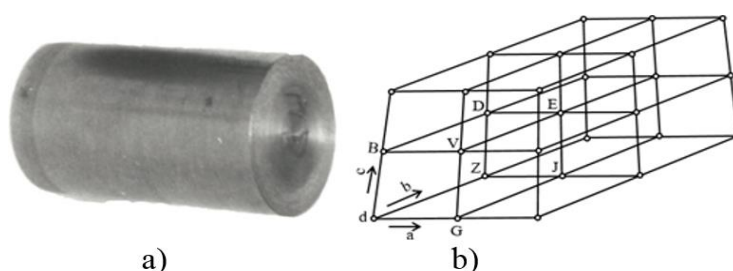
1.1. Metallar va ularning tuzilishi

Metallar va ularning qotishmalarini o'rganishga o'tishdan oldin metall materiallarning plastik deformatsiyalanishining tabiatini bilish zarurdir. Barcha metallar va metall qotishmalarining umumiy holati va tuzilishi ularning tabiatiga bog'liq bo'ladi va kristall tuzilish bilan belgilanadi. Shu bois barcha metallar va qotishmalar turlicha kristall tuzilishli jismlarga ega bo'ladi, metallarda atomlar (ionlar), amorf jismlardan farqli o'laroq, qonuniy tartibda joylashadi, amorf jismlarda esa atomlar (ionlar) qo'shni kengliklarda identik (xaotik) tartibda joylashadi. Jismning yuzasida joylashgan atomlardan (ionlardan) tashqari, donalarning chegaralari va ichida to'g'ri kristall tuzilishining buzilishlari mavjud bo'ladi. To'g'ri kristall tuzilishning buzilishlari deformatsiyalanmagan metallda kristall panjaraning alohida uchastkalarida atomlar minimal potensial energiya bilan barqaror muvozanat holatidan siljishiga olib keladi. Bunday siljishlarning bo'lishi shunga olib keladiki, muvozanat holatidan yangi muvozanat holatiga siljigan alohida atomlar guruhlarini ko'chirish uchun bunday siljishlar bo'lmagandagiga qaraganda kichikroq siljituvchi kuchlanishlar talab qilinishi mumkin.

Ko'pgina metallar turli xil usullar bilan olinadi (1.1-rasm,a). Agar metallar odatdagi usul bilan olingan bo'lsa, u holda ular o'zida bir-biriga nisbatan turlicha yo'nalgan ko'p sonli 10^{-1} - 10^{-5} sm mayda kristallardan tashkil topgan polikristall jismlarni taqdim qiladi.

Kristall tuzilishga ega bo'lgan metallar umuman olganda atomlarning (ionlarning) kengligida qonuniyatli va davriy joylashishi bilan tavsiflanadi, bunda har bir atom (ion) xuddi shunday qurshovda joylashadi. Ko'pgina tadqiqotlarning, aynan esa kristallarni rentgenografik tadqiq qilishlarning ko'rsatishicha, metallarda atomlar (ionlar) to'g'ri chiziqlar va tekisliklar bo'yicha joylashadi va nafaqat atomlarning (ionlarning) kenglikda o'zaro joylashishini aniqlash imkonini berib qolmasdan, ular o'rtasidagi masofani aniqlash imkonini ham beradi.

Aksariyat hollarda atomlarning (ionlarning) tekisliklar va to‘g‘ri chiziqlar bo‘yicha joylashishi oqibatida kristallning tuzilishini to‘g‘ri chiziqlardan tashkil topgan uch o‘lchovli to‘r ko‘rinishida taqdim qilish mumkin, ularning kesishish nuqtalarida atomlar (ionlar) joylashadi (1.1-rasm,b). Bunday to‘rni bir xil kattalikdagi umumiy tutashuvchi qirralarga ega bo‘lgan geometrik ko‘p qirrali jismdan (parallelepiped, prizma va boshqalar) tashkil topgan deb hisoblash mumkin. Anglash qiyin emaski, bu to‘rning har qanday ko‘p qirrasini, masalan, ABVGDEJZ parallelepipedni (agar tizim parallelepipedlardan tashkil topgan bo‘lsa) uchta yo‘nalishdan har qandayida (a,b,c) ma‘lum bir masofaga ko‘chirish yo‘li bilan shu to‘rdagi boshqa har qanday parallelepiped bilan to‘liq birlashtirish mumkin. Biz agar 1.1-rasm,a va 1.1-rasm,b ga e‘tibor beradigan bo‘lsak, ularda ko‘proq to‘g‘ri chiziqlardan tashkil topgan uch o‘lchovli to‘rning sxematik tuzilishi va chiziqning kesishish nuqtalarida atomlarning joylashishi yaqqol tasvirlangan.



1.1-rasm. Metall holati (a) va to‘g‘ri chiziqlardan tashkil topgan uch o‘lchovli to‘rni sxematik tuzilishidagi chiziqning kesishish nuqtalarida atomlarning joylashishi (b).

Bu holda uni asosiy kristallografik yo‘nalishlarda uzluksiz ko‘chirish yo‘li bilan butun kenglikdagi to‘rni qurish mumkin bo‘lgan eng kichik ko‘pqirra kristall panjaraning elementar yacheykasi deb ataladi. Uch o‘lchamli kenglikda qirralari bilan bir-biriga tutash holda joylashgan elementar yacheykalar jamlanmasi kenglikdagi panjara deb ataladi.

Kesmalarning ushbu yacheyka atomlarining qo‘shni yacheyka atomlari bilan to‘liq mos tushishi uchun zarur bo‘ladigan, elementar

yacheykani minimal siljitish kattaligini belgilaydigan asosiy uzunliklari (a,b,c) panjaraning parametrlari yoki takrorlanuvchanlik davrlari deb ataladi. Aksariyat hollarda atomlarning yacheykada o‘zaro joylashishi atomlarning metallarning berilgan kenglikdagi panjarasida joylashishini to‘liq belgilaydi.

Kenglikdagi panjaralar oddiy va murakkab bo‘ladi. Kristallarning kenglikdagi oddiy panjaralarida atomlar faqatgina panjaraning tugunlarida (faqatgina asosiy elementar yacheykaning cho‘qqilarida) joylashadi. Kenglikdagi murakkab panjaralarda asosiy elementar yacheykalarining ichida ham xuddi o‘sha joylarda atomlar joylashadi.

Kristallarning tuzilishini yoki kristallarning (metallarniki) kenglikdagi panjaralarini tasvirlash uchun shunday koordinatalar tizimi tanlanadiki, bu tizimning o‘qlari bo‘lib, u bitta nuqtadan (panjaraning tugunidan) o‘tkazilgan, kristallning asosiy tugun to‘g‘ri chiziqlari bilan mos keladigan uchta to‘g‘ri chiziq, masalan, 1.1-rasmda yo‘nalish bo‘yicha a,b,c vektorlar bilan mos keladigan to‘g‘ri chiziqlar xizmat qiladi, bunda kristallografik o‘qlar tizimi kristallning simmetriyasiga muvofiq tanlanadi.

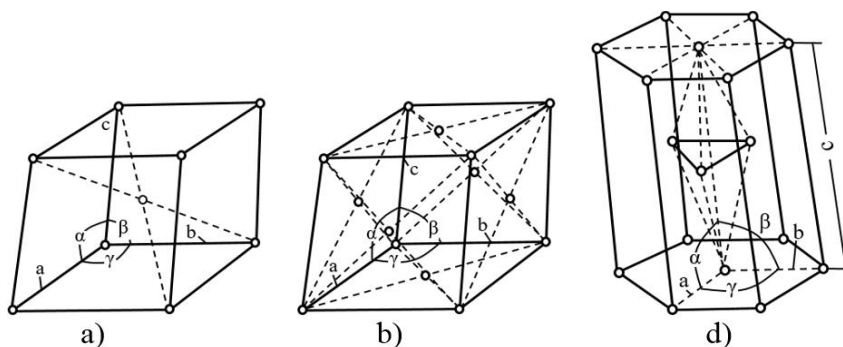
Kristallografik o‘qlar tizimida kenglikdagi panjaraning elementar yacheykasining shaklini panjaraning uchta a, b, c parametrlari va kristallografik o‘qlar o‘rtasidagi uchta α , β , γ koordinata burchaklari bilan tasvirlash mumkin (1.1-rasmga qarang).

Metallarda shuningdek, elementar yacheykalarining xillashgan shakllari ham mavjud bo‘ladi. Metallarning kenglikdagi kristall panjaralarining asosiy elementar yacheykalarining xillashgan shakllari 1.2-rasmda keltirilgan.

Kub panjaralar uchun (1.2-rasm, a,b) burchaklarning tengligi $\alpha = \beta = \gamma$ va panjara parametrlarining o‘zaro tengligi $a = b = c$ xarakterli. Agar kub panjarada elementar yacheyka kubining cho‘qqilarida joylashgan atomlardan tashqari kubning markazida joylashgan atom ham mavjud bo‘lsa, u holda bunday panjara hajmi-markazlashgan kub panjara deb ataladi.

Kubning qirralarining markazida joylashgan atomlarga ega bo‘lgan kub panjara markazlashgan qirrali kub panjara deb ataladi.

Geksagonal panjaraning elementar yacheykasi uchun (1.2-rasm,d) burchaklarning $\alpha = \beta = 90^\circ$ va $\gamma = 120^\circ$ qiymatlari va panjaraning faqatgina ikkita parametrining o‘zaro tengligi $a = b \neq c$ xarakterlidir. Panjaralarning bu uchta xili ko‘pchilik metallarga xos panjaralar hisoblanadi.



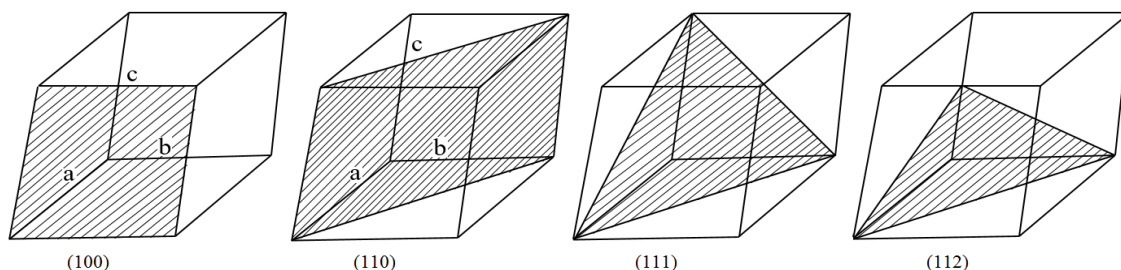
1.2-rasm. Kub panjaralardagi burchaklar va panjara parametrlarining o‘zaro tengligi (**a,b**) va geksagonal panjaraning elementar yacheykasidagi burchaklar (**d**).

Yuqorida ko‘rsatilgan hajmi-markazlashgan kub panjaraga, masalan, quyidagi metallar ega: α - va β - temir, litiy, vanadiy, volfram, molibden, xrom, tantal; markazlashgan qirrali kub yacheykali panjaraga quyidagi metallar ega: alyuminiy, γ -temir, oltin, mis, nikel, platina, qo‘rg‘oshin, kumush; prizmaning ichida uchta atomga ega bo‘lgan zich o‘ralgan geksagonal yacheykali panjaraga (1.2-rasm,d) quyidagi metallar ega: magniy, rux, berilliy, kadmiy, kobalt, α -titan va boshqalar.

Kenglikdagi panjaralarning elementar yacheykalarida (shundan kelib chiqqan holda kenglikdagi panjaralarning o‘zlarida ham) ko‘chirish mumkin bo‘lgan tekisliklarni aniqlash uchun shuningdek, kristallografik yo‘nalishlarni aniqlash uchun kristallografiyada indekslash tizimi qabul qilingan.

Ushbu tizimga ko‘ra, kub panjara uchun tekisliklarni indekslash dumaloq qavsga olingan uchta raqam bilan amalga oshiriladi. Bu raqamlar o‘zida a,b,c koordinatalar o‘qlarida tekislik bilan kesiladigan kesmalarga teskari proporsional bo‘lgan oddiy butun sonlarni

taqdim qiladi, bunda kesmalarning o‘lchov birligi sifatida panjara-ning parametrlari qabul qilinadi. Shu bois 1.3-rasmda bu tekisliklar-ning belgilanishini ko‘rsatish bilan elementar kub yacheykada o‘tkazilgan ba’zi bir tekisliklar ko‘rsatilgan.



1.3-rasm. Tekisliklarning belgilanishini ko‘rsatish bilan elementar kub yacheykada o‘tkazilgan ba’zi bir tekisliklar ko‘rinishlari.

Tekisliklarni indekslash dumaloq qavsga olingan uchta raqam bilan amalga oshirilgan kenglikdagi kub panjara-ning elementar yacheykalari 1.3-rasmda ko‘rsatilganligi yuqorida aytib o‘tildi.

Geksagonal elementar yacheykada indekslash to‘rtta kristallografik o‘qlarda ko‘rib chiqilayotgan tekislik bilan kesilgan kesmalar-ning teskari kattaliklari bilan olib boriladi, bu o‘qlardan uchta olti qirrali prizmaning asosini tekislikda (baza tekisligi deb ataluvchi tekislikda) yotadi, to‘rtinchi tekislik prizmaning o‘qiga mos keladi. Geksagonal elementar yacheykada tanlangan kristallografik o‘qlar tizimining yo‘nalishi, shuningdek, ba’zi bir tekisliklarning belgilanishi o‘zida masalan, (0001), (1100), (1120), (1010) va $+a_1, +a_2, +a_3$ [100] va $-a_1, -a_2, -a_3$ yo‘nalishlarni taqdim qiladi. Bundan tashqari, elementar kub yacheykada asosiy yo‘nalishlar va ularning belgilanishlari mavjud: [001], [010], [100], [101], [110], [111] va boshqalar.

Yuqori haroratda eritilgan suyuq metallning qotishida kristallanish jarayoni kuzatilsa, bunda juda katta miqdorda kristallanish markazlari paydo bo‘lishini ko‘rish mumkin, texnik metall o‘zida birgina kristallni emas, kristallit donalarining konglomeratini taqdim qiladi, bu donalarning shakli, o‘lchamlari va kristallografik o‘qlarining yo‘nalishi kristallanish va keyingi ishlov berish shart-sharoitlariga bog‘liq bo‘ladi. Bunday tuzilish polikristall tuzilish deb ataladi.

Har bir donada atomlarning berilgan metallning kenglikdagi panjara-siga mos keladigan tartibli joylashishi kuzatiladi. Biroq turli donalarda ma'lum bir kristallografik tengliklarning yo'nalishi turlicha bo'lishi mumkin. Shu sababli metallar va qotishmalar o'zlarida, qoidaga ko'ra, polikristallarni taqdim qiladi.

Polikristall metallning har bir donasida anizotropiya kuzatiladi. Biroq donalarning turli tomonga tartibsiz yo'naltirilganligi oqibatida polikristall turli yo'nalishlar bo'yicha bir xil xususiyatlarga ega bo'lishi va anizotropiya bo'lmasligi mumkin (ba'zan donalarning o'lchamlari polikristallning o'lchamlaridan ancha kichik bo'lishi va ularning soni juda katta bo'lishi mumkin). Bu holat ko'pgina hollarda polikristall jismga, donani ba'zi bir tarkib toptiruvchilarning xususiyatlarining anizotropiyasiga qaramasdan, izotrop jism (kvaziizotrop jism) sifatida qarash imkonini beradi.

Polikristalldan farqli o'laroq, ularning butun hajmi uchun kenglikda ma'lum bir kristallografik tekisliklarning yo'nalishining doimiyliigi xarakterli bo'lgan jismlar (jismning tashqi shaklidan qat'iy nazar) monokristallar deb ataladi. Hozirgi kunda ba'zi bir metallarning shunchalik katta o'lchamli monokristallarini sun'iy ravishda olish imkoniyati mavjudki, ulardan mexanik sinovlar uchun namunalarni tayyorlash mumkin, bu plastik deformatsiya jarayonini o'rganishni sezilarli darajada osonlashtiradi.

Metall namunalarda hosil bo'ladigan donalarni (kristallitlarni) kristallar bilan adashtirmaslik lozim, ularning tashqi yuzalari ixtiyoriy emas, ma'lum bir burchaklar ostida kesishadigan yassi qirralar ko'rinishida bo'ladi. Bularning barchasi metall materialning tarkibi, kristall tuzilishi va strukturasi, xossalari, xususiyatlari, ishlov berish usullari va ravshanki, eng asosiysi metallning tabiatiga ham bog'liq bo'ladi.

Metallar va ularning tuzilishi. Metall materiallarini o'rganishga kirishishdan oldin avvalambor metall va uning tuzilishi nimaligini bilish zarur bo'ladi. Bir paytlar mashhur rus olimi M.V.Lomonosov metallarning umumiy holati va tuzilishini o'rgangan va oxirida

ularni, ya'ni «Metallar bog'lash mumkin bo'lgan yaltiroq jismlardir» deya ta'riflagan. Bu uslub metallni eng oddiy ta'riflash bo'lgan, biroq hozirgi kungacha ham o'zining ahamiyatini yo'qotmagan.

Biroq metallar va ularning qotishmalarining ko'proq xilli va xarakterli xususiyatlari issiqlik o'tkazuvchanlik va elektr o'tkazuvchanlik bo'lib hisoblanadi, ular qizdirish harorati pasayishi bilan ortadi. Shuningdek, metallarning xususiyatlariga elektron tuzilish (o'tkazuvchanlik elektronlari yoki Frenkel bo'yicha o'tkazuvchanlik elektronlari), yaltiroqlik va boshqalar ham kiradi. Metall qotishmalari xususiyatlari bo'yicha metallar bilan ko'pgina umumiylikka ega bo'lganligi sababli, ba'zan metallar deganda ularning qotishmalarini ham tushinish mumkin.

Metallarning yuqorida aytilgan xususiyatlari ularning elektron tuzilishi bilan shartlanadi. Ko'pgina metallarda tashqi qobiqlarda joylashgan elektronlar (valent elektronlar) ma'lum bir atomlar bilan bog'lanmagan bo'ladi, aksincha, ulardan uzilgan bo'ladi va butun metall bo'lagiga tegishli bo'ladi. Bunday elektronlar odatda, Frenkel o'tkazuvchanlik elektronlari, jamoalashtirilgan elektronlar deb ataladi, chunki ular tashqi elektr maydonida yengil tezlanish olishga qodir bo'ladi va ularning tartibli harakati elektr tokining oqishini ta'minlaydi, bunday harakatni – elektr o'tkazuvchanlik deb tushiniladi. O'tkazuvchanlik elektronlarining zichligi $10^{22} - 10^{23} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil qiladi.

Shunday qilib, metallni - ichki elektronlarga ega bo'lgan atom yadrolari va elektron gazni, yoki aniqrog'i, elektronlarning o'zaro ta'sirlashish imkoniyatini hisobga oladigan bo'lsak – ion o'zakni «yuvib turadigan» elektron suyuqlikni hosil qiladigan jamoalashtirilgan o'tkazuvchanlik elektronlaridan tashkil topgan musbat ion o'zak ko'rinishida tasavvur qilish mumkin. Ion o'zak – davriy bo'lib, kenglikda to'g'ri joylashish bilan kristall panjarani hosil qiladi. Elektron gaz musbat ionlarning o'zaro elektrostatik itarilish kuchlarini kompensatsiyalaydi, ularning qattiq jismda bog'lanishini, ya'ni metall bog'lanishini ta'minlaydi.

Metallarda, yarim o'tkazgichlardan farqli o'laroq, o'tkazuvchanlik elektronlari har doim mavjud bo'ladi, yarim o'tkazgichlarda

ular faqatgina ma'lum bir ta'sirlarda, masalan, qizdirish harorati, sovutish va hokazolar ta'sirida paydo bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan ma'lumotlarga asoslangan holda metallarga quyidagicha ta'rif beramiz: «**Harorat pasaygan sari elektr o'tkazuvchanligi ortadigan, elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan, bolg'alanuvchan, issiqlik o'tkazuvchan va yaltiroq moddalarga metallar deb ataladi**». Qora metallar - turiga qarab juda ko'p yaxshi xususiyatlarga ega bo'lgan metallar hisoblanadi.

Ko'pgina metallar qattiq va ba'zan suyuq holatda bir qator xarakterli xususiyatlarga ega bo'ladi:

a – yuqori issiqlik o'tkazuvchanlik va elektr o'tkazuvchanlik;

b – elektr qarshiligining musbat harorat koeffitsiyenti; harorat ortishi bilan toza metallarning elektr qarshiligi ortadi, ko'p sonli metallar (~30) o'ta yuqori o'tkazuvchanlikka ega (bu metallarda absolyut nolga yaqin bo'lgan haroratlarda elektr qarshiligi sapchib o'zgarish bilan amalda nolgacha pasayadi);

d – termoelektron emissiya, ya'ni qizdirganda elektronlar chiqarish qobiliyati;

e – yaxshi qaytarish qobiliyati; metallar shaffof emas va ular metallik yaltiroqlikka ega;

f – oshirilgan plastik deformatsiyalanish qobiliyatiga ega.

Bu yaxshi xususiyatlarning bo'lishi moddalarning metall holati deb ataluvchi holatini tavsiflaydi.

Ma'lumki, materialshunoslikda «tizim», «faza» va «struktura» tushunchalaridan keng foydalaniladi. Muvozanat holatida bo'lgan fazalar jamlanmasi tizim deb ataladi. **Faza deb** tizimning bir xil tarkib, kristall tuzilish va xususiyatlarga, xuddi o'sha bitta agregat holatga ega bo'lgan va tarkibiy qismlardan ajratuvchi yuzalar bilan ajratilgan gomogen tarkibiy qismlariga aytiladi. Struktura deganda metallar va qotishmalarda tegishli fazalarning o'zaro joylashish shakli, o'lchamlari va xarakteri tushuniladi. Metallar va qotishmalarining barcha makro va mikrostrukturalari turlicha kattalashtirishlar bilan optik metallografik mikroskop (yoki makroskop) yordamida kuzatiladigan makronamunalar va mikronamunalarda tadqiqot qilinadi va o'rganiladi.

Ko‘pincha metallar bilan birgalikda turli kimyoviy elementlarga ega bo‘lgan qotishmalardan foydalaniladi. Odatda qotishma deganda ikkita yoki undan ko‘p elementlarni eritish bilan olinadigan modda tushuniladi. Qotishmalarni tayyorlashga quyidagicha ta’rif berish mumkin: «qotishma ko‘proq metall elementlardan tayyorlanadi, metall xususiyatlariga ega bo‘ladi va metall qotishma deb ataladi». Bu qotishmalardan mashinasozlikning turli sohalarida, shuningdek, metall qirqadigan turli uskunalarni tayyorlashda keng foydalaniladi.

1.2. Plastik deformatsiya to‘g‘risida umumiy tushuncha

Metallning qandaydir bir hajmiga qo‘yilgan kuchlar tizimi uning deformatsiyalanishini chaqiradi. Elastik (qayishqoq) va plastik deformatsiyalarga ajratiladi. Agar tashqi kuchlar olingandan keyin deformatsiyalangan jism o‘zining boshlang‘ich shakli va o‘lchamlarini to‘liq qayta tiklasa, bunday deformatsiya elastik deformatsiya deb ataladi. Agar jismning shakli va o‘lchamlarining tashqi kuchlar bilan chaqirilgan o‘zgarishlari bu kuchlar olingandan keyin qolsa, bunday deformatsiya plastik deformatsiya (qoldiq deformatsiya yoki qaytmas deformatsiya) deb ataladi.

Detallarni metallarga bosim bilan ishlov berish yo‘li bilan olish boshlang‘ich tayyorlanmaning plastik deformatsiyalanishiga asoslanadi.

Plastik deformatsiya nafaqat uni yemirmasdan tayyorlanmaning alohida hajmlarini nisbiy siljitish yo‘li bilan detalning berilgan shaklini olish imkonini berib qolmasdan, balki tayyorlanma materialining mexanik va fizikaviy-kimyoviy xususiyatlariga ham ta’sir ko‘rsatadi.

Odatda metallda qayishqoq deformatsiya atomlarning barqaror muvozanat holatidan chetlashishi hisobiga sodir bo‘ladi, bu muvozanat holati potensial energiyaning minimumi bilan tavsiflanadi. Bu chetlashishning kattaligi qo‘shni atomlar o‘rtasidagi masofadan katta bo‘lmaydi. Atomlar o‘rtasidagi masofalarning o‘zgarishi oqibatida qayishqoq deformatsiya hajmining qaytar o‘zgarishini chaqiradi. Hajmning qaytar o‘zgarishi, masalan, 100 kg/mm^2 bosim bilan har

tomondan siqishda po‘lat uchun $\approx 0,6\%$ ni, mis uchun esa $1,3\%$ ni tashkil qiladi.

Atomlarning barqaror muvozanat holatidan asosiy chetlashishi jismda to‘plangan potensial energiyani oshiradi va ma’lum bir chegaralargacha siljishlarning kattaligi deformatsiyalovchi kuchlarning ortishiga proporsional tarzda ortadi. Har qanday sharoitda ham tashqi kuchlarning jismga ta’siri atomlar o‘rtasidagi kuchlarning qarshi harakati bilan muvozanatlanadi, bu kuchlar atomlarni minimal potensial energiyali holatga qaytarishga harakat qiladi.

Ma’lumki, plastik deformatsiya atomlarning kristall panjaradagi atomlar o‘rtasidagi masofadan anchagina katta masofaga yangi barqaror muvozanat holatiga nisbiy siljishi hisobiga sodir bo‘ladi. Buning oqibatida plastik deformatsiyalashda jismga qo‘yilgan kuchlar bilan chaqirilgan umumiy deformatsiya plastik tarkib toptiruvchini ham, deformatsiyalovchi kuchlar olingandan keyin yo‘qoladigan qayishqoq tarkib toptiruvchini ham o‘z ichiga oladi. Bularning barchasi metallarni (yoki metall materiallarni) plastik deformatsiyalashdan keyin hosil bo‘ladi.

Monokristallning sovuq plastik deformatsiyalanish mexanizmi

Ushbu mexanizm plastik deformatsiyalash bajarilgandan keyin hosil bo‘ladi. Monokristallning plastik deformatsiyalanishi asosan ikkita yo‘l bilan sodir bo‘lishi mumkin: 1-sirpanish yoki sirg‘alish; 2-egizaklanish.

Birinchi yo‘l – sirg‘alish o‘zida monokristallning yupqa qatlamlarining qo‘shni qatlamlarga nisbatan parallel tarzda siljishini taqdim qiladi. Asosiy harakat bir qator tekisliklarni yoki yupqa qatlamlarni (sirpanish polosalarini) qamrab oladi, ularning orasida plastik deformatsiyalanish elementlari bo‘lmaydi. Eksperimental tadqiqotlar bilan shu narsa aniqlanganki, sirg‘alish polosalaridan biri ikkinchisidan o‘rtacha taxminan 1 mk masofaga orqada qoladi, qo‘shni atom tekisliklari o‘rtasidagi masofa esa taxminan 10^{-4} mk ni tashkil qiladi. Monokristallning sirpanish yo‘li bilan deformatsiyalanishining asosiy xarakteri (1.4-rasm, a) da yaqqol ko‘rinib turibdi, surat

cho‘zilishga tortilgan mis va alyuminiy qotishmasi monokristalli namunasida olingan.

Monokristallarda sirpanish - sirg‘alish ma‘lum bir kristallografik tekisliklar bo‘yicha sodir bo‘ladi, bu tekisliklar sirpanish tekisliklari deb ataladi. Odatda atomlarning eng katta joylashish zichligiga ega bo‘lgan tekisliklar sirpanish tekisliklari bo‘lib hisoblanadi, atomlar o‘rtasidagi masofa minimal kattalikka ega bo‘lgan yo‘nalishlar esa sirpanish yo‘nalishlari bo‘lib hisoblanadi. Masalan, markazlashgan qirrali kub kristall panjarali metallarda sirpanish tekisliklari odatda oktaedr xilidagi tekisliklar (111), sirpanish yo‘nalishlari esa [101] xilidagi yo‘nalishlar bo‘ladi.

Geksagonal kristall panjarali metallarda sirg‘alish tekisligi odatda (0001) xilidagi bazis tekislik, sirpanish yo‘nalishlari esa [100] xilidagi oltiburchakning diagonali bilan mos tushadigan yo‘nalishlar bo‘ladi.

Hajmi-markazlashgan kub panjaraga ega bo‘lgan metallda sirpanish bir nechta tekisliklar - (112), (123) va (110) xilidagi tekisliklar bo‘yicha amalga oshishi mumkin, chunki ularda atomlarning joylashish zichligi unchalik ko‘p farq qilmaydi. Sirpanishning ustivor yo‘nalishi [111] yo‘nalish bo‘lib hisoblanadi. Atomlarning qandaydir bir kristall tekisliklar bo‘yicha siljish imkoniyatiga asosan harorat katta ta‘sir ko‘rsatadi. Haroratning ortishi bir qator hollarda shunga olib keladiki, sirpanish jarayoni xona haroratida sirpanish sodir bo‘ladigan tekisliklardan farq qiladigan boshqa tekisliklar bo‘yicha amalga oshishi mumkin. Masalan, zich o‘ralgan geksagonal panjarali metallarda xona haroratida bitta sirpanish tekisligi – (0001) bazis tekisligi mavjud bo‘ladi, 200° dan oshiq haroratda esa qo‘shimcha (1011) yoki (1012) tipidagi tekisliklar bo‘yicha sirpanish imkoniyati paydo bo‘ladi. Barcha bu jarayonlar plastik deformatsiyalanishda sirpanishga kiradi.

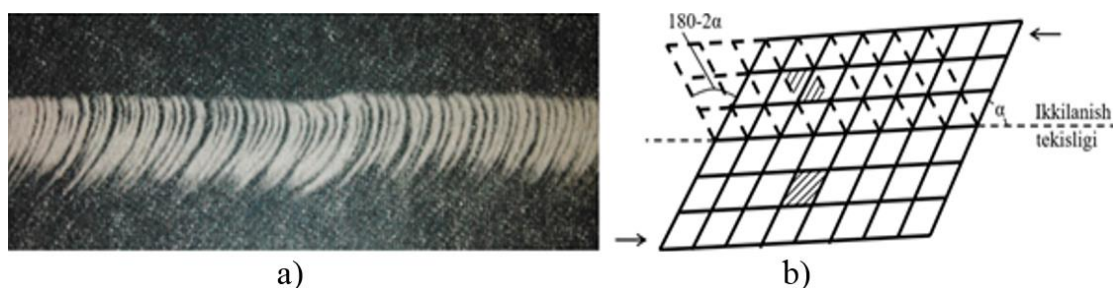
Ikkinchi yo‘l – egizaklash o‘zida «egizaklash tekisligiga» parallel tekisliklarda joylashgan atomlarning ushbu tekisliklardan egizaklash tekisligigacha bo‘lgan masofaga proporsional masofaga siljishini taqdim qiladi (1.4-rasm, b) punktir chiziq bilan deformatsiyalash natijasida olingan egizak ko‘rsatilgan, bunda kristall

panjaraning avval-boshda egizaklash tekisligiga qarab $\alpha < 90^\circ$ burchak ostida egilgan qovurg'alari $180^\circ - 2\alpha$ burchakka buriladi.

Kristallning egizaklash bilan deformatsiya olgan qismining asosiy panjarasi kristallning deformatsiyalanmagan qismi panjarasining egizaklash tekisligiga (egizakka) nisbatan oyna tasviri bo'lib hisoblanadi va egizakda atomlarning o'zaro joylashuvi deformatsiyalanmagan metallardagi joylashuv bilan bir xil bo'ladi.

Egizaklash statik yuklash bilan deformatsiyalashda nisbatan kam va zarba bilan deformatsiyalashda anchagina ko'p kuzatiladi. Egizaklanish faqatgina deformatsiyalanadigan jismga tashqi kuchlarning ta'siri natijasida emas, balki plastik deformatsiyadan keyin kuydirish natijasida ham vujudga kelishi mumkin. Bunday hodisa, xususan, mis, latun va markazlashgan qirrali kub panjaraga ega bo'lgan boshqa metallarda kuzatiladi. Egizaklanishga sirg'alish bilan deformatsiyalanish hamrohlik qilishi mumkin. Sirg'alish bilan deformatsiyalashda egizaklash deformatsiyalash uchun talab qilinadigan kuchni sapchib kamaytiradi.

Egizaklash tekisliklari odatda sirg'alish tekisliklari bilan mos tushadi. Markazlashgan qirrali kub panjaraga ega bo'lgan metallar uchun odatda (111) tekislik, hajmi-markazlashgan kub panjarali metallar uchun – (112) tekislik va zich o'ralgan geksagonal panjarali metallar uchun – (1012) tekislik egizaklash tekisligi bo'lib hisoblanadi.



1.4-rasm. Monokristallning sirg'alish bilan hosil qilingan deformatsiyasi xarakterining harakati (a) va metallning tekisliklarining egizaklash bilan hosil qilingan proportsional masofalari (b).

Ma'lumki, ishlov beriladigan metallarda (yoki metall materiallarda) plastik deformatsiyalanish jarayoni asosan sirg'alish hisobiga

amalgaga oshadi. Shu sababli ko'pgina metallarda plastik deformatsiyalanish atomlarning metallarning kristall panjarasida atomlar o'rtasidagi masofadan anchagina katta masofalarga yangi barqaror muvozanat holatiga siljishi hisobiga amalgaga oshadi. Barcha materiallar va asosiy jarayonlar metallarni sirg'alish va egizaklash bilan plastik deformatsiyalashga tegishli bo'ladi.

Polikristallning sovuq plastik deformatsiyasi

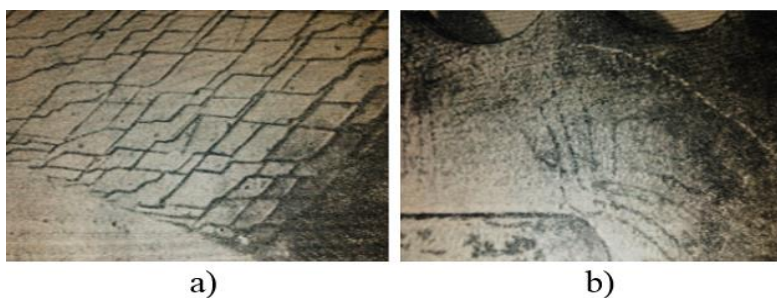
Ko'pgina metall materiallar sovuq plastik deformatsiya – polikristallning deformatsiyasiga ega bo'ladi. Bu - plastik deformatsiyada materialning polikristall jismining qoldiq shakl o'zgarishi hisobiga hosil bo'lishi mumkin.

Yuqorida aytib o'tilganidek, monokristallning plastik deformatsiyalanish jarayonida sirg'alish tekisliklarining kenglikdagi davriy yuzalarga aylanishi (sirg'alish tekisliklarining bukilishi), shuningdek, mozaika bloklarining nisbiy burilishi kuzatiladi. Bir paytning o'zida monokristallning metallning alohida bloklarining ichidagi kenglikda panjaraning yaxlitligiga putur yetkazmasdan alohida bloklarga ko'proq yaqqol ifodalangan maydalanishi kuzatiladi (1.5-rasm, a). Bir paytlar N.F.Lishko bu yo'nalishni o'rganish bilan plastik deformatsiyalanish jarayonida bloklar hosil bo'lishining asosiy sababi kristallning alohida qismlarining sirg'alish tekisliklarining bir paytda bukilish bilan sirg'alishiga asoslangan murakkab siljishi bo'lib hisoblanadi degan xulosaga kelgan. Katta plastik deformatsiya natijasida monokristall alohida bo'laklarga bo'linadi, bu bo'laklar to'g'ri kristall tuzilishga ega bo'ladi va sirg'alish tekisliklarining pachkalari bilan chegaralangan bo'ladi, bu bo'laklarda atomlarning kattagina siljishlari oqibatida to'g'ri kristall tuzilish buziladi. Shunday qilib, katta plastik deformatsiyalarda monokristall ma'lum bir sonli donalardan tashkil topgan polikristallga aylanadi.

Polikristall jismning umumiy qoldiq shakl o'zgarishi uni tarkib toptiruvchi donalarning plastik deformatsiyasi va donalarning nisbiy siljishidan tarkib topadi, bunda donalarning shakllari va o'lchamlari o'zgaradi.

Shunga muvofiq polikristallning ichkikristallit va kristallitlararo deformatsiyasi ajratiladi. Polikristallning alohida donalarining deformatsiyasi xuddi monokristalldagi kabi sirg‘alish yoki egizaklanish bilan amalga oshadi. Biroq polikristallda ko‘p sonli donalarning bo‘lishi polikristallning deformatsiyalanish jarayonining ba’zi bir o‘ziga xos xususiyatlari bo‘lishiga olib keladi.

Polikristallning alohida donalarida asosiy sirg‘alish tekisliklari kenglikda ixtiyoriy yo‘naladi. Alohida donalarning sirg‘alish tekisliklarining kenglikda turlicha yo‘nalganligi shunga olib keladiki, polikristall jism tashqi kuchlar tizimi bilan yuklanganda plastik deformatsiyalanish hamma donalarida bir paytda boshlanmaydi. Plastik deformatsiyalanish birinchi navbatda sirg‘alish tekisliklari ko‘proq qulay yo‘nalgan donalarda, ya’ni sirg‘alish tekisliklari berilgan kuchlar tizimi bilan chaqiriladigan urinma kuchlanishlar kattalik bo‘yicha eng katta ta’sir ko‘rsatish maydonchalari bilan mos tushadigan donalarda vujudga keladi. Qolgan donalar qayishqoq tarzda deformatsiyalanadi va bor-yo‘g‘i nisbiy siljishni olishi mumkin. Chiziqli cho‘zish va siqishda plastik deformatsiya boshlanishi uchun ko‘proq qulay bo‘lgan yo‘naltirilganlikka ularda sirg‘alish tekisliklari tashqi kuchning ta’sir ko‘rsatish yo‘nalishiga 45° burchak ostida joylashgan donalarga ega bo‘ladi. Ko‘proq qulay yo‘nalgan donalarda guruhviy siljishlarning namoyon bo‘lishi birinchi marta D.K.Chernov tomonidan topilgan - ko‘pincha deformatsiyalanadigan jismning yuzasida kuzatiladigan sirg‘alish chiziqlari bo‘lib hisoblanadi. 1.5-rasm, b da qalin metall listni qirqish bilan olingan tayyorlanmaning oksidli plenka bilan qoplangan yuzasida hosil bo‘lgan sirpanish chiziqlari keltirilgan. Donalarda birinchi siljishlar deformatsiyalanadigan jismga eng katta urinma kuchlanishlar ta’sir ko‘rsatadigan yo‘nalishlarda sodir bo‘lishi sababli, polikristall jismning yuzasida aniqlanadigan sirpanish chiziqlari jismda unga qo‘yilgan kuchlar bilan chaqiriladigan maksimal siljituvchi kuchlanishlarning yo‘nalishlari to‘g‘risida fikr yuritish imkonini beradi.



1.5-rasm. Monokristallning yuzasidagi tuzilishi, monokristall metallning va alohida bloklarning ichidagi kenglikda panjaraning yaxlitligiga putur yetkazmasdan alohida bloklarga ko‘proq yaqqol ifodalangan maydalanishi (**a**) va qalin metall listni qirqish bilan olingan tayyorlanmaning oksidli plenka bilan qoplangan yuzasida hosil bo‘lgan sirpanish (sirg‘alish) chiziqlari (**b**). X500

Deformatsiyalovchi kuchlar ortishi bilan kamroq qulay yo‘nalgan sirg‘alish tekisliklarida ta’sir ko‘rsatuvchi urinma kuchlanishlar plastik deformatsiya boshlanishi uchun zarur bo‘ladigan kattalikka erishadi, bunda plastik deformatsiya polikristallning tobora ko‘proq donlarini qamrab ola boshlaydi. Chiziqli cho‘zish yoki siqishda metall donlarining ustivor ko‘pchiligi plastik deformatsiyaga tortilishiga mos keladigan normal kuchlanish oquvchanlik chegarasi bo‘lib hisoblanadi. Polikristall jismning keyingi deformatsiyasi shunga olib keladiki, donalar metall materialining ko‘proq intensiv oqishi yo‘nalishida cho‘zilgan shaklni qabul qiladi.

Plastik deformatsiya natijasida cho‘zilgan donalarning ma’lum bir yo‘nalganligi mikrostrukturaning polosaligi deb ataladi. Demak, donalarning eng katta va eng kichik o‘rtacha kattaliklari o‘rtasidagi asosiy nisbat metall donalarining deformatsiya kattaligini ko‘rsatadi.

Sovuq deformatsiyada metallning mustahkamlanishi

Polikristallning plastik deformatsiyalanishi metallning fizikaviy, kimyoviy va mexanik xossalarining kattagina o‘zgarishlariga olib keladi. Deformatsiya darajasi ortishi bilan deformatsiyaga qarshilikning barcha ko‘rsatkichlari – elastiklik chegaralari, proporsionallik chegaralari, oquvchanlik va mustahkamlik chegaralari ortadi, shuningdek metallning qattiqligi ham oshadi.

Shu bilan bir paytda plastiklik ko'rsatkichlarining kamayishi kuzatiladi (nisbiy uzayish, nisbiy torayish, zarbiy qovushqoqligi, yopishqoqligi va boshqalar); elektr qarshiligi ortadi, korroziyaga qarshilik kamayadi, issiqlik o'tkazuvchanlik kamayadi, shuningdek, ferromagnitik metallarning magnit xususiyatlari o'zgaradi.

Plastik deformatsiyalanish jarayonida metallarning mexanik va fizikaviy-kimyoviy xossalarining o'zgarishi bilan bog'lanadigan hodisalar jamlanmasi mustahkamlanish (yoki qattiqlashish) deb ataladi. Metallarning mexanik xossalarining o'zgarishi, xususan, ularning mustahkamlik tavsiflarining ortishi, yuqorida aytib o'tilganidek, katta darajada deformatsiyalanish ortib borishi bilan ortadigan dislokatsiyalarning siljishga qarshiligi bilan tushuntiriladi. Sirg'alish tekisliklarining kesishish uchastkalari dislokatsiyalarning siljishiga oshirilgan qarshilikka ega bo'lgan asosiy uchastkalar bo'lib hisoblanadi, bu uchastkalarda dislokatsiyalarning kesishuvchi tekisliklar bo'ylab ko'chadigan kuch maydonlarining o'zaro ta'sirlashishi ularning qotishiga va keyinchalik ularning atrofida bir xil belgili dislokatsiyalarning to'planishiga olib keladi. Geksagonal kristall panjarali monokristallar (bitta sirg'alish tekisligi) kub kristall panjaraga ega bo'lgan metallarga qaraganda kamroq shiddat bilan mustahkamlanishi aytilganlarning ko'rgazmali tasdig'i bo'lib hisoblanadi. Shu bilan birgalikda polikristallda donalarning chegaralari dislokatsiyalarning chiqishi uchun kattagina to'siq bo'lib hisoblanadi va donalarning chegaralarida bir xil belgili dislokatsiyalarning to'planishiga, demak, shundan kelib chiqqan holda, ko'proq shiddatli mustahkamlanishiga ko'maklashadi deb taxmin qilish mumkin. Keyingi fikr geksagonal panjarali metallar uchun adolatli bo'ladi, ularda kuchlanish egri chiziqlari – deformatsiya chiziqlari keskin farq qiladi, kub panjarali metallarda esa bunday farq kuzatilmaydi.

Ma'lumki, D.K.Chernov, G.V.Kurdyumov, S.T.Konobeyevskiy, M.A.Zaxarov, I.A.Oding, S.T.Kishkina, S.S.Nosyrev, M.V.Burakov, A.P.Gulyaev va boshqalar kabi ko'pgina taniqli olimlar va tadqiqotchilar o'z vaqtida plastik deformatsiyalanish jarayonida metallarning mexanik va fizikaviy-kimyoviy xossalarining o'zgarishi va keyingi mustah-

kamlanishi masalalari bilan shug'ullanganlar. Metallning qattiq eritmasining deformatsiyalanish jarayonida sirg'alish tekisliklari bo'ylab dispers zarrachalar va karbidlar ajralishi bilan bu eritmaning parchalanishi sodir bo'ladi, natijada bu karbidlar metallning mustahkamlanishiga olib keladi. Buning uchun qizdirish harorati, tutib turish vaqti va sovitish tezligi zarur bo'ladi, ular metall materiallarning mustahkamlik xossalarini oshiradi.

1.3. Deformatsion kuchlarni aniqlash usullari

Mazkur usullarning mohiyati

Metallarga bosim bilan ishlov berish texnologik masalasini ko'p hollarda statik jihatdan aniqlab bo'lmaydi. Metallning plastik shakl o'zgarishida uning hajmi kuchlanishli-deformatsion holati uchun umumiy bo'lgan holat matematik ko'rinishda quyidagi tenglamalar tizimlari bilan ifodalanadi:

a – uchta differentsial tenglama;

b – deformatsiyalar (deformatsiya tezliklari) va siljishlar (siljish tezliklari) o'rtasidagi bog'lanishni aniqlaydigan oltita tenglama;

d – kuchlanishlar va deformatsiyalar (deformatsiya tezliklari) o'rtasidagi bog'lanishni aniqlaydigan oltita tenglama.

Bu tenglamalar tizimlari 15 ta noma'lumga ega bo'lgan 15 ta tenglamani o'z ichiga oladi. Bu tenglamalardan tashqari, plastiklik holati shartini qanoatlantirish, kuchlanishlarning shiddati va deformatsiyalarning (deformatsiya tezliklarining) shiddati ifodalariga ega bo'lishi, shuningdek, yaxlitlik shartini qanoatlantirish (uchta tenglama) zarur bo'ladi, chunki siljishlar (siljish tezliklari) o'zaro bog'langan bo'lishi va ixtiyoriy tarzda berilmasligi kerak.

Plastiklik holati sharti mexanik tavsiflarning nisbati – berilgan harorat va deformatsiya tezligida θ_s oquvchanlik kuchlanishining ($\tau_s = k$ siljishda oquvchanlik kuchlanishining) σ_1 kuchlanishlar shiddatiga (T urinma kuchlanishlarning shiddatiga) nisbati bilan aniqlanadi.

Bu tenglamalar tizimlarini yechish yengib bo'lmaydigan matematik qiyinchiliklarga duch keladi. Shu sababli, tadqiqotchilar

deformatsiyaning real sxemasini yoki yassi qilib, yoki o'q simmetriyali qilib taqdim qilishga intilishadi. Kuchlanishlarda analitik yo'l bilan yechish faqatgina yassi masala uchun va o'q simmetriyali deformatsiyalangan holatning ba'zi bir masalalari uchun mumkin bo'ladi, chunki bunday masalalarning qo'yilishida noma'lumlarning soni tenglamalarning soniga teng bo'ladi. Ko'pgina o'q simmetriyali masalalarni yechish uchun tenglamalar tizimini to'ldirish (masalan, hajmning doimiyligi shartini hisobga olish bilan deformatsiya tezliklari va kuchlanishlar o'rtasidagi nisbatlar bilan) va qo'shimcha yo'l qo'yilishlarni kiritish (masalan, oraliq normal kuchlanish va eng chekka kuchlanishlardan birini teng deb hisoblash (Xaar-Karman gipotezasi) zarur bo'ladi. Bu holatda ham ta'sir ko'rsatuvchi kuchlanishlarga nisbatan yopiq ko'rinishda matematik jihatdan yetarlicha aniq analitik yechimni olishga muvaffaq bo'lavermaydi.

Tadqiqotchilar odatda bosim bilan ishlov berish texnologik masalalarini yanada soddalashtirish yo'lidan boradilar – metalluskuna kontakt yuzalarida chegara shartlariga tegishli bo'lgan ko'proq yoki kamroq darajada eksperimental yo'l bilan asoslangan yo'l qo'yilishlarni kiritadilar yoki deformatsiyalanadigan jismning kesimlaridan biri bo'yicha urinma yoki normal kuchlanishlarning taqsimlanishining u yoki bu xarakteriga oldindan yo'l qo'yadilar.

Shu bois bu bobda keltirilgan yechish uslublari bilan bir qatorda yaqinlashuvchi analitik uslublari keng tarqalishga ega bo'lgan, ular hisoblash formulalarini yopiq shaklda olish imkonini beradi. Ulardan foydalanish bilan amaliyotni qanoatlantiradigan aniqlik bilan yetarlicha tez deformatsiyalovchi kuchlarning kattaligini baholash va turli omillarning deformatsiyalanishning kuch xarakteriga ta'sirini tahlil qilish mumkin.

Bundan tashqari, mazkur bobda muvozanat va plastiklik holatining yaqinlashuvchi tenglamalarini yechish uslublari keltirilgan, buning uchun eksperimental tadqiqotlarning yechishni soddalashtiradigan va amaliyot uchun yetarli bo'ladigan aniqlikni olish imkonini beradigan yo'l qo'yilishlarni kiritish imkonini beruvchi ma'lumotlaridan foydalanilgan.

Zarb qilish va shtamplash texnologik jarayonlarini ishlab chiqishda, shuningdek, ishlab chiqarishda temirchilik-shtamplash operatsiyalarini amalga oshirishda eng muhim masalalardan biri uskuna-deformatsiyalanadigan tayyorlanma kontakt yuzalaridagi kuchlanishlarni aniqlash bo'lib hisoblanadi. Bu to'liq yoki solishtirma deformatsiyalovchi kuchni, shuningdek, shakl o'zgartirish ishlarini hisoblash uchun zarur bo'ladi, bu berilgan texnologik operatsiya bajarilishi lozim bo'lgan mashinalar va uskunalarni to'g'ri tanlash imkonini beradi.

Kontakt yuzalarda normal va urinma kuchlanishlarning taqsimlanishini bilish temirchilik-shtamplash uskunalarni to'g'ri hisoblash, uning mumkin bo'lgan yemirilish va maksimal yedirilish joylarini aniqlash, uskunaning materialini va uni tayyorlash hamda ishlov berish texnologiyasini to'g'ri tanlash imkonini beradi.

Asosiy yo'l qo'yilishlar.

Texnologik masala yoki yassi masalaga yoki o'q simmetriyali masalaga keltiriladi. Bir qator hollarda tayyorlanmaning hajmini sohalarga (zonalarga) ajratish maqsadga muvofiq bo'ladi. Ba'zi bir sohalarda yassi, boshqalarida esa – o'q simmetriyali kuchlanishli-deformatsiyalangan holat ustivor bo'ladi.

τ_k urinma kuchlanishlar koordinatalarning biri bo'yicha chiziqlanadi va kontakt yuzalarda maksimal qiymatga ($\tau_k = k$) va erkin yuzalarda va deformatsiyalanadigan jismni simmetriya yuzalarida nolli qiymatga ($\tau_k = 0$) ega bo'ladi. Bunday yo'l qo'yilish uchun ba'zi bir masalalarni yechishda A.Nadai, A.D.Tomlenov, R.Xill va boshqalar tomonidan olingan chiziqli qonuniyatlar asos bo'lib hisoblanadi.

Qabul qilingan yo'l qo'yilish kontakt yuzalarda normal kuchlanishlar va kuchlarni aniqlash bo'yicha masalalarni yechishda qabul qilingan koordinatalar tizimiga bog'liq ravishda yozilgan muvozanat tenglamalaridan faqatgina birinchi tenglamalardan foydalanish imkonini beradi:

a) x, y to'g'ri burchakli koordinatalarda yassi masalalar uchun

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \quad (1.1)$$

b) r, φ qutb koordinatalarida yassi masalalar uchun

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{r \partial \varphi} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\varphi)}{r} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{2\tau_{r\varphi}}{r} = 0; \quad (1.2)$$

d) r, θ, z silindrik koordinatalarda o'q simmetrik masalalar uchun

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0; \quad (1.3)$$

e) ρ, θ, φ sferik koordinatalarda o'q simmetrik masalalar uchun

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\rho \partial \varphi} + \frac{[2\sigma_\rho - (\sigma_\theta + \sigma_\varphi) + \tau_{\rho\varphi} \operatorname{ctg} \varphi]}{\rho} = 0,$$

$$\frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_\varphi}{\rho \partial \varphi} + \frac{[3\tau_{\rho\varphi} - (\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \operatorname{ctg} \varphi]}{\rho} = 0. \quad (1.4)$$

Biroq shuni qayd qilish zarurki, urinma kuchlanishlarni qabul qilingan chiziqshastirishda ba'zi bir texnologik masalalar xuddi ikki o'lchovli masalalar kabi boshqa qo'shimcha yo'l qo'yilishlardan foydalanish bilan yechilishi mumkin.

1.3.1. Deformatsiyalanuvchi kuchlarni aniqlash

Foydalanishi bo'yicha mazkur plastiklik sharti chiziqshastirilgan ko'rinishda qo'llaniladi.

Maxsus nuqtalarda kontakt urinma va normal kuchlanishlarni aniqlash uchun, kontakt yuzalari erkin yuzalar bilan kesishadigan nuqtalar, ya'ni ular da urinma kuchlanishlar θ dan τ_k gacha sapchib o'zgaradigan τ_φ nuqtalar shunday nuqtalar bo'lib hisoblanadi, sirg'alish chiziqshastirishining maydonlarini qurish uslubidan foydalaniladi.

Shunday qilib, texnologik masalalarni yechishning tasvirlanadigan yaqinlashuvchi uslubi kombinatsiyalangan uslub bo‘lib hisoblanadi.

Kuchlanishlarda chegara shartlari eksperimental ma‘lumotlarga muvofiq eng umumiy ko‘rinishda qabul qilinishi mumkin. Urinma kuchlanishlar σ_n normal kuchlanishlarga bog‘liq bo‘lishi yoki bog‘liq bo‘lmasligi mumkin.

O‘q simmetrik masalalarni silindrik yoki sferik koordinatalarda yechishda Xaar-Karman gipotezasidan foydalaniladi. Bunda asosiy yo‘l qo‘yilishlar tufayli ikki o‘lchamli yassi masala yoki uch o‘lchamli o‘q simmetrik masala mohiyatiga ko‘ra bir o‘lchamli masalaga keltiriladi.

2-punktdagi asosiy yo‘l qo‘yilishlarga muvofiq quyidagilarni aniqlaymiz:

a) x, y to‘g‘ri burchakli koordinatalarda tayyorlanmaning kengayishsiz kirishishi yassi masalasi uchun

$$\tau_{xy} = \tau_k \cdot 2y/h, \quad (1.5)$$

bu yerda k – zarb qilish balandligi;

b) r, φ qutb koordinatalarda yassi masala uchun

$$\tau_{r\varphi} = \varphi_k \cdot 2\varphi/\alpha, \quad (1.6)$$

bu yerda α – parallel bo‘lmagan plitalar o‘rtasidagi burchak;

d) r, φ, z silindrik koordinatalarda o‘q simmetrik masala (tsilindrning kirishishi) uchun

$$\tau_{rz} = \tau_k \cdot 2z/h, \quad (1.7)$$

e) ρ, θ, φ sferik koordinatalarda o‘q simmetrik masala uchun

$$\tau_{\rho\varphi} = \tau_k \cdot 2\varphi/\varphi, \quad (1.8)$$

bu yerda φ – konus matritsaning jismoniy burchagi.

Urinma kuchlanishlarning bu qiymatlarini (1.1)–(1.4) ifodalarning birinchi tenglamalariga o‘rniga qo‘yish bilan xususiy hosilalarda emas, odatdagi hosilalarda quyidagi yaqinlashuvchi muvozanat tenglamalarini olamiz, ular faqatgina kontakt yuzalardagi kuchlanishlar uchun o‘rinli bo‘ladi, normal kuchlanishlardagi ikkinchi indeks shuni ko‘rsatadi:

a) to‘g‘ri burchakli koordinatalarda yassi masala uchun

$$\frac{d\sigma_{xk}}{dx} + \frac{2\tau_k}{h} = 0; \quad (1.9)$$

b) r, φ qutb koordinatalarida yassi masala uchun

$$\frac{d\sigma_{rk}}{dr} + \frac{2\tau_k}{(r\alpha)} + \frac{(\sigma_{rk} - \sigma_{\varphi k})}{r} = 0, \quad (1.10)$$

bu yerda α – deformatsiyalaydigan plitalar o‘rtasidagi to‘liq burchak;

d) silindrik koordinatalarda o‘q simmetrik masala (tsilindrning kirishishi) uchun

$$\frac{d\sigma_{rk}}{dr} + \frac{2\tau_k}{h} + \frac{(\sigma_{rk} - \sigma_{\varphi k})}{r} = 0, \quad (1.11)$$

bu yerda h – kirishadigan tayyorlanmaning balandligi;

e) sferik koordinatalarda o‘q simmetrik masala uchun

$$\frac{d\sigma_{\rho k}}{d\rho} + \frac{4\tau_k}{(\rho\alpha)} + \frac{2(\sigma_{\rho k} - \sigma_{\varphi k})}{\rho} = 0. \quad (1.12)$$

Sferik koordinatalarda yaqinlashuvchi muvozanat tenglamasini chiqarishda konusning jismoniy burchagi unchalik katta emas deb qabul qilingan, shundan kelib chiqqan holda

$$\text{ctg}\varphi = 1/\varphi; \quad \text{tg}\varphi = \varphi. \quad (1.13)$$

Urinma kontakt kuchlanishlar yoki normal kuchlanishlarga proporsional bo‘ladi yoki doimiy bo‘ladi yoki koordinatalardan biriga chiziqli bog‘liq bo‘ladi.

(1.5)–(1.8) tenglamalar chiziqli tenglamalar ekanligini ko‘rish mumkin. umumiy shaklda ularni ko‘rinishida yozish mumkin.

$$\frac{d\sigma_i}{di} + f_1(i) \cdot f_2(\sigma_j) \cdot f_3(i) = 0 \quad (1.14)$$

Bu yerda koordinatalar tizimiga bog‘liq ravishda i va j indekslar mos ravishda to‘g‘ri burchakli koordinatalarda yassi masalalar uchun – x, u ; qutb koordinatalarida yassi masalalar uchun – r, φ ; silindrik koordinatalarda o‘q simmetrik masalalar uchun – r, φ, z ; sferik koordinatalarda o‘q simmetrik masalalar uchun ρ, θ, φ qiymatlarni qabul qilishi mumkin.

Shunday qilib, kontakt kuchlanishlarini, shundan kelib chiqqan holda solishtirma va to‘liq kuchlarni aniqlash bo‘yicha texnologik masalalarni yechishning taklif qilinayotgan yaqinlashuvchi uslubining elementlaridan biri muvozanat tenglamalarini chiziqlashtirish bo‘lib hisoblanadi.

(1.9) tenglamaning umumiy yechimi ko‘rinishga ega bo‘ladi.

$$\sigma_j = e^{-\int f_1(i)di} \{c - \int f_3(i)e^{f_1(i)} di\} \quad (1.15)$$

Zarb qilish va shtamplashning ba’zi bir jarayonlarini yechish uchun zarur bo‘ladigan $f_1(i)$, $f_2(\sigma_j)$, $f_3(i)$ funksiyalar 1.1-jadvalda keltirilgan. Bu jadval deformatsiyalanadigan jismning kontakt yuzalarida urinma kuchlanishlar doimiy bo‘lishi, normal kuchlanishlarga proporsional bo‘lishi yoki i koordinataga bog‘liq bo‘lishi mumkin deb taxmin qilish asosida tuzilgan. Shunday jadvalni zarb qilish va shtamplashning boshqa texnologik jarayonlari uchun ham tuzish mumkin. Odatda s doimiy chegara shartlaridan aniqlanadi.

Yassi deformatsiyalangan holat uchun plastiklik shartini quyidagi ikkita ko‘rinishda ko‘chirib yozamiz:

$$\sigma_{xk} - \sigma_{yk} = \pm 2\sqrt{k^2 - \tau_k^2},$$

yoki

$$\frac{(\sigma_{xk} - \sigma_{yk})}{(2k)} = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_k}{k}\right)^2}. \quad (1.16)$$

Ko'pgina mualliflar (1.11) tenglamani ko'rinishda chiziqlashtirganlar.

$$\sigma_{xk} - \sigma_{yk} = \pm 2k \quad (1.17)$$

1.1-jadval

Metallarga bosim bilan ishlov berishning ba'zi bir jarayonlari uchun (1.2,1.5,1.9,1.10) tenglamalarni yechish uchun zarur bo'ladigan $f_1(i)$, $f_2(\sigma_j)$ va $f_3(i)$ funksiyalarining qiymatlari

Texnologik jarayon	Kulon ishqalanish sohaslari $\tau_k = \mu x_j$			Maksimal va doimiy urinma kuchlanishlar sohaslari $\tau_k = k$			Qattiq murakkabroq sohaslari $\tau_k = ki/h$		
	$f_1(i)$	$f_2(\sigma_j)$	\ominus	$f_1(i)$	$f_2(\sigma_j)$	$f_3(i)$	$f_1(i)$	$f_2(\sigma_j)$	$f_3(i)$
Prizmatik zagotovkadagi yassi kirishishi	$2\mu/h$	σ_j	0	0	1	$-2k/h$	0	1	$-2ki/h^2$
Pona zagotovkaning yassi kirishishi va kengayishsiz prokatlash	$2\mu/(\alpha i)$	σ_j	0	0	1	$-2k/(\alpha i)$	0	1	$-2k(1+\alpha) * (1/i - 1/h)/\alpha^2$
Chiziqsimon silindli zagotovkaning to'liq plastikligidagi kirishishi	$2\mu/h$	σ_j	0	0	1	$-2k/h$	—	1	$-2ki/h^2$
Konussimon matritsada bosim bilan ishlashi	$4\mu/(\alpha i)$	σ_j	0	0	1	$-4k/(\alpha i)$	—	—	—

Bundan shuni aytish mumkinki, σ_{xk} va σ_{yk} kuchlanishlar, yo‘l qo‘yilganidek, bosh kuchlanishlar bo‘lib hisoblanadi. Bunday chiziq- lashtirilgan plastiklik sharti va (1.5)–(1.8) muvozanat tenglamalari yordamida ko‘pgina amaliy masalalar yechilgan, eng yaxshi natijalar, tabiiyki, kontakt yuzalardagi urinma kuchlanishlarning kichik qiymatlarida bo‘lgan yoki boshqacha qilib aytganda, kontakt ishqalanish koefitsiyentining kichik qiymatlarida bo‘lgan. 1.6-rasmda (1.1) tenglama $\eta - \tau k/k$, $(\sigma_{xk} - \sigma_{yk})/k$ koordinata o‘qlarida τ_k/k o‘qqa parallel bo‘lgan AB to‘g‘ri chiziq ko‘rinishida taqdim qilingan.

Keyinchalik ayrim mualliflar tomonidan plastiklik shartini to‘g‘ri chiziqning ikkita kesmasi bilan chiziq- lashtirish taklif qilingan, ya‘ni

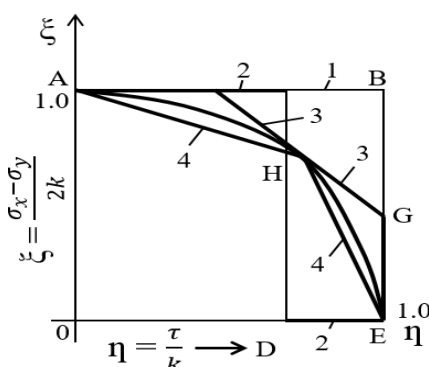
$$\begin{aligned} 0 \leq \tau_k \leq \pi k / 4 \text{ uchun } \sigma_{xk} - \sigma_{yk} &= 2k \\ \pi k / 4 \leq \tau_k \leq k \text{ uchun } \sigma_{xk} - \sigma_{yk} &= 0 \end{aligned} \quad (1.18)$$

1.6-rasmda keyingi tenglamalar ikkita AS va DE to‘g‘ri chiziq kesmalari ko‘rinishida taqdim qilingan.

Agar kontakt urinma kuchlanishlar kontakt yuzada o‘rtacha integral kuchlanishga teng bo‘lsa, ya‘ni $\tau_k = \tau_{k.o'rt} = \text{const}$ bo‘lsa, u holda $a = b = \pi/(4-\pi)$ ekanligi sababli (1.11) plastiklik shartini quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\sigma_{xk} - \sigma_{yk} = \pm 2k \sqrt{1 - f_i^2}, \quad (1.19)$$

Bu yerda $f_i = \tau_{k.o'rt}/k \leq 1$ – integral ishqalanish omili.



1.6-rasm. Kesmalarda plastiklik shartini bosqichma-bosqich chiziq- lashtirish uslublari: 1 - AV $1 \geq \eta \geq 0$ da; $a = 1$; $b = 0$; 2 - AS $\pi/4 \geq \eta \geq 0$ da; $a = 1$; $b = 0$; DE $1 \geq \eta \geq \pi/4$; $a = 0$; $b = 0$; 3 - AF $1/2 \geq \eta \geq 0$ da, $a = 1$; $b = 0$; FS $1 \geq \eta \geq 1/2$ da, $a = 1,5$; $b = 1$; 4 - AN $\pi/4 \geq \eta \geq 0$ da, $a = 1$; $b = (4-\pi)/4$; NE $1 \geq \eta \geq \pi/4$ da.

Bundan $k = 1 - 0$ da (1.12) ifodani, $f_i = 1$ da esa – (1.5,1.13) ifodani olamiz. Asosiy oqibat esa $f_i = \text{const}$ da

$$d\sigma_{xk} = d\sigma_{yk}$$

bo‘lib hisoblanadi.

Keyingi bosqich plastiklik shartiga kiradigan, (1.11) ko‘rinishida yozilgan ildiz ostidagi ifodani (1.20) formuladan foydalanib

$$a > b \text{ da } \sqrt{a^2 + b^2} \cong 0,96a - 0,396b \quad (1.20)$$

chiziq lashtirish mumkin.

So‘ngra $a = \sigma_{xk} - \sigma_{yk}$ va $b = 2\tau_k$ yoki $a = 2\tau_k$ va $b = \sigma_{xk} - \sigma_{yk}$ qiymatlarni o‘rniga qo‘yamiz.

(1.11) ifoda t_k urinma kuchlanish va σ_{xk} va σ_{yk} normal kuchlanishlarga nisbatan chiziqli bo‘lib qoladi. 1.6-rasmda bu chiziq lashtirish ikkita AH va HE kesuvchi to‘g‘ri chiziqlar bilan taqdim qilingan. Plastiklik shartini bunday chiziq lashtirishni biroz keyinroq M.Matchinskiy amalda qo‘llagan.

Nihoyat, plastiklik shartini geometrik chiziq lashtirish uslubi taklif qilingan va unga muvofiq xuddi o‘sha η, ξ koordinata o‘qlarida (1.6-rasmga qarang) tomonlarning soni $t = 4p$ ga teng bo‘lgan ko‘pburchaklarni quramiz va doiraning birinchi kvadrantini ko‘rib chiqamiz. η, ξ koordinata o‘qlarida ko‘pburchakning har bir i-tomonining tenglamasi

$$\xi = a_i + b_i \eta \quad (1.21)$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi va

shundan kelib chiqqan holda

$$\sigma_{xk} - \sigma_{yk} = 2k (a_i + b_i \tau_k) \quad (1.22)$$

Bu yerda $i = 1, 2, 3, \dots$, ko'pburchak tomonlarining soniga bog'liq bo'ladi.

Dastlab tasvirlangan AFGE ko'pburchakni ko'rib chiqishda birinchi kvadrantda $a_i > 0$ koeffitsiyentlar ko'pburchak tomonlarining η o'qdagi davomi bilan kesiladigan kesmalarni belgilaydi, $ab_i \leq 0$ ko'pburchakning tomonlarining η o'q bilan egilish burchaklarining tangenslari bo'lib hisoblanadi. Shunday qilib, η o'q $0 \leq \eta \leq 1$ uchastkada $(0,1), (1,2), \dots, (n-1)$ intervallarga ajraladi. Shunga mos ravishda η, ξ koordinata o'qlarida doiraning to'rtidan bir qismi bilan chegaralangan soha trapetsiyalarga ajraladi, uning har bir tomoni uchun (1.5,1.6) chiziqli bog'lanish adolatli bo'ladi. Shundan kelib chiqqan holda (1.9) nochiziqli tenglamani (1.16) yaqinlashuvchi chiziqli tenglamalar bilan almashtirish mumkin, ularning har biri $i, (i + 1)$ intervalda adolatli bo'ladi (uning chegaralarini ham o'z ichiga olgan holda). $(i + 1)$ -intervalning $1 \leq i \leq p$ boshlang'ich shartlari bo'lib i -intervalnig oxirida τ_i/k o'lchovsiz urinma kuchlanishning qiymati hisoblanadi.

Mana endi qandaydir bir i -interval uchun belgilashlarga (1.1) va (1.16) tenglamalarga kiradigan indeksni qo'shib yozish bilan (1.10) va (1.16) tenglamalar tizimlarini ko'rib chiqamiz (1.6-rasmga qarang).

Bu tizimni birgalikda yechish uchun (1.1) dagi birinchi tenglamani u bo'yicha, ikkinchi tenglamani esa $-x$ bo'yicha differensiallaymiz. Birinchi tenglamadan ikkinchisini ayirish bilan ni olamiz.

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) = \frac{\partial^2 \tau_i}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \tau_i}{\partial y^2} \quad (1.23)$$

(1.12) tenglamani 2 marta differensiallash bilan (bir marta σ bo'yicha va bir marta u bo'yicha) ga ega bo'lamiz.

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) = 2b_i \frac{\partial^2 \tau_i}{\partial x \partial y} \quad (1.24)$$

(1.17) va (1.18) tenglamalarning chap tomonlari o'zaro tengligi sababli o'ng tomonlarni tenglashtirish bilan

$$\frac{x^2 \tau_i}{\partial y^2} + 2b_i \frac{\partial^2 \tau_i}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \tau_i}{\partial x^2} = 0 \quad (1.25)$$

ni olamiz.

Shunday qilib, biz (1.1) tenglamalar tizimining o‘rniga giperbolik tipdagi yaqinlashuvchi chiziqli tenglamalarni oldik, ular uchun tavsif tenglamalari

$$\frac{\partial y}{\partial x} = b_i \pm \sqrt{b_i^2 + 1} \quad (1.26)$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.

Ravshanki, (1.19) tenglamaning tavsiflari – o‘zaro perpendikulyar to‘g‘ri chiziqlar bo‘lib, ularning x , u koordinatalar tekisligidagi tenglamalari mos ravishda

$$y_{i1} = \left(b_i + \sqrt{b_i^2 + 1}\right) x_i + c \quad \text{va} \quad y_{i2} = \left(b_i - \sqrt{b_i^2 + 1}\right) x_i + c \quad (1.27)$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.

(1.19) ifodadan ko‘rinib turibdiki, $\eta\xi$, tekislikning aks tasviri bo‘lib hisoblanadigan x va u tekislikda uning chap qismi i -tavsifning x o‘q bilan kesishish burchagining tangensi bo‘lib hisoblanadi, ya’ni

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_i} = \operatorname{tg}\alpha_i \quad (1.28)$$

(1.19) tenglamaning i va $(i + 1)$ -tavsiflari to‘r hosil qilish bilan kesishadi, bu to‘r siniq chiziqlardan tashkil topadi, va unga (1.19) tenglama tizimining tavsiflari sifatida qarash mumkin yoki boshqacha qilib aytganda sirg‘alish chiziqlari to‘ri sifatida ham qarash mumkin. Burchaklardagi nuqtalarda bitta oilaning har bir shunday tavsifi o‘zining yo‘nalishini $\Delta\alpha$ burchakka (approksimatsiyalaydigan ko‘pburchakning markaziy burchagi) o‘zgartiradi. Siniq tavsiflar to‘rining bu xususiyati – uni qurish uchun juda muhim bo‘lib hisoblanadi.

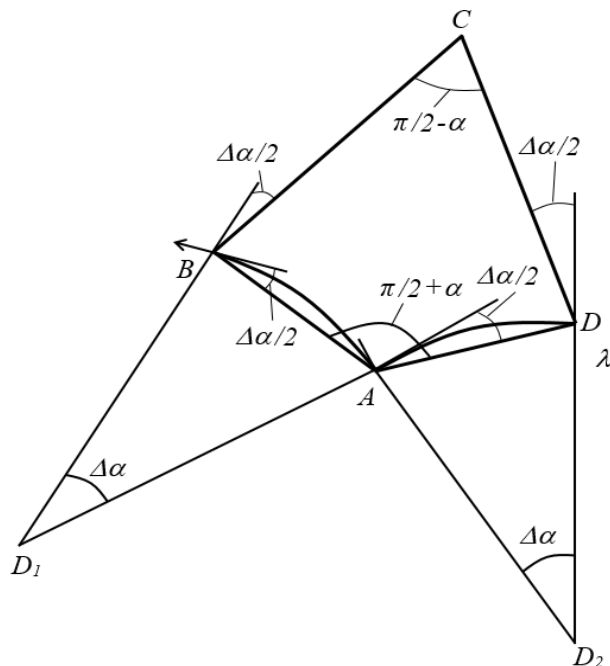
Tabiiyki, qanchalik ko‘p tomonlar approksimatsiyalaydigan ko‘pburchakka ega bo‘lsa, $\Delta\alpha$ burchak shunchalik kichik bo‘ladi, (1.19) tenglamaning siniq tavsifi (1.1) va (1.16) tenglamalar tizimini qanoatlantiradigan silliq egri chiziqqa shunchalik yaqin bo‘ladi.

(1.20) tenglamalarni ko‘rib chiqishga qaytamiz. $bi = 0$ da $dyi/dxi = 1$ bo‘ladi, ya’ni bo‘lakli-chiziqli tavsiflar o‘qni $\alpha = \pi/4$ burchak ostida kesib o‘tadi, bu - tavsiflarning (boshqacha qilib aytganda, sirg‘alish chiziqlarining) asosiy xususiyatiga – urinma kuchlanishlardan holi bo‘lgan chiziqni $\alpha = \pi/4$ burchak ostida kesib o‘tishga mos keladi.

Biroq (1.21) ifoda o‘zida ularning tugun nuqtalarida urinma va egri chiziqli tavsiflarning tenglamalarini taqdim qiladi. Shu sababli sirg‘alish chiziqlari to‘rini qurishda tugun nuqtalar (bo‘lakli-chiziqli kesmalarining kesishish nuqtalari) haqiqiy nuqtalarga – egri chiziqli sirg‘alish chiziqlari kesishadigan nuqtalarga nisbatan siljiydi. Bu siljishlar (1.21) siniq chiziqlar to‘rini boshlang‘ich egri chiziqlardan boshlab qurishda ortib boradi, shuningdek, maydonning yacheykalarining o‘lchamlari ortishi bilan ortadi, yoki boshqacha qilib aytganda approksimatsiyalaydigan ko‘pburchaki tomonlarining soni kamayishi bilan ortadi.

AN va NE tomonlarga ega bo‘lgan kiritilgan ko‘pburchakdan foydalanilganda anchagina yaxshi natijalar olinadi (1.6-rasmga qarang). Bu holda sirg‘alish chiziqlari δ va λ oilalarga tegishli bo‘lgan kesuvchi chiziqlar uslubi bilan qurilgan bo‘lakli-chiziqli sirg‘alish chiziqlari bilan mos tushadi (1.7-rasm). Bunda urinma va kesuvchi chiziqlar o‘rtasidagi burchak O_1 va O_2 aylanalarning markazlaridan chiqadigan radiuslar o‘rtasidagi $\Delta\alpha$ markaziy burchakning yarmiga teng degan teoremdan foydalaniladi. Sirg‘alish chiziqlari to‘rini bo‘lakli-chiziqli tavsiflardan bunday qurish uslubi, masalan, Ye.Tomsen, Ch.Yang, Sh.Kobayashi va boshqalarning ishlarida tasvirlangan.

Shuni aytib o‘tish joizki, bu holda sirpanish (sirpanish) chiziqlari to‘ri to‘g‘ri chiziqli tomonlarga ega bo‘lgan to‘rt burchaklardan tashkil topadi, bunda bunday to‘rt burchakning ikkita qarama-qarshi burchagi $\pi/2$ ga, qolgan ikkitasi esa – mos ravishda $\pi/2 + \Delta\alpha$ va $\pi/2 - \Delta\alpha$ ga teng bo‘ladi.



1.7-rasm. Sirpanish (sirg‘alish) chiziqlari to‘rining bo‘lakli-chiziqli yacheykasini aylanalarning O_1A va O_2A radiuslarining yoylari bilan almashtirilgan kesuvchi AV va AD tavsiflar uslubi bilan qurish holatlari.

Bo‘lakli-chiziqli tavsiflar (sirg‘alish chiziqlari) kontakt tekisligini $\Delta\alpha/2$ burchak ostida kesib o‘tadi, nolli urinma kuchlanishlarga ega bo‘lgan tekislikni esa $-\pi/4 \pm \Delta\alpha/2$ burchak ostida kesib o‘tadi. Biroq bu $\tau_k - k$ da kontakt tekisligini kesib o‘tishda $\alpha = 0$; $\alpha = \infty$ tenglik shartini, simmetriya tekisligini – urinma kuchlanishlarning nolli qiymatlariga ($\tau_k = 0$) ega bo‘lgan tekislikni kesib o‘tishda $\alpha = \pm \pi/4$ tenglikni qanoatlantirmaydi.

Shunday qilib, plastiklik shartini (1.11) aylanani (1.16) kiritilgan to‘g‘ri ko‘pburchak bilan almashtirish yo‘li bilan chiziqdashirish, mohiyatiga ko‘ra, sirg‘alish chiziqlarining bo‘lakli-chiziqli to‘rini kesuvchi chiziqlar uslubi bilan qurishga ekvivalent bo‘lib hisoblanadi. (1.19) tenglamaga qaytamiz. Bu tenglama ikkita ko‘rsatkichli funksiyalarning ko‘paytmasi ko‘rinishidagi umumiy yechimga ega. Har ikkala funktsiyaning daraja ko‘rsatkichiga tavsiflar tenglamalari kiradi. Biroq chegara shartlaridan integrallash doimiylarini aniqlashda ularning murakkabligi ularni qo‘llash zarurligini oqlamaydigan ifodalar olinadi. Bunday yechishlar V.S.Smirnov tomonidan bajarilgan.

Silindrik koordinatalarda o‘q simmetrik masalalar uchun urinma kuchlanishlar $\tau_{r\phi} = \tau_{rz}$ bo‘ladi. Agar Xaar-Karman gipotezasi normal kuchlanishning tarkibiy qismlariga qo‘llanilsa, masalan, $\sigma_r = \sigma_\phi$ deb qabul qilinsa, u holda plastiklik sharti:

$$(\sigma_r - \sigma_z)^2 + 3\tau_{rz}^2 = \sigma_s^2 \quad \text{ёки} \quad \sigma_r - \sigma_z = \pm \sigma_s \sqrt{\frac{1-3\tau_{rz}^2}{\sigma_s^2}} \quad (1.29)$$

ko‘rinishni oladi.

Bu ifodani (2.11) kabi chiziqshtirish mumkin: $0 \leq \tau_{rz} \leq \pi_k/4$ uchun $\sigma_r - \sigma_z = \sigma_s$, va $\pi_k/4 \leq \tau_{rz} \leq k$ uchun $\sigma_r - \sigma_z = 0$.

$\tau_{rz}/k = \eta$; $(\sigma_r - \sigma_z)/\sigma_s = \xi$ koordinata o‘qlarida (1.22) ifoda o‘zida birga teng bo‘lgan radiusli aylanani taqdim qiladi, va shundan kelib chiqqan holda uni (1.5) kabi chiziqshtirish mumkin.

To‘liq va solishtirma deformatsiyalovchi kuchlarni, shuningdek metall-deformatsiyalaydigan uskuna kontakt tekisliklarida kuchlanishlarning taqsimlanishini aniqlashning yaqinlashuvchi uslubida ko‘proq oddiy (1.5) – (1.8) yaqinlashuvchi muvozanat tenglamalari va (1.12), (1.13), (1.15) ko‘rinishidagi chiziqshtirilgan plastiklik shartlaridan foydalanamiz. Bu operatsiyalar metallarga bosim bilan ishlov berish va boshqa texnologik operatsiyalar uchun yetarli bo‘ladi.

1.3.2. Metallarning elastik va plastik deformatsiyalanishi

Metallga biror kuch ta’sir ettirilganda shu metall geometrik shaklining o‘zgarishiga *deformatsiya* deyiladi. Odatda, metallar fizikaviy va kimyoviy hodisalar, masalan, allotropiya hodisasi ta’siri ostida ham metall deformatsiyalanishi mumkin. Bu holatlar aslida metallarning plastik deformatsiyalanishi yoki rekristallanishini bildiradi.

Metallga tashqi kuch ta’sir ettirilishidan oldin, ya’ni u deformatsiyalanmagan holda bu metallning kristall panjarasi o‘zgarmaydi, metall deformatsiyalangandan keyin esa uning kristall panjarasi o‘zgaradi - panjara tugunlaridagi atomlar o‘rnidan siljiydi. Normal

haroratda metallning deformatsiyasi uch bosqichdan: elastik va plastik deformatsiyalardan hamda yemirilishdan iborat bo'ladi. Deformatsiyaning ana shu bosqichlari bilan alohida-alohida tanishib chiqamiz.

Metallarning elastik deformatsiyalanishi. Metallga ta'sir ettirilgan kuch olingandan keyin metall asli holiga yoki shakliga qaytsa, ya'ni uning deformatsiyasi yo'qolsa, bunday deformatsiyaga *elastik deformatsiya* deb ataladi. Masalan, po'lat prujina siqilsa, uning shakli o'zgaradi, ya'ni deformatsiyalanadi, bu prujina qo'yib yuborilsa, yana avvalgi vaziyatiga keladi, ya'ni uning deformatsiyasi yo'qoladi. Ana shu deformatsiyani elastik deformatsiya deb tushiniladi.

Prujina siqilganda po'latning kristall panjarasi o'zgaradi, prujina qo'yib yuborilgandan keyin esa kristall panjara yana asli holiga keladi.

Metallning cho'zilishidagi elastik deformatsiyalanishi bilan kuchlanishi orasida chiziqli bog'lanish bo'lib, bu bog'lanish diagramma tarzida 1.8-rasmda ko'rsatilgan. Bu bog'lanishning matematik ifodasi quyidagicha bo'ladi va proporsionallik qonuni, boshqacha qilib aytganda, Guk qonuni deyiladi:

$$\sigma = E\delta,$$

bu yerda σ – normal kuchlanish;

E – proporsionallik koeffitsiyenti;

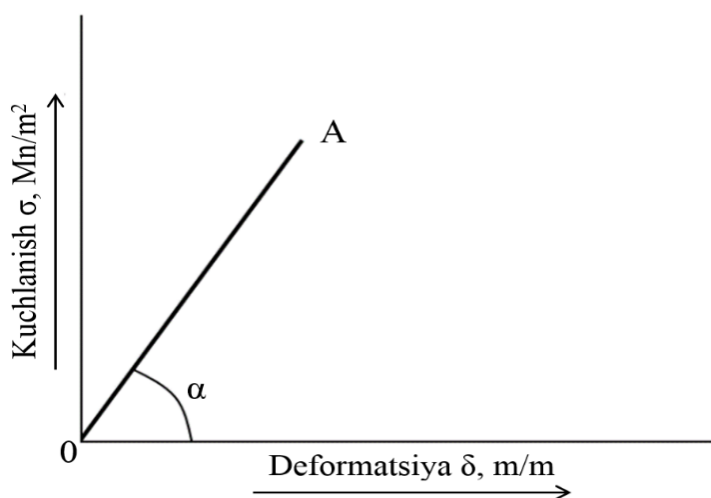
δ – deformatsiya (uzayish).

Proporsionallik koeffitsiyenti (E) *Yung moduli*, boshqacha aytganda, *elastiklik moduli* deb ataladi va α burchakning tangensiga teng bo'ladi:

$$E = \frac{\sigma}{\delta} = \operatorname{tg}\alpha.$$

Yung moduli metall kristall panjarasining turiga va parametriga bog'liqdir. Demak, har xil metallar uchun yung moduli turlicha bo'ladi.

Metallning elastiklik xossasi ma'lum chegaragachagina saqlanib qoladi, kuchlanish bu chegaradan oshsa, metallning elastiklik xossasi yo'qoladi. Ana shu chegara **elastiklik chegarasi** deb ataladi. Elastiklik chegarasi 1.8-rasmdagi diagrammada **A** harfi bilan ko'rsatilgan kuchlanishga to'g'ri keladi. Bu diagrammada asosan kuchlanish va deformatsiya bo'lib, unda **A** harfi bilan ko'rsatilgan chiziq elastiklik chegarasini bildiradi. Metallarning elastiklik chegarasi **A** harfidan keyin qiyshayishi yoki sinishi to'g'ri kelmaydi, shu bois belgilangan chegarada bo'lishi maqsadga muvofiqdir.



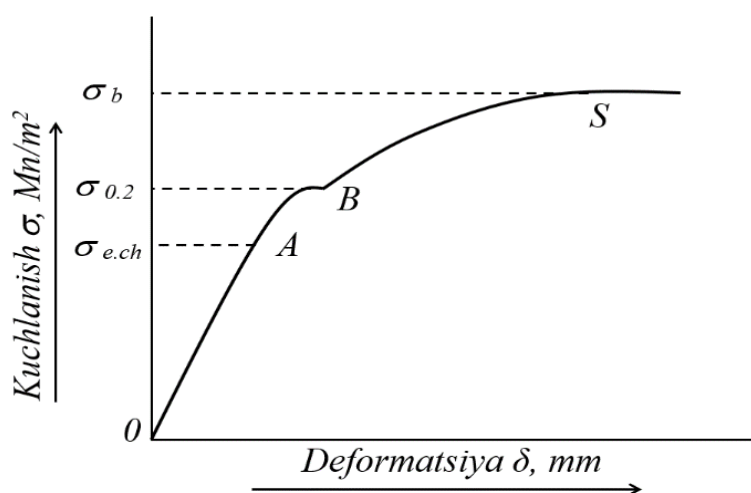
1.8-rasm. Elastik deformatsiya bilan kuchlanish orasidagi bog'lanish diagrammasi.

Metallning elastiklik xossalari atomlararo ta'sir kuchlaridan kelib chiqadi, shuning uchun metall qizdirilganda elastiklik moduli pasayadi, chunki haroratning ko'tarilishi natijasida metallning kristall panjarasidagi atomlararo masofa kattalashadi, demak, atomlarning o'zaro tortishuv kuchi ham zaiflashadi.

Metallarning plastik deformatsiyalanishi. Metallga ta'sir ettirilgan kuch olingandan keyin metall asli holiga yoki shakliga kelmasa, ya'ni unda qoldiq deformatsiya hosil bo'lsa, bunday deformatsiyaga **plastik deformatsiya** deb ataladi. Metallda plastik deformatsiya shu metallga ta'sir ettirilgan yuk elastiklik chegarasidan ortgandagina vujudga keladi.

Plastik deformatsiya, yuqorida aytib o‘tilganidek, deformatsiyaning ikkinchi bosqichi, ya’ni elastik deformatsiyaning davomi bo‘lib, uning diagrammasi 1.9-rasmda keltirilgan.

Plastik deformatsiya jarayonida metallning deformatsiyaga qarshiligi ortib boradi va plastik deformatsiyalanish xususiyati pasayadi.



1.9-rasm. Elastik va plastik deformatsiyalar diagrammasi.

Elastik deformatsiya bilan plastik deformatsiya orasida chuqur fizikaviy farq bor. Metallning elastik deformatsiyalanishida, yuqorida aytib o‘tilganidek, kristall panjaradagi atomlar (ionlar) oralig‘i o‘zgaradi, ta’sir ettirilgan kuch olinganda esa atomlar (ionlar) oralig‘i asliga keladi, natijada deformatsiya yo‘qoladi.

Plastik deformatsiya vaqtida esa kristallning bir qismi boshqa qismiga nisbatan siljiydi, ta’sir ettirilgan kuch olinganda kristallarning siljigan qismi avvalgi joyiga qaytmaydi, ya’ni deformatsiya qoladi. Bundan tashqari, plastik deformatsiya vaqtida donalar ichida mozaika bloklari maydalanadi, deformatsiya darajasi yuqori bo‘lgan hollarda esa donalarning shakli va ularning fazoda joylashuvi ham sezilarli darajada o‘zgaradi, bunda donalar oralig‘ida, ba’zan esa donalar ichida ham darzlar hosil bo‘ladi. 1.9-rasmda tasvirlangan diagrammadagi $\sigma_{e.ch}$ kuchlanish plastik deformatsiyaning boshlanish paytiga to‘g‘ri keladi. Deformatsiyani o‘lchash usuli qanchalik aniq bo‘lsa, A nuqta shunchalik past turadi. Texnik o‘lchashlarda namuna uzunligining yoki boshqa o‘lchamining 0,2 foiziga teng qoldiq

deformatsiya hosil qiladigan kuchlanish xarakteristikasi qabul qilingan, bu xarakteristika *oquvchanlik chegarasi* deb ataladi va $\sigma_{0,2}$ yoki σ_{0q} bilan belgilanadi.

Eng katta kuchlanish (σ_b) metallning sinish (ajralish) paytiga to'g'ri keladi. Bu xarakteristika, ko'pincha, *sinishga ko'rsatiladigan qarshilik* deb ataladi. Metallar tashqi kuch ta'siri ostidagina emas, balki hajm o'zgarishlari bilan bog'liq bo'lga i faza o'zgarishlaridan vujudga kelgan ichki kuchlanishlar ta'siri ostida ham plastik deformatsiyalanadi.

Plastik deformatsiya jarayonini tekshirishda metallning monokristalidan foydalanish ancha qulaydir. Plastik deformatsiya jarayonini tekshirish natijasida, bu jarayonning sirpanish yo'li bilan va ikkilanish yo'li bilan borishi aniqlanadi.

Plastik deformatsiya vaqtida kristall panjarada sodir bo'ladigan o'zgarishlar sxemasi 1.10-rasmda tasvirlangan. Deformatsiya kuchsizroq bo'lganda, dastlab siljish yo'nalishiga nisbatan eng qulay joylashgan tekisliklardagi atomlar sirpana boshlaydi, deformatsiya kuchaya borgan sari boshqa tekisliklardagi atomlar ham sirpanadi. Shunday qilib, plastik deformatsiya jarayoni butun monokristall bo'ylab birin-ketin tarqaladi.

Metallning silliqanib, so'ngra yaltiratilgan namunasini plastik deformatsiyalab, atomlarning sirpanish izlarini ko'rish mumkin: bu izlar sirpanish chiziqlari tarzida bo'ladi. Agar deformatsiya atomlarning ikkilanishi yo'li bilan borsa, metall namunasining mikroskopik tuzilishida ikkilangan plastinkalar paydo bo'ladi.

Metallar plastik deformatsiyalanganda, ko'pincha, bir vaqtning o'zida atomlarning ham sirpanishi, ham ikkilanishi yuz beradi. Dislokatsiyalar nazariyasiga ko'ra metall plastik deformatsiyalanganda chiziqli nuqsonlar hosil bo'ladi, bu nuqsonlar suriladi, bir-biri bilan ham, boshqa nuqsonlar bilan ham o'zaro ta'sir etadi ana shu chiziqli nuqsonlar (dislokatsiyalar) hosil bo'lishi metallning kristall panjarasidagi atomlarning tashqi-kuchlar yoki ichki kuchlanishlar ta'sirida sirpanish (siljish) jarayoni bilan bog'liqdir.

Dislokatsiya hosil bo'lgandan keyin sirpanish tekisligining ikkala tomonida kristall panjaraning vaziyati o'zgaradi va atomlar

orasidagi ideal bog‘lanish buziladi. Agar metallga kichikroq tashqi P kuch qo‘yilsa bas, sirpanish tekisligi ustidagi vertikal qator atomlari bitta atomlararo masofadan ortiq bo‘lmagan oraliqqa birin-ketin siljiydi. Buning natijasida dislokatsiya navbatdagi qator atomlariga o‘tadi (siljiydi) va ma’lum bir paytda (1.10-rasm, a) da tasvirlangan vaziyatni oladi, oqibatda dislokatsiya sirtga tepib yo‘qoladi.

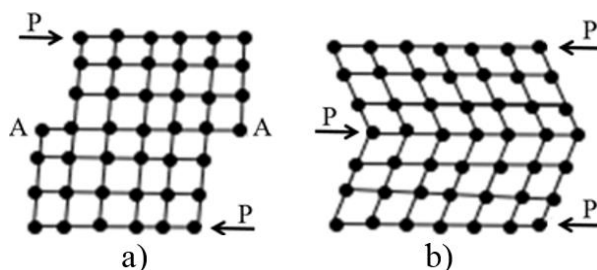
Shunday qilib, yuqorida tasvirlangan jarayon natijasida sirpanish tekisligi AA dan yuqorigi qatorlar bitta atomlararo masofaga siljiydi (1.10-rasm, a). Dislokatsiya hosil bo‘lishi uchun nisbatan katta dastlabki P kuch talab etiladi. Dislokatsiya hosil bo‘lgandan keyin, plastik deformatsiyani vujudga keltirish uchun ancha kichik tashqi kuch kifoya qiladi. Bu yerdan shunday xulosa chiqarish mumkin: metallda dislokatsiyalar qancha ko‘p bo‘lsa, shu metall kristalida siljish jarayoni shuncha oson o‘tadi va aksincha, metallda dislokatsiyalar qancha kam bo‘lsa, siljish imkoniyatlari shuncha kam va metall shuncha puxta bo‘ladi.

Nihoyat, dislokatsiya hosil bo‘lmaydigan metallda siljish kristalining barcha qismining bir vaqtda surilishi hisobiga sodir bo‘ladi. Dislokatsiyasiz yoki cheklangan va ko‘paymaydigan dislokatsiyali metallning puxtaligi nazariy puxtaligiga tenglashib boradi. Ammo dislokatsiyasiz kristallar hozircha juda kichik o‘lchamlarda, ya’ni ipsimon holdagina hosil qilingan. Masalan, temirning 1 mk chamasi qalinlikdagi va $2,5\text{ mm}$ uzunlikdagi ipsimon kristalini hosil qilishga muvaffaq bo‘lingan. Bular hammasi aniq bir eksperimentlar asosida tahlil qilingan.

Plastik deformatsiya jarayoni ikkilanish yo‘li bilan borganda (1.10-rasm, b) monokristallning muayyan qismidagi atomlar shunday siljiydiki, natijada monokristallning bir qismi ikkinchi qismiga, nisbatan yoborilib, simmetrik vaziyatga keladi. Bunda metallning mikrostrukturasida o‘ziga xos ikkilangan plastinkalar, ya’ni plastinkasimon strukturalar paydo bo‘ladi.

Plastik deformatsiya jarayoni polikristallarda monokristallardagiga qaraganda ancha murakkab boradi. Polikristallarda o‘lchamlari va shakllari jihatidan bir-biridan farq qiladigan va bir-biriga nisbatan turlicha vaziyatda joylashgan ko‘pdan-ko‘p monokristallar

bo‘lganligidan, bunday kristallarda atomlarning sirpanish jarayoni qiyinlashadi.



1.10-rasm. Plastik deformatsiya vaqtida kristall panjarada sodir bo‘ladigan o‘zgarishlar: **a**-sirpanish; **b**-ikkilanish jarayonlari.

Demak, polikristallarda plastik deformatsiya jarayoni monokristallarga qaraganda ancha murakkabroq o‘tadi. Polikristallarda o‘lchamlari va shakllari jihatidan bir-biridan farq qiladigan va bir-biriga nisbatan turlicha vaziyatda joylashgan ko‘pdan-ko‘p monokristallar bo‘lganligidan, bunday kristallarda atomlarning sirpanish jarayoni qiyinlasha boradi. Polikristallardan tuzilgan metall plastik deformatsiyalanganda dislokatsiyalar va panjaraning boshqa nuqsonlari soni ortadi, dislokatsiyalar qayta taqsimlanadi va donalar hamda mozaika bloklari chegaralariga to‘planadi. Polikristallardan tuzilgan metallarning deformatsiyaga ko‘rsatadigan qarshiligi monokristallnikiga qaraganda katta bo‘lishining sababi ham ana shundadir.

Metallarning yemirilishi. Metallarning plastik deformatsiyalanishi nihoyatda muhim xossadir, chunki metallarni sim qilib cho‘zish, prokatlash, shtamplash, cho‘ktirish, egish kabi texnologik jarayonlar metallarning plastik deformatsiyalanish xossasiga asoslangan. Bundan tashqari, metallarning plastik deformatsiyalanish xossasi shu metallardan tayyorlangan konstruksiyalar, detallar va xilma-xil buyumlarning puxta ishlashi uchun ham katta ahamiyatga egadir.

Ma’lumki, metall namunasiga ta’sir ettirilgan yuk ma’lum chegaraga yetganda bu namuna yemiriladi, uziladi yoki sinadi. Yemirilish xarakteri metallning qanday holatda ekanligiga bog‘liqdir, metall esa mo‘rt yoki qovushqoq holatda bo‘lishi mumkin. Shu

munosabat bilan metall ikki xil holatda yemiriladi. Birinchisi mo‘rt holatda yemirilish, ikkinchisi qovushqoq holatda yemirilishdir.

Metallning mo‘rt holatda yemirilishi plastik deformatsiyasiz (aslida esa hisobga olmasa ham bo‘ladigan kichik plastik deformatsiyadan keyin) sodir bo‘ladi. Metallning mo‘rt holatda yemirilishi shu metallning biror kesimiga perpendikulyar bo‘lgan kuchlanishlar ta’siri ostida atomlararo bog‘lanishlarning uzilishidan iboratdir. Demak, mo‘rt holatdagi metall ta’sir ettirilgan kuchga perpendikulyar tekislikda uziladi.

Metallning mo‘rt holatdagi mustahkamlik (puxtalik) qiymatini aniq topib bo‘lmaydi, chunki yuqorida aytib o‘tilganidek, metallning yemirilishi oldidan juda kichik qiymatli plastik deformatsiya vujudga keladi. Metallning mo‘rt holatdagi puxtaligi plastik deformatsiyani qiyinlashtiradigan sharoitda, masalan, juda past haroratlarda sinash yo‘li bilan taqriban topiladi.

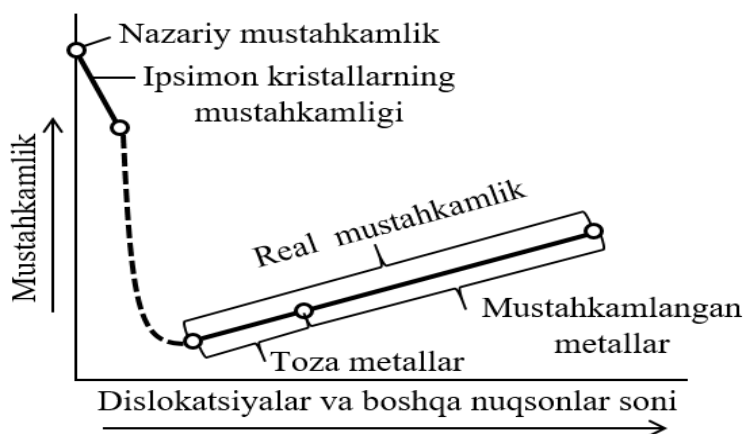
Metallning qovushqoq holatda yemirilishi shu metall ko‘p daraja plastik deformatsiyalanganidan keyin ro‘y beradi. Qovushqoq holatdagi metall normal kuchlanishlar bilan biror burchak hosil qiluvchi tekislik bo‘yicha yemiriladi.

Metallar strukturalariga plastik deformatsiyaning ta’sir ko‘rsatishi. Plastik deformatsiya vaqtida metallning kristall panjarasi buzilibgina qolmasdan, balki unda donalar muayyan tartibda joylashib ham qoladi, bu hodisa **teksturalanish** deb ataladi. Ma’lumki, har bir kristallning biror geometrik o‘qi bo‘ylab uning puxtaligi eng yuqori bo‘ladi, deformatsiya ta’siri ostida metall kristallarining ana shu o‘qlari deformatsiya yo‘nalishi bilan bir xil bo‘lib qoladi.

Teksturalanish darajasi deformatsiya darajasiga bog‘liqdir, deformatsiyalanish darajasi ma’lum qiymatga yetganda metalldagi barcha donalar muayyan bir yo‘nalishda joylashib qolishi mumkin.

Dislokatsiyasiz metallning puxtaligi nazariy puxtaligiga yaqinlashib borishi yuqorida aytib o‘tilgan edi. Ammo metallarni puxtalashning boshqa yo‘li ham bor. Ma’lum bo‘lishicha, dislokatsiyalar sonining ortishi metallning puxtaligini faqat dastlabki paytdagina pasaytiradi. Dislokatsiyalarning ma’lum bir kritik sonida (zichligida) metallning real puxtalik qiymati minimumga tushib, so‘ngra yana

ko‘tarila boshlaydi (1.11-rasm). Buning sababi shuki, bir-biriga parallel dislokatsiyalar hosil bo‘libgina qolmay, balki har xil tekisliklarda va har xil yo‘nalishlarda ham dislokatsiyalar hosil bo‘ladi, bunda y dislokatsiyalar esa bir-birining siljishiga halaqit berib, metallning real puxtaligini oshiradi.



1.11-rasm. Metallning mustahkamligi bilan shu metall kristall panjarasidagi dislokatsiyalar va boshqa nuqsonlar soni orasidagi bog‘lanishlarning ko‘rinishlari.

Plastik deformatsiya ta‘sirida metallning puxtalanishi *naklyop* yoki *nagartovka* deb ataladi. Demak, plastik deformatsiya vaqtida siljishlar hosil bo‘lishi metallning puxtaligini, qattiqligini oshirib, plastikligini pasaytiradi, chunki plastiklikning bir qismi naklyop vaqtida yo‘qoladi.

Naklyop ko‘pdan-ko‘p siljish yuzalari hosil bo‘lishiga, mozaika bloklarining maydalanishiga olib keladi, bu esa dislokatsiyalar sonini oshiradi. Ayni vaqtda bu jarayon kristall panjaraning elastik buzilishiga sabab bo‘ladi, bu esa dislokatsiyalarning siljishi uchun juda ko‘p g‘ovlar hosil qiladi. Bularning hammasi naklyop vaqtida metallning puxtalanishiga sabab bo‘ladi. Bundan tashqari, dislokatsiyalarning surilishiga to‘sqinlik qiluvchi har qanday sabab, masalan, qo‘shimchalarning atomlari (Kottrel atmosferasi) va kimyoviy birikmalarning nihoyatda mayda zarrachalari ham metallarni puxtalaydi.

Xulosa qilib aytganda, metallarning puxtaligi ularning kristall panjarasidagi dislokatsiyalar va boshqa nuqsonlar soniga, kristall panjaraning buzilgan buzilmaganligiga, metall donalarining maydayirikligiga, metallda submikroskopik mayda qattiq zarrachalar bor-yoʻqligiga bogʻliqdir.

Qizdirish haroratining deformatsiyalangan metallar strukturasi va xossalari taʼsiri (metalldagi qaytish va rekristallanish hodisalari)

Taniqli rus olimi S.S.Shteynberg ilmiy-tadqiqotlariga koʻra, metallni deformatsiyalash uchun sarf qilingan energiyaning taxminan 90 foiz issiqlik energiyasi tarzida ajralib chiqadi, 10 foizi esa metallda ichki kuchlanishlar hosil qiladi. N.N.Davidenkovning klassifikatsiyasiga muvofiq, bu ichki kuchlanishlar uch turga: birinchi tur, ikkinchi tur va uchinchi tur kuchlanishlarga boʻlinadi. Birinchi tur kuchlanishlar makrohajmlarda, yaʼni butun metall hajmida, ikkinchi tur kuchlanishlar ayrim donalar hajmida, uchinchi tur kuchlanishlar esa ayrim kristall panjaralar doirasida muvozanatlashadi; uchinchi tur kuchlanishlar taʼsirida kristall panjara buziladi. Metallardagi ayrim atomlar muvozanat holatidan siljiydi. Agar metallda makrohajmdagi kuchlanishlar katta boʻlsa, shu metalldan yasalgan detallning biror qismi yoyilganda hajmning kamayishi natijasida muvozanat buziladida, detal deformatsiyalanadi.

Metallardagi ayrim donalar hajmidagi kuchlanishlarga metallning (deformatsiyasi uchun sarf qilingan energiyaning hisobga olmasa ham boʻladigan darajadagi qismi (S.S.Shteynberg olgan maʼlumotlarga koʻra, metallda qolgan energiyaning 1% chasi) toʻgʻri keladi. Demak, plastik deformatsiya jarayonida metall xossalari oʻzgarishi uchinchi tur kuchlanishlardan, yaʼni kristall panjaraning buzilishidan kelib chiqadi. Plastik deformatsiyalangan metallda erkin energiya darajasi yuqori boʻlganligidan, bunda y metall termodinamik jihatdan ancha beqapop boʻladi. Metallni struktura jihatidan barqaror holatga qaytaruvchi hodisalar oʻz-oʻzidan sodir boʻlishi kerak. Bunda y hodisalar jumlasiga siljish natijasida buzilgan kristall

panjarani asliga qaytaruvchi hodisalar va donalarning o'sish hodisalari kiradi. Buzilgan kristallarni asliga qaytaruvchi hodisalar yuqori harorat talab etmaydi, chunki bunda atomlar juda kichik oraliqda siljiydi. Uncha yuqori bo'lmagan (temirga 300-400°C) haroratdayoq buzilgan kristall panjarani asliga qaytaradi va metallning dastlabki mexanik xossalari birqadar tiklanadi.

Plastik deformatsiyalangan temir mexanik xossalarining haroratiga qarab o'zgarishi mumkin. O'zgarish egri chiziqlardan ko'rinib turibdiki, haroratlarning kichik bir oralig'ida metallning dastlabki mexanik xossalari ayniqsa, tez tiklanadi. Bu haroratlar oralig'idan past haroratda metallning mikrostrukturasi o'zgarmaydi.

Rentgenostruktura tahlilining ko'rsatishicha, plastik deformatsiyalangan metall past haroratlarda qizdirilganda ayrim donalar hajmidagi (ikkinchi tur) kuchlanishlargina kamayadi. Deformatsiyalangan metallni qizdirish jarayonida shu metall xossalarining deformatsiyalanishdan oldingi holiga kelishi **qaytish** yoki **hordiq** deb ataladi. Bu jarayon natijasida metallning qattiqligi va puxtaligi 20-30% pasayadi, plastikligi esa ortadi.

Shuni ham aytib o'tish kerakki, qaytish jarayonida metallning ichki tuzilishi uncha o'zgarmaydi, shuning uchun mexanik xossalari batamom tiklanmaydi, ba'zi fizikaviy xossalari, masalan, elektr o'tkazuvchanligi esa batamom tiklanadi. Metallning barcha xossalarini deformatsiyalanishdan oldingi holiga batamom keltirish uchun uni yuqoriroq haroratgacha qizdirish kerak bo'ladi.

Yuqorida aytib o'tilganidek, plastik deformatsiyalangan metall kristall panjarasining buzilishi shu metallning butun hajmiga bir tekis tarqalgan bo'lmaydi, metallda shunday joylar ham bo'ladiki, bu joylarda ichki kuchlanishlar konsentratsiyasi ayniqsa yuqori, erkin energiya darajasi esa ortiq bo'ladi. Ana shu joylar termodinamik jihatdan eng beqaror bo'lib, metall qizdirilganda ana shu joylardagi kristall panjaralar boshqa joylardagidan oldin tiklana boshlaydi.

Demak, metall plastik deformatsiyalanganda uchinchi tur kuchlanishlar hosil bo'lgan joylar metall qizdirilganda eng oldin barqaror holatga o'tadi va kristall panjarasi tiklanmagan qismlar hisobiga o'sa

boshlaydi. Shunday qilib, kristall pajarasi asli holiga kelgan mikro-hajmlar yangi donalar o'sadigan markazlar bo'lib qoladi.

Bunday markazlar hosil bo'lishi va ularning buzilgan kristallar hisobiga o'sishi **rekristallanish** deb ataladi. Rekristallanish vaqtida metallning deformatsiyalanishdan oldingi donalari tiklanmay, balki yangi donalar hosil bo'ladi, ya'ni metall yangidan kristallanadi. Rekristallanishning allotropik shakl o'zgarishlar vaqtida sodir bo'ladigan ikkilamchi (qayta) kristallanishdan farqi shuki, rekristallanishda metallning kristall panjarasi o'zgarmaydi. Rekristallanish harorati (rekristallanishning eng kichik harorati) har xil metallar uchun turlicha bo'ladi. Masalan, misning rekristallanish harorati $\sim 270^{\circ}\text{C}$, temirniki $\sim 450^{\circ}\text{C}$, nikelniki $\sim 600^{\circ}\text{C}$, alyuminiyniki $\sim 50^{\circ}\text{C}$, volframniki - 1200°C , qalay, qo'rg'oshin va oson suyuqlanuvchi boshqa metallarniki esa normal haroratdan past bo'ladi.

Rekristallanish harorati bilan suyuqlanish harorati orasida quyidagi bog'lanish bor:

$$T_{\text{rekrist}} = aT_{\text{suyuql}}$$

bu yerda T_{rekrist} – rekristallanish absolyut harorati;

T_{suyuql} – suyuqlanish absolyut harorati;

a – metallning tozaligiga bog'liq koeffitsiyenti.

Metall qanchalik toza bo'lsa, bu metallning rekristallanish harorati shunchalik past bo'ladi. Odatdagi texnik tozalikdagi metallar uchun $a=0,3 \div 0,4$ qotishmalarning rekristallanish harorati, odatda, toza metallarnikidan yuqori bo'ladi va ba'zi hollarda suyuqlanish haroratini 0,8 hissasiga tenglashadi ($T_{\text{rekr.}} = 0,8 T_{\text{suyuql}}$), aksincha, juda toza metallarning rekristallanish harorati ancha past, ya'ni suyuqlanish haroratining 0,2 va hatto, 0,1 ulushiga teng bo'ladi [$T_{\text{rekr}} = (0,2 \div 0,1) T_{\text{suyuql}}$]. a koeffitsientdan foydalanib, metall va qotishmalarining rekristallanish haroratini hisoblab topish qiyin emas. Masalan, tarkibida 0,5% C bo'lgan po'latning suyuqlanish harorati taxminan 1500°C (1539°C) ga teng, uning rekristallanish harorati esa

$$T_{\text{rekr.}} \approx 0,8 \cdot 1500 \approx 1200^{\circ}\text{C} \text{ atrofida bo'ladi.}$$

Rekristallanish harorati deformatsiya darajasiga ham bog'liqdir. Deformatsiya darajasi qanchalik katta bo'lsa, metallning ichki tuzilishi shunchalik mayda, strukturaning barqarorligi shunchalik kam bo'ladi. Demak, barqarorroq holatni olish uchun shunchalik ko'p intiladi. Deformatsiya darajasining katta bo'lishi rekristallanishni osonlashtiradi va rekristallanish haroratini pasaytiradi.

Rekristallanish haroratining amaliy ahamiyati g'oyat katta. Masalan, plastik deformatsiyalangan metallning deformatsiyadan oldingi strukturasi tiklash uchun bu metallni rekristallanish haroratidan yuqori haroratgacha qizdirish kerak. Bu jarayon *rekristallizatsion yumshatish* deb ataladi.

Rekristallanish haroratidan yuqori haroratlarda sodir bo'ladigan plastik deformatsiya natijasida metall kristall panjarasidagi atomlar siljisa va metall puxtalansa-da, ammo shu haroratlarda bo'ladigan rekristallanish jarayoni bu puxtalikni yo'qotadi.

Metallarga rekristallanish haroratidan yuqori haroratda ishlov berish *qizdirib bosim bilan ishlash* deb, rekristallanish haroratidan past haroratda ishlov berish esa *sovuqlayin bosim bilan ishlash* deb ataladi.

Metallarni bosim bilan ishlashda (bolg'alash, shtamplash va boshqalarda) rekristallanish haroratidan tashqari, deformatsiya, tezligini ham hisobga olish zarur. Deformatsiya tezligi kichik bo'lsa, rekristallanish minimal haroratidan yuqori barcha haroratlarda metall rekristallanadi, deformatsiya tezligi katta bo'lganda esa rekristallanish oxiriga yetmay qolishi va ishlov berish vaqtida metallda bir qadar naklyop hosil bo'lishi mumkin. Haroratning ko'tarilishi bilan rekristallanish tezligi kuchli darajada ortadi.

Metallni qizdirib ishlashda uning plastikligini oshirish va puxtalanishiga yo'l qo'ymaslik uchun metall rekristallanish haroratidan ancha yuqori haroratgacha qizdiriladi. Puxtalangan (naklyoplangan) metall yoki qotishmani yumshatishda ham rekristallanish haroratidan ancha yuqori haroratlardan foydalaniladi, bunday qilinganda rekristallanish jarayonlari yetarli darajada tez boradi.

Puxtalangan metall qizdirilganda strukturasi o'zgarishi bilan mexanik xossalari ham o'zgaradi. Haroratning ko'tarilishi bilan

metallning qattiqligi dastavval sal pasayadi, chunki bunda qaytish hodisasi yuz beradi. Metall rekristallanish haroratidan bir qadar yuqori haroratda yumshatilgandan keyin uning qattiqligi pasayib, puxtalanishdan oldingi qiymatiga tenglashadi. Ana shu diagramma harorat rekristallanishning eng kichik, boshqacha aytganda, minimal haroratidir. Metallning boshqa mexanik xossalari (mustahkamlik chegarasi, oquvchanlik chegarasi) ham xuddi qattiqligining o'zgarishi kabi o'zgaradi.

Yuqorida aytib o'tilganidek, metallning rekristallanishi vaqtida yangi donalar hosil bo'lish va ularning o'sish jarayoni, shuningdek, eski donalarning o'sish jarayoni sodir bo'ladi. Rekristallanish vaqtida donalarning o'lchami ularning deformatsiyadan oldingi o'lchamidan kichik bo'lishi yoki bir necha marta katta bo'lishi mumkin. Rekristallanish vaqtida donalarning katta-kichikligi qizdirish haroratiga, deformatsiya darajasiga, ma'lum bir haroratda tutib turish vaqtiga va dastlabki donalar o'lchamiga bog'liqdir. Qizdirish harorati ko'tarilganda va tutib turish vaqti oshirilganda donalarning o'lchami kattalashaveradi.

Deformatsiyaning kritik darajasida rekristallanish vaqtida donalarning o'lchami eng katta bo'ladi. Kam uglerodli po'lat uchun deformatsiyaning kritik darajasi 7-15 foizni tashkil etadi, shuning uchun bunday po'latni bosim bilan ishlashda deformatsiya darajasini bunday qiymatlarga yetkazmaslik kerak.

Donalar o'lchamining asosiy faktorlarga, ya'ni qizdirish haroratiga va deformatsiya darajasiga qarab o'zgarishi (har qaysi metall uchun) *rekristallanishning fazoviy diagrammasi* deb ataladigan diagramma bilan ifodalanadi. Rekristallanish diagrammalarining amaliy ahamiyati g'oyat kattadir. Bu diagrammalardan foydalanib, rekristallanish vaqtida mayda donalar hosil qilish uchun kerak bo'ladigan optimal harorat va optimal deformatsiya darajasini aniqlash mumkin.

1.4. Metallar va ular qotishmalarining o'ta yuqori plastikligi

Metallar va qotishmalarda plastik deformatsiya bilan birgalikda metallarning o'ta yuqori plastikligi ham uchraydi. Metallarning o'ta yuqori plastikligi deb metallning ma'lum bir sharoitlarda kichik

deformatsion qarshilik bilan (100 – 101 MIIa) katta plastik deformatsiyalanish qobiliyatiga ($\delta = 102 \div 103\%$) aytiladi. O‘ta yuqori plastiklik ikki turga bo‘linadi:

1 – metallarning strukturaviy o‘ta yuqori plastikligi. U donaning kattaligi 0,5 dan 10 mkm gacha bo‘lgan metallar va qotishmalarda $> 0,5 T_{pl}$ qizdirish haroratlarida kichik deformatsiya tezliklarida (ε deformatsiya tezligi $\varepsilon = d/\tau$ nisbatdan aniqlanadi, bu yerda d - deformatsiya darajasi – o‘lchamsiz kattalik; τ - vaqt) namoyon bo‘ladi;

2 – metallarning subkritik o‘ta yuqori plastikligi. U metallarning faza aylanishlari boshlanishi yaqinida, masalan, polimorf aylanishlar boshlanishi yaqinida kuzatiladi.

Bu o‘ta yuqori plastikliklardan strukturaviy o‘ta yuqori plastiklik jarayoni ko‘proq istiqbolli bo‘lib hisoblanadi.

Nazariya nuqtai-nazaridan o‘ta yuqori plastiklik qandaydir bir maxsus metallar va qotishmalarning mexanik xususiyati bo‘lib hisoblanmaydi va struktura tegishlicha tayyorlanganda va ma’lum bir deformatsiya sharoitlarida bosim bilan ishlov berilgan ko‘pgina qotishmalarda namoyon bo‘ladi.

Strukturaviy o‘ta yuqori plastiklik – metall donalarida sodir bo‘ladigan dislokatsion plastik deformatsiya mexanizmidan tashqari, donalararo (yoki dona-chegarali) plastik deformatsiya hamdir, u juda yuqori deformatsiya darajalarini ta’minlaydi ($\Sigma=10^2\dots 10^3\%$). Bunday hodisa strukturaviy o‘ta yuqori plastiklik deb ataladi. O‘ta yuqori plastiklik sharoitlarida deformatsiyaning yuqori darajalariga unchalik katta bo‘lmagan deformatsiyalovchi kuchlar bilan erishiladi. Shu sababli o‘ta yuqori plastiklikdan sanoatlarda foydalanish katta ahamiyatga egadir.

O‘ta yuqori plastiklik ma’lum bir sharoitlarda vujudga keladi. O‘tkazilgan eksperimentlarning ma’lumotlariga ko‘ra, o‘ta yuqori plastiklik metallda ~ 10 mkm o‘lchamli ultrakichik dona mavjud bo‘lganda va u deformatsiyalash jarayonida saqlanib qolganda kuzatiladi. Dona o‘lchamlarining bunday turg‘unlashuviga hajmiy fazalar nisbati 1:1 bo‘lgan ikki fazali qotishmalarda va boshqa ba’zi bir ish sharoitlarida erishiladi. Albatta, ularni o‘ta yuqori plastiklik

rejimlarida deformatsiyalash mumkin bo'lgan magniy, alyuminiy, mis, titan va temir asosidagi ko'plab qotishmalar mavjud.

Metallarning o'ta yuqori plastikligi faqatgina deformatsiyalash jarayonida (masalan, namunani cho'zishda) mahalliy deformatsiya hosil bo'lmaydigan sharoitda o'rinli bo'lishi mumkin.

Maxsus namunada deformatsiya mahalliylashganda bo'yinning mahalliy ingichkalashishi vujudga keladi va u tezda yemiriladi. O'ta yuqori plastiklik sharoitlarida namunani cho'zishda bo'yin hosil bo'lishiga yuqori qarshilik σ oqish kuchlanishining ϵ deformatsiya tezligining o'zgarishiga yuqori sezuvchanligi bilan bog'lanadi: $\sigma = R\epsilon^m$, bu yerda R – struktura va sinovdan o'tkazish sharoitlariga bog'liq bo'lgan koeffitsiyent; m – oqish kuchlanishining tezlikni sezuvchanlik ko'rsatkichi.

Ideal yopishqoq qattiq jismlar uchun (Nyuton jismlari) $m = 1$ bo'ladi va cho'zilishda bo'yin hosil bo'lishi kuzatilmaydi. Odatdagi plastik deformatsiya sharoitlarida $m < 0,2$, o'ta plastik deformatsiya sharoitlarida esa $m > 0,3$ bo'ladi, ba'zan $0,4 \dots 0,7$ bo'lishi ham mumkin. O'ta yuqori plastik deformatsiyada bo'yin hosil bo'la boshlaganda namunaning shu uchastkasida ϵ ortadi va m ning yuqori qiymati tufayli σ oqishga qarshilik ortadi, shu tufayli bo'yin hosil bo'lishi to'xtaydi. Mazkur jarayon yugurik bo'yin deb ataluvchi bo'yin hosil bo'lishiga olib kelish bilan uzluksiz takrorlanadi, yugurik bo'yin namunaning uzunligi bo'ylab ko'chish bilan mahalliy siqilish sodir bo'lishiga yo'l qo'ymaydi. Bunday kvazibirtekis deformatsiyalashda metall namunani cho'zishda juda katta uzayishga erishiladi.

Strukturaviy o'ta yuqori plastik deformatsiya asosan donachegarali sirg'alish tufayli kechadi, biroq ma'lum darajada donaning ichidagi dislokatsion sirg'alishlar ham mavjud bo'ladi.

Sanoat uchun mo'ljallangan strukturaviy o'ta yuqori plastik materialni yaratishda asosiy muammo – bu avvalambor, metallda ultrakichik muvozanatli donani olish va o'ta yuqori plastik deformatsiyalashda uni saqlashdir.

Donalar o'lchamlarining asta-sekin turg'unlashuviga quyidagilar bilan erishiladi:

1 – fazalarning 1:1 hajmiy nisbatiga ega bo‘lgan ikki fazali qotishmalarni qo‘llash; bu holda fazalararo yuzaning maksimal rivojlanishi o‘rinli bo‘ladi, bu faza donalari o‘rishining o‘zaro tormozlanishini ta‘minlaydi;

2 – donalarning chegaralarini siljishi uchun to‘siq bo‘lib hisoblanadigan dispers ajralmalardan foydalanish. Hozirgi kunda o‘ta yuqori plastiklik holatida ishlov berish uchun ko‘pincha QA21 (21% Al), QA22 (22% Al) rux-alyuminiy qotishmasi, $\alpha+\beta$ titan qotishmalari, ikki fazali $\alpha+\gamma^i$ mis va rux qotishmalari (latun), α -eritma va Al_3Zr dispers zarrachalardan tashkil topgan alyuminiy qotishmasi va boshqa ba‘zi bir qotishmalardan foydalaniladi.

Hozirgi kunda sanoatda o‘ta yuqori plastiklik hodisasidan hajmli izotermik shtamplash, pnevmoqoliplash va metallarga bosim bilan ishlov berishda foydalaniladi.

O‘ta yuqori plastiklik shtamplash jarayonida bitta operatsiya bilan murakkab shaklli detallarni olish, metallardan foydalanish koeffitsiyentini oshirish, mehnat sarfi hamda detallar va buyumlarni tayyorlash tannarxini kamaytirish imkonini beradi. Bularning barchasi metallarning o‘ta yuqori plastikligining afzalliklariga kiradi. O‘ta yuqori plastiklikning kamchiliklari shtamlarni ishlov berish haroratigacha qizdirish zarurligi va kichik deformatsiya tezligi, shuningdek, ishlab chiqarishda kam qo‘llanilishi bo‘lib hisoblanadi.

1.4.1. Plastik deformatsiya jarayonlarini tahlil qilish usullari

Sirpanish chiziqlari usulining nazariyasi asoslari

Nazariy va amaliy asoslar bo‘yicha plastik deformatsiya, sirpanish chiziqlarini tahlil qilish usullari, metallardagi kuchlanishlar va deformatsiyalar bo‘yicha turli masalalar va materiallar ko‘rib chiqilgan va o‘rganilgan.

Biz bu o‘rinda klassik plastiklik nazariyasining asoslariga, ya‘ni qattiq jismda (ayniqsa, qovushqoqlik yoki qayishqoqlik chegarasidan tashqarida deformatsiyani boshdan kechiradigan metallarda) doimiy

kuchlanishlar va deformatsiyalarni o'rganishga detalli kirishni berish niyatimiz bor.

Bu fan bo'yicha juda kam sonli darsliklar, o'quv qo'llanmalar va yo'llanmalar mavjud bo'lsa-da, ammo ular bu yo'nalishlarga to'g'ridan-to'g'ri mos kelmaydi, lekin shunga qaramay, ayrim materiallarni va shunga molik ishlarni o'z ichiga oladi. Ularning ko'pchiligi faqat rus tilida yoki ingliz tilidagi adabiyotlardir. Shu sababli bu kitobning yaratilishi kelajak yosh avlodlar va mutaxassislar uchun asosiy bilim bazasi hisoblanadi. Shuning uchun biz yaratilgan nazariya va amaliy ishlarni ko'proq ikki o'lchamli masalalarini yechish uslublarini ishlab chiqish uchun foydalanilgan asoslariga va ularni yechish usullariga e'tibor qaratamiz.

Plastik deformatsiyalarni tahlil qilish uchun ishlab chiqilgan tenglamalar barcha omillarning ta'sirini to'liq hisobga olmaydi. Taklif qilingan matematik modellar ko'proq yoki kamroq darajada bitta kamchilikdan aziyat chekadi: barcha kuzatiladigan hodisalarni tushuntirib bera olmaydi. Masalani qo'yishda metallarning o'zini qanday tutishini majmuaviy o'rganishda deformatsion mustahkamlanish, deformatsiya tezligi va haroratning ta'sirini bir paytda hisobga olish zarur bo'ladi. Hozircha bizning nazariy modellarimiz to'liq emas, biroq bu metallarga bosim bilan ishlov berish texnologiyalari va asbob-uskunalarining rivojlanishiga xalaqit bermaydi albatta, bu texnologiyalar va asbob-uskunalar sanoatning ko'pgina tarmoqlarida allaqachon yuqori darajaga erishgan va bu texnologiyalar rivojlanishi yanada davom etmoqda.

Tajribali muhandislar harorat, deformatsiya tezligi, moylash, har tomondan siqish (gidrostatik bosim), uskunaning shakli, alohida zarblanmalarni tayyorlash uchun qo'llaniladigan operatsiyalar ketma-ketligidan foyda chiqarish bilan foydalanishga intilishmoqda.

Shu bilan birgalikda nazariy konsepsiyalarning katta qismi nisbatan oddiy deformatsiya sxemalari sharoitlarida - ikki o'qli yuklash yoki kombinatsiyalangan bir o'qli yuklash va burash sharoitlarida namunalarni kuzatishga asoslanadi, bu deformatsiyalar, qoidaga ko'ra, normal haroratda kvazistatik sharoitlarda amalga oshiriladi. Bu ma'noda texnologiya nazariyaga yangi talablarni qo'yadi.

Shunga qaramasdan, ba'zi bir ideallashtirilgan matematik modellar qimmatli bo'lib hisoblanadi, ular qattiq jismlarning siqiluvchan emasligini hisobga oladi, bu ko'p sonli turli-tuman soddalashtirishlarni kiritishning natijasi bo'lib hisoblanadi. Ko'pchilik modellarda harorat va deformatsiya tezligining ta'sirini hisobga olmaslik, qattiq jismga esa yoki ideal qattiqplastik, yoki mustahkamlanadigan qattiqplastik jism sifatida qarash qabul qilingan. Har ikkala holdayam, qattiq jism, agar undagi kuchlanish oquvchanlik kuchlanishidan kichik bo'lsa, qattiq deb hisoblanadi (qayishqoqlik moduli cheksizlikka teng).

Ideal qattiqplastik qattiq jismda mustahkamlanish bo'lmaydi, mustahkamlanadigan qattiqplastik jismda esa sodda bo'lishi uchun mustahkamlanish murakkab bo'lmagan deformatsiya funksiyasi ko'rinishida qabul qilinadi. Agar keyinchalik material izotrop deb taxmin qilinsa, u holda plastik oqish faqatgina bosh yo'nalishlarning qiymatiga bog'liq bo'ladi, ularning yo'nalishiga esa bog'liq bo'lmaydi. Shundan kelib chiqqan holda, har qanday plastiklik kriteriysini faqatgina σ_{ij} kuchlanishlar tenzorining uchta birinchi invariantidan foydalanish bilan yozish mumkin:

$$f(I_1, I_2, I_3) = 0 \quad (1.30)$$

(1.30) ni keyingi soddalashtirish shundan iborat bo'ladiki, metallning plastik holati gidrostatik bosimga bog'liq bo'lmaydi. Bu Bridjmen va Pbyuning, shuningdek boshqa mualliflarning ishlarida eksperimental tarzda aniqlangan. Bu holda mo'tadil bosimlar uchun (1.31) formula quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$f(J_2, J_3) = 0 \quad (1.31)$$

bu yerda, J_2 va J_3 – sij diviator kuchlanishlar tenzorining ikkinchi va uchinchi invariantlari. Ma'lumki, hosil bo'ladigan (1.32) formula

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\delta_{ij}\sigma_{kk}}{3}; \quad J_2 = \frac{s_{ij}s_{ij}}{2}; \quad \text{Ba } J_3 = \frac{s_{ij}s_{ik}s_{ki}}{3} \quad (1.32)$$

mizesning plastiklik sharti (1.33) ning $f - J_3$ ga bog'liq bo'lmaydigan xususiy holati bo'lib, uni $J_2 - k^2 = 0$ ko'rinishda yozish mumkin. (1.33)

Bu yerda k – ideal qattiqplastik qattiq jism yoki mustahkamlanadigan qattiqplastik qattiq jism uchun siljishda oquvchanlik kuchlanishi.

Quyidagi (1.34) tenglama ko'plab boshqa muqobil shakllarga ega. Ulardan O_x o'qli to'g'ri burchakli Dekart koordinitalar tizimida σ_{ij} tenzor kuchlanishlarning tarkibiy qismlaridan foydalanadigan ko'proq ommaviylashgani quyidagi ko'rinishga ega:

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 - \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) = 2\sigma^2 = 6k^2 \quad (1.34)$$

Bu formulada k ni siljishda oquvchanlik kuchlanishi deb hisoblash mumkin, $\bar{\sigma}$ ni esa – bir o'qli cho'zishda (siqishda) oquvchanlik kuchlanishi deb hisoblash mumkin; $\bar{\sigma}$ shuningdek, kuchlanishning shiddati, ekvivalent yoki umumlashtirilgan kuchlanish deb ham ataladi.

Tresk plastiklik shartini J_2 va J_3 invariantlar orqali ifodalash mumkin, biroq bunday ko'rinishda u juda murakkab va foydalanish uchun noqulay bo'lib chiqadi. Tresk plastiklik sharti odatda quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \bar{\sigma} = 2k = \sigma_s \quad (1.35)$$

Bu yerda σ_{max} , $\sigma_{min} - \sigma_{11}$, σ_{22} , σ_{33} uchta bosh kuchlanishlarning maksimal va minimal qiymatlari.

(1.34) va (1.35) ifodalar bilan aniqlanadigan plastiklik shartlari eng oddiy postulatlar bo'lib hisoblanadi, biroq materialning o'zini qanday tutishi shu yoki boshqa har qanday modellarga qay darajada mos kelishini eksperimental tarzda tekshirib ko'rish lozim bo'ladi.

Boshlang'ich oquvchanlik yuzasini taqqoslash bilan mustahkamlanish natijasida uning shaklining o'zgarishi aniqlanadi. Bu yuza kuchlanishlar kengligida plastik holat tenglamasi bilan aniqlanadi.

Nazariy jihatdan uch o'lchamli kuchlanishlar kengligini ko'rib chiqish mumkin, amalda ko'pchilik umumiy qurishlar bosh kuchlanishlarning uch o'lchamli kengligida bajarilgan. Bu holda eng oddiy yo'l qo'yilish izotrop mustahkamlanish bo'lib hisoblanadi, bunda oquvchanlik chegarasi shunchaki o'lchamlarini o'zgartiradi. Boshqa bir tez-tez foydalaniladigan taxmin – kinematik mustahkamlanish bo'lib, unda oquvchanlik yuzasi o'zining shakli va o'lchamlarini saqlash bilan kuchlanishlar kengligida ko'chadi. Oquvchanlik chegarasi harakatlanadigan yo'nalishni (agar u harakatlansa) eksperimental ilmiy-tadqiqotlar bilan bir qiymatli tarzda aniqlab bo'lmaydi.

Umumiy holatda metallning plastikligini (oquvchanligini) boshlang'ich holati va mustahkamlanishni hisobga olish bilan uning keyingi o'zini qanday tutishi hozirgi kungacha ham ishlab chiqish davom etayotgan modellarga qaraganda anchagina murakkab bo'ladi. Biroq material avval-boshda izotrop yoki anizotrop bo'lganligiga bog'liq ravishda, keyingi mustahkamlash oquvchanlik chegarasining siljishi, kengayishi yoki og'ishiga (yoki unisigayam, bunisigayam) olib keladi deb taxmin qilish bilan odatda oquvchanlikning boshlang'ich va barcha keyingi funksiyalarini kuchlanishlar kengligida bo'rtik yuza bilan taqdim qilish mumkin deb hisoblanadi.

Yuza silliq bo'lmasligi va Tresk plastiklik shartiga muvofiq yassi uchastkalar va burchaklarga ega bo'lishi mumkin.

Biroq oquvchanlik yuzasida o'tkir burchakning (yoki cho'qqining) mavjud bo'lishi va rivojlanishi, garchi kuchli egrilanish sohalari topilgan bo'lsada, isbotlanmagan. Bu erda shuni qayd qilish mumkinki, keyingi o'n yillikda listli metallar va boshqa shu kabilardan ishlangan detallar, plastinkalar va qobiqlarda burma yoki titroq hosil bo'lishiga qiziqish va buning boshlanishini oldindan aytishga bo'lgan urinishlar kuzatilmoqda.

Klassik plastik oqish nazariyasini (mazkur bobda ko'rib chiqilayotgan) tahlil qilish, qoidaga ko'ra, siljishda kritik kuchlanishga ega bo'lgan nuqtalarni topish imkonini beradi.

Hozirgi kunda tahlil qilish uchun oquvchanlik yuzasida cho‘q-qiga ega bo‘lgan qattiq jismlarga murojaat qilishda deformatsion plastiklik nazariyasidan foydalanish qabul qilingan.

Biz endi qandaydir bir umumiy oquvchanlik shartiga bo‘ysunadigan

$$f(\sigma_{ij}) = 0 \quad (1.36)$$

qattiqplastik qattiq jismni ko‘rib chiqamiz.

Mustahkamlanuvchi qattiq jismlarda plastik oqish

$$f(\sigma_{ij}) = 0 \text{ u } (\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_{ij} \text{ yoki } (\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_{ij} / dt > 0 \quad (1.37)$$

da boshlanadi, mustahkamlanmaydigan jismlarda esa

$$f(\sigma_{ij}) = 0 \text{ va } (\partial f / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_{ij} = 0 \quad (1.38)$$

da boshlanadi.

Metallda plastik deformatsiya jarayonida kuchlanish va deformatsiya o‘rtasidagi o‘zaro nisbatni aniqlashdan oldin virtual ish tenglamasini topamiz, chunki undan bir qator plastiklik teoremlarida foydalaniladi va u kuchlanish va deformatsiya o‘rtasidagi o‘zaro nisbatning konkret turiga bog‘liq bo‘lmaydi.

Deformatsiya tezligi

Qovushqoq yoki qayishqoq qattiq jismni izotermik (yoki adiabatik) deformatsiyalashda har bir kuchlangan holatga faqatgina bitta deformatsiyalangan holat mos keladi, plastik deformatsiyalashda esa bunday emas. Deformatsiyaning ortishi yoki deformatsiya tezligi (biroq deformatsiya emas) joriy kuchlangan holat bilan bog‘lanadi, bu quyida batafsil ko‘rib chiqiladi. Aytaylik, Ox_i , du_i — to‘g‘ri burchakli Dekart koordinatalar tizimida du_i — joriy radiusvektori \bar{x}_i ga teng bo‘lgan zarrachaning d_t vaqtda cheksiz kichik

siljishi bo'lsin. Shunda deformatsiyalanadigan muhitda dt vaqtda deformatsiyaning cheksiz kichik ortish tenzorini

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial(du_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(du_j)}{\partial x_i} \right\} \quad (1.39)$$

ifodadan aniqlash mumkin.

Siljishlarning ortishini ko'rib chiqishning o'rniga siljish (oqish) tezliklarini, shundan kelib chiqqan holda deformatsiyaning ortishini emas, deformatsiya tezligini ko'rib chiqish qulayroq bo'ladi. Bu $e_{ij} = d\varepsilon_{ij}/dt$ siljishlar tezliklari tenzorini (deformatsiya tezligi tenzorini) ko'rib chiqishga olib keladi, bu yerda differensiallash

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial t} \right) \right\} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.40)$$

sifatida aniqlanadigan zarracha uchun o'tkaziladi.

Bu yerda t – vaqt yoki vaqt parametri; a – siljish (oqish) tezligi $v = du_i/dt$; $v = \bar{x}_i$ joriy radius-vektorli zarrachaning tezligi.

$\partial v_i/\partial x_i$ tezliklar gradiyenti tenzorini simmetrik va asimmetrik qismlarning yig'indisi sifatida yozish mumkin, aynan esa:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\} = e_{ij} + w_{ij} \quad (1.41)$$

Bunda deformatsiya tezligi tenzori – simmetrik a'zo. Asimmetrik qism materialning ko'rib chiqilayotgan elementining qattiq zarracha sifatida aylanishiga mos keladi (1.41). Bu elementning qattiq jism sifatida harakatlanishining zaruriy va yetarli sharti $e_{ij} = 0$ hisoblanadi. Agar $w_{ij} = 0$ bo'lsa, u holda oqish girdobsiz (potensial) oqish deyiladi.

Mazkur bobda deformatsiya tezligi tenzorining tarkibiy qismlarining joriy kuchlangan holat bilan bog'lanishini aniqlaymiz. Shu tariqa olingan oddiy nisbatlar tadqiqot uchun to'liq yetarli bo'ladi.

Umumiy tarzda ko‘rib chiqish qayishqoqplastik kontinuumni va oxirgi deformatsiyani ko‘proq detalli ko‘rib chiqishni o‘z ichiga olishi lozim. Bunday yondashuv oxirgi deformatsiya (va ularning tezliklari) tenzorlariga nisbatan koordinatalar tizimini tanlashga bog‘liq holda va qanday konfiguratsiya – deformatsiyalanadigan yoki deformatsiyalanmaydigan konfiguratsiya ko‘rib chiqilishiga bog‘liq ravishda ba’zi bir taxminlarga olib keladi.

O‘z navbatida kuchlanishlar va kuchlanishlar tezliklarini ba’zi bir mos keluvchi aniqlashlar ham vujudga keladi. Ko‘proq detalli ko‘rib chiqishni shu yo‘nalishlarga bag‘ishlangan turli ishlardan topish mumkin bo‘ladi.

1.4.2. Muvozanat va virtual ish differensial tenglamalari

Ma’lumki, muvozanat va virtual ish differentsial tenglamalari alohida-alohida yoziladi. Masalan, yuqoridagi ma’lumotlarni inobatga olgan holda muvozanat tenglamalari mana bunday ko‘rinishga

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + X_i = 0 \quad (1.42)$$

ega bo‘ladi.

Bu yerda σ_{ij} – kuchlanishlar tenzori; X_i – hajm birligiga to‘g‘ri keladigan kuch.

Jismning yuzasida yoki chegarasida elementning muvozanat sharti

$$T_i = \sigma_{ij}, n_j \quad (1.43)$$

Bu yerda T_i – elementning egilgan maydonchasida ta’sir ko‘rsatuvchi kuchlanish vektori; n_j – tashqi bittalik normal.

Agar σ_{ij} – jismning yuzasida T_i tishlashish kuchlari va X_i , hajmiy kuchlar bilan muvozanatda bo‘lgan qandaydir bir kuchlanishlar maydoni bo‘lsa, v_i – qandaydir bir uzluksiz tezliklar maydoni bo‘lsa, u holda (1.42) (1.43) tenglamalardan, shuningdek kuchlanishlar tenzorining simmetrikligidan

$$\int_V X_i v_i dV + \int_S T_i v_i dS = \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV \quad (1.44)$$

bo'lishi kelib chiqadi.

Bu yerda e_{ij} (1.41) tenglama bilan aniqlanadi; V – jismning hajmi va S – maydonchanning yuzasi. (1.45) tenglama virtual ish tenglamasi deb ataladi va u quyidagicha isbotlanadi:

$$\begin{aligned} \int_V X_i v_i dV + \int_S T_i v_i dS &= \int_V X_i v_i dV + \int_S \sigma_{ij} n_j v_i dS = \\ &= \int_V X_i v_i dV + \int_V \frac{\partial(\sigma_{ij} v_i)}{\partial x_j} dV = \int_V \left(X_i v_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} v_i + \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) dV \\ &== \int_V \left(X_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) v_i dV + \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV \\ &= \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV \end{aligned} \quad (1.45)$$

(1.45) tenglama e_{ij} ning turidan qat'i nazar adolatli hisoblanadi.

Qattiqplastik qattiq jismning kvazistatik oqishida tezliklar uziladigan yuzalarga yo'l qo'yiladi, chunki bu holda yopishqoqlik hodisalari bo'lmaydi. Agar tezliklar maydoni bunday yuzalarni o'z ichiga olsa, u holda (1.1, 1.15) tenglamalarni modifikatsiyalash lozim bo'ladi.

Aytaylik ko'rib chiqilayotgan jism v_i tezliklar maydonining qolgan barcha nuqtalarida uzluksiz bo'lgan S_D tezliklarning uzilish yuzasi bilan ikkiga ajratilgan bo'lsin, aytaylik v_i^I va v_i^L – S_L yuzaga mos ravishda 1 va 2 sohalardan kuchlar qo'yilganda tezlik vektorlari bo'lsin. (1.45) tenglamani 1 va 2 sohalar uchun alohida-alohida yozamiz, so'ngra ularni qo'shamiz va quyidagi tenglamani olamiz:

$$\begin{aligned} & \int_S T_i v_i dS + \int_V X_i v_i dV \\ &= \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV + \int_{S_D} \sigma_{ij} n_j (v_i^2 - v_i^1) dS \end{aligned} \quad (1.46)$$

Bu yerda n_j – S_D ga qo'yilgan, 2 sohaga yo'naltirilgan bittalik normal vektor.

Plastik siqilmaslik talabiga muvofiq (1.45) va (1.46) tenglamalarda foydalaniladigan tezliklar maydonlari quyidagi shartlarni qanoatlantirishi lozim:

$$v_{ij} = 0, \quad v_{i1} n_j = v_{i2} n_j \quad (1.47)$$

(1.47) tenglama shuni bildiradiki, agar qattiq jism siqilmas bo'lsa, u holda tezlikning S_D uzilish yuzasiga normal tarkib toptiruvchisi uzluksiz bo'ladi, ya'ni tezlikning faqatgina tangentsial tarkib toptiruvchisigina S_D yuzada uziladi. (1.16) tenglamadagi oxirgi a'zoni quyidagi ko'rinishda ko'chirib yozish mumkin:

$$\int_{S_D} \tau[v] dS \quad (1.48)$$

Bu yerda τ – u yo'nalishda S_D bo'ylab urinma kuchlanish,

$$v_i^2 - v_i^1 = (v_i^2 - v_i^1) \quad (1.49)$$

σ_{ij} – plastik kuchlanishlarning muvozanatli holati va v_{ij} – u bilan bog'langan tezliklar maydoni bo'lgan xususiy holat uchun

$$\int_{S_D} \tau[v] dS = \int_{S_D} k[v] dS \quad (1.50)$$

Bu yerda k – sof siljishda oquvchanlik kuchlanishi.

Qattiqplastik qattiq jismning kvazistatik oqishi masalasida kuchlanishlarning uzilish yuzalari ham uchrashi mumkin, biroq ular tezliklarning uzilishi sodir bo‘ladigan yuzalardan farq qiladi. σ_{ij} muvozanatli kuchlanishlar maydoni kuchlanishlar uziladigan yuzalarni o‘z ichiga olgan taqdirda ham (1.45) tenglama adolatli bo‘lib qolaveradi. Muvozanat shartidan bunday maydon orqali o‘tishda σ_{ijnj} ning uzluksizligi talabi kelib chiqadi.

1.4.3. Maksimal ishlar tamoyili

Maksimal ishlar tamoyili uning uchun deformatsiyaning (yoki deformatsiya tezligining) ortishi $\text{grad}F$ ga proporsional bo‘lgan $F(\sigma_{ij})$ plastik-potensial kuchlanishlar funksiyasi mavjud degan taxmindan chiqariladi.

Plastik-potensial funksiya bilan (1.9) tenglama bilan aniqlangan plastik holat tenglamasi bir xil degan taxmin ayniqsa, muhim ahamiyat kasb etadi. Bundan

$$e_{ij} = \lambda(df/d\sigma_{ij}) \quad (1.51)$$

hosil bo‘lishi kelib chiqadi.

Bu yerda λ – musbat skalyar kattalik, biroq konstanta emas.

Odatda (1.19) tenglama ko‘pincha oqish qonuni deb ataladi. Agar plastik holat tenglamasi ma‘lum bo‘lsa, u hech bo‘lmaganda deformatsiya tezligini aniqlash imkonini beradi.

Agar oquvchanlik yuzasi ularda $d/d\sigma_{ij}$ normal bir qiymatli tarzda aniqlangan bo‘lib hisoblanmaydigan chekkalar yoki burchaklarga ega bo‘lsa, u holda e_{ij} - Koyterga muvofiq (1.19) tenglamani umumlash-tirish bilan chekkalar yoki burchaklardagi nuqtalarda (singulyar nuqtalar deb ataluvchi) beriladi. Agar singulyar nuqtalar bilan qo‘shni bo‘lgan yuza $f_r(\sigma_{ij}) = 0$ shart bilan beriladigan bir qator yuzalarning birlashmasi bo‘lib hisoblanadi deb taxmin qilinsa, u holda singulyar nuqtada (1.19) umumlashtirilgan tenglama

$$e_{ij} = \sum_r \lambda_r (\partial f_r / \partial \sigma_{ij}) \quad (1.52)$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.

Yig‘indi singulyar nuqtada uchraydigan barcha yuzalar bo‘yicha olinadi. (1.19) va (1.20) tenglamalardan shu kelib chiqadiki, e_{ij} ni plastik kuchlanishlar tizimiga mos keladigan vektorli taqdim qilish σ_{ij} nuqtada oquvchanlik chegarasiga normal bo‘ladi. Normal yoki normallar singulyar nuqtada uchraydigan yuzalar bilan bo‘linadi. Maksimal ish tamoyili (1.19) tenglama va oquvchanlik yuzasining bo‘rtikligidan kelib chiqadi:

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*) e_{ij} \geq 0 \quad (1.53)$$

Bu yerda σ_{ij} – oquvchanlik shartini qanoatlantiradigan amaldagi kuchlanishlar maydoni; e_{ij} – mos keluvchi deformatsiya tezligi; σ_{ij}^* – oquvchanlik yuzasining ustida yoki ichida nuqta bilan taqdim qilinadigan, statik mumkin bo‘lgan har qanday kuchlanishlar maydoni.

$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^*$ da yoki σ_{ij}^* va σ_{ij} oquvchanlik yuzasining xuddi o‘sha bitta yassi uchastkasida yotganda, yoki σ_{ij}^* va σ_{ij} faqatgina siqilmaydigan jism uchun gidrostatik bosim bilan farq qilganda tenglikning belgisi saqlanadi. Druker barqaror plastik materialni aniqlashdan kelib chiqish bilan (1.21) tenglamani olgan, *tek* yuzaning bo‘rtikligi va oquvchanlik chegarasiga normal vektorlarning tabiiyligi material barqaror deb taxmin qilishdan kelib chiqadi.

Yuqorida keltirilgan fikrlarda biz statik mumkin bo‘lgan (muqobil) kuchlangan holatlar tushunchasini kiritdik. Yuzaning chegarasida berilgan va qolgan uchastkada berilgan kuchlar ta’sirida oqadigan qattiqplastik izotrop siqilmaydigan qattiq jism uchun kuchlanganlik holati bir qiymatlimi degan savol tug‘iladi. Xill deformatsiyaning kuchlanishlar maydoni bir qiymatli bo‘lishini ko‘rsatgan.

To‘liq yechim muvozanatli kuchlanishlar maydoni va chegara shartini qanoatlantiradigan mos keluvchi tezliklar maydonini o‘z

ichiga oladi. Bundan tashqari, kuchlanishlar maydoni deformatsiya berilgan tezliklar maydoniga mos kelganda plastiklik shartini qanoatlantirishi va qattiq sohada plastiklik shartini qanoatlantirmasligi lozim.

1.5. Plastik deformatsiya kuchining pastki va yuqorigi baholarini aniqlash uchun asosiy ekstremal tamoyillar

Plastik deformatsiyalash uchun zarur bo'ladigan kuchning pastki va yuqorigi bahosini aniqlash uchun Xillning ikkita ekstremal tamoyillaridan foydalanish mumkin. Bu tamoyillar mustahkamlanmaydigan qattiq jismlarning statsionar oqishi masalalarida yuklamalarni cheklash uchun qo'llaniladi. Biroq ularning yuklamalar intervalini aniqlash uchun qo'llanilishiga qaramasdan, bu ekstremal tamoyillar fundamental nazariy ahamiyatga ega bo'ladi.

Aytaylik σ_{ij} , va v_i - berilgan T_i yuza kuchlarining S_T yuzaning qismlariga va S yuzaning S_V bilan belgilangan qismiga berilgan u , v_i tezliklar bilan ta'siri ostida qattiqplastik jismning oqishi masalasining to'liq yechimini belgilasin. So'ngra, aytaylik σ_{ij} - S_T ga qo'yilgan, chegara shartlarini qanoatlantiradigan va hech qayerda oquvchanlik shartlarini buzmaydigan muvozanatli kuchlanishlar maydoni bo'lsin. Bunday kuchlanishlar maydoni statik yo'l qo'yiladigan maydon deb ataladi. Virtual ish tamoyilidan

$$\begin{aligned} & \int_S (T_i - T_i^0) v_i dS \\ &= \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0) e_{ij} dV + \int_{S_D} (k - \tau^0) [v] dS \end{aligned} \quad (1.54)$$

bo'lishi kelib chiqadi.

Bu yerda τ^0 - S_D ga $[v]$ uzilish bo'ylab ta'sir ko'rsatuvchi urinma kuchlanish. Shunda

$$\int (T_i - T_i^0) v_i dS > 0 \quad (1.55)$$

tenglama hosil bo'ladi, chunki $k \geq \tau^0$, $(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0) e_{ij} > 0$ va $T_i^0 = \sigma_{ij}^0 n_j = \sigma_{ijn} - T_i$ ga teng bo'ladi.

(1.54) tenglama – birinchi ekstremal tamoyil bo'lib hisoblanadi. Undan shu narsa kelib chiqadiki, deformatsiyalovchi kuchlarning pastki bahosini, ya'ni $\int T_i v_i dS - Sv$ ga ko'rsatiladigan noma'lum yuza kuchlarining quvvatining pastki bahosini statik yo'l qo'yiladigan kuchlanishlar maydonini ko'rib chiqish bilan olish mumkin.

Aytaylik $v_i - S_p$ yuzaning qismlariga qo'yilgan, siqilmaslik va tezlikning chegara shartlarini talablarini qanoatlantiradigan tezliklarning noli bo'lsin. Bunday tezliklar maydoni kinematik yo'l qo'yiladigan maydon deb ataladi. Virtual ish tamoyilidan quyidagi kelib chiqadi:

$$\int_S T_i v_i^* dS = \int_V \sigma_{ij} e_{ij}^* dV + \int_{S_D} \tau [v^*] dS \quad (1.56)$$

Bu yerda $\tau - [v^*]$ uzilish bo'ylab S_D ga qo'yilgan σ_i haqiqiy kuchlanishlar maydoni bilan aniqlanadigan urinma kuchlanish.

Agar $\sigma_{ij} -$ kuchlanishlar maydoni bo'lsa, deformatsiyaning tezliklar maydonini hosil qilish uchun talab qilinadigan statik yo'l qo'yiladigan maydon bo'lishi shart emas

$$e_{ij}^* = \left(\frac{dv_i^*}{dx_j} + dv_j^*/dx_i \right) / 2$$

Shunda

$$\begin{aligned} \int_S T_i v_i^* dS &= \int_V \sigma_{ij} e_{ij}^* dV + \int_{S_D^*} \tau[v^*] dS \\ &\leq \int_V \sigma_{ij}^* e_{ij}^* dV + \int_{S_D^*} k[v^*] dS \quad (1.57) \end{aligned}$$

chunki

$$k \geq \tau \text{ va } (\sigma_{ij}^* - \sigma_{ij}) e_{ij}^* \geq 0$$

S_p юзада $v_i = v_i^*$, shundan kelib chiqqan holda

$$\begin{aligned} \int_{S_v} T_i v_i dS &\leq \int_V \sigma_{ij}^* e_{ij}^* dV + \int_{S_D} k[v^*] dS \\ - \int_{S_T} T_i v_i^* dS & \quad (1.58) \end{aligned}$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.

(1.57-1.58) tenglamalar ikkinchi ekstremal tamoyil bo‘lib hisoblanadi, unga ko‘ra, plastik deformatsiyalash uchun zarur bo‘ladigan deformatsiyalovchi kuchning yuqorigi bahosini aniqlash uchun S_v yuzaning qismlariga ko‘rsatiladigan noma’lum yuza kuchlarining quvvatini kinematik yo‘l qo‘yiladigan tezliklar maydonidan hisoblash lozim bo‘ladi.

Yuqorida ko‘rsatib o‘tilganidek, ekstremal tamoyillarning amaliy qo‘llanilishi mustahkamlanmaydigan qattiq jismlar bilan cheklanadi, ular odatda yoki yassi, yoki o‘q simmetrik deformatsiya sharoitlarida bo‘ladi. Shu sababli ushbu bobda ideal qattiqplastik qattiq jismning yassi oqishi uchun tavsiya etilgan tenglamalari ko‘rib chiqildi va tahlil qilindi.

Nazorat savollari

1. Metallar va ular qotishmalarining tabiati nimaga bog‘liq va ularning umumiy holati nima bilan belgilanadi?
2. Kristall tuzilishga ega bo‘lgan metallar va ular atomlarining (ionlarining) kengligidagi qonuniyatlari qanday tavsiflanadi?
3. Metallarda elementar yacheykalarining qanday shakllari mavjud bo‘ladi (kristall panjaralarning elementar yacheykalarini chizib tushintiring)?
4. (0001), (1100), (1120), (1010) va $+a_1, +a_2, +a_3$ [100] va $-a_1, -a_2, -a_3$ yo‘nalishlar nimani bildiradi?
5. Metallarning qanday xususiyatlarini bilasiz?
6. Qoldiq deformatsiya deganda ninani tushunasiz?
7. Metallar deb nimaga aytiladi?
8. Monokristallning sirpanish bilan hosil qilingan deformatsiyasi xarakterining harakatini chizib tushintiring).
9. Polikristallar qanday deformatsiyalarga ajratiladi?
10. Metallarning elastik va plastik deformatsiyalari farqini tushuntiring).

2-BOB. YASSI PLASTIK OQISH NAZARIYASINING ASOSLARI

2.1. Plastik oqish holati, kuchlanganlik holati va Genki tenglamasining hosil bo'lishi

Yassi oqishda hamma zarrachalar berilgan tekislikka parallel tarzda harakatlanadi, bu tekislikni x, u, r to'g'ri burchakli Dekart koordinatalar tizimining $x-u$ tekisligiga parallel qilib tanlaymiz. Zarrachalarning ko'chishi deformatsiya tezligi tenzorining noldan farqli o'laroq $y_{e_{xx}} - y_{e_{uu}}, y_{e_{ux}} - y_{e_{xu}}$ tarkibiy qismlariga bog'liq bo'lmaydi.

Agar material Mizes plastiklik shartiga bo'ysunadi deb taxmin qilinsa, u holda yassi oqish uchun ifoda bilan aniqlanadigan oqish qonuniga ko'ra, quyidagi natijalar adolatli bo'ladi:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0, \\ \sigma_{zz} = 6\lambda\{\sigma_{zz} - (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3\} = 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Shundan kelib chiqqan holda, σ_{zz} - oraliq bosh kuchlanish

$$\sigma_{zz} = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) / 2 \quad (2.2)$$

ga teng bo'ladi.

Bu natijalarni Mizes plastiklik sharti o'rniga qo'ygandan keyin quyidagini olamiz:

$$[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) / 2]^2 + \sigma_{yx}^2 = k^2 = (\sigma_s/3)^2 \quad (2.3)$$

Xuddi shunday ifodani Tresk plastiklik sharti uchun ham olish mumkin, biroq bu holda $k = \sigma_s/2$ bo'ladi. Yana $\sigma_{zz} - 0,5 (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$ ga teng bo'lishi shart emas, biroq bu oraliq bosh kuchlanish bo'lib hisoblanadi.

Deformatsiya kvazistatik deb taxmin qilinadi, inertsiya kuchlari hisobga olinmaydi, shu sababli harakat tenglamalari bizga yaxshi ma'lum bo'lgan statik muvozanat tenglamalariga keltiriladi:

$$d\sigma_{xx}/dx + d\sigma_{xy}/dy = 0 \quad \text{va} \quad d\sigma_{yx}/dx + d\sigma_{yy}/dy = 0 \quad (2.4)$$

Agar (2.3) va (2.4) tenglamalar va kuchlanishlar bo'yicha chegara shartlari tenglamalari kuchlanishlar maydonini aniqlash uchun yetarli bo'lsa, u holda masalani statik aniqlash mumkin bo'ladi. Biroq umumiy holatda bu to'g'ri emas. Ba'zi bir statik aniqlanadigan masalalarni yechish tegishli formulalar bilan ko'rib chiqiladi va ularni yechish uslubi to'g'ri uslub deb ataladi. Sirg'alish chiziqlari to'ri unda sirg'alish chiziqlari to'ri ma'lum bo'lgan qandaydir bir sohadan boshlab bevosita quriladi. Odatda bu tekislik fizikaviy tekislik bo'lib hisoblanadi (ba'zi bir hollardagina tezliklar tekisligi bo'lib hisoblanadi). Fizikaviy tekislikda yoki tezliklar tekisligida boshlang'ich sirg'alish chiziqlarining shakli yetarlicha ma'lum bo'lmasa, u holda yuqorida keltirilgan uslub yaroqsiz bo'ladi.

Bunday holda masala to'g'ri xilda bo'lmagan masala deyiladi. Ilgari yechimni topish uchun kishini toliqtiradigan sinab ko'rishlar va xatolar uslubiga murojaat qilishga to'g'ri kelgan (odatda grafik yo'l bilan). Endilikda bu masalalarning ko'pchiligini matritsa-operator uslublari deb ataluvchi uslublar bilan yechish mumkin, bu uslublar asosan Kollinz tomonidan ishlab chiqilgan. Elektron hisoblash mashinasidan (EHM) foydalanish bilan hisoblash sxemasi Kollinz va Devurst tomonidan taklif qilingan. Matritsa-operator uslubi keyingi formulalarda ko'rsatilgan bo'lib, ularda bir qator yechiladigan masalalar bilan bir qatorda nazariy asoslar ham ko'rib chiqilgan.

Yassi plastik oqishda deformatsiyalanadigan materialning har qanday nuqtasidagi kuchlanishni 2.1-rasm, a da ko'rish mumkin. Mor aylana diagrammasi bilan ham tahlil qilish mumkin. (6.24) plastiklik shartini qanoatlantiradigan kuchlanishlar

$$\sigma_{xx} = -p - k \sin 2F; \quad \sigma_{yy} = -p + k \sin 2F; \quad \sigma_{xy} = k \cos 2F \quad (2.5)$$

tenglamalar bilan aniqlanadi.

Bu yerda $p = -0,5 (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) = -\sigma_{33}$ – kuchlanishlar tenzorining gidrostatik qismi, $(F+\pi/4)$ x musbat o‘qdan σ_{11} algebraik eng katta bosh kuchlanishning maksimumining yo‘nalishidan boshlab soat strelkasi aylanishiga qarshi yo‘nalishda hisoblanadi. 2.1-rasm,b ga muvofiq (2.4) tenglamani (2.5) o‘rniga qo‘ygandan keyin (2.6) ni olamiz.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} - 2k \cos 2F \frac{\partial F}{\partial x} - 2k \sin 2F \frac{\partial F}{\partial y} &= 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial x} - 2k \sin 2F \frac{\partial F}{\partial x} + 2k \cos 2F \frac{\partial F}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

(2.7) tenglama giperbolik xilda bo‘lib, uni tavsiflar uslubi bilan yechish mumkin. Yechish uslubining batafsil tasvirlanishini bir qator ishlardan topish mumkin. Ma’lum bo‘lishicha, tavsiflarning ikkita oilasi ortogonal bo‘lib, har qanday nuqtada maksimal urinma kuchlanishlarning trayektoriyasi bilan mos tushadi. Tavsiflarning (yoki sirg‘alish chiziqlarining) bitta ortogonal oilasini α -chiziqlar, boshqasini – β -chiziqlar deb atash qabul qilingan. Shuningdek α va β chiziqlarga koordinatalarning va ular uchun algebraik eng katta bosh kuchlanish birinchi va uchinchi kvadratlar orqali o‘tadigan o‘ng ortogonal tizimi sifatida qarash qabul qilingan (2.1-rasm,b ga qarang).

Tavsiflar bo‘ylab kuchlanishlarning o‘zgarishi sifatida

$$\begin{aligned} p+2k F - \alpha\text{-chiziq bo‘ylab doimiy;} \\ p-2k F - \beta\text{-chiziq bo‘ylab doimiy; taqdim qilinadi.} \end{aligned} \quad (2.7)$$

taqdim qilinadi.

(2.8) tenglamalar Genki tenglamalari deb ataladi, ular o‘zida plastik oqishni boshdan kechiradigan material uchun yassi deformatsiyada muvozanat tenglamalarini taqdim qiladi. Umumiy holatda (2.8) tenglamadagi konstantalar bir-biridan farq qiladi va xuddi o‘sha bitta oila doirasida bitta sirg‘alish chizig‘idan boshqasiga o‘tishda o‘zgaradi. Siqilmaslik va yassi deformatsiya shartlari va deformatsiya

tezligining tenzori uchun (2.1) ifodani hisobga olish bilan (2.8) ni olamiz.

$$\begin{aligned} e_{xx} + e_{yy} &= 0 \\ \partial v_x / \partial x + \partial v_y / \partial y &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Mizes plastiklik shartiga bo'ysunadigan qattiq jismlar uchun (2.1-2.2) plastik oqish qonuniga muvofiq (2.9) nisbat olinadi.

$$\frac{\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x}{\partial v_x / \partial x - \partial v_y / \partial y} = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \quad (2.9)$$

Bu tenglama shuningdek – $\operatorname{ctg} 2F$ ga teng, buni (2.6) tenglamaning o'ng qismi va Mor aylana diagrammasini ko'rib chiqish bilan osongina aniqlash mumkin (2.1-rasm, a ga qarang). Shundan kelib chiqqan holda, (2.6) tenglamani ko'rinishda ko'chirib yozish mumkin (ba'zan izotropiya tenglamasi deb ham ataladi). Bular ichida (2.10) tenglama quyidagi ko'rinishga

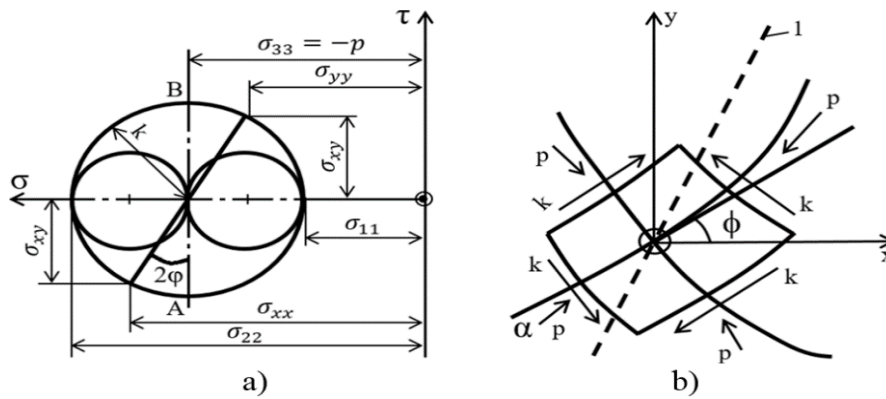
$$\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x = - (\partial v_x / \partial x - \partial v_y / \partial y) \operatorname{ctg} 2F \quad (2.10)$$

ega bo'ladi.

(2.9) va (2.10) tenglamalar giperbolik xilda bo'lib, ularning tavsifiy yo'nalishlari kuchlanishlarning yo'nalishlari bilan mos tushadi. Tavsiflarning (sirpanish chiziqlarining) ikkita oilasi bo'ylab tezliklarning nisbati bo'lishini quyidagi tenglamadan (2.11) ko'rsatish

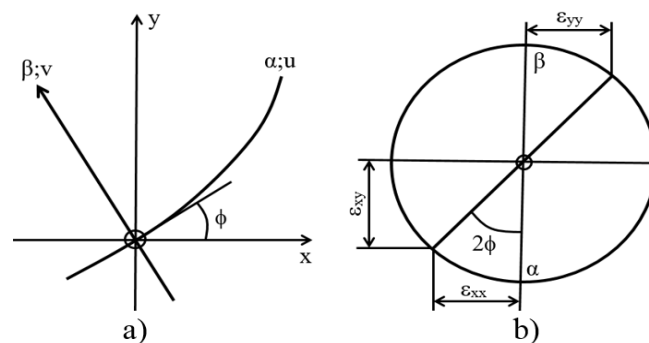
$$\begin{aligned} du - v dF &= 0 \quad \alpha - \text{liniyaga;} \\ dv + u dF &= 0 \quad \beta - \text{liniyaga.} \end{aligned} \quad (2.11)$$

mumkin. (2.11) tenglamalar Geyringer tenglamalari deb ataladi, ular har qanday sirpanish chizig'i bo'ylab cho'zilish nolga teng bo'lishini tasdiqlashdan boshqa narsa emas.



2.1-rasm. Yassi oqishda Mor aylana kuchlanishlar diagrammalari (a) va sirpanish chiziqlari (α, β): 1 – σ_p eng katta bosh kuchlanishning yoʻnalishi (b).

2.2-rasm,a da yassi plastik oqishda tezliklar aniqlangan, 2.2-rasm,b da esa – deformatsiya tezliklarining Mor aylana diagrammasi keltirilgan. Shuni qayd etish joizki, 2.2-rasm,a da tezliklarning yoʻnalishlari ixtiyoriy tanlangan: tezliklardan biri 2.2-rasm,a da koʻrsatilganidek boshqasiga qarama-qarshi yoʻnalgan boʻlishi mumkin va bu (2.12) da belgining oʻzgarishiga olib keladi.



2.2-rasm. Yassi plastik oqishda tezliklar (a) va yassi oqishda tezliklarning aylana diagrammasi (b).

Sirpanish chiziqlari toʻrini aniqlash fundamental ahamiyatga ega, chunki toʻr aniqlangan boʻlganda va gidrostatik bosim (oʻrtacha kuchlanish) maʼlum boʻlganda maydonning bitta nuqtasida butun maydonning kuchlanishlarini topish mumkin. Sirpanish chiziqlarining ikkita oilasining ortogonalligi – toʻr yoʻl qoʻyiladigan boʻlishi uchun zaruriy, biroq yetarli boʻlmagan shart boʻlib hisoblanadi.

Quyida mos keluvchi tezliklar diagrammalarida (yoki godograflarda) sirpanish chiziqlari to‘rining ma’lum bir asosiy xususiyatlari keltirilgan.

2.3-rasm,a da ABCD soha ikkita AV va DC α -chiziqlar va ikkita AD va VS β -chiziqlar bilan ajratilgan. A va S o‘rtasidagi farq P ni (2.9) tenglama bo‘yicha topish mumkin. Bunda (2.12) tenglama hosil bo‘ladi:

$$\begin{aligned} p_C - p_A &= (p_C - p_D) + (p_D - p_A) = 2k(2F_D - F_C - F_A), \\ p_C - p_A &= (p_C - p_B) + (p_B - p_A) = 2k(F_C + F_A - 2F_B) \end{aligned} \quad (2.12)$$

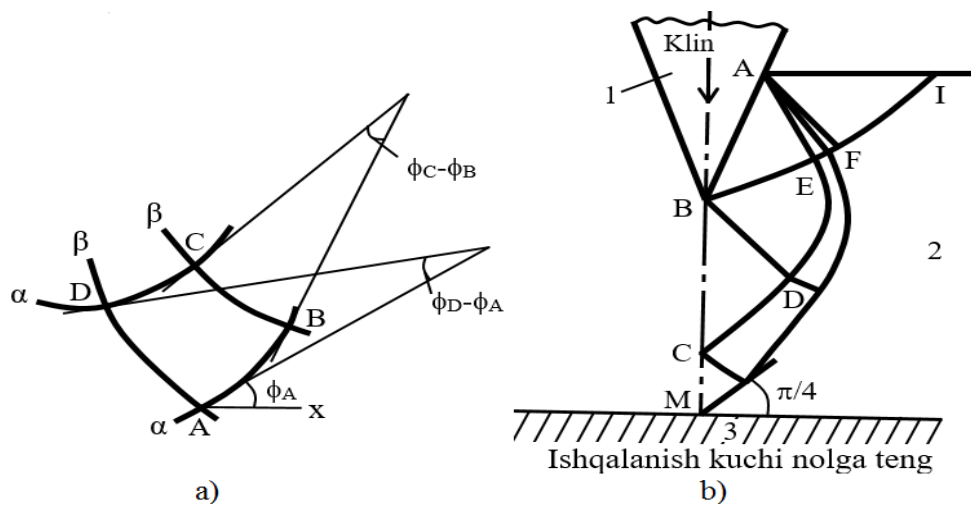
$$\begin{aligned} \text{Shundan kelib chiqqan holda, } F_D - F_A &= F_C - F_B. \\ F_C - F_D &= F_B - F_A. \end{aligned}$$

Shundan kelib chiqqan holda (2.12) tenglamadan shu narsa kelib chiqadiki, bitta oilaning ikkita sirpanish chiziqlariga o‘tkazilgan urinma chiziqlar o‘rtasidagi burchak ularning boshqa oilaning sirpanish chiziqlari bilan kesishish nuqtasida sirpanish chiziqlarining butun uzunligi bo‘ylab doimiy bo‘ladi. Bu Genkning birinchi teoremasi bo‘lib hisoblanadi va u sirpanish chiziqlari to‘rini sonli va grafik tarzda qurish uchun katta ahamiyatga egadir.

Odatda $|F_S - F_D| = |F_B - F_A| \Delta F$ deb belgilash qulay bo‘ladi, bu tengburchakli to‘rga olib keladi. Genkning birinchi teoremasining oqibatlaridan biri shundan iboratki, agar bitta oilaning ikkinchi oilaning ikkita sirg‘alish chiziqlari orasiga olingan sirpanish chizig‘i to‘g‘ri chiziq bo‘lsa, u holda bu oilaning ikkinchi oilaning xuddi o‘sha sirpanish chiziqlari orasida joylashgan qolgan barcha chiziqlari ham to‘g‘ri chiziqlar bo‘ladi. To‘g‘ri chiziqlar - ularni kesib o‘tadigan ikkinchi oilaning sirpanish chiziqlarining umumiy normallari bo‘lib hisoblanadi. Shunday qilib, bu sirpanish chiziqlari umumiy evolventaga ega va barcha to‘g‘ri chiziqlar bir xil uzunlikka ega.

Agar sirpanish chizig‘i – to‘g‘ri chiziq bo‘lsa, u holda (2.8) ga muvofiq u bo‘ylab kuchlanish o‘zgarmaydi. Agar oilalarni kesib o‘tadigan sirpanish chiziqlari ham to‘g‘ri chiziq bo‘lsa, u holda bu

sirpanish chiziqlari bilan belgilanadigan soha bir jinsli kuchlangan holat bilan tavsiflanadi. Sirpanish chiziqlari to‘rida tez-tez uchraydigan boshqa bir yo‘l qo‘yiladigan konfiguratsiya v radiuslar va konsentrik aylanalardan tashkil topadi. Bunday uchastkalar «markazlashgan yelpig‘ichlar» deb ataladi. Bu holda sirpanish-sirg‘alish to‘g‘ri chiziqlari kuchlanishning singulyarligini tasvirlaydigan umumiy nuqtaga to‘planadi. Ko‘rgazma sifatida 2.3-rasm, b da pona indentorni ishqalanishsiz yarim cheksizlikka bosishda mumkin bo‘lgan sirpanish chiziqlari to‘rining yarmi ko‘rsatilgan.



2.3-rasm. Genkning birinchi teoremasining grafik talqini va silliq asosda yotgan qalin plastinkaga silliq ponani kiritishda sirpanish chiziqlari to‘ri (ishqalanish kuchlari nolga teng): 1 - pona; 2 - plastina; 3 - asos.

To‘r «qavulgan qiyqim ko‘rpa» ko‘rinishiga ega va yuqorida tasvirlangan ko‘pgina xususiyatlarga ega: ARE va BED markazlashgan yelpig‘ichlar AVDBCD uchburchaklar, AFI – bir jinsli kuchlangan holat sohasi (2.3-rasmga qarang). Sirpanish chiziqlari to‘rlarini ko‘proq batafsil ko‘rib chiqish va uni hisoblab qurish tegishli formulalar va adabiyotlardan topish mumkin.

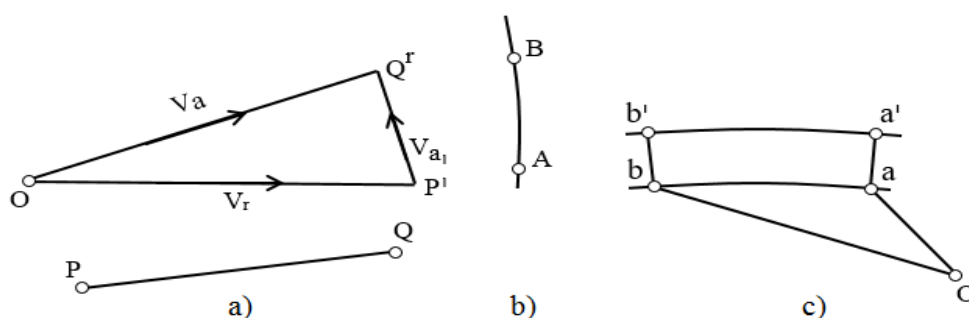
Sirpanish chiziqlari to'rida yassi plastik oqish uchun tezliklarning Godograf rejasi

Sirpanish chiziqlari to'riga mos keluvchi tezliklar rejasini (planini) godograf rejasi yordamida taqdim qilish mumkin. Godografdan birinchi marta, aftidan, Grin tomonidan foydalanilgan, u yassi plastik oqish uchun tezliklar planini sirpanish chiziqlari to'riga qayta qurish mumkinligini ko'rsatgan.

Sirpanish chizig'i bo'ylab cheksiz kichik masofada joylashgan ikkita P va Q nuqtalarni ko'rib chiqamiz (2.4-rasm,a). Sirpanish chizig'iga urinma yo'nalishida cho'zilish tezligi nolga teng, shundan kelib chiqqan holda, Q tezlikning R ga nisbatan yo'nalishi QP ga perpendikulyar. Godograf tekisligida qotirilgan koordinatalar boshi (qutb boshi) sifatida unda tezlik nolga teng bo'lgan nuqta tanlanadi. Qutbdan sirpanish chiziqlari to'rining nuqtalariga tezliklarni belgilaydigan vektorlar o'tkaziladi. Sirpanish chizig'i to'rining nuqtalari tegishli vektorlarning eng chekka nuqtalari sifatida godograf tekisligiga ko'chirib o'tkaziladi. Masalan, P va Q nuqtalar godograf tekisligiga P' va Q' nuqtalar sifatida o'tkaziladi (2.4-rasm,a ga qarang), bu yerda $OP = vp$ va $OQ' = vq - R$ va Q nuqtalarning tezliklari. $O'Q' - vq/p$ tezlik vektori Q nuqtaning P nuqtaga nisbatan tezligini belgilaydi va PQ ga perpendiyeklyar bo'ladi. PQ sirpanish chizig'ining elementi godograf tekisligiga $P'Q'$ sifatida qayta quriladi. Shuni ko'rsatish mumkinki, agar α -chiziqlar godograf tekisligida, masalan, α' -chiziqlarga, β -chiziqlar esa $-\beta'$ -chiziqlarga mos tushsa, u holda α' va β' -chiziqlar sirpanish chiziqlari to'ri ega bo'lgan xuddi o'sha geometrik xususiyatlarga ega bo'lgan ortogonal to'rni hosil qiladi.

Endigina siljiy boshlagan deformatsiyalanmaydigan sohalar godograf tekisligida bittayu-bitta nuqtaga mos keladi; unda tezlikning uzilishi sodir bo'ladigan α -chiziq godograf tekisligiga ko'chirib o'tkazishda bir xil uzunlikdagi β' -chiziqlar bilan bog'langan - tezlik uzilishining qiymatiga teng bo'lgan ikkita parallel α' -chiziqlar bilan taqdim qilinadi. Bu 2.4-rasm,b,v da ko'rsatilgan, bu yerda AV egri chiziq unda tezlik uzilishi sodir bo'ladigan sirg'alish chizig'ini taqdim qiladi. O nuqtada qutbga ega bo'lgan godograf tekisligida ab

va $a'b'$ chiziqlar – AV sirg‘alish chizig‘iga ortogonal bo‘lgan, tezlikning uzilish kattaligi bilan, masalan, v bilan farq qiladigan ikkita ekvidistang egri chiziqlardir. aa va bb' chiziqlar mos ravishda A va V nuqtalarda sirpanish chizig‘iga urinma ega bo‘lgan xuddi o‘sha yo‘nalishga ega va tezlikning uzilish kattaligini belgilaydi.



2.4-rasm. Tezliklar plani godografi (a) va godograf tekisligiga ko‘chirib o‘tkazishda tezliklarning uzilishi: **b**-sirpanish chiziqlari; **c**-godograf; aa' va bb' – tezliklarning uzilishi.

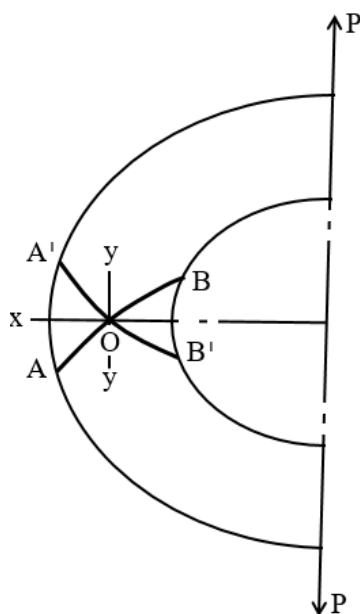
Umumiy holda, agar qaysidir bir sirpanish chizig‘ida tezlik uzilishining kattaligi aniqlangan bo‘lsa, u holda har doim bu sirg‘alish chizig‘ining har qanday davomida ham tezlikning uzilishi mavjud bo‘ladi. Sirpanish chizig‘i qattiq shtampning tekisligiga yoki uskunaning ishchi yuzasiga urinma bo‘lib hisoblanadigan holat bundan mustasno. Shu nuqtada yuzaga normal bo‘lgan sirpanish chizig‘i tezlikning uzilish chizig‘i bo‘lmasligi mumkin.

Ularda tezlikning tangensial tarkib toptiruvchisining uzilishi sodir bo‘ladigan sirpanish chiziqlariga tegishli bo‘ladigan yana bir umumiy qoida shundan iboratki, bu sirpanish chiziqlari yoki deformatsiyalanadigan sohaning chegaralarini hosil qiladi, yoki maydonning ichida kuchlanishning singulyarlik nuqtasida boshlanadi yoki tugaydi. Bu chegaralashlar, qoidaga ko‘ra, zarur bo‘lib hisoblanadi, aks holda kinematik yechimning birlashuvchanligi buziladi.

Endi kuchlanishning uzilishi hech qanday holatda sirpanish chiziqlariga nisbatan ko‘ndalang holatda sodir bo‘lmasligi lozimligiga yana bir marta e‘tibor qaratamiz. Kuchlanishlarning uzilishlari sirpanish chiziqlari to‘rining ichida mavjud bo‘lishi mumkin va ularni

to‘sinlar va konstruksiyalarning boshqa elementlarini bukishda kuzatish mumkin.

Quyida 2.5-rasmda jamlangan kuchlar bilan yuklangan yarim halqani siqish uchun mumkin bo‘lgan, O nuqtaga to‘planadigan to‘rtta sirpanish chiziqlaridan tashkil topgan sirpanish chiziqlari to‘riga misol keltirilgan. Bu nuqtada gidrostatik bosimning uzilishi sodir bo‘ladi, buni Genki integralidan oson ko‘rish mumkin.



2.5-rasm. Halqani bukishdagi asosiy sirpanish chiziqlari.

Bu oquvchanlik zonalarida yoki O nuqtaning har ikkala tomonida σ_{xx} va σ_{yy} kuchlanishlarning uzilishiga olib keladi. Grin singulyar nuqtada kuchlanishlarning uzilishi sodir bo‘lmasligini ko‘rsatib bergan.

2.2. Sirpanish chiziqlarini qurishning matritsa-operator usuli

Ilgari qayd qilib o‘tilganidek, sirpanish chiziqlari to‘rini to‘g‘ri va to‘g‘ri bo‘lmagan usul bilan qurish mumkin. Bu atamalar qat‘i emas, ularni yaqinlashuvchi tarzda quyidagicha talqin qilish mumkin. Bizning sirpanish to‘rining ichidagi qandaydir bir sohadagi bilimlarimizdan bevosita olinishi mumkin bo‘lgan yoki fizikaviy tekislikda yoki godograf tekisligida aniqlangan yechimlar to‘g‘ri

yechimlar deb ataladi. Eng oddiy holatlarda sirpanish chiziqlari oilasini shunday aniqlash mumkinki, bunda sirpanish chiziqlari to‘rining qolgan qismi ma’lum bo‘lgan bir jinsli kuchlangan holatga yoki sirpanish chiziqlarining markazlashgan yelpig‘ichlariga muvofiq bevosita qadamma-qadam quriladi.

Agar dastlabki sirpanish chiziqlarini qurish uchun zarur bo‘ladigan boshlang‘ich ma’lumotlarni ifodalash imkoniyati bo‘lmasa, u holda to‘liq to‘rni bevosita qurib bo‘lmaydi. Biroq masalaning yechimi muammosini matematik ifodalashlarning natijasi sifatida olish mumkin, bu uslub Kollinz va Devurst tomonidan ishlab chiqilgan. Bu uslub matritsa-operator uslubi nomini olgan va to‘g‘ri bo‘lmagan uslub bo‘lib hisoblanadi. To‘g‘ri va to‘g‘ri bo‘lmagan yechish uslublari tushunchalarini yanada aniqlashtirish uchun Xill, Grin, Aleksander va boshqalarning birinchi ishlarining tasnifi berilgan ishlarga murojaat qilish mumkin.

Yaqin vaqtlargacha sirpanish chiziqlari to‘ri Xill tomonidan ishlab chiqilgan. Agar chegara shartlari boshlang‘ich sirpanish chizig‘ining shaklini aniqlab bo‘lmaydigan holda berilgan bo‘lsa, u holda bu chiziqning shaklini topish uchun sinab ko‘rishlar va xatolar uslubidan foydalaniladi, so‘ngra uni bilish bilan butun sirpanish chiziqlari to‘ri qayta tiklanadi. Bu protsedura hisoblash ishlarida katta mehnat sig‘imini talab qiladi va mazkur uslubni qo‘llashning maqsadga muvofiqligini shubha ostiga qo‘yadi. Kitobxon misol sifatida Aleksanderning qaynoq prokatlash uchun grafik usul bilan yechish uslubini ko‘rib chiqishi va Grin tomonidan ishlab chiqilgan polosani cho‘zish va siqish masalalarining yechimlari bilan oradagi farqni aniqlashi mumkin.

1967-yilda Evin sirpanish chiziqlari to‘rini qurish uchun bir qator uslublarni taklif qilgan. Bu yondashuvda egrilik radiusi bir jinsli to‘planadigan ikkitalik darajali progressiya sifatida ifodalangan. Ikkita ortogonal sirpanish chiziqlarining segmentlaridan boshlab to‘rning qolgan qismini ham mazkur taqdim qilishga muvofiq progressiya ko‘rinishida aniqlash mumkin. Bu uslub to‘rni qadamma-qadam qurishga xos bo‘lgan xatolarni kamaytirish imkonini beradi, bu uslubdan foydalanishda birdan-bir mumkin bo‘lgan xatolar

progressiyaning uzilishlari bilan bog‘lanadi. Biroq bu xatolarni aniqlashtirish va nolga keltirish mumkin.

Garchi Evinning ishini maqsadi masalalarni to‘g‘ri usul bilan yechishda hisoblash uslublarini soddalashtirish bo‘lgan bo‘lsada, Kollinz va Devurst uchun sirpanish chizig‘ini progressiyani yoyish koeffitsiyentlarini uning egrilik radiusi bo‘yicha vektor kolonkasi sifatida taqdim qilish uchun bu ish boshlang‘ich ish bo‘lib xizmat qilgan.

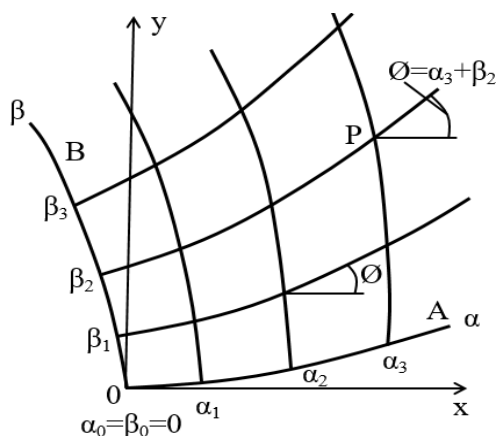
Bu usul keyinchalik Kollinz tomonidan rivojlantirilgan, unda aniqlanadigan matritsa operatorlari tizimi Xill tomonidan oddiy chizikli algebraik tenglamalardan foydalanish bilan ishlab chiqilgan to‘rlarning superpozitsiyasi tamoyilini geometrik tarzda ifodalash imkonini bergan. Bu matritsa-operator uslubi masalalarni to‘g‘ri bo‘lmagan usul bilan yechish uchun ayniqsa, qulay. Matritsa operatorlari uslubi yordamida to‘rning ichidagi munosabatlarni ham aniqlash mumkinligi sababli, noma‘lum boshlang‘ich sirpanish chizig‘ini aniqlash masalasi matritsani oddiy inversiyalash masalasiga aylangan. Bunday matritsa-operator uslublari masalalarni to‘g‘ri ifodalash imkonini beradi.

2.2.1. Sirpanish chiziqlarining umumiy tavsif tenglamalari

Yassi deformatsiya sharoitlarida mustahkamlanmaydigan qattiqplastik materialning deformatsiya o‘chog‘ida kuchlanishlar va tezliklarning taqsimlanish tenglamalari tabiatiga ko‘ra giperbolik tenglamalar bo‘ladi. Tavsiflar maksimal burchak deformatsiyalarining tezliklarini va Genki – Prandtl α va β -sirpanish chiziqlari ortogonal to‘rini aniqlaydi (2.6-rasm).

To‘rning ichidagi har qanday P nuqtani yoki Dekart koordinatalaridan (x, u) , yoki tavsifiy yoki egri chizikli koordinatalardan (α, β) foydalanish bilan aniqlash mumkin. Agar OA (α -chiziq) va OV (β -chiziq) egri chizikli o‘qlar bo‘lsa, u holda P nuqtada $F = \alpha + \beta$ ga teng bo‘lgan F burchak soat strelkasiga qarama-qarshi yo‘nalishda 0 nuqtadagi α -yo‘nalish va P nuqtadagi α -yo‘nalish o‘rtasidagi burchak sifatida aniqlanadi. P nuqtaning koordinatalari (α, β) - (α_3, β_3)

sifatida aniqlanadi, bu yerda α_3 – F ning P1 nuqta orqali o‘tadigan β -chiziq OA ning asosiy α -chizig‘ini kesib o‘tadigan nuqtadagi qiymatlari, β_2 – F ning P nuqta orqali o‘tadigan α -chiziq OV chiziqning asosiy β -chizig‘ini kesib o‘tadigan nuqtadagi qiymatlari. Shundan qilib, α - α -chiziq bo‘ylab, β esa - β -chiziq bo‘ylab doimiy bo‘ladi.



2.6-rasm. Genki – Prandtl α - va β -sirpanish chiziqlari to‘ri.

Sirpanish chizig‘ini yoki uning R , S egrilik radiuslari, yoki «harakatlanuvchi koordinatalar» yordamida taqdim qilish qulay bo‘ladi. α va β -chiziqlarning mos ravishda R va S bilan belgilanadigan egrilik radiuslari

$$\begin{cases} \alpha - \text{chiziq bo'ylab} & \frac{1}{R} = \frac{d\Phi}{dS_\alpha} = \frac{d\alpha}{dS_\alpha} \\ \beta - \text{chiziq bo'ylab} & \frac{1}{S} = -\frac{d\Phi}{dS_\beta} = -\frac{d\beta}{dS_\beta} \end{cases} \quad (2.13)$$

ifodalar bilan beriladi.

Bu yerda dS_α va dS_β – mos ravishda α - va β -chiziqlar bo‘yicha yoylarning differensiallari. Ularning ma‘nosi shundan iboratki, ular egri chizikli o‘qlarning o‘ng juftligini aniqlaydi (2.7-rasm,a). S va R keltirilgan egri chiziqlar uchun musbat, chunki $d\beta$ - dS_β uzunlikdagi yoy bo‘ylab slat strelkasi bo‘yicha harakatning natijasi sifatida manfiy bo‘ladi.

Quyida 2.7-rasm,b da egri chiziqli koordinatalar tizimining yo‘nalishini ko‘rsatuvchi o, u, x asosiy chiziqlar ko‘rsatilgan. So‘ngra Genki teoremasidan egrilik radiusi uchun tenglamalar quyidagi ko‘rinishga ega bo‘lishi kelib chiqadi:

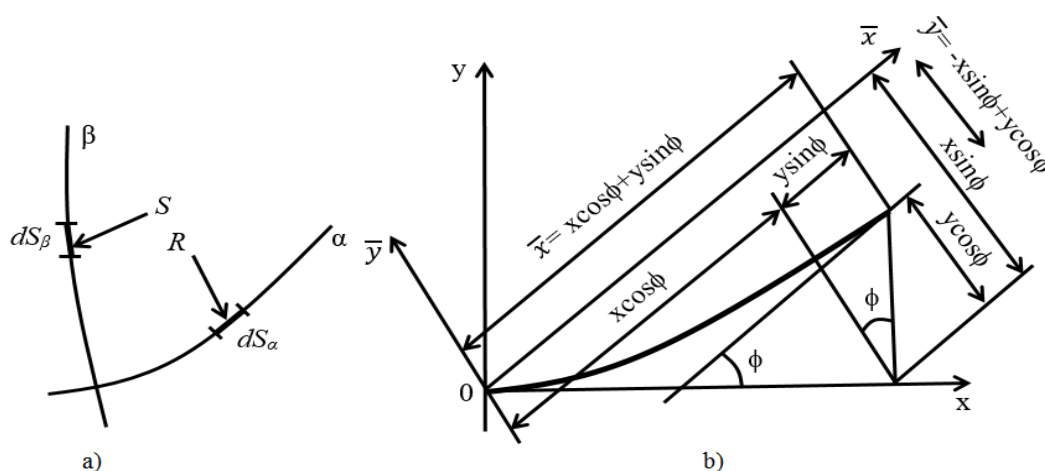
$$\begin{aligned} \alpha - \text{chiziq bo‘ylab } ds + R\delta F &= 0 \\ \beta - \text{chiziq bo‘ylab } dR + S\delta F &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

α -chiziqda $dF - d\alpha$, β -chiziq bo‘ylab esa $dF - d\beta$ ekanligi sababli (2.14) ga

$$\frac{dS}{d\alpha} + R = 0; \quad \frac{dR}{d\beta} - S = 0 \quad (2.15)$$

binoan (2.15) ni hosil qilish mumkin.

Genking ikkinchi teoremasi shunday deydi, boshqa oilaning sirg‘alish chiziqlarini kesib o‘tuvchi egrilik radiusi berilgan sirg‘alish chizig‘i bo‘ylab harakatlanish bilan bosib o‘tilgan masofaga teng bo‘lgan kattalikka o‘zgaradi.



2.7-rasm. Sirpanish chiziqlari: **a** - α - β egri chiziqli koordinatalar tizimi; **b** - $F=\alpha$ da Mixlinning harakatlanuvchi koordinatalar tizimi.

2.3. Metallarning plastik oqishini chaqiruvchi kuchlarni aniqlashning yaqinlashuvchi energetik uslubi

Yaqinlashuvchi energetik usulining mohiyati va mo'ljallanishi

Metallarning plastik oqishi masalasining to'liq yechimi kuchlanishlar va tezliklarning differensial tenglamalari, chegara shartlari, plastik shakl o'zgarishi energiyasining musbatligi shartini va plastikliklik shartini buzmasdan qattiq zonaga davom ettirish imkoniyatini qanoatlantirishi lozim.

Yaqinlashuvchi usullar uoki uslublarning afzalligi ularning nisbatan oddiyligidan, va shundan kelib chiqqan holda, ko'proq murakkab masalalarni yechish imkoniyatidan iborat. Biroq shuni nazarda tutish kerakki, yaqinlashuvchi uslublarni oshiqcha aniqlashtirish ularni to'liq yechimlarga nisbatan bunday asosiy afzallikdan mahrum qilishi mumkin.

Ko'rib chiqiladigan yaqinlashuvchi uslublar plastiklik nazariyasining teoremlariga asoslanadi, ularda soddalashtirilgan yechish bilan olingan plastik deformatsiyaning quvvati to'liq yechimdan olingan quvvat bilan solishtiriladi.

Teoremlardan biri plastik oqishning quvvati va kuchlari uchun pastki bahoni, ya'ni ko'rsatilgan kattaliklarning pasaytirilgan qiymatlarini beradi. Ikkinchi teorema yuqorigi bahoni, ya'ni bu kattaliklarning oshirilgan qiymatlarini beradi. Ba'zi bir hollarda teoremlar to'liq tenglamalar tizimini yechmasdan turib amaliy masalalarni yechish imkonini beradi. Biroq bunda metallarning plastik oqishi jarayonlarining ba'zi bir ahamiyatli xususiyatlari aniqlashtirilmaganligicha qolishi mumkin.

Metallarning plastik oqishining quvvati va kuchlarining pastki va yuqorigi baholari

Bu paragrafda S yuza bilan chegaralangan qattiqplastik metallarning yassi oqishini ko'rib chiqamiz. Yuzaning S_f qismida to'liq yechimni qanoatlantiradigan tashqi kuchlar F_i ga teng. Yuzaning

qolgan S_u qismida to‘liq yechimni qanoatlantiradigan siljishlar u_i ga teng. ω plastik sohaning ichida to‘liq yechimga javob beradigan kuchlanishlar va deformatsiya tezliklari mos ravishda σ_{ij} va e_{ij} ga teng. Berilgan holatda tashqi va ichki kuchlarning quvvatlarining tengligi quyidagi ko‘rinishga ega:

$$\int_S F_i u_i dS = \int_{S_u} F_i u_i dS + \int_{S_f} F_i u_i dS = \int_\omega \sigma_{ij} e_{ij} d\omega \quad (2.16)$$

Muvozanat va plastiklik shartlarini qanoatlantiradigan, biroq to‘liq yechimga mos kelmaydigan F_i^* kuchlar va σ_{ij}^* kuchlanishlarni kiritamiz. Bu kuchlar va kuchlanishlar uchun (2.17) tenglik quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\int_S F_i^* u_i dS = \int_{S_u} F_i^* u_i dS + \int_{S_f} F_i^* u_i dS = \int_\omega \sigma_{ij}^* e_{ij} d\omega \quad (2.17)$$

(2.16) tenglamadan (2.17) tenglamani ayirish bilan

$$\int_{S_u} (F_i - F_i^*) u_i dS = \int_\omega (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*) e_{ij} d\omega \quad (2.18)$$

ni olamiz.

Demak, haqiqiy kuchlanganlik holati uchun, ya’ni to‘liq yechimga javob beradigan kuchlanganlik holati uchun plastik deformatsiyaning dissipatsiya tezligi plastiklik sharti bilan yo‘l qo‘yiladigan boshqa qandaydir bir kuchlanganlik holatidagiga qaraganda katta bo‘ladi. Shundan kelib chiqqan holda, (2.19) tenglikning o‘ng qismi noldan katta bo‘ladi, yoki:

$$\int_{S_u} (F_i - F_i^*) u_i ds \geq 0 \quad (2.19)$$

Shundan kelib chiqqan holda

$$\int_{S_u} F_i^* u_i ds \leq \int_{S_u} F_i u_i ds \quad (2.20)$$

(2.21) tenglamadan kuchlarning pastki bahosi to'g'risidagi teorema kelib chiqadi: yuzaning siljishlar tezligi belgilangan qismiga qo'yilgan, statik yo'l qo'yiladigan tashqi kuchlar tizimi bilan rivojlantiriladigan quvvat to'liq yechimga mos keladigan kuchlar bilan rivojlantiriladigan quvvatdan kichik bo'ladi, yoki:

$$F_I^* < F_i \quad (2.21)$$

Yuzaning siljishlar tezligi belgilangan qismiga qo'yilgan, statik yo'l qo'yiladigan tashqi kuchlar tizimi bilan rivojlantiriladigan kuch to'liq yechimga mos keladigan kuchlar bilan rivojlantiriladigan kuchdan kichik bo'ladi.

Shunday qilib, kuchlanishlar uchun ikkita (2.19), (2.20) tenglamalar tizimining yechimi, (2.21), (2.22) tezliklar tenglamalaridan qat'i nazar, kuchlarning ko'rsatilgan to'rtta tenglamalar tizimining birgalikdagi yechimiga mos keladigan pastki bahosini beradi. Kuchlanishlar uchun ikkita (2.19), (2.20) tenglamalar tizimining yechimiga nolli tezliklarga mos keladigan yechim, ya'ni oqishning boshlanishiga javob beradigan yechim sifatida qarash mumkin.

Aytaylik, yuzaning plastik sohani chegaralaydigan S_j qismida F_i tashqi kuchlar ma'lum bo'lsin, yuzaning qolgan S_u qismida esa to'liq tenglamalar tizimi va chegara shartlarini qanoatlantiradigan u_i siljishlar tezliklari ma'lum bo'lsin. ω plastik sohaning ichida σ_{ij} kuchlanishlar va ularga mos keladigan ε_i Deformatsiya tezliklari vujudga keladi. Aytaylik, ω plastik sohaning ichida unda (u_i) tezliklarning tangentsial uzilishlari mavjud bo'lgan va P_s kuchlar qo'yilgan l yuza mavjud bo'lsin.

Yuqorida ko'rsatilgan kuchlar, kuchlanishlar va tezliklarning haqiqiy kattaliklari bilan bir qatorda kinematik mumkin bo'lgan – chegara shartlari va siqilmaslik shartlariga javob beradigan u_i^* va ε_{ij} siljishlar va deformatsiyalar tezliklarini ko'rib chiqamiz. Plastik potensial tenglamasiga ko'ra, kinematik mumkin bo'lgan tezliklarga umumiy holda muvozanat tenglamasini qanoatlantirmaydigan σ_{ij} kuchlanishlar va R_s^* kuchlar mos keladi. Lagranj tenglamasiga muvofiq:

$$\int_{\omega} \sigma_{ij} e_{ij}^* d\omega + \int_l P_S[u^*] dl = \int_f F_i u_i^* ds + \int_{S_u} F_i u_i ds \quad (2.22)$$

Plastik deformatsiya energiyasi dissipatsiyasining maksimal quvvati tamoyiliga muvofiq (2.5) va (2.6) tenglamalardan

$$\sigma_{ij}^* e_{ij}^* \geq \sigma_{ij} e_{ij}^* \quad (2.23)$$

(2.24) tenglama

$$\int_{S_u} F_i u_i ds \leq \int_{\omega} \sigma_{ij}^* e_{ij} d\omega + \int_l P_S^*[u^*] dl + \int_{S_f} F_i u_i^* ds \quad (2.24)$$

kelib chiqadi.

(2.7) tengsizlik kinematik mumkin bo'lgan kuchlar uchun yuqorigi bahoni beradi. Chegara shartlari va siqilmaslik shartiga javob beradigan tezliklar maydoni asosida hisoblangan kuchlar tezliklar va kuchlanishlar uchun tenglamalar tizimini to'liq yechimiga mos keladigan kuchlardan katta bo'ladi.

Pastki va yuqorigi bahoni hisoblash tezliklar va kuchlanishlar uchun to'liq tenglamalar tizimini yechmasdan turib, haqiqiy kuch unda joylashadigan chegaralarni aniqlash imkonini beradi. Aynan kinematik mumkin bo'lgan tezliklar maydoni tufayli minimal yuqorigi bahoni aniqlash va shu tariqa yechimni aniqlashtirish mumkin. Masalalarni kinematik yechish to'liq va statik yechishlarga qaraganda anchagina oson. Agar kinematik mumkin bo'lgan maydon uning ichida tezliklar maydoni bir jinsli bo'lib hisoblanadigan, yuzaning S_f qismi esa kuchlardan holi bo'ladigan bloklardan tashkil topgan bo'lsa, ayniqsa oddiy yechimlar olinadi. Bu holda ushbu (2.25) tenglama quyidagi ko'rinishni qabul qiladi:

$$\int_{S_u} F_i u_i ds \leq \int_l P_S^*[u_i] dl \quad (2.25)$$

v , tezlik bilan ilgarilanma-qaytar harakat qiladigan uskuna bilan amalga oshiriladigan plastik deformatsiya holatida tashqi kuchlarning quvvati uchun yuqoridagi tenglama ifodasi (2.26) ko'rinishga

$$\int_{S_u} F_i u_i ds = qblv \quad (2.26)$$

ega bo'ladi.

Bu yerda q – solishtirma kontakt kuchi; b – kontakt yuzasining uskunaning harakat yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan tekislikka proyeksiyasining kengligi;

t – harakat yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan yo'nalishda kontakt yuzasining o'lchami.

(2.8) tengsizlikning o'ng qismi (2.27) tenglama ko'rinishiga

$$\int_l P_S^*[u_i] dl = kt \Sigma v_i l_i \quad (2.27)$$

ega bo'ladi.

bu yerda k –plastik doimiy; l_i – bloklarning alohida chegaralari-ning uunligi; v_i – bloklarning chegaralari bo'ylab oqish tezliklarining uzilishi.

(2.8) – (2.10) tenglamalaridan (2.28) tenglama

$$\frac{q}{2k} \leq \frac{\Sigma v_i l_i}{2bu} \quad (2.28)$$

kelib chiqadi.

b va v ni birga teng deb qabul qilish bilan formulaga ko'proq oddiy ko'rinishli (2.29) tenglamani berish mumkin:

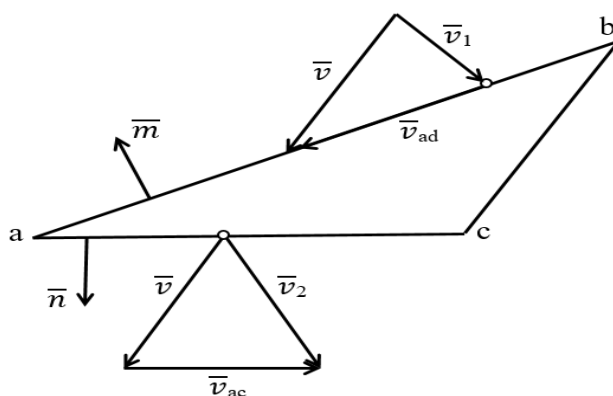
$$\frac{q}{2k} \leq 0,5 \Sigma v_i l_i , \quad (2.29)$$

bu yerda v_i va l_i – o'lchovsiz tezliklar va uzunlik.

Yuqorida ko'rsatib o'tilganidek, tezliklarning uzilish chiziqlari kesishadigan nuqtaning atrofida tezliklarning uzilishining vektor yig'indisi nolga teng bo'ladi. Bu kinematik mumkin bo'lgan tezliklar maydonining godografini qurish uchun grafostatik uslublarni qo'llash

imkonini beradi, bunda farq shundan iborat bo‘ladiki, biz o‘zak shaklning o‘rniga sirpanish chiziqlarining uzilishli to‘riga, Maksvellning kuch diagrammasining o‘rniga esa – tezliklar godografiga ega bo‘lamiz.

Shuni qayd qilish lozimki, Maksvell kuch diagrammalaridan farqli o‘laroq, sirpanish chiziqlari maydonining tashqi chegaralarida tezliklar yopiq figura hosil qilmaydi. 2.8-rasmda abc uchburchak blok ko‘rsatilgan, u uning ichida tezliklar maydoni (sirpanish chiziqlari maydoni) bir jinsli bo‘ladigan sohani chegaralaydi.



2.8-rasm. Bir jinsli sirpanish chiziqlari maydoniga ega bo‘lgan sohani chegaralaydigan uchburchak blokining ko‘rinishi.

abc uchburchakka tashqi bo‘lgan tezliklar maydonining v_i tezlik vektori a_b chegarada vab tezlikning uzilish vektori bilan qo‘shilish bilan b_s vektorga kollinear bo‘lgan v vektorni hosil qiladi. ab chegara orqali v_i vektorning L_1 oqimi

$$-L_1 = \bar{u}_1 \bar{m} ab = \bar{u} \bar{m} ab = \psi \bar{bc} \cdot \bar{m} ab = \psi f \quad (2.30)$$

ga teng bo‘ladi.

Bu yerda \bar{m} – ab ga ortogonal bo‘lgan bittalik vektor; ψ – doimiy koeffitsiyent; f – uchburchakning ikkilangan maydoni.

\bar{v} vektor as chegarada \bar{v}_{ac} uzilish tezligi bilan qo‘shilish bilan \bar{v}_2 vektorni hosil qiladi. as tomon orqali vektorning \bar{v}_2 oqimi quyidagiga teng bo‘ladi:

$$L_2 = v_2 \text{ nac} = v \text{ nac} = \psi bc \cdot \text{nac} = \psi f \quad (2.31)$$

Bu yerda n – as ga ortogonal bo‘lgan bittalik vektor.

(2.13) va (2.14) ifodalarni taqqoslash bilan $L_1 + L_2 = 0$ ni topamiz.

Kinematik yo‘l qo‘yiladigan sirpanish chiziqlari maydonini tarkib toptiradigan uchburchaklar tizimi to‘g‘risidagi mulohazani takrorlash bilan quyidagini topamiz:

$$\sum_{i=0}^n L_i = 0 \quad (2.32)$$

Shunday qilib, tezliklar uchun Maksvell o‘zaro diagrammalarini qurishda tashqi tezliklar oqimining nolga tengligi avtomatik tarzda bajariladi va tezliklar maydoni to‘g‘ri qurilganligini tekshirish uchun xizmat qilishi mumkin.

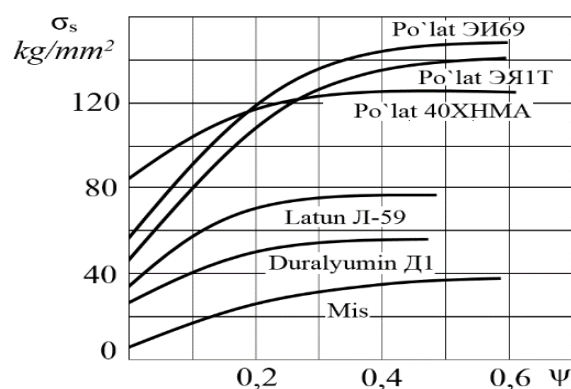
2.4. Plastik deformatsiyaning haqiqiy kuchlanish va mustahkamlanish egri chiziqlari

Plastik deformatsiya jarayonida deformatsiyaga qarshilikning o‘zgarishini tavsiflash uchun deformatsiyaga qarshilik ko‘rsatkichi sifatida odatda haqiqiy kuchlanish deb ataluvchi kuchlanish qabul qilinadi, u o‘zida namunani chiziqli cho‘zishda har bir deformatsiya momentida amaldagi kuchning namunaning ko‘ndalang kesimi yuzasiga nisbatidan hosilani taqdim qiladi (haqiqiy kuchlanishning qiymatini siqilishga sinovlar ma’lumotlari bo‘yicha ham topish mumkin). σ_s haqiqiy kuchlanish mohiyatiga ko‘ra deformatsiyada mustahkamlanish oladigan materilning oquvchanlik chegarasi bo‘lib hisoblanadi va uni oquvchanlik kuchlanishi deb atash mumkin.

Namunalar shakl o‘zgarishining deformatsiya darajasini baholaydigan ko‘rsatkichlari cho‘zishda namunaning nisbiy uzayishi $\varepsilon = \iota - \iota_0 / \iota_0$ namuna yoki ko‘ndalang kesim maydonining nisbiy kamayishi $\psi = F_0 - F / F_0$, namuna bo‘lib hisoblanadi, bu yerda ι_0 va F_0 – namunaning hisobiy uzunligi va uning hisobiy ko‘ndalang kesimi maydonining boshlang‘ich qiymatlari, ι va F – berilgan deformatsiya

momentida namunaning uzunligi va ko'ndalang kesim maydonining joriy qiymatlari.

Oquvchanlik kuchlanishining deformatsiya darajasiga bog'lanish grafiklari mustahkamlanish egri chiziqlari deb ataladi. Ba'zi bir metallar va qotishmalar uchun mustahkamlanish egri chiziqlarining texnologik xarakteri 2.9-rasmda keltirilgan.



2.9-rasm. Turli metallar va qotishmalar (po'latlar va rangli metallar) uchun mustahkamlanish egri chiziqlarining asosiy xarakterlari.

Keltirilgan mustahkamlanish egri chizig'idan ko'rinib turibdiki (2.9-rasmga qarang), oquvchanlik kuchlanishining ko'proq shiddatli ortishi deformatsiyaning boshlang'ich bosqichida bo'ladi. Deformatsiya darajasining ba'zi bir qiymatlarida esa (mustahkamlanish ostonasi) keyingi deformatsiyalash oquvchanlik kuchlanishi kattaligining sezilarli o'zgarishini chaqirmaydi.

Qabul qilingan deformatsiya darajasi ko'rsatkichiga bog'liq ravishda birinchi va ikkinchi turdagi mustahkamlanish egri chiziqlari ajratiladi. Birinchi turdagi mustahkamlanish egri chiziqlarida oquvchanlik kuchlanishi nisbiy uzayishga bog'liq ravishda beriladi, ikkinchi turdagi mustahkamlanish egri chiziqlarida esa nisbiy torayishga bog'liq ravishda beriladi. Demak, 2.9-rasmdan ko'rinib turibdiki, oquvchanlik kuchlanishining deformatsiyaga bog'lanishi murakkab xarakterga ega.

Mustahkamlanishning deformatsiya jarayoniga ta'sirini hisobga oladigan yaqinlashuvchi bog'lanishlarni qidirishda metallarga bosim bilan ishlov berish nazariyasida ko'pincha mustahkamlanish egri

chizig'ini chiziqli approksimatsiyalashdan foydalaniladi. Oquvchanlik kuchlanishining deformatsiyaga bog'liq ravishda o'zgarishini yaqinlashuvchi tarzda tavsiflovchi to'g'ri chiziq sifatida ko'proq chiziqli cho'zishda bir tekis uzayish bosqichining tugashi va bo'yin hosil bo'lishining boshlanishiga mos keluvchi nuqtadan mustahkamlanish egri chizig'iga o'tkazilgan urinma qabul qilinadi.

Ma'lumki, bu momentga kuch-deformatsiya yoki shartli kuchlanish-deformatsiya egri chizig'idagi maksimum mos keladi, bu yerda shartli kuchlanish deganda P cho'zish kuchini F_0 namuna ko'ndalang kesimning boshlang'ich maydoniga bo'lishdan olingan hosila tushuniladi, shunda

$$\sigma_{\text{shartli}} = P / F_0 \text{ namuna ni olamiz} \quad (2.33)$$

Shu bilan birgalikda har qanday deformatsiya momentida kuchni σ_s oquvchanlik kuchlanishi va F namunaning berilgan deformatsiya momentidagi haqiqiy ko'ndalang kesim maydoni orqali ifodalash mumkin:

$$P = \sigma_s F \quad (2.34)$$

Shu tenglamani differensiallash bilan

$$dP = \sigma_s dF + F d\sigma_s \text{ ni hosil qilamiz.} \quad (2.35)$$

(2.35) ifodadan ko'rinib turibdiki, cho'zish jarayonida mustahkamlanish kuchning ortishiga ko'maklashadi ($d\sigma_s$ - musbat), ko'ndalang kesim maydonining kamayishi esa kuchning kamayishiga ko'maklashadi (dF - manfiy). Bir tekis uzayish bosqichida kuch ortadi, bo'yin hosil bo'la boshlashi bilan ko'ndalang kesim maydonining kamayishi ustunlik qiladi va kuch kamayadi. Bo'yin hosil bo'lishining boshlanishi mustahkamlanish hisobiga kuchning ortish shiddati absolyut qiymat bo'yicha ko'ndalang kesim maydonining kamayishi ("barqaror" deformatsiya bosqichining tugashi) hisobiga kuchning kamayish shiddatiga teng bo'lgan momentga mos keladi:

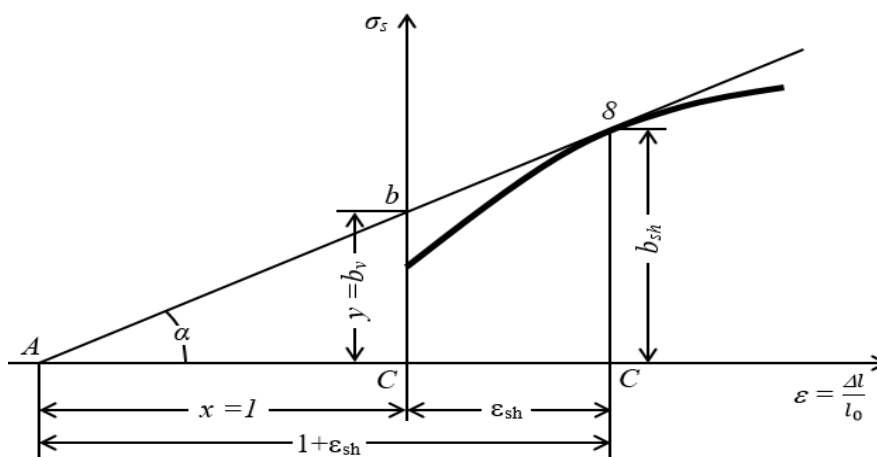
$$dP_{bo'yin} = \sigma_{bo'yin} dF_{bo'yin} + F_{bo'yin} d\sigma_{bo'yin} = 0 \quad (2.36)$$

(2.35) tenglikdan foydalanish bilan, mustahkamlanish egri chiziqlarining koordinata o'qlarida ko'rsatilgan urinma bilan kesiladigan kesmalarning kattaliklari bilan tavsiflanadigan xususiyatlarini aniqlash mumkin, ularni bilish cho'zilishga standart sinovlardan o'tkazish ma'lumotlari bo'yicha ularni qurishni osonlashtiradi.

Endi birinchi turdagi mustahkamlanish egri chizig'ini ko'rib chiqamiz (2.10-rasm). Bo'yin hosil bo'lguncha har qanday deformatsiya momenti uchun oquvchanlik kuchlanishini (2.36) munosabatdan, $\sigma_{shartli}$ kuchlanish va F ko'ndalang kesim maydonining joriy qiymatlari bo'yicha aniqlash mumkin:

$$\sigma_s = \sigma_{shartli} F_{namuna} / F \quad (2.37)$$

Bu munosabatlar bo'yicha birinchi turdagi mustahkamlik egri chiziqlari hosil bo'lgan. Cho'zilishga sinovlarga namunada bo'yin hosil bo'lishining boshlanishiga mos keladigan momentda shartli kuchlanish σ_v oquvchanlik chegarasiga teng bo'ladi (cho'zish kuchi maksimal kattalikka ega bo'ladi).



2.10-rasm. Birinchi turdagi mustahkamlanish grafigining egri chizig'i.

Bu momentga mos keladigan $\sigma_{bo'yin}$ oquvchanlik kuchlanishidan foydalanish quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\sigma_{\text{bo'yin}} = \sigma_v F_o / F_{\text{bo'yin}} \quad (2.38)$$

bu yerda $F_{\text{bo'yin}}$ – namunani cho‘zishda unda bo‘yin hosil bo‘lish momentida ko‘ndalang kesim maydoni.

Shunday qilib, bo‘yin hosil bo‘lishi boshlanishiga mos keladigan nuqtada mustahkamlanish egri chizig‘iga o‘tkazilgan urinma deformatsiya o‘qining manfiy qismida son jihatidan birga teng bo‘lgan kesmani kesadi, oquvchanlik kuchlanishlari o‘qida esa – son jihatidan mustahkamlik chegarasiga teng bo‘lgan kesmani kesadi. 2.11-rasmda ikkinchi turdagi mustahkamlanish egri chiziqlarining xususiyatlari keltirilgan. Cho‘zishda namunaning ko‘ndalang kesimi maydonining nisbiy kamayishi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\begin{aligned} \psi &= F_o - F / F_o, \text{ bundan} \\ F &= F_o (1-\psi) \text{ va } dF = - F_o d\psi \end{aligned} \quad (2.39)$$

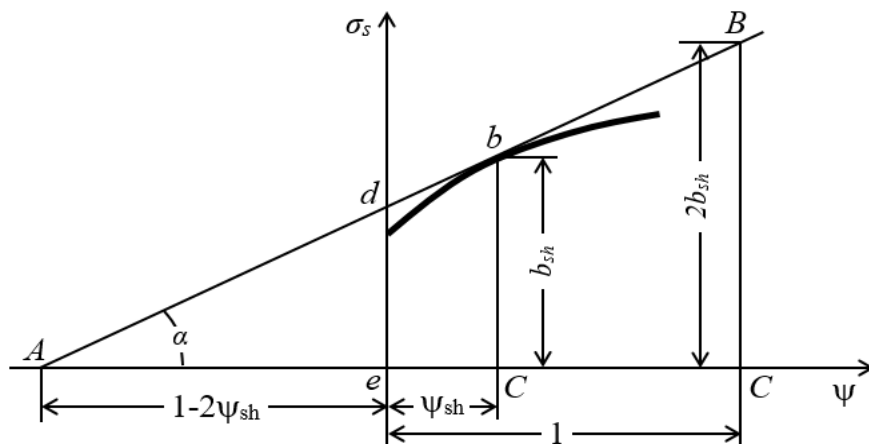
kelib chiqadi.

$\psi = \psi_{\text{bo'yin}}$ va $d\psi = d\psi_{\text{bo'yin}}$ (2.36) bo‘lganda (2.38) tenglamadan F va dF ning bo‘yin hosil bo‘lishi boshlanishiga mos keluvchi qiymatlarini o‘rniga qo‘yish bilan quyidagi (2.40) nisbatni olishimiz mumkin:

$$d\sigma_{\text{bo'yin}} / d\psi_{\text{bo'yin}} = \sigma_{\text{bo'yin}} / 1 - \psi_{\text{bo'yin}} \quad (2.40)$$

$d\sigma_{\text{bo'yin}} / d\psi_{\text{bo'yin}}$ nisbat bo‘yin hosil bo‘lishi boshlanishiga mos keluvchi nuqtada mustahkamlanish egri chizig‘iga o‘tkazilgan urinmaning α egilish burchagining tangensi bo‘lib hisoblanadi. Bundan $\text{tg}\alpha = \sigma_{\text{bo'yin}} / 1 - \psi_{\text{bo'yin}}$ bo‘lishi, abstsissalar o‘qiga perpendikulyarda, $\psi = 1$ nuqtada esa – $2\sigma_{\text{bo'yin}}$ ga teng bo‘lgan kesma hosil bo‘lishi kelib chiqadi. Shunday qilib, bo‘yin hosil bo‘lishi boshlanishiga mos keluvchi nuqtada mustahkamlanish egri chizig‘iga o‘tkazilgan urinma abssissalar o‘qiga perpendikulyarda $\psi = 1$

nuqtada son jihatidan bo‘yin hosil bo‘lishi boshlanadigan momentdagi oquvchanlik kuchlanishining ikkilangan qiymatiga teng bo‘lgan kesmani kesadi.



2.11-rasm. Ikkinchi turdagi mustahkamlanish egri chiziqlarining grafikaviy xususiyatlari.

Asosiy mustahkamlanish egri chiziqlaridan metallarga bosim bilan ishlov berishda mustahkamlanishning deformatsiyalash uchun zarur bo‘ladigan kuchlariga ta‘sirining xarakteri va darajasini tahlil qilish uchun foydalanish mumkin.

Mustahkamlanishning deformatsiya kuchining kattaligi va deformatsiyalanadigan jismda kuchlanishlarning taqsimlanishiga ta‘sirini aniqlash masalasini analitik yechishni osonlashtirish uchun mustahkamlanish egri chizig‘ini oquvchanlik kuchlanishini deformatsiya darajasi bilan bog‘laydigan tenglama ko‘rinishida taqdim qilish zarur bo‘ladi.

Oquvchanlik kuchlanishining deformatsiya darajasiga funktsionl bog‘lanishini soddalashtirish maqsadida mustahkamlanish egri chizig‘i to‘g‘ri chiziq yoki darajali egri chiziq bilan almashtiriladi.

Endi mustahkamlanishning oquvchanlik kuchlanishining kattaligiga ta‘sirini yaqinlashuvchi tarzda tasdiqlaydigan to‘g‘ri chiziq sifatida bo‘yin hosil bo‘lishi boshlanishiga mos keladigan nuqtada mustahkamlanish egri chizig‘iga o‘tkazilgan urinma qabul qilingan holatni ko‘rib chiqamiz. Bunda asosiy σ_s – ψ koordinatalarda bu to‘g‘ri chiziqning tenglamasini quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\sigma_s = \sigma_{\text{nam oquvch}} + \Pi\psi \quad (2.41)$$

bu yerda $\sigma_{\text{nam oquvch}}$ – ekstrapolirlangan oquvchanlik chegarasi ($\psi = 0$ da ordinatalar o‘qida urinma bilan kesiladigan kesma); P – to‘g‘ri chiziqning abstsissalar o‘qiga egilish burchagining tangensi bo‘lib hisoblanadigan mustahkamlanish moduli.

(2.7) va (2.6) munosabatlardan foydalanish, shuningdek, $\sigma_{\text{bo‘yin}}$ = $\sigma_V F_{\text{o namuna}} / F_{\text{bo‘yin}}$ ekanligini hisobga olish bilan

$$P = \sigma_V / (1 - \psi_{\text{bo‘yin}})^2 \quad (2.42)$$

ni olish mumkin.

σ_s kattalikni Ade uchburchakdan topish mumkin (2.11-rasm) va $\sigma_{\text{nam oquvch}}$ ni aniqlash formulasi $\text{tg}\alpha = P$ ni aniqlaydigan (2.42) ifodadan foydalanish bilan

$$\sigma_{\text{nam oquvch}} = \sigma_V (1 - 2\psi_{\text{bo‘yin}}) / (1 - \psi_{\text{bo‘yin}})^2 \quad (2.43)$$

ko‘rinishni qabul qilishi mumkin.

(1.8) formula bo‘yicha hisoblash bilan aniqlangan σ_s kattaliklar ψ ning $\psi = \psi_{\text{bo‘yin}}$ dan tashqari barcha qiymatlarida mustahkamlanish egri chiziqlari bo‘yicha aniqlanadigan σ_s qiymatlardan biroz katta bo‘ladi, bunda bu kattaliklar o‘rtasidagi farq kichik deformatsiya darajalarida ayniqsa, sezilarli bo‘ladi ($\psi = \psi_{\text{bo‘yin}}$).

Birinchi turdagi mustahkamlanish egri chizig‘i uchun xuddi shunday ifodalarni $\sigma_s = c (\epsilon)$ chiziqli bog‘lanish uchun ham olish mumkin. Oquvchanlik kuchlanishining ψ kattalikka haqiqiy bog‘lanishini

$$\sigma_s = C\psi^n \quad (2.44)$$

ko‘rinishdagi darajali funksiya ko‘proq aniq aks ettiradi.

C va n ning qiymatlarini quyidagicha aniqlash mumkin: $\psi = \Psi_{bo'yin}$ da $\sigma_s = \sigma_{bo'yin}$, shundan kelib chiqqan holda, $C = \sigma_{bo'yin} / \psi n_{bo'yin}$. C ning topilgan qiymatini (2.44) tenglama o'rniga qo'yish bilan

$$\sigma_s = \sigma_{bo'yin} / \psi n_{bo'yin} \psi n \quad (2.45)$$

ni olamiz.

(2.45) ifodani differensiallash va $dP = 0$ tenglashtirish bilan (bo'yin hosil bo'lishi boshlanishi momenti uchun) $n = \Psi_{bo'yin} / 1 - \Psi_{bo'yin}$ ni topamiz.

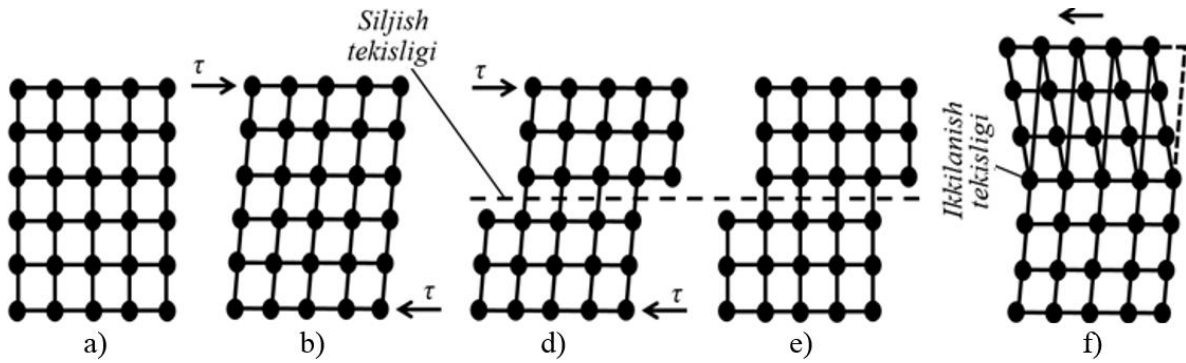
Mustahkamlanish egri chizig'ini boshqa koordinatalarda approksimatsiyalaydigan tenglamalarni ham xuddi shu tarzda topish mumkin.

Metallarga bosim bilan ishlov berish nazariyasida oquvchanlik kuchlanishi koordinatalarida qurilgan mustahkamlanish egri chiziqlari – logarifmik deformatsiya egri chiziqlaridan (namunaning oxirgi o'lchamining boshlang'ich o'lchamiga nisbatining natural logarifmi bilan ifodalanadi) yoki kuchlanishlarning shiddati koordinatalarida qurilgan – deformatsiyalarning shiddati egri chiziqlaridan ham foydalaniladi.

2.5. Sirpanish va egizaklanish bilan plastik deformatsiyalanish

Ko'pgina hollarda plastik deformatsiyalanish sirpanish va egizaklanish bilan amalga oshadi. Masalan, urinma kuchlanishlarning ta'siriga tortilgan kub strukturali metallning elastik va plastik deformatsiyasining sxematik tasviri 2.12-rasmda keltirilgan.

Sirpanish. Kristall panjarada sirpanish atomlar ko'proq zich o'ralgan – siljishga qarshilik eng kichik bo'lgan tekisliklar va yo'nalishlar bo'yicha kechadi. Bu shu bilan izohlanadiki, bunda qo'shni atom tekisliklari o'rtasidagi masofa, ya'ni ular o'rtasidagi bog'lanish eng kichik bo'ladi. Sirpanish tekisliklari va bu tekisliklarda yotadigan sirpanish yo'nalishlari sirpanishlar tizimini hosil qiladi. Metallarda bitta yoki bir paytning o'zida bir nechta sirpanishlar tizimi amal qilishi mumkin.



2.12-rasm. τ siljish kuchlanishi ta'siri ostida metallning elastik va plastik deformatsiyasining sxematik tasviri: **a** - boshlang'ich kristall; **b** - elastik deformatsiya; **d** - elastik deformatsiyaning ortishi va plastiklik chegarasidan oshiq yuklama berilganda sirpanish bilan chaqiriladigan plastik deformatsiyaning paydo bo'lishi; **e** - siljish paydo bo'lishini shartlaydigan kuchlanish (siljishdan keyin qoldiq deformatsiya saqlangan); **f** - egizak hosil bo'lishi.

Ma'lumki, markazlashgan qirrali kub panjaraga ega bo'lgan metallar – Fe γ , Cu, Al va boshqalarda – sirpanish oktaedrning (111) tekisliklari bo'yicha va kub qirrasining (110) diagonali yo'nalishida sodir bo'ladi.

Hajmi-markazlashgan kub panjarali metallarda – Fe α , Mo, V va boshqalarda – sirpanish (110), (112) va (123) tekisliklar bo'yicha va kubning (111) kenglikdagi yo'nalishida ko'proq oson amalga oshadi.

Hajmi-markazlashgan kub panjarada (2.13-rasm) atom tekisliklarining kristallografik belgilanishlari ko'rsatilgan.

Kenglikdagi kristall panjaralarda atom tekisliklarining (atomlar orqali o'tadigan tekisliklarning) holatini belgilash uchun h , R , u indekslardan foydalaniladi, ular o'zida o'qlarning koordinata o'qlarida berilgan tekislik bilan kesiladigan kesmalariga teskari kattaliklar bo'lib hisoblanadigan uchta butun ratsional sonlarni taqdim qiladi.

O'qlar bo'ylab uzunlik birliklari elementar yacheykalarining qovurg'alarining uzunligiga teng qilib tanlanadi. Bu sonlar dumaloq qavslarga olinadi. Buning uchun tekisliklarni belgilashlarga misollar keltiramiz va kub tekisligi uchun boshlang'ich indekslni o'rnatamiz.

Kubning har bir tekisligi (2.13-rasm,a) faqatgina bitta o'qni kesib o'tadi va bunda kesiladigan kesmalar $(1, \infty, \infty)$; $(\infty, 1, \infty)$; $(\infty, \infty, 1)$ ga teng bo'ladi. Kesiladigan kesmalarning teskari kattalıkları mos ravishda $(1, 0, 0)$; $(0, 1, 0)$; $(0, 0, 1)$ ga teng bo'ladi. (h, R, ι) tekislik indeksleri (100) , (010) , (001) bo'ladi.

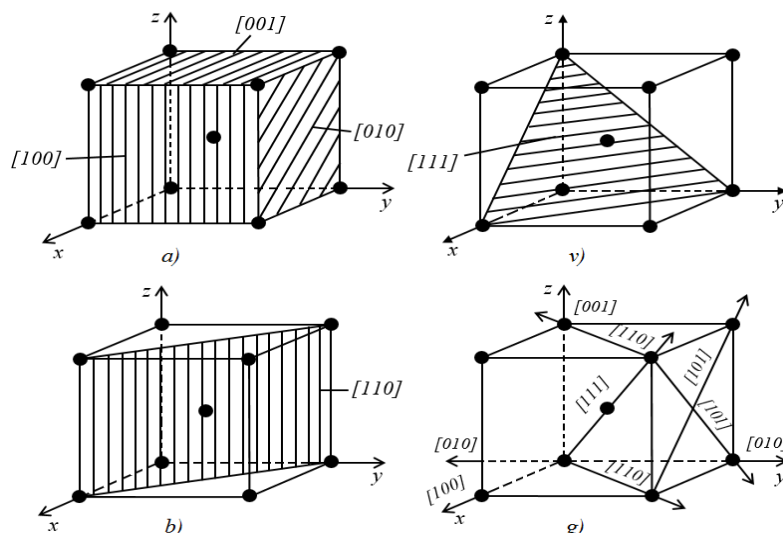
Indeksning ustidagi minus belgisi manfiy kesmalarga mos keladi. Kub panjarada kub tekisliklaridan tashqari (2.13-rasm,a) oktaedr tekisligi (111) (2.13-rasm,v) va rombik dodekaedr tekisligi (110) (2.13-rasm,b) ajratiladi. Shuni nazarda tutish kerakki, indekslar qandaydir bir bitta tekislikni emas, butun parallel tekisliklar guruhini tavsiflaydi, shunda ular figurali qavslarga olinadi (kubning oltita kristallografik ekvivalent tekisliklar jamlanmasi qaysidir bir tekislikning figurali qavslarga olingan indeksleri bilan belgilanadi, masalan, $\{100\}$ yoki $\{100\}$ va boshqalar, oktaedrning sakkizta kristallografik ekvivalent tekisliklari jamlanmasi esa mos ravishda $\{111\}$ va boshqalar bilan belgilanadi).

2.13-rasm,g da kub panjarada asosiy yo'nalishlarning indeksleri ko'rsatilgan. Panjara o'qlarining indeksleri $x - [100]$, $y - [010]$ va $z - [001]$, kenglikdagi diagonalning indeksleri esa $[111]$.

Chetlari zich o'ralgan geksagonal (CHZG) panjarali metallar – Mg, Zn, Be va boshqalarda – sirg'alish bazis tekisligi bo'yicha sodir bo'ladi. Kub kristall panjarali metallar (Chetlari zich o'ralgan geksagonal (CHZG) panjarali va hajmli-markazlashgan kub (HMK) panjarali) yuqori plastiklikka ega, chunki ularda sirpanish ko'p yo'nalishlarda sodir bo'ladi.

Geksagonal zich o'ralgan strukturali metallar kamroq plastik va shu sababli shtamplash, prokatlash va boshqa deformatsiya turlariga kub strukturali metallarga qaraganda qiyinroq beriladi.

Asosiy sirpanish jarayonini kristallning bir qismini boshqasiga nisbatan bir paytda siljishi sifatida tasavvur qilmaslik lozim. Bunday qattiq yoki sinxron siljish deformatsiya jarayoni amalda kechadigan kuchlanishlardan yuzlab va hatto minglab marta oshiq bo'ladigan kuchlanishlarni talab qiladi.



2.13-rasm. Hajmi markazlashgan kub panjarada (HMK) kristallografik tekisliklarning (a–v) va yo‘nalishlarning (g) asosiy indeksleri.

Egizaklanish. K12 va G12 zich o‘ralgan panjaraga ega bo‘lgan metallarning plastik deformatsiyalanishi sirpanishdan tashqari egizaklanish bilan ham sodir bo‘lishi mumkin, bunda deformatsiyalanish kristallarning bir qismini egizaklash tekisligi deb ataluvchi tekislikka nisbatan birinchi qismga simmetrik bo‘lgan holatga qaratishga keltiriladi. Egizaklashda, xuddi sirpanishdagi kabi, dislokatsiyalarning kristall bo‘ylab o‘tishi kuzatiladi. Egizaklanish sirpanishga qaraganda kamroq ahamiyatga ega. Chetlari zich o‘ralgan geksagonal (CHZG) panjarali va hajmli-markazlashgan kub (HMK) panjarali metallarda egizaklanish faqatgina deformatsiyaning katta darajalari va past qizdirish haroratlarida kuzatiladi.

2.6. Metallarning yassi deformatsiyasi, yassi kuchlanganlik holati va deformatsiyalarni bartaraf qilish usullari

Uzun silindrik yoki prizmatik jismda yassi deformatsiya qizdirish harorati uning ko‘ndalang kesimi bo‘ylab o‘zgarganda, biroq silindr yoki prizmaning o‘qiga (z o‘q) parallel chiziqlar bo‘yicha o‘zgarmaganda vujudga keladi. Bu holda T - z ga bog‘liq bo‘lmaydi.

Agar (2.46) formulalar bilan aniqlanadigan, nolga teng bo'lgan deformatsiyalarga olib keladigan kuchlangan holatdan yana kelib chiqadigan bo'lsak, u holda zarur bo'ladigan hajmiy kuchlar (2.47) bog'lanishlar bilan aniqlanadi, endi bu yerda $Z = 0$ deb qabul qilish lozim bo'ladi, jismning yuzasiga esa, uning yon tomonlarini ham o'z ichiga olgan holda, (2.48) formula bo'yicha aniqlanadigan bosim qo'yilishi lozim bo'ladi.

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p = -\frac{\alpha ET}{1-2\nu}, \quad \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.46)$$

$$X = \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Y = \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad Z = \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.47)$$

$$\frac{\alpha ET}{1-2\nu} \quad (2.48)$$

So'ngra jismning elementlari bir-biri bilan tutashgan deb hisoblash bilan hajmiy kuchlarni, shuningdek yuzaning egri chiziqli qismiga o'q deformatsiya nolga teng bo'lib qolaveradigan qilib qo'yilgan bosimni olib tashlaymiz. Yuklamani bunday olishning ta'sirini unga ko'rinishdagi hajmiy kuchlar va uning

$$X = -\frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Y = -\frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.49)$$

yuzasidagi egri chiziqlar qismi bo'ylab

$$\frac{\alpha ET}{1-2\nu}, \quad (2.50)$$

kattalikdagi normal cho'zuvchi kuchlanishlar qo'yilganda jismning yassi deformatsiyasi masalasini ($\varepsilon_z = 0$) yechish bilan olish mumkin. Demak, har bir formula uchun ma'lum kattalikdagi normal cho'zuvchi kuchlanishlar qo'yilsa, shunda tayyor jismning yassi deformatsiyasi yechiladi.

Bu masala, agar yassi kuchlangan holat uchun berilgan formulada tenglikning o'rniga v ni $v / (1 - v)$ bilan almashtirish bilan yassi kuchlangan holat uchun mos keluvchi tenglikdan foydalanish lozimligi hisobga olinmasa, yuqorida ko'rib chiqilgan masalalar tipiga kiradi. Bundan yuqorida ko'rsatilgan tenglamalarning o'rniga

$$\sigma_x - \frac{\alpha ET}{1-2\nu} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y - \frac{\alpha ET}{1-2\nu} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \quad (2.51)$$

shuningdek

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.52)$$

ga ega bo'lamiz.

Qidirilayotgan kuchlanishlar funksiyasi (2.52) tenglamani qanoatlantirishi va chegaraga normal cho'zuvchi kuchlanishni yetkazishi lozim (2.49). φ kuchlanish aniqlangandan keyin formulalar bo'yicha (v) ni topish mumkin. Bu kuchlanishning ustiga (2.50) forsulalar bo'yicha aniqlanadigan kuchlanishlarni qo'yish lozim bo'ladi.

σ_z o'q kuchlanishlarni (2.51) formula bo'yicha aniqlanadigan ifodani (2.52) dagi $v = (\sigma_x + \sigma_y)$ ifoda bilan qo'shish orqali olish mumkin. Natijalovchi o'q kuchi va uchdagi bukuvchi momentni bir o'qli cho'zish va bukishni qo'yish bilan olib tashlash mumkin.

Metallarning yassi kuchlangan holati, agar harorat uning qalinligi bo'ylab o'zgarmasa, yupqa plastinkada vujudga keladi. xy tekislikni plastinkaning o'rta tekisligi sifatida qabul qilish bilan $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ ni qo'yishimiz mumkin. Bundan tashqari, plastinkaning har bir elementini z yo'nalishda erkin cho'ziluvchan deb hisoblash mumkin. Elementlarning birlashuvchanligini ta'minlash uchun x va y yo'nalishlarda kengayishni bartaraf qilish yetarli bo'ladi.

$$\text{Bu} \quad \sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha ET}{1-\nu}, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (2.53)$$

kuchlanishlarni qo'yishni talab qiladi.

Bu ifodalarni muvozanat tenglamalariga o'rniga qo'yish bilan talab qilinadigan hajmiy kuchlarni topamiz:

$$X = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Y = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.54)$$

ularni $\alpha ET/(1 - \nu)$ normal bosim bilan birgalikda plastinkaning chekkalariga qo'yish kerak bo'ladi.

Bu kuchlarni olib tashlash bilan shunday xulosaga kelish mumkinki, harorat kuchlanishlarini

$$X = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Y = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.55)$$

hajmiy kuchlar va jismning chekkalari bo'ylab qo'yilgan $\alpha ET/(1 - \nu)$ normal cho'zuvchi kuchlanishlar bilan chaqirilgan yassi kuchlangan holatga (2.54) kuchlanishlar maydonini qo'yish bilan aniqlash mumkin. Bu yassi kuchlangan holatni qidirish bizni yana (2.51) formulada ko'rib chiqilgan tipdagi masalaga olib keladi.

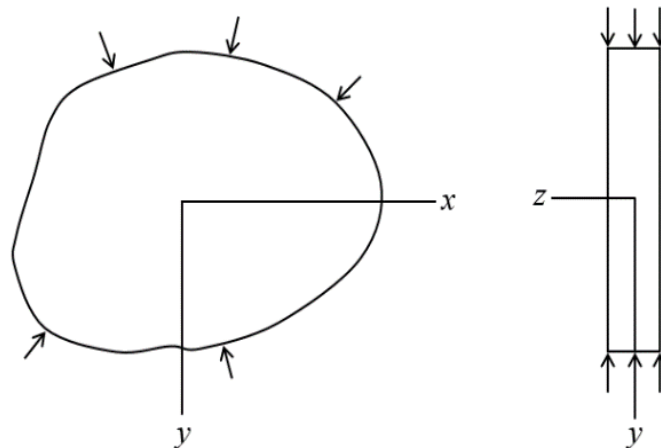
Bizga bor-yo'g'i yuqorida ko'rsatilgan tenglamalarga

$$V = \frac{\alpha ET}{1-\nu}, \quad (2.56)$$

ni qo'yish qoladi, u (2.55) hajmiy kuchlarning potentsiali bo'lib hisoblanadi.

Keltirilgan materiallar va formulalar shuni ko'rsatadiki, harorat o'zgarishi bilan yassi deformatsiya o'zgaradi, biroq silindr va prizmaning o'qiga parallel chiziqlar bo'yicha o'zgarmaydi.

Agar yupqa plastinka uning chegarasida plastinka tekisligiga parallel bo'lgan va qalinlik bo'ylab bir tekis taqsimlangan kuchlar bilan yuklangan bo'lsa (2.14-rasm), u holda kuchlanishlarning σ_z , τ_{xz} , τ_{yz} tarkibiy qismlari plastinkaning har ikkala yuzasida nolga teng bo'ladi va ular plastinkaning ichida ham nolga teng deb taxmin qilish mumkin.



2.14-rasm. Chegarada plastinkaning tekisligiga parallel kuchlar bilan yuklangan yupqa plastinkaning sxematik tasviri.

Shunda kuchlangan holat faqatgina σ_x , σ_u , τ_{xu} tarkibiy qismlar bilan aniqlanadi va yassi kuchlangan holat deb ataladi. Shuningdek, bu uchta tarkibiy qismlar z ga bog‘liq bo‘lmaydi, ya’ni plastinkaning qalinligi bo‘ylab o‘zgarmaydi va faqatgina x va u ning funksiyalari bo‘lib hisoblanadi deb taxmin qilish mumkin.

Deformatsiyani bartaraf qilish uslubi. Yuqorida keltirilgan materialdan tushunarliki, erkin harorat deformatsiyasi, deformatsiyani deyarli to‘liq bartaraf qiladi. Demak, deformatsiyani bartaraf qilish uslubi yordamida ham xuddi shu xulosani olish mumkin.

Jism notekis qizdirishga tortilgan va cheksiz kichik elementlarga bo‘lingan deb tasavvur qilamiz. Aytaylik, bu elementlarning $\varepsilon_x = \varepsilon_u = \varepsilon_z = \alpha T$ erkin harorat deformatsiyalariga har bir elementga qo‘yilgan bir tekis r bosim qarshi harakat qilsin, bu bosimning kattaligi $(\alpha ET / (1 - 2\nu))$ formula bilan aniqlanadi. Shunda erkin harorat deformatsiyasi to‘liq bartaraf bo‘ladi.

Barcha elementlar bir-biriga qarab tortilgan bo‘lib qoladi va boshlang‘ich shakl va o‘lchamlarga ega bo‘lgan uzluksiz (yaxlit) jismni hosil qiladi.

$(\alpha ET / (1 - 2\nu))$ bosimning taqsimlanishini elementlardan tashkil topgan aytilgan jismga qandaydir bir hajmiy kuchlar va yuza bosimlarini qo‘yish bilan amalga oshirish mumkin. Bu kuchlar muvozanat tenglamalari va chegara shartlarini qanoatlantirishi lozim.

Bu tenglamalarga

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p = -\frac{\alpha E T}{1-2\nu}, \quad \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.57)$$

ning qiymatlarini o‘rniga qo‘yish bilan elementlardan tashkil topgan jismga uning boshlang‘ich shaklini berish uchun

$$X = \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Y = \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad Z = \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.58)$$

hajmiy kuchlarni qo‘yish zarurligini topamiz, yuzaga esa $(\alpha E T / (1 - 2\nu))$ bosimni qo‘yish lozim bo‘ladi.

Endi elementlar bir-biri bilan tutashgan deb taxmin qilamiz va (2.58) kuchlarni va $(\alpha E T / (1 - 2\nu))$ yuza bosimini bartaraf qilamiz. Shunda harorat kuchlanishini, ravshanki, $(\alpha E T / (1 - 2\nu))$ bosimga elastic - qayishqoqroq jismdagi

$$X = -\frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Y = -\frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad Z = -\frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.59)$$

hajmiy kuchlar va yuzalarga teng bo‘lgan normal cho‘zilish bilan chaqiriladigan kuchlanishlarni qo‘yish bilan

$$\frac{\alpha E T}{1-2\nu} \quad (2.60)$$

olish mumkin bo‘ladi.

Shunday qilib, o‘tkazilgan eksperimentlar va keltirilgan formulalar natijasida bunday xulosaga kelish mumkinki, metallar yoki qotishmalarni va ularning elementlarini bir tekis va notekis qizishi, shuningdek, boshqa kamchiliklar erkin harorat deformatsiyasi hisobiga to‘liq bartaraf bo‘ladi. Buni keltirilgan materiallar, ma’lumotlar, o‘tkazilgan eksperimental ilmiy-tadqiqotlar va tavsiya etilgan aniq formulalar tasdiqlab turibdi.

Nazorat savollari

1. Yassi plastik oqish nazariyasi bo'yicha plastik oqish holati va kuchlanganlik holati deganda nimani tushunasiz?

2. O'zida plastik oqishni boshdan kechiradigan material uchun yassi deformatsiyada muvozanat tenglamalari, ya'ni Genki tenglamalari qanday ko'rinishda yoziladi?

3. Materiallarning yassi oqishida Mor aylana kuchlanishlar diagrammasi va sirpanish chiziqlari grafigini chizib tushuntiring.

4. Sirpanish chiziqlari to'rida yassi plastik oqish uchun tezliklarning Godograf rejasini birinchi marta qaysi olim foydalangan?

5. Godograf tezliklar rejasini va godograf tekisligiga ko'chirib o'tkazishda tezliklarning uzilishi grafiklarini chizib tushuntiring.

6. Sirpanish chiziqlari to'rini qanday usullar bilan qurish mumkin?

7. Metallar va qotishmalar uchun mustahkamlanish egri chiziq-larining texnologik xarakterini belgilovchi egri chiziqlarini chizib tushuntiring.

8. Metallarning yassi deformatsiyasi va yassi kuchlanganlik holatlarini qanday bartaraf qilish mumkin?

9. Metallarning egizaklanish deganda nimani tushinasiz va u sirpanishga qaraganda qanday ahamiyatga ega?

10. Chegarasi plastinkaning tekisligiga parallel kuchlar bilan yuklangan yupqa plastinkaning sxematik ko'rinishini chizib tushuntiring.

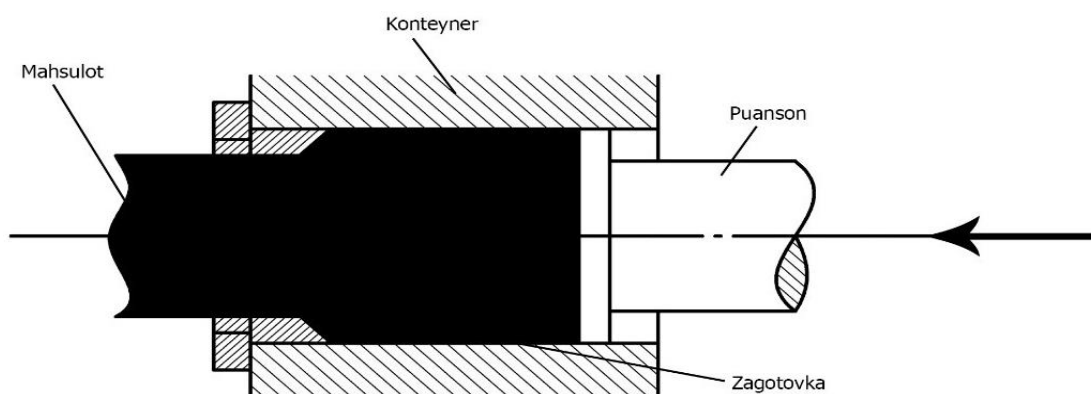
3-BOB. METALL MATERIALLARINI PRESSLASH VA SHTAMPOVKALASH USULLARI

3.1. Materiallarni presslash va shtampovkalash haqida umumiy tushunchalar

Ko‘pchilik metall materiallari (yoki metallmas materiallari) sovuq va issiq hollarda presslanadi. Metall materiallarini presslashdan maqsad shuki, ulardan turli shaklli va o‘lchamli buyumlar olishdir. Buning uchun har xil konstruksiyali presslash mashinalaridan foydalanishiladi. Odatda, presslash mashinasining konteyneriga, ya’ni havol silindriga kiritilgan materiallarni asosan uni matritsa deb ataluvchi asbobi asbobni ezib siqib chiqarish bilan bog‘liq bo‘lgan texnologik jarayonga presslash deb ataladi.

Presslash mashinasida presslab olinayotgan buyumning ko‘ndalang kesimi matritsa ko‘zi shakliga o‘tadi va bo‘yiga uzayib ketadi. Bu jarayon materialni presslash natijasida amalga oshiriladi. Bu usulda avvalo, zagotovkalarni presslash mashinasining konteynerli silindriga kiritiladi, so‘ngra puanson bilan siqiladi va matritsa asbobi teshigidan ezib chiqarib olinadi (3.1-rasm).

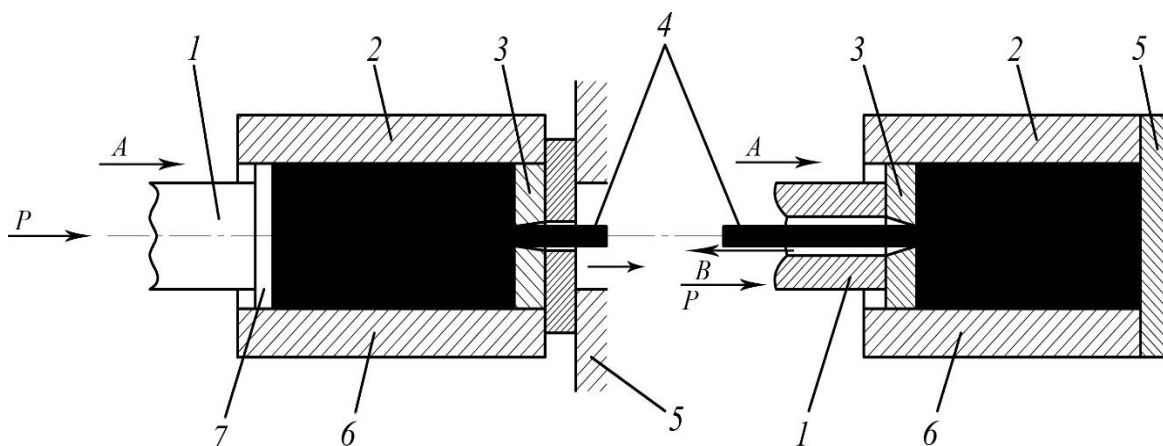
Yuqorida aytib o‘tilganidek, materiallarni yo sovuq holda yoki issiq holda presslab, har xil shaklli va o‘lchamli buyumlar olish mumkin. Shunga asosan plastikligi yuqori bo‘lgan rangli metallar va ularning qotishmalari sovuqlayin, po‘latlar esa ma’lum haroratgacha qizdirilib issiqlayin presslash mashinalarida alohida-alohida presslanadi.



3.1-rasm. Materiallarni presslab buyum mahsulotini olish jarayoni.

Materiallarni presslayotganda diametri 3 mm dan ortiq bo'lgan chiviqlar, devor qalinliklari 1,5mm dan 12mm gacha bo'lgan, ichki diametrlari 20mm dan 400mm gacha bo'lgan quvurlar, ko'ndalang kesim o'lchami 400mm^2 gacha bo'lgan turli shaklli va o'lchamli buyumlar tayyorlanib olinadi. Tayyor buyumlarning uzunligi ishlab chiqarish korxonasi turiga qarab, har xil bo'ladi. Presslab ishlov berishda zagotovkalar sifatida asosan turli quymalar va sortamentlardan unumli foydalaniladi. Ammo shuni esda saqlash kerakki, materiallarni presslashda ko'proq ularning materialiga, diametriga, devor qalinligiga, ichki diametlariga va ko'ndalang kesimi o'lchamlariga e'tibor berish kerak.

Odatda, materiallarni presslash ikki usulda olib boriladi: Shulardan birinchisi materiallarni to'g'ri presslash usuli (3.2-rasm, a) va ikkinchisi materiallarni teskari presslash usuli (3.2-rasm, b) hisoblanadi. Agar sxemalarga e'tibor bersak, ularning birida to'g'ri presslangan mahsulot buyumi, ikkinchisida esa teskari presslangan buyum mahsulotini olish jarayoni tasvirlangan.



3.2-rasm. Materiallarni presslash usullari: **a**-to'g'ri presslash usuli; **b**-teskari presslash usuli; 1-puanson; 2-konteyner; 3-matritsa; 4-buyum; 5-shayba; 6 - zagotovka; 7-pressshayba ko'rinishlari.

Materiallarni to'g'ri presslashda (3.2-rasm, a ga qarang) asosan puanson 1 va matritsa 3 asosiy vazifani bajaradi, konteyner havol silindri 2 ga kiritilgan zagotovka 6, shayba 5 va puanson 1 A strelkasi tomon yurishida uni P kuch bilan siqib matritsa 3 ko'zidan ezib

chiqaradi, chunki o'ng tomondagi tirak shayba 5 matritsaning siljishiga yo'l qo'ymaydi va konteynerni zich berkitib turadi. Bu holda zagotovka konteyner devoriga ishqalanib surilib deformatsiyalanishida ma'lum qarshilikka uchraydi. Shu bilan birga bu usulda chiqindi ham bir muncha ko'proq sarf bo'ladi. Shunga qaramay, birinchi usulda sifatli buyumlar olinadi.

Materiallarni teskari presslashda (3.2-rasm, b ga qarang) matritsa 3 ni puansonning A strelkasi tomon yurishida zagotovka konteynerda siljimay, ezilib, majburan matritsa ko'zidan o'tadi. Bu holda zagotovka konteyner devoriga ishqalanmaydi va unda puansonga qarshilik ko'rsatuvchi ishqalanish kuchi ham yo'q. Shu sababli materiallarni (yoki metallarni) teskari presslab buyum mahsulotlarini olishda sarflangan kuch P to'g'ri presslashga qaraganda 20-30% kichik bo'lib, chiqindi ham 2-3 barobar kam bo'ladi. Ammo teskari presslashni to'g'ri presslashga qaraganda afzalliklari bo'lib, unda puanson konstruksiyasining murakkabligi, olinuvchi mahsulot uzunligining cheklanishi va boshqa sabablarga ko'ra bu usuldan foidalanish birmuncha cheklangan. Lekin ma'lum kamchiliklari bo'lishiga qaramay, ikkala usuldan ham kerakli vaqtlarda foydalanishiladi, ulardan turli shaklli va o'lchamli mahsulotlar olinadi. Har xil shakl va o'lchamlarda tayyorlangan buyum mahsulotlarining ishlash sharoitlariga qarab, kerakli joylarda qo'llaniladi.

Materiallarni presslash uskunalariga asosan gorizont va vertikal gidravlik presslar va ularning asboblari kiradi. Gorizont va vertikal gidravlik presslardan materiallarni (metallarni) presslashda juda keng foydalanishiladi. Gorizont gidravlik presslarning presslash kuchi 600-60000 tonna oralig'ida bo'lsa, vertikal gidravlik presslarning presslash kuchi esa 300 - 1000 tonna oralig'ida bo'ladi. Bu yerda shuni aytib o'tish joizki, metallarni presslashga o'tishdan oldin tayyorlanuvchi buyum materialiga, tarkibiga, xossasiga, shakliga va o'lchamiga ko'ra zagotovka tanlashda uning hajmiga olinuvchi buyum hajmiga yaqinroq bo'lishi kerak. Shunda uning uzunligi (l_3) havol bo'lmagan buyumlar uchun $l_3 = (2-3) \cdot d_{\max}$, havol buyumlar uchun esa $l_3 = (1,5-2) \cdot d_{\max}$ deb olinadi. Undan keyin uning yuza sirti oksid pardalar va kirlardan tozalanadi (buning uchun masalan, 15-

25% sulfat kislotaning suvdagi eritmasi solingan vannaga ma'lum vaqt tushirib, so'ngra yaxshilab yuviladi va quritiladi), ayrim vaqtlarda zaruriyatga ko'ra ma'lum haroratgacha qizdirib, konteynerga kiritiladi. Bunda presslash rejimi zagotovka plastikligiga, deformatsiyalash darajasiga va boshqa omillarning deformatsiyasiga ko'ra belgilanadi.

Agar zagotovkaning asbob matritsa ko'zidan chiqish tezligi (v_3) aniqlanmoqchi bo'linsa, presslash tezligini (v_n), zagotovkaning cho'zilish koeffitsiyentini μ desak, unda biz quyidagi ko'rinishni hosil qilamiz:

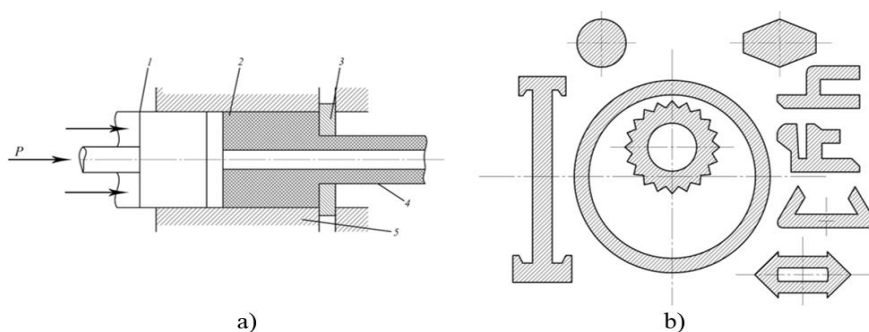
$$v_3 = \mu \cdot v_n; \text{ см/с га теги} \quad (3.1)$$

Biz bilamizki, rangli metallardan biri mis qotishmasini presslashda v_3 ning qiymati 12-15 sm/s bo'lsa, alyuminiy uchun esa 8 sm/s ga teng bo'ladi.

Yuqorida aytib o'tilganlardan ma'lumki, matritsa olinuvchi buyum ko'ndalang kesim shakli, o'lchami va yuza sifatini ta'minlab beradi. Shu sababli bu asboblarning sifatli uglerodli va legirlangan asbobsozlik po'latlaridan, metallokeramik qattiq qotishmalardan, sintetik olmoslardan va boshqa materiallardan tayyorlanadi. Bu asboblarning konstruktsiyasiga kelsak, ularning shakllari va o'lchamlari o'zgarmaydigan yoki o'zgaradigan xillarga bo'linadi hamda ishlash sharoitlariga qarab qo'llaniladi.

Metallar va ularning qotishmalaridan quvurlar (trubalar) tayorlash sxematik jarayoni (3.3-rasm, a) da ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, konteynerdagi zagotovka bir oz siqib ezilsa, puanson ignasi zagotovka orqali matritsa ko'ziga kiradi, so'ngra zagotovkani puanson bilan siqib ular oralig'idan o'tkaziladi. Undan keyingi (3.3-rasm, b) da asosan materiallarni presslab olinadigan turli shaklli va o'lchamli buyumlarning ko'ndalang kesimi yaqqol tasvirlangan. Demak, metallarni (yoki materiallarni) presslash uchun presslash mashinalari, gorizontal va vertikal gidravlik presslar kerak bo'ladi. Bu presslarda har xil ko'rinishdagi buyum mahsulotlari presslab olinadi va ishlatiladi.

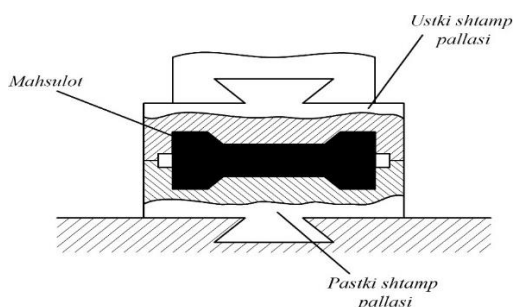
Materiallarni presslashda press mashinalarining roli juda kattadir, chunki ular turli shaklli va o‘lchamli konstruksiyali buyumlarni presslab sifatli qilib tayyorlab beradi (3.3-rasm,a,b ga qarang). Sifatli presslangan va kerakli ishlovlar berilgan buyumlar turli zavodlarda va sanoat korxonalarida qo‘llaniladi.



3.3-rasm. Materiallarni presslash usullari: **a**-quvurlar (trubalar) tayyorlash usuli; **b**-presslash yo‘li bilan hosil qilinadigan buyumlar profili usuli; 1-puanson; 2-konteyner; 3-matritsa; 4-buyum; 5-zagotovka ko‘rinishlari.

Materiallarni shtamplash usuli. Odatda, shtamplar metall va qotishmalarga bosim bilan ishlov berishda foydalaniladigan asboblardir, shtamp, puanson, matritsa, rolik va boshqalar uchun ishlatiladigan po‘latlardan tayyorlanadi.

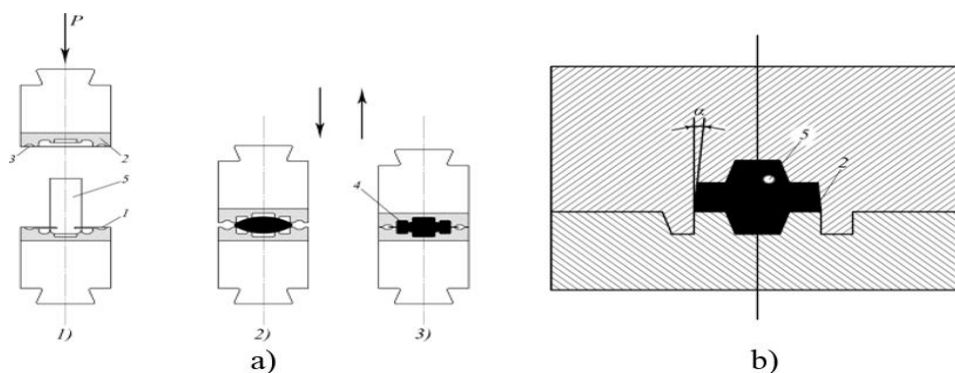
Materiallarga bosim bilan ishlov berish usullaridan biri – bu hajmiy shtamplashdir. Hajmiy shtamplashda zagotovkani shtamp deb ataluvchi asbobning pastki palla oyig‘iga qo‘yib, ustki pallasi bilan zarblab ishlov berishga hajmiy shtamplash deb ataladi. Metall maxsulotini hajmiy shtamplash jarayoni 3.4-rasmda tasvirlangan.



3.4-rasm. Materiallarni hajmiy shtamplash jarayonining ko‘rinishi.

Materiallarni shtamplash jarayonlari konstruktsiyasiga binoan asosan ochiq shtamplash (3.5-rasm,a) va yopiq shtamplash (3.5-rasm,b) usullarida olib boriladi.

Bu usulda asosan ma'lum haroratgacha qizdirilgan metall zagotovkalar ikki palladan iborat shtamp asbobining pastki palla o'yig'iga qo'yilib, ustki palla bilan zarblab ishlov berishda deformatsiyalab, shtamp o'yig'ini to'ldirish jarayoni tushiniladi. Shtamp o'yig'ini to'ldirish jarayonlaridan biri 3.5-rasm,a da ko'rsatilgan va unda: 1-shtamp ochiq holatda; 2-shtamp ishchi yopiq holatda ichki o'yog'i to'ldirilmagan holati; 3-shtamp ishchi yopiq holatda ichki o'yig'i to'ldirilgan holati.



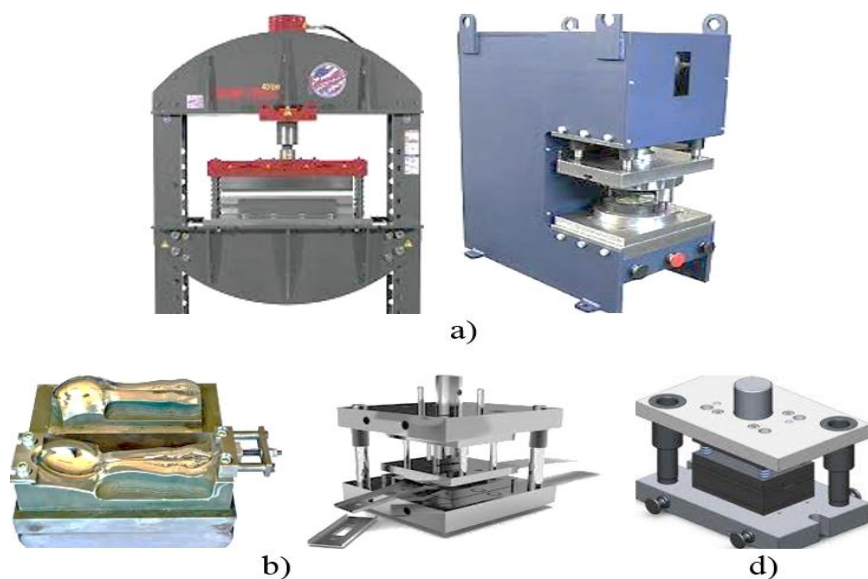
3.5-rasm. Materiallarni ochiq shtamplash (a) va yopiq shtamplash (b) jarayonlari: 1,2-shtamp pallalari; 3-pitr ariqchasi; 4-zagotovka; 5-pokovka holatlari.

Bu usul boshqa usullarga qaraganda, ish unumining yuqoriligi, murakkab shaklli pokovkalar olinishi, shakli va o'lchamlarining aniqligi, sirt yuzasidagi g'adur-budurligining kamligi, yuqori malakali ishchini talab etmasligi kabi afzalliklari bilan ajralib turadi va bu usul turli xil pokovkalar tayyorlanadigan yirik temirchilik tsexlarida juda keng foydalaniladi. Uning kamchiligiga asosan shtamp narxining qimmatligi, qimmat po'lat ishlatilishi, pokovka massasining og'irligi 250-300 kg dan oshmasligi va boshqalar kiradi.

Materiallarni hajmiy shtamplash shtamplari asosan yuqori sifatli legirlangan shtamp po'latlaridan yasaladi. Bu shtamplar ishlash sharoitlariga qarab, sovuq holda (qizimaydigan shtamp po'latlari)

ishlaydigan shtamp po‘latlariga va issiq holda (qiziydigan shtamp po‘latlari) ishlaydigan shtamp po‘latlariga bo‘linadi. Shtamp po‘latlari GOST bo‘yicha alohida-alohida markali po‘latlardan tayyorlanadi va ma’lum termik ishlovlardan o‘tkaziladi va keyin qo‘llaniladi.

Materiallarni hajmiy shtamplashda maxsus shtamp presslaridan (3.6-rasm,a), materiallarni shtamplash jarayonlarida esa konstruksiyasiga ko‘ra ochiq shtampdan (3.6-rasm,b) va yopiq shtampdan (3.6-rasm,d) unumli foydalaniladi.



3.6-rasm. Materiallarni shtamplash uchun ishlatiladigan maxsus shtamp pressi (a), ochiq shtamp (b) va yopiq shtamp (d) ko‘rinishlari.

Hajmiy shtamplash presslarida (yoki uskunalarida) zagotovkalarini shtamplash jarayonlari. Odatda, hajmiy shtamplash metall zagotovkalarini shtamplashda foydalaniladigan asosiy presslar yoki uskunalariga siqilgan bug‘-havoda ishlovchi shtamplash bolg‘alari, bolg‘alash presslari, gorizontaal yoki vertikal bolg‘alash mashinalari, vintli friksion presslar va maxsus zamonaviy presslarni o‘z ichiga oladi. Shulardan biri masalan, siqilgan bug‘-havoda ishlovchi shtamplash bolg‘alari umumiy tuzilishi jihatidan erkin bolg‘alash bolg‘alariga o‘xshash bo‘lib, faqatgina konstruksiyasi bo‘yicha bir-biridan farq qiladi, ammo ishlash prinsipi deyarli bir-biriga o‘xshash bo‘ladi.

3.2. Materiallarni presslash uchun foydalaniladigan asboblardan va uskunalardan

Ma'lumki, metallarni presslashda ko'proq turli uskunalardan va har xil asboblardan unumli foydalaniladi. Masalan, presslash uskunalari gorizontal gidravlik presslar va vertikal gidravlik presslar kiradi. Bu presslar turli xil metall maxsulotlarini ishlab chiqaradigan zavodlarda, korxonalarda, temirchilik tsexlarida va umuman mashinasozlik sanoatlarida juda keng qo'llaniladi. Gidravlik presslar presslanadigan metall buyumning shakli va o'lchamlariga qarab ishlatiladi. Masalan, gorizontal gidravlik presslarning presslash kuchi 600-60000 t gacha, vertikal gidravlik presslarning presslash kuchi esa 300-1000 t gacha bo'ladi. Eslatib o'tish kerakki, metallarni presslashga o'tishdan oldin tayyorlanuvchi buyum materialiga, tarkibiga, xossasiga, shakliga va o'lchamiga ko'ra zagotovka tanlashda uning hajmi olinuvchi buyum hajmiga yaqinroq bo'lishi lozim. Shundagina uning uzunligi (l_3) havol bo'lmagan buyumlar uchun $l_3 = (2-3) \cdot d_{\max}$, havol buyumlar uchun esa $l_3 = (1,5-2) \cdot d_{\max}$ deb olinadi.

Olingan buyumning yuza sirt qismi oksid pardalar va kirlardan tozalanadi. Tozalash uchun 15-25% sulfat kislotaning suvdagi eritmasi solingan vannaga ma'lum vaqt tushirib, keyin yaxshilab yuviladi va quritiladi. Quritilganlari ish vaziyatiga qarab, kerakli haroratgacha qizdiriladi va so'ngra konteynerga kiritiladi. Ana shunda presslash rejimi zagotovka plastikligiga, deformatsiyalash darajasiga va boshqa omillarga ko'ra belgilab olinadi. Aytaylik, zagotovkani asbob matritsasi ko'zidan chiqish tezligi (v_3) aniqlanmoqchi bo'lsa, presslash tezligini (v_n), zagotovkaning cho'zilish koeffitsiyentini μ deb olamiz:

$$v_3 = \mu \cdot v_n; \text{ sm/s} \quad (3.2)$$

Yuqorida aytib o'tilganidek, rangli metall bo'lmish mis qotishmasini presslashda v_3 ning qiymati 12-15 sm/s ga, alyuminiy uchun esa 8 sm/s ga tengdir.

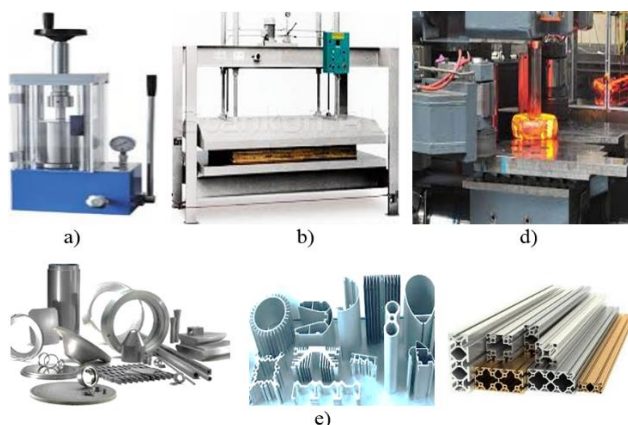
Katta presslash mashinalarida ishlaganda matritsa olinuvchi buyum ko'ndalang kesim shakli, o'lchami va yuza sifatini ta'minlab

beradi. Shuning uchun bu asboblarning sifatli uglerodli va legirlangan asbobsozlik po'latlaridan, metallokeramik qattiq qotishmalardan, sintetik olmoslardan va boshqa materiallardan tayyorlanadi. Bu asboblarning konstruksiyasiga to'xtaladigan bo'lsak, ular shakllari va ko'z o'lchamlari o'zgaradigan yoki o'zgarmaydigan xillarga bo'linadi hamda ishlash sharoitlariga qarab foydalaniladi.

Endi gorizontaal gidravlik presslar va vertikal gidravlik presslarda qanday ishlar bajarilishi bilan tanishib o'tamiz. Masalan, gorizontaal gidravlik presslar presslash kuchiga qarab, ma'lum bir talab etilgan qalinlikdagi metallarni presslaydi va kerakli shaklga va o'lchamga ega bo'lgan buyumlar olinadi. Olingan buyumning ko'rinishi, tuzilishi, og'irligi va puxtaligi uning sifatini belgilaydi. Presslash kuchi katta bo'lgani uchun ular yirikroq ishlab chiqarish korxonalarida ishlatiladi.

Aytaylik, vertikal gidravlik presslarda vertikal holatga ega bo'lgan buyum mahsulotlari presslanadi. Shu bilan birga bu presslar metall buyumning shakli va o'lchamlariga qarab ham ishlatiladi. Pressning presslash kuchi kamroq bo'lgani uchun ular qalinligi kam ingichkaroq metall materiallarini presslaydi va bu presslar kichikroq temirchilik tsexlarida va korxonalarida foydalaniladi.

Materiallarni presslashda laboratoriya pressi (3.7-rasm,a), sovuq holda presslash pressi (3.7-rasm,b), issiq holda presslash pressi (3.7-rasm,d) hamda kerakli shakl va o'lchamlarda (3.7-rasm,e) olingan metall buyumlar yoki detallarning umumiy ko'rinishlari keltirilgan.



3.7-rasm. Materiallarni presslash laboratoriya pressi (a), sovuq holda presslash pressi (b), issiq holda presslash pressi (d) va presslab olingan har xil buyumlar (e).

Metall materiallarini presslash jarayonida asosan press uskunasining sozligiga, ochiq shtamp yoki yopiq shtampning butunligiga, komplektiga ishonch hosil qilish kerak, ya'ni ishni boshlashdan oldin asbob-uskunalarining to'liq sozligini tekshirib chiqish lozim, undan keyin press uskunalarida ishlash mumkin. Yuqorida aytilganidek, bu asboblarda ko'proq sifatli uglerodli po'latlar va legirlangan asbobsozlik po'latlaridan, metallokeramik qattiq qotishmalardan va sintetik olmoslardan yasaladi.

3.3. Materiallarni shtamplash, sovuq va issiq holda shtamplash uchun shtamplar va ularning konstruksiyalari

Metallar va ularning qotishmalaridan hamda metallmas materiallardan turli xil buyumlar olish uchun ular shtamplanadi. Metallarni shtamplashda asosan metall zagotovka shtamp bo'shlig'iga o'tkaziladi, o'tkazilgandan so'ng ular ma'lum bosim ostida plastik deformatsiyalanadi va shu shtamp ichki qismidagi bo'shlig'ini butun hajmi bo'yicha zichlab-presslab to'ldiradi (bu pressning bosim kuchiga bog'liq).

Natijada tayyor va sifatli buyumlar olinadi. Materiallarni shtamplash usuli boshqa usullarga qaraganda ish unumi ancha yuqori, olingan buyumlarning shakli va o'lchamlari aniq, buyumlar yuzasi tekis va g'adur-budurligi judayam kam, bu shtampda murakkab shaklli buyumlar olish qulay, materialni shtamplash uchun yuqori malakali ishchi talab etilmasligi va sifatli buyumlar olinishi shtamplash usulining afzalligidir. Bunday afzalliklarga ega bo'lganligi uchun shtamplash usuli ko'proq temirchilik tsexlarida juda keng qo'llaniladi. Shtampning kamchiligiga ularni tayyorlanishi, narxining qimmatligi, pokovkaning nisbatan og'irligi va boshqalar kiradi.

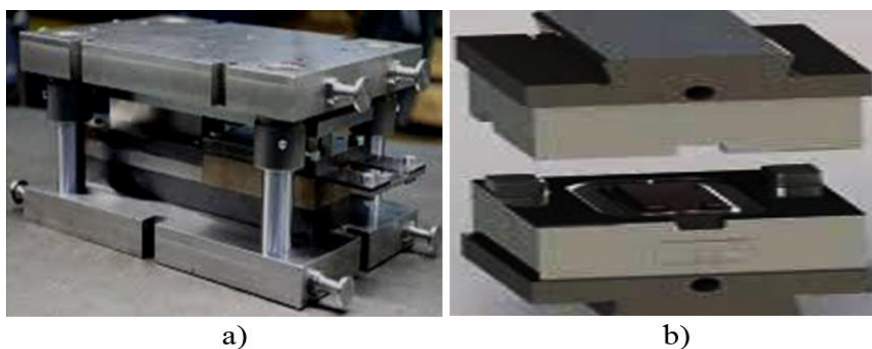
Materiallarni shtamplashda shtampning ichki o'yiqlari – bo'shliqlari shakli va o'lchamlari pokovkaning tashqi shakli va o'lchamlariga juda yaqin bo'ladi. Asosiy konstruksiyasi bo'yicha shtamplar ikki xilga ajratiladi: 1-ochiq holda; 2-yopiq holda ishlovchi xillarga bo'linadi. Shtamplar yuqori sifatli legirlangan asbobsozlik po'latlaridan tayyorlanadi (eslatma: shtamp tayyorlash jarayoni nihoyatda

qiyin va nozik ish, shu sababli bu ishga yuqori malakali ishchi-asbobsoz bo'lishi kerak). Tayyorlangan shtamplar xillari va konstruksiyalariga qarab, ma'lum bir termik ishlov berish rejimlaridan o'tadi va keyin foydalaniladi.

Odatda, metallarni deformatsiyalaydigan asboblar – shtamplar, puansonlar, matritsalar, roliklar va valiklar metallarni bosim bilan ishlov berish uchun qo'llaniladi. Shu bois shtamplarga quyidagicha ta'rif bersak bo'ladi. Metallar va qotishmalarni bosim bilan ishlov berishda qo'llaniladigan asboblar - shtamplar, puansonlar, matrisalar, roliklar, valiklar va boshqalar tayyorlash uchun ishlatiladigan po'latlarga *shtamp po'latlari* deb ataladi. Ular tashqi ko'rinishi bo'yicha juda keng tarqalgan asboblar turkumiga kiradi.

Metallar va qotishmalarni bosim bilan ishlov berish asboblari ikki gruppaga bo'linadi: 1 - metall va qotishmalarni sovuqlayin deformatsiyalovchi asboblar (3.8-rasm,a); 2 - metall va qotishmalarni qizdirilgan holda deformatsiyalaydigan asboblar (3.8-rasm,b). Shuning uchun bunday asboblar tayyorlash uchun ishlatiladigan po'latlar ham ikki gruppani tashkil etadi. Metall va qotishmalarni qizdirib turib, bosim bilan ishlov berishda asboblar qattiq qiziydi. Demak, bunday asboblar tayyorlanadigan po'latning mexanik xossalari sovuq holatdagina emas, balki qizigan holatda ham yuqori bo'lishi kerak. Ish jarayonida qattiq qiziydigan asboblar tayyorlanadigan po'latlarning oquvchanlik- proporsionallik chegarasi yuqori bo'lishi kerak, aks holda, bu asboblar yuqori bosim ta'siri ostida deformatsiyalanishi mumkin. Temirchilik shtamplari bosim bilan ishlanayotgan metallga zarb bilan urilganda sinib yoki yorilib - ketmasligi uchun bunday shtamplar po'lati qovushqoq bo'lishi ham kerak.

Shtamp po'latlarining hamma turlari ham yeyilishga chidamli bo'lishi shart, chunki po'lat yeyilishga chidamli bo'lgandagina undan yasalgan asboblar ko'p va uzoq muddatga chidaydi va ishlaydi (bu o'z navbatida shtamp po'lati markasi va ishlov berish usullariga bog'liqdir).



3.8-rasm. Shtamlarning umumiy ko‘rinishi: **a**-sovuq holda ishlaydigan shtamp; **b**-issiq holda ishlaydigan shtamp.

Metallarni presslash asboblari zarbsiz ishlaganligi uchun bunday asboblarni tayyorlanadigan po‘lat qizigan holda yeyilishga chidamli bo‘lishi kerak. Shu sababli bolg‘a shtamlari, ya’ni zarb bilan ishlaydigan shtamlar uchun alohida, presslash shtamlari uchun esa alohida markali po‘latlar ishlatiladi.

Yuqorida keltirilgan ma’lumotlarga asoslanib, bundan buyon sovuqlayin bosim bilan ishlov berishda foydalaniladigan asboblarni sovuq holda, ya’ni *qizimaydigan shtamlar* deb, metall va qotishmalarni qizdirib turib bosim bilan ishlov berishda foydalaniladigan asboblarni esa issiq holda, ya’ni *qiziydigan shtamlar* deb ataymiz.

Sovuq holda, ya’ni qizimaydigan shtamlar tayyorlanadigan po‘lat juda qattiq, ishqalanishga bardosh bera oladigan, qovushqoq (ayniqsa, puansonlar tayyorlash uchun ishlatiladigan po‘lat) bo‘lishi kerak.

Issiq holda, ya’ni qiziydigan shtamlar tayyorlash uchun ishlatiladigan po‘lat mahalliy qizish ta’siriga imkoni boricha chidamli bo‘lishi kerak, chunki yetarli darajada plastik (qovushqoq bo‘lmagan, masalan, yomon bo‘shatilgan po‘latdan yasalgan shtampning ish qismi qizisa, unda darzlar hosil bo‘lishi mumkin.

Asosan bosim ostida detal quyish qoliplari, press-qoliplari ayniqsa, og‘ir sharoitda ishlaydi. Qolipga quyilgan suyuq metall qolipning ish yuzasini qattiq qizdiradi, qolipning ichki qismlariga yuborib turiladigan suv esa shu qismlarni sovitadi, buning natijasida katta issiqlik kuchlanishlari vujudga keladi. Pressqoliplar tayyorlanadigan po‘lat yeyilishga chidamli, qizigan holatda ham yuqori

mexanik xossalarga ega, qolipning ish sirti suyuq metall ta'sirida yeyilmaydigan bo'lishi zarur.

Katta o'lchamli shtamplar tayyorlanadigan po'latlarda, yuqorida aytib o'tilgan xossalardan tashqari, chuqurroq toblanish xossasi ham bo'lishi kerak. Murakkab shaklli shtamplar tayyorlanadigan po'latlar toblash vaqtida imkoni boricha kam deformatsiyalanishi lozim. Bu shtamplarning keyingi ish faoliyatini yaxshi ta'minlaydi. Shuning uchun biz Siz bilan ko'proq qizimaydigan va qiziydigan shtamplar tayyorlash uchun ishlatiladigan shtamp po'latlari bilan alohida-alohida tanishib chiqamiz.

Sovuq holda shtamplash uchun shtamplar (*qizimaydigan shtamp po'latlari*). Asosan sovuq holda, ya'ni qizimaydigan shtamp-larning qattiqligi yuqori bo'lib, Rokvel pribori bo'yicha HRC58-60 va hatto, HRC62 dan yuqori bo'lishi mumkin. Bunday shtamplar tarkibidagi uglerod miqdori 1% dan kam bo'lmagan uglerodli po'latlardan, shuningdek, ba'zilar legirlangan asbobsozlik po'latlaridan tayyorlanadi). Y10, Y11, Y12 markali po'latlardan shakli oddiy bo'lgan, kichikroq o'lchamli shtamplar yasaladi. Y10, Y11, Y12 po'latlarining toblanish chuqurligi katta bo'lmaganligi uchun ularni nisbatan engil sharoitda ishlaydigan shtamplar tayyorlash uchun ishlatish kerak. Shakli ancha murakkab va ancha og'ir sharoitda ishlaydigan shtamplar toblanish chuqurligi katta legirlangan po'latlardan, masalan, X yoki IIX15 markali po'latlardan tayyorlanadi. Sovuqlayin prokatlash jo'valari tayyorlash uchun tarkibida o'rta hisob bilan 1 yoki 2%Cr bo'lgan xromli po'latlar (9X yoki 9X2 po'latlari) ishlatiladi. Bunday jo'valarning ko'ndalang kesim yuzi katta bo'lganligi uchun ular suvda toblanib, past (100-120°C) haroratda bo'shatiladi. Bunday qilinganda jo'vaning 15 mm gacha qalinlikdagi sirtqi qatlamining qattiqligi Rokvel pribori bo'yicha HRC66 ga teng bo'ladi.

Metallarni sovuqlayin deformatsiyalaydigan, ammo zarb bilan ishlaydigan ba'zi asboblarning, masalan, zubilo, pnevmatik asboblarning va boshqalarning qattiqligi, aksincha, Rokvel pribori bo'yicha HRC52-58 bo'lishi kerak. Nisbatan engil sharoitda ishlaydigan bunday asboblarning, masalan, dastaki zubilo, dastaki kleymo va shu

kabilar Y7, Y8, Y9 markali asbobsozlik po‘latlaridan tayyorlanadi va keyin qo‘llaniladi.

Shtamp po‘latlarining eng ko‘p ishlatiladiganlari 4XC, 6XC, 4XB2C, 5XB2C va 6XB2C markali po‘latlardir (bu po‘latlarning kimyoviy tarkibi 3.1-jadvalda, toblanish harorati va qattiqligi esa 3.2-jadvalda ko‘rsatilgan).

3.1-jadval

Legirlangan asbobsozlik po‘latlari kimyoviy tarkibi

Po‘lat markasi	Elementlar miqdori, % hisobida						
	C	Si	Mn	Cr	V	Mo	W
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
X12	2-2,3	≤0,4	≤0,35	11,5-13,0	-	-	-
X12M	1,45-1,7	≤0,4	≤0,35	11,0-12,5	0,15-0,3	0,4-0,6	-
XГ	1,3-1,5	≤0,35	0,45-0,7	1,3-1,6	-	-	-
X	0,95-1,1	≤0,35	≤0,4	1,3-1,6	-	-	-
X09	0,95-1,1	≤0,35	≤0,4	0,75-1,05	-	-	-
9X	0,8-0,95	0,25-0,45	0,25-0,35	1,4-1,7	-	-	-
X05	1,25-1,4	≤0,35	0,2-0,4	0,4-0,6	-	-	-
7X3	0,6-0,75	≤0,35	0,2-0,4	3,2-3,8	-	-	-
8X3	0,76-0,85	≤0,35	0,2-0,4	3,2-3,8	-	-	-
9XC	0,85-0,95	1,2-1,6	0,3-0,6	0,95-1,25	-	-	-
6XC	0,6-0,7	0,6-1,0	≤0,4	1,0-1,3	-	-	-
4XC	0,35-0,45	1,2-1,6	≤0,4	1,3-1,6	-	-	-
XГC	0,95-1,1	0,5-1,0	0,8-1,2	1,4-1,8	0,2-0,4	-	-
Φ	0,95-1,05	≤0,35	0,2-0,4	-	0,15-0,3	-	-
8XΦ	0,75-0,85	≤0,34	0,2-0,4	0,5-0,8	0,15-0,3	-	-
85XΦ	0,8-0,9	≤0,35	0,3-0,6	0,45-0,7	0,15-0,3	-	-

3.1-jadvalning davomi

1	2	3	4	5	6	7	8
B1	1,05-1,25	≤0,35	0,2-0,4	0,1-0,3	0,2-0,5	-	0,8-1,2
3X2B8	0,3-0,4	≤0,35	0,2-0,4	2,2-2,7	-	-	7,5-9,0
4X8B2	0,35-0,45	≤0,35	0,2-0,4	7,0-9,0	0,15-0,3	-	2,0-3,0
XB5	1,25-1,5	≤0,30	≤0,3	0,4-0,7	-	-	4,5-5,5
4XB2C	0,35-0,44	0,6-0,9	0,2-0,4	1,0-1,3	-	-	2,0-2,5
5XB2C	0,45-0,54	0,5-0,8	0,2-0,5	1,0-1,3	-	-	2,0-2,5
6XB2C	0,55-0,65	0,5-0,8	0,2-0,4	1,0-1,3	-	-	2,2-2,7
XBΓ	0,9-1,05	0,15-0,35	0,8-1,1	0,9-1,2	-	-	1,2-1,6
9XBΓ	0,85-0,95	0,15-0,35	0,9-1,2	0,5-0,8	-	-	0,5-0,8
5XBΓ	0,55-0,7	0,15-0,35	0,9-1,2	0,5-0,8	-	-	0,5-0,8
5XHM	0,5-0,6	≤0,35	0,5-0,8	0,5-0,8	-	0,15-0,3	-
5XΓM	0,5-0,6	0,25-0,65	1,2-1,6	0,6-0,9	-	0,15-0,3	-

Eslatma: **1** - P va S ning miqdori 0,03% va undan ham kam bo'ladi; **2** - X12 va X12M po'latlarida Ni miqdori 0,35% dan, 9X, 7X3, 8X3, 9XC, 4XC, XΓC, 8XΦ, Φ, 3X2B8, 4XB2C, 5XB2C, 6XB2C, XBΓ, 5XBΓ, 5XΓM po'latlarida esa 0,25% dan oshmaydi; **3** - 5XHM po'latida 1,4-1,8% Ni bo'ladi; **4** - X12 va X12M po'latlari o'rniga X12Φ1 po'lati ko'proq ishlatiladi, uning tarkibida (1,2-1,4%C, 0,4% dan kam Si, 0,35% dan kam Mn, 11,0-12,5% Cr, 0,7-0,9% V) bo'ladi. Bu po'latlarning kimyoviy tarkibi ΓOCT 5950-51 da ko'rsatilgan.

3.2-jadval

**Legirlangan asbobsozlik po‘latlarining mexanik xossalarini
qattiqligi**

Po‘lat markasi	Toblanmagan po‘latning qattiqligi, HB	Toblash harorati va sovituvchi suyuqlik (s - suv, m - moy)	Toblangan po‘latning qattiqligi, HRC
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
X12	269-217	950-1000 m	60
X12M	255-207	950-1000 m	58
XГ	241-197	800-830 m	61
X	229-187	830-860 m	62
X09	229-179	830-860 m	62
9X	217-179	820-850 m	62
X05	241-187	780-810 s	64
7X3	229-187	850-880 m	54
8X3	255-207	850-880 m	55
9XC	241-197	820-860 m	56
6XC	229-187	840-860 m	56
4XC	207-170	880-900 m	47
XГC	255-207	820-860 m	62
Φ	217-179	780-820 s	62
8XΦ	207-170	800-850 s	61
85XΦ	258-207	840-860 s	42
B1	229-187	800-850 s	62
3X2B8	255-207	1075-1125 s	46
4X8B2	255-207	1025-1075 m	45
XB5	285-229	800-820 s	65

3.2-jadvalning davomi

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
4XB2C	217-179	850-900 s	53
5XB2C	255-207	860-900 m	55
6XB2C	285-229	860-900 m	57
XБГ	255-207	800-830 m	62
9XBГ	241-197	800-830 m	62
5XBГ	217-179	850-900 m	57
5XHM	241-197	830-860 m	47
5XГM	241-191	820-850 m	50

Shu po‘latlarning bo‘shatish harorati bilan bo‘shatilgandan keyingi qattiqligini (3.3-jadval) da ko‘rsatib o‘tamiz.

3.3-jadval

Shtamp po‘latlarining bo‘shatish harorati va bo‘shatilgandan keyingi qattiqligi

Po‘lat markasi	Bo‘shatish harorati	Bo‘shatilgandan keyingi qattiqligi, HRC
4XC	240-270	51-51
6XC	240-270	52-53
4XB2C	240-270	50-52
	420-440	44-46
5XB2C	240-270	51-53
	420-440	45-47
6XB2C	240-270	53-55
	420-440	46-48

Qizimaydigan shtamplar, shuningdek, metallni sovuqlayin yoki biroz qizdirib turib deformatsiyalash uchun ishlatiladigan boshqa asboblarda, masalan, sim tortish asboblarning fileralari (ko‘zlari) va shu kabilar yeyilishga va issiqlikka chidamlilik xossalari yuqori, termik ishlov berilganda kam deformatsiyalanadigan ko‘p xromli po‘latlardan, masalan, X12, X12M, X12Φ1, X6BΦ markali po‘latlardan tayyorlanadi, X12, X12M, X12Φ1, X6BΦ po‘latlarining kimyoviy tarkibi (3.1-jadvalda) ko‘rsatilgan. Ular suyuqlantirilgan tuzda qizdiriladi. Ko‘p xromli po‘latlarni toblash haroratlari 3.4-jadvalda keltirilgan.

3.4-jadval

Ko‘p xromli po‘latlarni toblash haroratlari

Po‘lat markasi	Birlamchi qattiqlik hosil qilish uchun toblash		Ikkilamchi qattiqlik hosil qilish uchun toblash		Eng kam deformatsiyalanadigan qilib toblash	
	qizdirish	Qattiq- ligi,	Qizdi- rish	Qattiq- ligi,	qizdirish	qattiqligi HRC

	harorati, °C	HRC	harorati, °C	HRC	harorati, °C	
X12	1000-1040	61-63	-	-	-	-
X12M	1020-1040	62-63	1115-1130	45-50	1040-1060	60-61
X12Φ	1020-1040	61-63	1090-1130	45-50	1040-1060	60-61
X12Φ1	1040-1070	61-63	1100-1140	45-50	1080-1100	60-61

Shtamp po‘latlaridan X12Φ1 markali po‘latining qattiqligi va undagi qoldiq austenit miqdorining toblash haroratiga qarab o‘zgari-shini ko‘rsatuvchi diagramma (3.9-rasm,a) da keltirilgan. Ushbu diagrammadan ko‘rinib turibdiki, toblash harorati ko‘tarilgan sari po‘latning qattiqligi oldin oshib, toblash harorati 1075°C bo‘lganda eng yuqori darajaga etadi, so‘ngra pasayadi. Shuning uchun bu po‘latlardan tayyorlangan asboblar yuqori (1050-1150°C) harorat-gacha qizdirilib, so‘ngra toblanadi. Bo‘shatish harorati toblash haroratiga qarab olinadi. Agar po‘lat 1075°C gacha qizdirilib, so‘ngra toblangan bo‘lsa, po‘latning hosil qilingan yuqori qattiqli-gini saqlab qolish uchun uni bo‘shatish harorati 220°C dan oshmasligi kerak, chunki bo‘shatish harorati 220°C dan yuqori bo‘lsa, po‘latning qattiq-ligi pasayadi. Agar po‘lat 1150°C haroratgacha qizdirilib, so‘ngra toblangan, ya’ni po‘latda ko‘p miqdorda qoldiq austenit hosil qilin-gan bo‘lsa, qoldiq austenitni parchalash va po‘latning qattiqligini oshirish uchun u 525-550°C haroratda bo‘shatiladi.

Asosan ko‘p xromli po‘latlarning qattiqligini oshirish zarur bo‘lsa, ular 1150°C gacha qizdirilib, so‘ngra moyda toblanadi-da, ko‘p miqdorda (30-35%) qoldiq austenit hosil qilinadi, shundan keyin noldan past haroratda ishlov berish va bo‘shatish yo‘li bilan qoldiq austenitning juda ko‘p qismini parchalab yuboradi. Po‘lat shunday termik ishlanganda uning qattiqligi Rokvel pribori bo‘yicha HRC60 dan yuqori bo‘ladi. Ma’lumki, termik ishlashning bu usuli tezkesar

po‘lat uchun qo‘llaniladi, ammo uni ko‘p xromli po‘latlarga ham tatbiq qilish mumkin bo‘ladi.

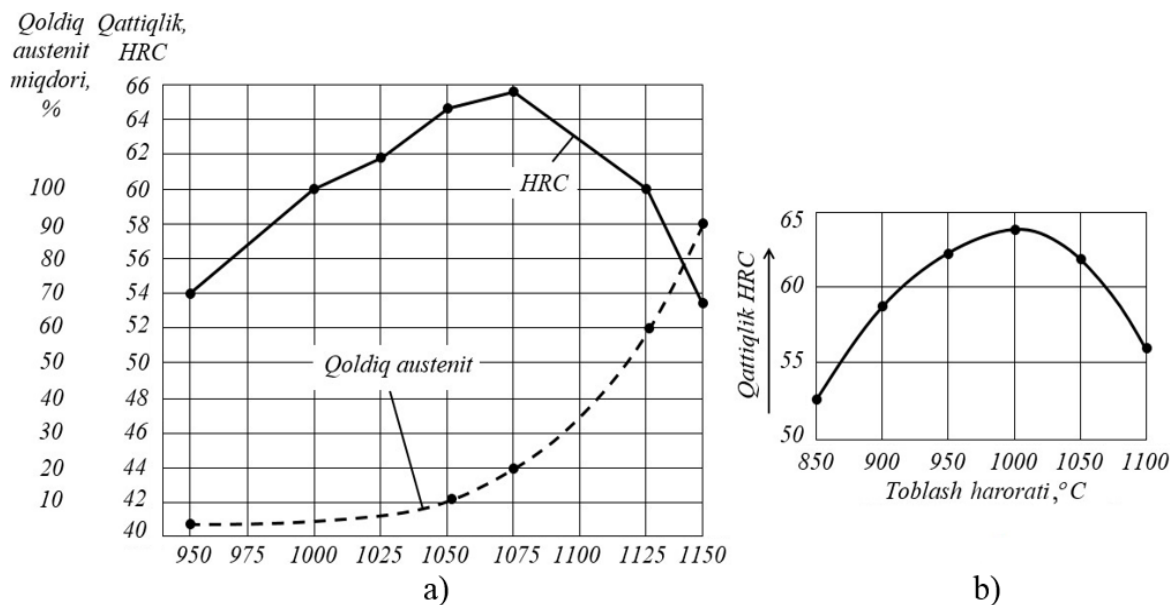
Biz bilamizki, ko‘p xromli po‘latda qoldiq austenit miqdori keng chegaralarda o‘zgarganligi uchun bunday po‘lat toblanganda uning hajmi ham kuchli darajada o‘zgaradi. Po‘lat martensit strukturasigacha toblanganda uning hajmi ortadi, austenit hosil qilish uchun toblanganda esa kamayadi. Ma’lum bir haroratda, hosil bo‘ladigan martensit miqdori bilan austenit miqdori shunday nisbatda bo‘ladiki, toblangan po‘latning hajmi toblanishdan oldingi hajmidan farq qilmaydi. Ammo amalda, toblash harorati martensit bilan austenitning yuqorida aytilgan nisbatiga to‘g‘ri keladigan haroratdan yuqori yoki past bo‘lishi, sovitish sharoitining o‘zgarishi mumkin, natijada, toblangan po‘latning (shtampning) hajmi toblanishdan oldingi hajmidan farq qilib qoladi. Agar shtamp toblanganda uning hajmi kamayib qolsa, bunday shtamp 520°C da bo‘shatiladi. Bunda qoldiq austenitning bir qismi martensitga aylanib, shtampning hajmi kattalashadi. Agar toblash natijasida shtampning hajmi kattalashib qolsa, shtamp 350°C da bo‘shatiladi, bunday haroratda austenit o‘zgarmay qoladi, tetragonal martensit esa bo‘shagan martensitga aylanib, shtampning hajmi kichrayadi. Aytib o‘tilgan bu usul asbob (shtamp) o‘lchamlarini *termik tiklash* deb ataladi.

Shtamp X12M va X12Φ1 po‘latlari juda kichik deformatsiyalanadi, shuning uchun ularga termik tiklak usuli tatbiq etilsa, ularda toblash natijasida hosil bo‘lgan deformatsiyaga, amaliy jihatdan olganda, barham berilgan bo‘ladi. Demak, bu po‘latlarni toblashda deformatsiyalanishiga yo‘l qo‘yib bo‘lmaydigan murakkab shaklli asboblarni yasash uchun ishlatilishi lozim. X12 markali po‘lat tarkibida karbid fazasining miqdori ko‘p bo‘lganligi uchun uning mexanik puxtaligi pastroqdir. Shuning uchun X12 po‘lati uncha muhim bo‘lmagan, konstruksiyasi jihatidan oddiy bo‘lgan asboblarni tayyorlash uchun ishlatiladi.

Asosan ko‘p xromli po‘latlar gruppasiga kiradigan, ammo tarkibidagi uglerod miqdori bilan xrom miqdori nisbatan kamroq bo‘lgan po‘lat X6BΦ* markali po‘latdir. X6BΦ po‘latida karbidlar miqdori X12 xilidagi po‘latlardagidan ko‘ra kamroq bo‘ladi, shuning

uchun u karbidlar likvatsiyasiga kamroq moyildir. X6BΦ po‘latida xrom karbidi - $(Cr, Fe)_7C_3$, ya’ni M_7C_3 dan tashqari, sementit xilidagi karbid ham bo‘ladi. X6BΦ po‘latidan yasalgan asboblarda X12 xilidagi po‘latlardan ko‘ra pastroq ($900-1010^{\circ}C$) haroratgacha qizdirilib, so‘ngra toblanadi, chunki toblash harorati oshirilgani bilan undagi karbid fazasining eritmaga o‘tishi uncha ortmaydi. X6BΦ po‘lati $900-1010^{\circ}C$ gacha qizdirilib, so‘ngra toblanganda uning qattiqligi eng yuqori Rokvel pribori bo‘yicha HRC63 ga teng bo‘ladi. X6BΦ markali po‘lati qattiqligining toblash haroratiga qarab o‘zgarishini ko‘rsatuvchi egri chiziq (3.9-rasm,b) da keltirilgan (eslatma: *X6BΦ po‘lat tarkibida 1,05-1,14% C, 0,4% gacha Si, 0,5-0,35% Mn, 5,5-7,0% Cr, 1,1-1,5% W, 0,5-0,7% V, 0,03% P, 0,03% S bo‘ladi).

Taniqli rus metallshunos olimlaridan professor A.P.Gulyaev, V.D.Bessonov va A.A.Badaevalar shtamp po‘latlaridan X12Φ1 va X6BΦ bo‘yicha ilmiy izlanishlar olib borishgan va yuqori natijalarga erishgan (3.9-rasmga qarang).

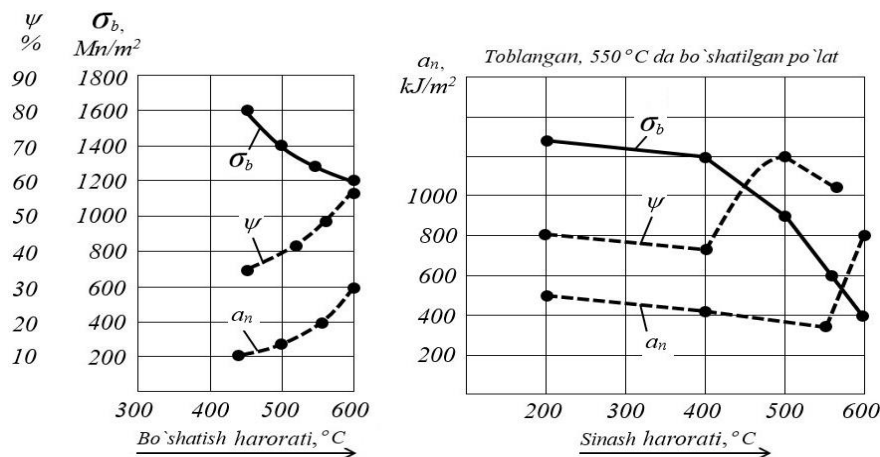


3.9-rasm. Shtamp po‘latlari: **a**-X12Φ1 markali po‘lat qattiqligi va undagi qoldiq austenit miqdorini toblash haroratiga qarab o‘zgarishi; **b**-X6BΦ markali po‘lat qattiq-ligining toblash haroratiga qarab o‘zgarishi grafigi.

Issiq holda shtamplash uchun shtamplar (*qiziydigan shtamp po‘latlari*). Odatda metall va qotishmalarni qizdirib turib deformatsiyalash asboblari tayyorlanadigan po‘latlarda issiqbardoshlik, otashbardoshlik*, termobardoshlik**, chuqur toblanuvchanlik, qovushqoqlik, bo‘shatish vaqtida mumkin qadar kam mo‘rtlashuvlik, yopishmaslik xossalari bo‘lishi kerak (eslatma: *po‘latga harorat uzoq vaqt ta’sir etganda issiqbardoshlik xossasini saqlab qolish xususiyatiga *otashbardoshlik* deb, **po‘latni harorat o‘zgarishiga bardosh berish xossasiga esa *termobardoshlik* deb ataladi).

Asosan yengil sharoitda, ya’ni shtamplash vaqtida shtampning ish yuzasiga tushadigan solishtirma bosim kichik bo‘ladigan sharoitda ishlovchi shtamplar Y7, Y8 va Y9 po‘latlaridan yasaladi; bu maqsadda Y7 po‘lati eng ko‘p ishlatiladi. Og‘irroq sharoitda ishlaydigan shtamplar (bolg‘a shtamlari) legirlangan asbobsozlik po‘latlaridan, masalan, 5XHM, 5XГM, 5XHT va 5XHCB markali po‘latlardan tayyorlanadi XHM va 5XГM po‘latlarining kimyoviy tarkibi 3.1-jadvalda ko‘rsatilgan. Ma’lumki, og‘ir sharoitda ishlaydigan shtamplar tayyorlanadigan po‘latlarning ichida eng yaxshisi va eng ko‘p ishlatiladigani 5XHM markali po‘latdir. Bu po‘lat mexanik xossalari bo‘shatish haroratiga va sinash haroratiga qarab o‘zgarishini ko‘rsatuvchi grafiklar 3.10-rasmda keltirilgan.

Grafikdan ko‘rinib turibdiki, chapda bo‘shatish harorati ko‘tarilgan sari po‘latning puxtaligi pasayib, plastikligi va qovushqoqligi ortib boradi. O‘ngda sinash harorati ko‘tarilganda ham po‘latning puxtaligi pasayadi, ammo plastikligi 400°C haroratgacha pasayib borib, so‘ngra ko‘tariladi-da, harorat 500°C ga yetganda yana pasayadi, zarbiy qovushqoqligi esa ma’lum haroratgacha pasayib boradi va yana ko‘tariladi. Bunday po‘latlarning mexanik xossalari bo‘shatish va sinash haroratlarini o‘zgartirish bo‘yicha taniqli rus olimlari M.V.Pridansev, G.L.Livshits, E.V.Smironov va boshqalar shug‘ullanishgan va ilmiy tomondan yuqori natijalarga erishgan.



3.10-rasm. 5XHM po'lati mexanik xossalari bo'shatish (a) va sinash haroratlariga (b) qarab o'zgarishini ko'rsatuvchi egri chiziqlarning ko'rinishlari.

Shtamp po'latlarini legirlangan asbobsozlik po'latlaridan 5XHT va 5XHCB tayyorlashda quyidagi kimyoviy tarkib tavsiya etiladi: 5XHT markali po'lat 0,5-0,6%C, 0,35% gacha Si, 0,5-0,8%Mn, 0,9-1,25%Cr, 1,4-1,8%Ni, 0,08-0,15%Ti, 0,03%P, 0,03%S; 5XHCB markali po'lat 0,5-0,6%C, 0,6-0,9%Si, 0,3-0,6%Mn, 1,3-1,6%Cr, 0,8-1,2%Ni, 0,4-0,6%W, 0,03%P, 0,03%S bo'ladi.

Aslida 5XHM va 5XHCB po'latlarini toblab, so'ngra 550°C da bo'shatilgandan keyingi mexanik xossalari (normal haroratda) mana bunday bo'ladi: $\sigma = 1200-1300 Mn/m^2$, $\delta = 10-13\%$; $\psi = 40-45\%$; $a_n = 400-500 kJ/m^2$. 5XGM po'lati uchun: $\sigma = 1200-1300 Mn/m^2$; $\delta = 10-13\%$; $\psi = 30\%$, $a_n = 300-400 kJ/m^2$ (plastikligi va qovushqoqligining pasayishiga sabab shuki, bu po'lat marganets o'rniga nikel bilan legirlangan).

5XHT po'latida bo'shatish jarayonini susaytiruvchi elementlar (molibden va volfram) bo'lmaganligidan, bu po'lat 550°C da bo'shatilganda uning puxtaligi pasayib, plastikligi ancha ko'tariladi.

Asosan 600°C haroratda mexanik xossalari kompleksi eng yuqori bo'lgan po'lat 5XHM markali po'latdir. Qizigan holatdagi puxtaligi jihatidan 5XGM va 5XHCB po'latlari 5XHM po'latidan ustun turadi, ammo ularning qovushqoqligi 5XHM po'latinikidan pastroqdir. Ma'lumki, molibden bilan volfram martensitning parchalanish jarayonini kechiktiradi, 5XHT markali po'latda esa bu

elementlar bo‘lmaydi, shuning uchun uning 600°C dagi puxtaligi past bo‘ladi. Bo‘shatish vaqtida mo‘rtlashuv darajasi 5XHT po‘latida yuqori, 5XHM va 5XHCB po‘latlarida esa past bo‘ladi. Toblanish chuqurligi 5XHCB po‘latida eng yuqori, 5XGM po‘latida undan past. 5XHM po‘latida 5XGM po‘latinikidan pastroq, 5XHT po‘latida esa eng past bo‘ladi. Molibden bilan volfram po‘latning termobardoshligini oshiradi, demak, 5XHT po‘latining termobardoshligi qolgan po‘latlarnikidan past bo‘ladi (agar po‘lat tarkibida molibden, volfram, vanadiy, titan va boshqa elementlar bo‘lganida juda ham e‘tiborli bo‘lar edi).

5XHT va 5XHCB po‘latlaridan tashqari, 5XHB markali po‘lat ham bo‘lib, kimyoviy tarkibi quyidagicha bo‘ladi: 5XHB po‘lati 0,5-0,6%C, 0,15-0,35%Si, 0,5-0,8%Mn, 0,5-0,8%Cr, 1,4-1,8%Ni, 0,4-0,6%W, 0,03%P, 0,03%S dan iborat.

Amaliyotdan ma‘lumki, shtamlarga termik ishlov berish (toblash va bo‘shatish) nihoyatda mas‘uliyatli va murakkab ish hisoblanadi. Shtamlarni Ac₃ kritik nuqtadan 20-40°C yuqori haroratgacha qizdirilib, so‘ngra moyda toblanadi. Toblangan shtamlar, masalan, 5XHM po‘latidan yasalgan shtamlar (bolg‘a shtamlari), shtampning o‘lchamiga qarab, 480-580°C haroratda bo‘shatiladi.

Qiziydigan shtamp po‘latlarini toblash va bo‘shatish haroratlari 3.5-jadvalda ko‘rsatilgan.

3.5-jadval

Qiziydigan shtamp po‘latlarini toblash va bo‘shatish haroratlari (bu o‘rtacha o‘lchamli shtamlar uchun)

Po‘lat markasi	Po‘latni toblash usuli		Po‘latni bo‘shatish usuli	
	qizdirish harorati, °C	qattiqligi, HRC	qizdirish harorati, °C	qattiqligi, HB
5XHM	830-850	54-58	530-550	364-402
5XGM	830-850	54-58	530-550	364-402
5XHГ	830-850	54-58	530-550	364-402
5XHT	830-850	54-58	485-510	364-402
5XHCB	850-870	55-59	530-550	364-402

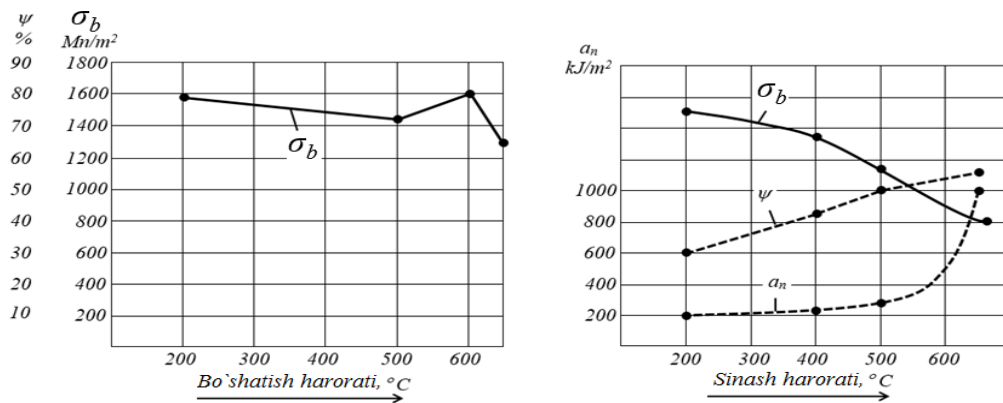
Endi presslash asboblari va gorizontol-bolg‘alash mashinalari bilan tanishib chiqamiz. Presslash asboblari va gorizontol-bolg‘alash mashinalarining shtamlari ko‘proq legirlangan po‘latlardan, masalan, 3X2B8, 4X5B2ΦC ЭИ-9581, 4X2B5ΦM (ЭИ-959), 4X3B2 Φ2 M2 (ЭP-1) po‘latlaridan tayyorlanadi, bu po‘latlarning kimyoviy tarkibi 3.6-jadvalda keltirilgan.

3.6-jadval

Presslash asboblari va gorizontol-bolg‘alash mashinalarining shtamlari tayyorlanadigan po‘latlarning kimyoviy tarkibi

Po‘lat markasi	Elementlar miqdori, % hisobida						
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V
3X2B8	0,3-0,4	≤0,35	0,2-0,4	2,2-2,7	7,5-9,0	-	-
4X5B2ΦC	0,35-0,45	0,8-1,2	0,15-0,4	4,5-5,5	2,4-2,6	-	0,8-1,2
4X2B5ΦM	0,35-0,45	0,15-0,35	0,15-0,4	2,0-3,0	4,5-5,5	0,6-1,0	0,6-1,0
4X3B2Φ2M2	0,35-0,45	0,15-0,35	0,3-0,5	3,0-3,7	2,0-2,7	2,0-2,5	1,5-2,0

3.6-jadvalda keltirilgan po‘latlar ichida eng ko‘p ishlatiladigani 3X2B8 po‘latidir. 3X2B8 po‘latidan yasalgan shtamp 1100°C gacha qizdirilib, so‘ngra toblanadi. Bunda shtamp po‘latining strukturasi martensitdan va ozroq miqdor qoldiq austenit bilan ortiqcha karbidlardan iborat bo‘ladi; po‘latning qattiqligi Rokvel pribori bo‘yicha HRC51-52 ni, mustahkamlik chegarasi esa $\sigma = 1600 \text{ Mn/m}^2$ ni tashkil etadi. 3X2B8 markali po‘lat xossalari bo‘shatish haroratiga va sinash haroratiga qarab o‘zgarishi grafik (3.11-rasmda) keltirilgan. 3X2B8 po‘latining qattiqligi kabi, uning puxtaligi ham po‘lat bo‘shatish haroratigacha (650°C) qizdirilganda juda kam o‘zgaradi (3.11-rasm, chapdagi grafik), demak, 3X2B8 po‘lati va shu xildagi boshqa po‘latlar issiqbardosh po‘latlardir. Buning sababi shuki, ular volfram va molibden bilan legirlangan, bu elementlar esa 650°C dan yuqori haroratlardagina koagullanuvchi karbidlar (M_6C) hosil qiladi. Shuning uchun po‘latning puxtaligi va qattiqligi ham baland (650°C gacha) haroratlarda (3.11-rasm, o‘ngdagi grafik) yuqori bo‘ladi.



3.11-rasm. 3X2B8 markali po‘latining xossalarini bo‘shatish va sinash haroratlariga qarab o‘zgarishini ko‘rsatuvchi egri chiziqlar.

Qizdirib turib presslash asboblarning detallari tayyorlash uchun 3X2B8, 4X5B2ΦS, 4X2B5ΦM va 4X3B2Φ2M2 po‘latlaridan boshqa po‘latlar ham ishlatilishi mumkin. Masalan, ish vaqtida kamroq qiziydigan, kamroq bosim ta’sirida bo‘ladigan matritsalar, teshish va qoliplash puansonlari (uncha uzun bo‘lmagan, kichikroq diametrlilik puansonlar) 5XHM yoki 30XГC po‘latidan tayyorlanadi. Katta solishtirma bosim va yuqori harorat ta’sir etadigan puanson va matritsalar 3X2B8 po‘latidan yoki shu xildagi po‘latlardan tayyorlanishi kerak.

Zarb ta’sirida ishlaydigan asboblarning uchun ham 3X2B8 po‘lati o‘rniga 5XHM yoki 4X5B2ΦC po‘lati ishlatish lozim, chunki ularning qovushqoqligi 3X2B8 po‘latidan yuqori bo‘ladi. Bu borada professor A.P.Gulyaev, S.L.Rustem va boshqa olimlarning ilmiy ishlari va o‘tkazgan barcha eksperimentlari maqtovga sazovordir.

Yuqorida nomlari qayd etilgan shtamp po‘latlardan tashqari, yana 400-500°C dan yuqori haroratgacha qizimaydigan shtamplar 7X3 markali po‘latdan ham tayyorlanishi mumkin (7X3 po‘latining kimyoviy tarkibi 3.1-jadvalda berilgan). Ammo bu po‘latning kamchiligi shundaki, u ko‘rsatilgan haroratdan yuqorigacha qizimaydi, mabodo qizigan taqdirda ham unda darzlar paydo bo‘lishi mumkin.

Gorizontal-bolg‘alash mashinalarining hamda press shtamplarining 3X2B8 va boshqa po‘latlardan yasalgan detallarini termik ishlash ularni ma’lum haroratgacha qizdirib, moyda toblash va

ma'lum haroratda bo'shatishdan iborat. Ularni termik ishlash rejimlari 3.7-jadvalda keltirilgan.

3.6-jadvalda keltirilgan po'latlar markalaridan tashqari, presslash asboblarning detallarini tayyorlash uchun boshqa po'latlar markalarini ham qizdirib ishlatilish mumkin.

3.7-jadval

Gorizontal-bolg'alah mashinalari va press shtamplarining detallari tayyorlanadigan po'latlarni toblash va bo'shatish haroratlari

Po'lat markasi	Po'latni toblash usuli		Po'latni bo'shatish usuli	
	qizdirish harorati, °C	qattiqligi, HRC	qizdirish harorati, °C	qattiqligi, HB
3X2B8	1000-1065	49-52	600-620	402-474
4X5V2AC	1050-1080	53-56	580-620	387-430
4X2B5ΦM	1050-1080	53-56	600-650	387-402
4X3B2Φ2M2	1050-1080	53-56	600-620	387-402

Buning uchun presslash asboblarning detallari ish vaqtida kamroq qiziydigan, kam bosim ta'sirida bo'ladigan matritsalar, teshish va qoliplash puansonlari (uzun bo'lmagan) tarkibida xrom, nikel, molibden, marganets va boshqa elementlar bo'lgan po'latlardan tayyorlanadi. Bunday tashqari, katta solishtirma bosim va yuqori harorat ta'sir etadigan puanson va matritsalar ham shu xildagi po'latlardan tayyorlanishi mumkin, ammo zarb ta'sirida ishlaydigan asboblarning uchun tarkibida yuqoridagi elementlardan tashqari, bor, vanadiy va boshqalar qo'shiladi.

Bosim ostida quyish press-qoliplari detallari ishining harorat rejimi va qiziydigan shtamp detallari ishining harorat rejimi bir-biriga o'xshash bo'lganligidan press-qolip detallari ham qiziydigan shtamp detallari yasaladigan po'latlardan tayyorlanadi va tegishli joylarda qo'llaniladi.

Xulosa qilib aytish mumkinki, qizimaydigan va qiziydigan shtamp po'latlarining kimyoviy tarkibi, mexanik xossalari, toblash va bo'shatish haroratlari va qattiqliklari keltirildi hamda ularning qo'llanilish joylari haqida to'liq ma'lumotlar berildi.

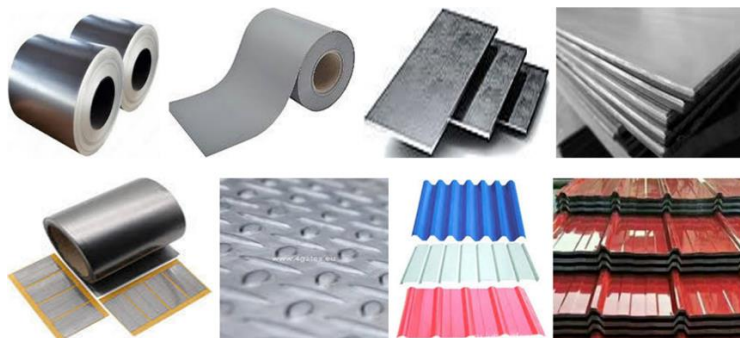
3.3.1. Listli materiallarni shtampovkalash usullari

Odatda, listli materiallarni shtamplash uchun qalinligi yuqaroq ingichka, o'rta va kattaroq qalinlikka ega metall listlardan foydalaniladi. Ular maxsus shtamp presslarida shtamplanadi va kerakli buyumlar olinadi.

Endi listli materiallarni o'rganishga kirishishdan avval ularning ta'rifini bilib olaylik. *Har xil listlar, lentalar, polosalar holatidagi yupqa qalinligi 100 mm gacha bo'lgan plastik metallar va ularning qotishmalaridan hamda metallmas materiallardan turli xil shaklli va o'lchamli buyumlar tayyorlash texnologik jarayoniga listli materiallarni shtamplash deb ataladi.*

Amaliyotdan ma'lumki, listli materiallardan asosan avtotraktormashinasozligida 50-60% va asbobsozlikda 70-80% gacha xilma-xil ko'rinishdagi buyumlar yoki detallar shtamplab olinadi. Buning sababi shuki, listli materiallarni shtampovkalashda judayam aniq shaklli va o'lchamli, bir tekis yuzali metall buyumlar sovuqlayin shtamplab olinadi, shu bois bu usulning ish unumdorligi ancha yuqori hisoblanadi.

Ishlab chikarish sharoitida listli materiallarni shtamplash yuli bilan buyumlarni tayyorlash texnologik jarayonlari ikki boskichga ajratiladi: 1-listli materiallardan zagotovkalar tayyorlash; 2-tayyorlangan zagotovkalarini shtamplab kutilgan shaklga keltirish. Shuning uchun avvalo, listli materiallaridan kerakli zagotovkalar tayyorlanadi va keyin qanday shakl kerak bo'lsa, zagotovkani shtamplab shu shaklga keltiriladi. Quyida rulonli va metall listli materiallarining (3.12-rasm) umumiy ko'rinishlari keltirilgan.



3.12-rasm. Turli xil metall listli materiallarning umumiy ko'rinishlari.

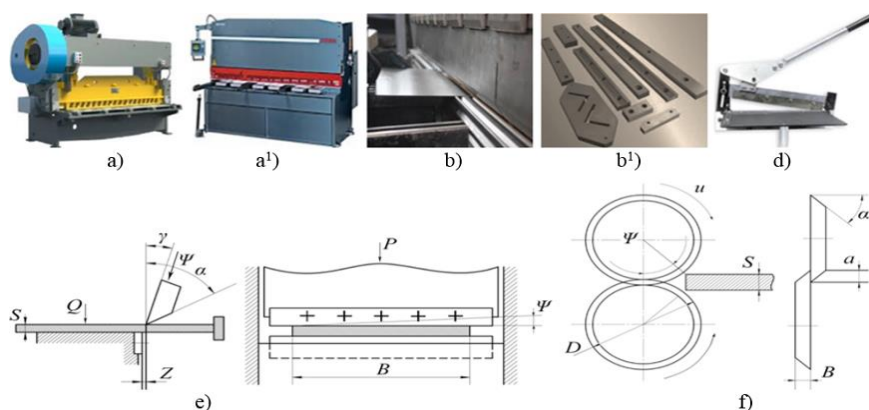
Ko‘pchilik hollarda listli materiallaridan zagotovkalar tayyorlashda olinuvchi metall buyumlar o‘lchamiga qarab, kam chiqindi chiqishiga alohida e‘tibor berish kerak, chunki ish jarayonida qanchalik e‘tiborli bo‘lsa, oqilona yondashib bichilsa, shu zagotovkadan qanday foydalanilganligi va uni alohida ajratilganligi materialdan foydalanish koeffitsiyenti (K_f) yordamida aniqlash mumkin:

$$K_f = n \cdot F / B \cdot L$$

bu yerda n – zagotovka soni; F – zagotovkaning ko‘ndalang kesimi yuzi, mm^2 ; B – zagotovkaning eni, mm ; L – zagotovkaning uzunligi, mm . Demak, bunday holatda

$$K_f = 0,75 - 0,8 \text{ ga teng bo‘la oladi.}$$

Metall listlardan zagotovkalarni ajratib olishda ko‘proq foydalaniladigan pichoq tig‘i va qiyaroq gilotina hamda diskli qirqish mashinalaridan ishlatiladi. Masalan, o‘tkir metall pichoq tig‘li gilotina (3.13-rasm,a,a¹), metall kesish jarayoni (3.13-rasm,b,b¹), metall kesuvchi qaychi (3.13-rasm,d), pichoqli (3.13-rasm,e) va diskli (3.13-rasm,f) qirqish mashinasida metall listlar juda ko‘plab kesiladi.



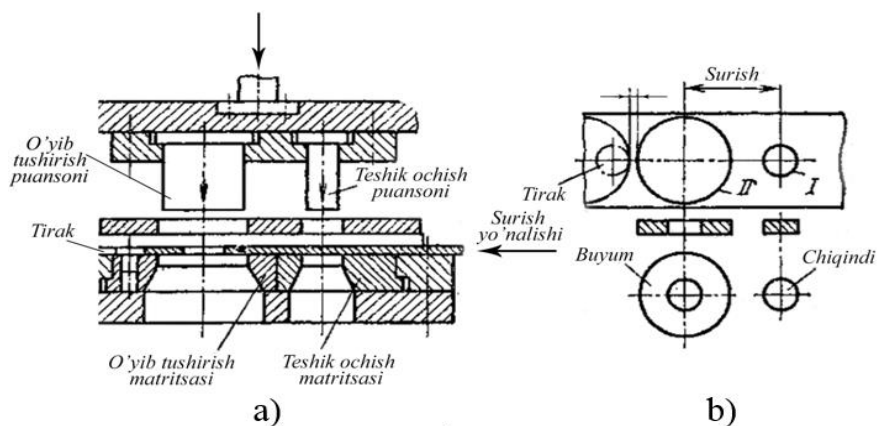
3.13-rasm. Metall qirqish dastgohlari: **a,a¹**-metall kesuvchi gilotina; **b,b¹**-metall kesish jarayoni; **d**-metall kesuvchi qaychi; **e**-metall listlarni o‘tkir pichoqli gilotinada kesish; **f**-metall listlarni diskli mashinada kesish usullari.

Agar gilotina qirqish dastgohida zagotovkani ajratib olishda kerakli kuchlarni quyidagicha aniqlash mumkin bo‘ladi:

$$P = 1,25 \cdot 0,5 \cdot s^2 \cdot \tau_{kr} / \operatorname{tg} \alpha, \text{ H (кГ)}$$

bu yerda 1,25 – pichoqning o‘tmaslanish koeffitsiyenti; s – material qalinligi, mm; τ_{kr} – materialning qirqishga qarshiligi, MPa, u odatda, 0,8-0,9 δ_v ga teng; α – ustki pichoqning qiyalik burchagi, gradusda bo‘ladi.

Metall listlardan turli xil shaklli va o‘lchamli shakldor zagotovkalar kesilishi yoki o‘yib tushirilishi mumkin. Masalan, metall listdan berk kontur bo‘yicha aylana, kvadrat yoki boshqa shakldagi zagotovkalarni o‘yib tushirish kerak bo‘lsa, u puanson va matritsalardan foydalanib presslarda ajratib olinadi (3.14-rasm,a,b). Bunda zazor puanson o‘lchami hisobiga zagotovkaning o‘lchamidan 5-10% kichikroq, matritsa ko‘zi o‘lchami esa zagotovka o‘lchamiga teng qilib olinadi.



3.14-rasm. Metall listlarni o‘yib tushirish (a) va teshik ochish (b) jarayonlari.

Metall listlardan teshik ochishda esa zazor matritsa o‘lchami hisobiga olinadi. Bunday ishlarni bajarishda kerakli kuch qiymati quyidagicha hisoblab topiladi:

$$P = 1,25 \pi d s \tau_{kr}, \text{ H (kg)};$$

$$P = 1,25 L s \tau_{kr}, H \text{ (kg)}.$$

bu yerda 1,25 – puanson va matritsa kesuvchi tig‘larning o‘tmaslanish koeffitsiyenti; d – o‘yib tushirilgan zagotovka diametri, mm; L – o‘yib tushirilgan zagotovka perimetri, mm; τ_{kr} – metallni qirqishga qarshiligi, MPa.

Listli materiallarni kesishda puanson va matritsa kesuvchi pichoq tig‘larining o‘tmaslanish koeffitsiyenti, metallni o‘yib tushirish diametri va perimetri hamda metallni qirqishga qarshiligi hisobga olinishi kerak. Shundagina bir tekis yuzali buyumlar kesib olinadi.

Ko‘pchilik temirchilik tsexlarida va shunga o‘xshash korxonalarda asosan mexanik, gidravlik, bug‘-havoda ishlovchi, krivoshipshatunli, friksion va boshqa yangi zamonaviy presslardan unumli foydalaniladi. Bu presslar odatda, bir stoykali bir polzunli oddiy krivoshipli press va ikki polzunli murakkabroq krivoshipli press holatida ishlaydi.

List metallarni shtamplash presslarida turli xil ishlar bajariladi, ya’ni ularda har xil shaklli va o‘lchamli list zagotovkalari yoki bo‘lmasa, tayyor metall buyumlar presslanib-shtamplanib olinadi. Shtamplash presslarida shtamplab olingan buyumlarning sifati va puxtaligi ancha yuqori bo‘ladi.

Bukish operatsiyasi – materialga bukib ishlov berishda kutilgan shakldagi buyum olish uchun zagotovkani matritsa ustiga qo‘yib, shakldor puanson bilan siqib-ezib matritsa ko‘ziga o‘tkazishda uning pallalari yig‘ilib, kutilgan shaklga keladi. Bunda puansonga qo‘yiluvchi kuch quyidagi formula bo‘yicha aniqlanadi:

$$P = 0,7 B \cdot S^2 \cdot \sigma_b / r+s, H \text{ (kg)}$$

bu yerda B – zagotovka eni, mm; S – zagotovka qalinligi, mm; σ_b – materialning cho‘zilishga ko‘rsatgan qarshiligi, MPa; r – bukish radiusi, mm.

Botirish operatsiyasi – materialga bukib ishlov berishda matritsaga o‘rnatilgan doiraviy zagotovkaning markaziy qismiga puanson bilan ohista bosib, uni matritsa ko‘ziga botirib o‘tkaziladi.

Bunday ishlov berishda stakan, vtulka va boshqa ko‘rinishli buyumlar olinadi. Shunda burma hosil bo‘lmasligi uchun $D_3 / d_a = 1,2-1,3$ oralig‘ida olinishi kerak bo‘ladi.

Bo‘rt qayirish operatsiyasi – materialga qayirib ishlov berishda teshikli list zagotovkaning sirtqi konturi bo‘yicha bort hosil qiladi. Bunda bort qayirish jarayoni hosil bo‘ladi.

Bo‘rttirish operatsiyasi – materialga bo‘rttirib ishlov berishda puanson bilan elastik materialni siqib, zagotovka matritsa ko‘ziga o‘tib, kutilgan shaklli buyum hosil qiladi.

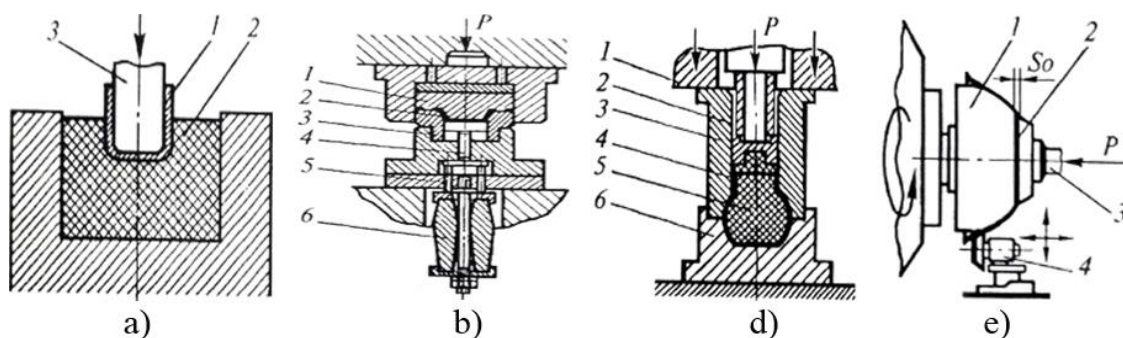
Siqish operatsiyasi – materialga siqib ishlov berishda hoval silindrik zagotovka uchini perimetri bo‘yicha siqib kichiklashtiriladi, ya’ni zagotovka siqilgan sayin kichiklashib boraveradi.

Demak, listli materiallarni shtamplash operatsiyalarining o‘z maqsadlari va vazifalari borki, ulardan turli shaklli va o‘lchamli metall list buyumlari olinadi.

Bu operatsiyalardan tashqari, listli materiallarni shtamplashning oddiy shtamplash usuli, ilgor shtamplash usuli va boshqa usullari ham mavjuddir.

Metallarni oddiy shtamplash usuli – bu usul asosan elastik materiallar yordamida shtamplashga asoslanadi. Oddiy shtamplash usuli bilan qalinligi 2,0 mm gacha bo‘lgan yuqori plastik materiallardan kichik va o‘rtacha o‘lchamdagi buyumlarni kam seriyalab olishda foydalaniladi. Quyidagi 3.15-rasm,a da konteynerdagi rezina o‘rindiqlik 3 dagi list 2 puanson 1 bilan botirilganda, u zagotovkani puansonga siqib, kutilgan shaklga keltiradi.

Keyingi 3.15-rasm,b da poliuretanning puanson 1 bilan cho‘zib botirishi ko‘rsatilgan, 3.15-rasm,d da metall listni puanson bilan botirib 1 shtamplash jarayoni havola etilgan, 3.15-rasm,e da esa metall listni bosqich bilan bosim ostida ishlov berib, kutilgan shaklga o‘tkazish jarayoni tasvirlangan.



3.15-rasm. Metallarni oddiy shtamplash usullari: **a**-rezina bilan shtamplash; 1-puanson; 2-list; 3-rezina o‘rindiqli; **b**-poliuretanni puanson bilan cho‘zib botirish: I-holda: 1-puanson; 2-detaly; 3-matritsa; 4-turtki; 5-shtok; 6-rezina bufer; II-holda: 1-tashqi polzun; 2-puanson tutkich; 3,6-matritsa; 4-ichki puanson; 5-detaly; **d**-botirish bilan shtamplash; 1-opravka; 2-zagotovka; 3-tirak; 4-bosqich; **e**-bosib shtamplash jarayonlarining ko‘rinishlari.

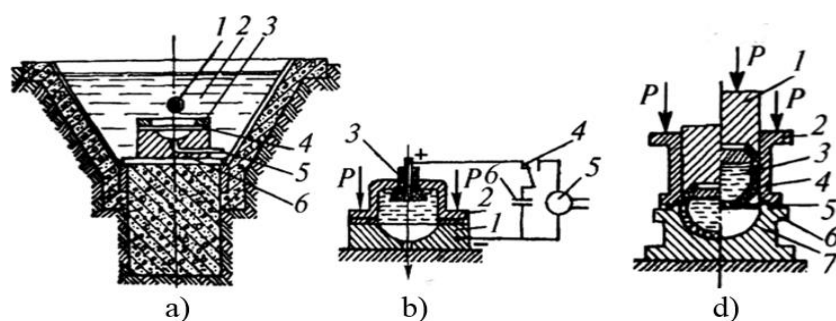
Oddiy shtamplash usulida ko‘proq plastik materiallardan kichikroq va o‘rtacharoq shakl va o‘lchamlardagi detallar yoki buyumlarni juda kam seriyalab ishlab chiqarishda foydalaniladi. Bu usul asosan rezina bilan shtamplash, poliuretanni puanson bilan cho‘zib botirib shtamplash, botirish bilan shtamplash, bosib shtamplash va zagotovkani bosqich bilan bosib kutilgan shaklga keltirish jarayonlarini o‘z ichiga oladi.

Metall zagotovkani bosqich bilan bosib kutilgan shaklga keltirish usulida zagotovkani u bilan birga aylanuvchi yog‘och opravkaga bosqich bilan siqib borib, u opravka shakliga o‘tkaziladi. Bu usul bilan ishlaganda zagotovka qalinligi o‘zgarishi ham, o‘zgarmasligi ham mumkin, bu holat zagotovkani qanchalik kuch bilan siqish yoki ezish darajasiga ham bog‘liq bo‘ladi (3.15-rasm, g ga qarang).

Metallarni ilg‘or shtamplash usuli – bu usul asosan zagotovkani portlovchi moddalar kuchida shtamplashga asoslangan. Bunda portlovchi moddalar sifatida porox, trotil, bizant va boshqalardan foydalaniladi. Quyidagi 3.16-rasm, a dan ko‘rinib turibdiki, shtamplashni boshlashdan oldin suv bilan to‘ldirilgan basseyndagi matritsa 6 ustiga list o‘rnatiladi. Qisqich 3 bilan siqilgach, matritsa 6

o‘yig‘idagi havo trubka 5 orqali suriladi va osilgan detanatorli zaryad portlatiladi. Hosil bo‘lgan kuchli energiya suvda katta bosimli to‘lqin berib, bu to‘lqin zagotovkani matritsa tomon siqib, shtamplaydi. Ilg‘or shtamplash usulida qimmatbaho asbob-uskunalar va priborlar talab etilmaydi, bu usul shunisi bilan ham unumli usul hisoblanadi.

Ilg‘or shtamplash usulida yana elektrogidravlik shtamplash usuli ham borki, bu portlatib shtamplash usuliga juda o‘xshash bo‘lib, shtamplashda hosil qilingan elektr zaryadi suv to‘lqiniga o‘tib, zagotovkani matritsaga shtamplaydi. Quyidagi 3.16-rasm, b da zagotovka matritsa 1 ga qo‘yilib, chekkasi korpus 2 bilan siqiladi, so‘ngra matritsa o‘yig‘idan havo so‘rilib, korpus suv bilan to‘ldiriladi, undan keyin elektrod 3 orqali elektr impulsi hosil qilinadi. Bu payt suvda zarblovchi to‘lqin hosil bo‘lib, u zagotovkani matritsaga shtamplaydi. Suyuqlik bilan shtamplash jarayoni 3.16-rasm, d da ko‘rsatib o‘tilgan. Suyuqlik bilan shtamplashda plunjer 1 qisqich 2 bilan o‘zaro harakatga kelib, suyuqlik 3 va rezina g‘ilof 4 bilan zagotovka 5 ni matritsa 6 ga jo‘natadi, natijada suyuqlik bilan shtamplash jarayoni o‘tib, tayyor detal hosil bo‘ladi.



3.16-rasm. Metallarning ilg‘or shtamplash usullari: **a**-portlatib shtamplash: 1-detanator zaryad; 2-suv; 3-qisqich halqa; 4-zagotovka; 5-trubka; 6-matritsa; **b**-elektrogidravlik shtamplash: 1-matritsa; 2-korpus; 3-elektrod; 4-kontakt kurulma; 5-to‘g‘rilagich; **d**-suyuqlik bilan shtamplash: 1-plunjer; 2-qisqich; 3-suyuqlik; 4-rezina g‘ilof; 5-zagotovka; 6-matritsa; 7-detal ko‘rinishlari.

Metallarga bosim bilan ishlov berish sexlarida xavfsizlik texnikasi va qoidalarini bilish hamda ularga rioya qilish holatlari. Ishlab

chiqarish zavodlari va korxonalarining ishchilari, muxandis-texnik xodimlari va rahbarlari doimo xavfsizlik texnikasi va qoidalariga qat'iy ravishda rioya qilishlari zarur, bu barcha ishlab chiqarish tsexlari va uchastkalarini o'z ichiga oladi. Ayniqsa, quymakorlik tsexi, mexanika, termik ishlov berish, metallarga bosim bilan ishlov berish va boshqa turdosh sexlar shular jumlasiga kiradi.

Metallarga bosim bilan ishlov berish tsexlarida zagotovkalarni kesishda, avval ularni ma'lum haroratgacha qizdirib, so'ngra bolg'lash va presslashda qator mashinalar, qurilmalar, asbob-uskunalar, moslamalar va boshqalar bilan tsexlari bevosita munosabatda bo'linadi. Shu sababli avvalo, ularni to'g'ri ishlatish tartiblari va qoidalarini bilishlari, ishga to'g'ri rostdashlari, harakatlanuvchi qismlarini himoyalash, oyoq ostida pokovkalar sochilib betartib yotmasligi va ishga halaqit bermasligi kerak.

Ishga kerakli zarur asboblardan, moslamalar, jihozlardan, anjomlardan tegishli joylarda bo'lishi, ishchi korjoma, maxsus kiyimlar, ochkilar va qo'lqop kiyib ishlashlari lozim. Tsex sharoitlarida ajraladigan kuyindining tashqariga ko'p miqdorda chiqib ketishining oldini olishga alohida ahamiyatli bo'lish va qat'iy e'tibor berish kerak. Ishlab chiqarish tsexlarini doimo yorug' tutish, toza va ozodalikka rioya qilish va vaqti-vaqti bilan shamollatib turish zarur, har bir tsexdagi dushlar va boshqa zaruriy joylar har doim normal ishlab turishi kerak.

Ishchi xodimlar ishni boshlashdan avval texnika xavfsizligi qoidalaridan o'tishlari, uni bilishlari va tushinishlari kerak. Ishchilar ishga kelganlarida ular uchun alohida-alohida yechinish xonalari, to'liq ish kiyimlari, qulay ish joylari, ishdan keyin esa yuvinish joylari dushlar bo'lishi lozim. Ishchi ish joyiga kelganida avvalo stanokning sozligini, asboblarning yaroqliligini va texnika xavfsizligini tekshirish kerak, undan keyin ishni boshlash mumkin. Stanok atrofida metall yoki metallmas bo'laklar, moylar, tez yonuvchi yoki alanga oluvchi materiallar, portlovchi moddalar va boshqa zararli elementlar bo'lmasligi lozim. Ishchi ishni tamomlagandan so'ng stanok ishchi qismlarini artib, tozalab, zaruriy joylarini moylab qo'yishi kerak. Shundagina stanoklar ertangi ishga tayyor holatda

turadi. Ishchi xodimlar (muhandislar va rahbarlar) vaqti-vaqti bilan texnika xavfsizligidan o'tishlari kerak, bu barcha ishlab chiqarish xavfsizligini ta'minlaydi va ish unumini anchaga oshiradi.

Yuqorida keltirilgan ma'lumotlardan xulosa qiladigan bo'lsak, zavod yoki korxonaning quymakorlik tsexi, mexanika tsexi, termik ishlov berish tsexi, payvandlash va qoplama qoplash tsexlarida ishlovchi ishchilar texnika xavfsizligiga qat'iy e'tibor bergan holda albatta har kuni maxsus brezent kiyim-boshlarni, oyoq kiyimlarni, qo'lqoplarni kiyib, ochkilarni taqib, ehtiyot choralarni ko'rib ishlashlari kerak, bu ularning xavfsizligini ta'minlaydi va turli xil noxush voqealarning oldini oladi. Zavod yoki korxonaning territoryasiga kirgan har bir ishchi – xodim ayniqsa, ishchilar albatta texnika xavfsizligiga rioya qilgan holda yuqorida nomlari qayd etilgan inventarlarni, ya'ni kiyimlar va qo'lqoplarni kiyib, ko'zlariga ochkilarni taqib, nihoyatda ehtiyot bo'lib ishlashlari shart. Shundagina barcha texnik xavfsizliklardan holi bo'ladi.

3.4. Metall materiallarni erkin kovkalash

Quymakorlik usulida quyib olinadigan quyma pokovkalar yoki prokat zagotovkalaridan olinadigan pokovkalar turli xil shaklli va o'lchamli ko'rinishlarda bo'ladi. Pokovkalar har xil shaklli va o'lchamli bo'lib, ularning og'irligi bir necha grammdan, toki bir necha tonnachaga (masalan, 5-450 gr gacha, 10-100 kg gacha va 250-350 t gacha) va undan ham ortiq bo'lishi mumkin. Bu yerda shuni eslatib o'tish kerakki, odatda, katta o'lchamli pokovkalar quymakorlik usulida quyib olinadi, o'rta va kichik o'lchamli pokovkalar esa prokat zagotovkalaridan tayyorlanadi. Har bir pokovka ishlatiladigan joyiga va maqsadiga qarab, belgilangan joylarda foydalaniladi. Texnologik ishlov berish natijasida hosil qilingan buyumlarga pokovka deb ataladi. Pokovkalarni har xil asboblarda yordamida bolg'alab yoki erkin bolg'alab, kerakli zaruriy ishlovlar berib turli buyumlar yasaladi.

Endi materiallarni erkin bolg'alash usuliga quyidagicha ta'rif beramiz: «Plastik holatdagi materialni bolg'a muhrasi va tegishli

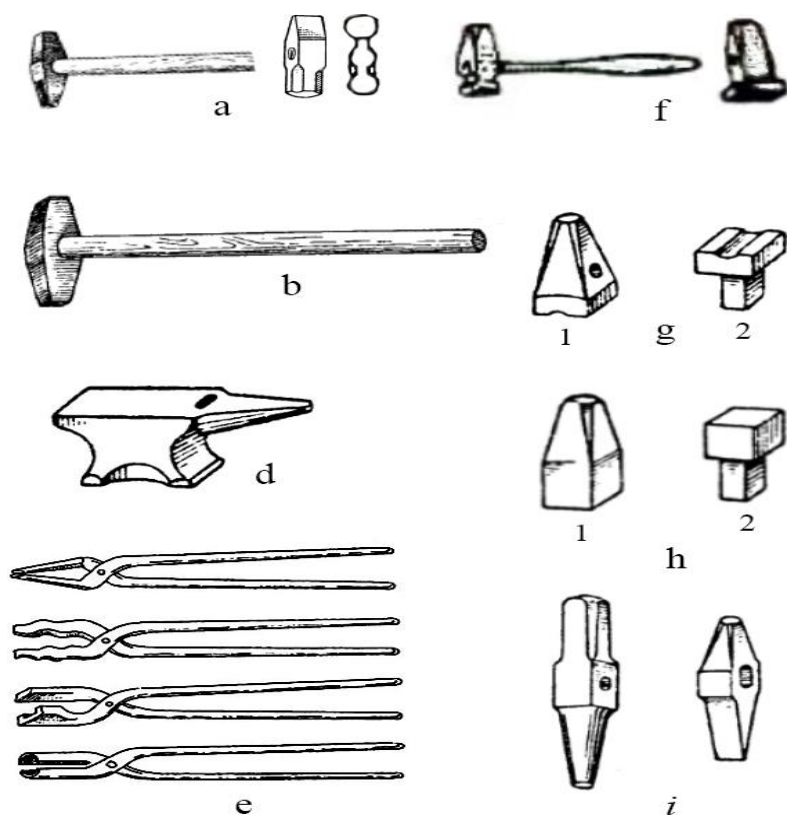
asboblardan zarblab urib yoki press muhrasining bosimi ta'sirida kutilgan shaklli va o'lchamli buyumlar (yoki detallar) olish texnologik jarayoniga erkin bolg'alash deb ataladi».

Insonlar juda qadimdan materiallarni bolg'alash usullari bilan tanish bo'lganlar. Ammo shunga qaramay, bugungi kunda ham bolg'alash usullari yordamida metall buyumlarni donalab yoki juda kam seriyada ishlab chiqaruvchi korxonalarda keng qo'llaniladi. Ayrim ishlab chiqarish zavod – korxonalarida metallarni bolg'alash presslari yordamida buyurtmachilar talabiga ko'ra pokovka buyumlari donalab yoki ko'proq donalab tayyorlanib berishi mumkin, lekin seriyalab ishlab chiqarilmaydi. Buning sababi shuki, jarayon juda murakkab, qiyin va qo'l mehnatini ko'p talab qiladi hamda ish unumdorligi juda past bo'ladi, shu bois bu usuldan kam foydalaniladi.

Materiallarni bolg'alash usuli mexanizatsiyalashganlik darajasiga ko'ra dastaki va mashinalarda bolg'alash turlariga bo'linadi: 1-metallarni dastagi bolg'alashda mayda prokat zagotovkasini tajribali usta bir uchini chap qo'lidagi qisqich bilan qisadi, sandon ustiga qo'yadi, o'ng qo'lidagi bolg'acha bilan ura boshlaydi, shogirdiga esa kuvalda bilan urush joyini ko'rsatadi, shogirdi ustozi ko'rsatgan joyga kuvalda bilan uradi va natijada kutilgan shaklli va o'lchamli buyum tayyorlanadi (*eslatma*: buyumni tayyorlaydigan usta yoki ustalar nihoyatda sog'lom, baquvvat va kuchli bo'lishlari kerak).

Metallarni bolg'alashda tegishli ishlarni bajarish uchun turli xil asboblardan, masalan, bolg'alar, qisqichlar, tekislagichlar, sandonlar, zubilalar, metall qaychilar, ombirlar, kleshikilar (3.17-rasm) va boshqalardan unumli foydalaniladi; 2-metallarni mashinalarda bolg'alashda asosan mashinasozlik zavodlari yoki kichik temirchilik tsexlarida zagotovkalardan kichik va mayda hajmli pokovkalar olishda foydalaniladi. Pokovkaning shakli va o'lchamlari buyum qo'llaniladigan joyga bog'liq bo'ladi.

Metallarni bolg'alashda qo'llaniladigan barcha asboblardan va uskunalardan soz va ishga yaroqli bo'lishi kerak, shunda ish unumi juda yaxshi bo'ladi.



3.17-rasm. Metallarni dastaki bolg‘alashda ishlatiladigan har xil asboblarning ko‘rinishlari: **a**-bolg‘a; **b**-bosqon; **d**-sandon; **e**-ombirlar, **f**-silliqlagichlar; **g**-qisqichlar; 1-ustki; 2-ostki; **h**-podboykalar; 1-ustki; 2-ostki; **i**-zubilalar.

Metallarni qizdirishda ko‘proq gazli pechlardan (yoki kam hollarda elektr pechlaridan) foydalaniladi. Tajribali va malakali usta kerakli me'yorigacha qizigan metallni pechdan ombir yoki kleshi yordamida chiqarib oladi va sandon ustiga qo‘yadi. Qizigan metall tez sovib qolmasligi uchun usta va uni shogirdi tezlik bilan qo‘lda bolg‘alaydi va chizma talabiga ko‘ra kutilgan shakl va o‘lchamga keltiradi (agar metall sovib qolsa, bu jarayon bir necha marta qaytariladi, ya’ni metall qayta-qayta qizdiriladi va bolg‘alanadi). Pokovkadan yasalgan metall buyumlar sifati usta tajribasiga va malakasiga bog‘liq bo‘ladi. Shuning uchun zavod yoki korxonalar tsexlarida ham, temirchilik tsexlarida ham yoki kichik ta’mirlash ustaxonalarida ham tajribali va malakali temirchi ustalar ishlagani ma’qulroq, chunki ular sifatli bolg‘alangan metall buyumlar tayyorlashni biladilar.

Materiallarni erkin bolg‘alashga quyidagi asosiy operatsiyalar kiradi:

1-cho‘ktirish operatsiyasi. Bunda metall zagotovka bo‘yiga kichraytirilib, buning hisobiga ko‘ndalang kesim o‘lchamlari kattalashtiriladi (3.18-rasm,a). Bu operatsiya bilan ishlov berishda metall zagotovka bo‘yicha egilmasligi uchun uni bo‘yi diametridan yoki qalinligidan 2-2,5 martadan ortiq olinmasligi lozim. Odatda kesim yuzi kvadrat va to‘g‘ri to‘rt burchakli zagotovkalarni boshqa kesimli shaklga o‘tkazishda ularni avvalo, yumaloq shaklga o‘tkazish uchun harakat qilishga va eng kichik perimetr qoidasi bo‘yicha ishlov berishga cho‘ktirish deb ataladi.

Bu operatsiya bo‘yicha ishlov berilganda kutilgan maqsad va natijalarga tezroq erishiladi.

Agar zagotovkaning ayrim joylari cho‘ktirilsa, bunday ishlov berishga mahalliy cho‘ktirish deb ataladi. Bu ishlovda zagotovkaning cho‘kish koeffitsiyenti qiymatini quyidagi formuladan aniqlash mumkin:

$$K_r = H / h \quad (3.3)$$

bu yerda H – zagotovkani cho‘ktirilguncha balandligi, mm;

h – zagotovkani cho‘ktirilgandan keyingi balandligi, mm.

Zavod yoki korxonalar sexlarida yoki temirchilik ustaxonalarida mas’uliyatli pokovkalarni olishda $K_r = 3-5$ va undan ham ortiqroq bo‘lishi mumkin;

2-cho‘zish operatsiyasi. Bunda metall zagotovkaning ko‘ndalang kesim o‘lchamlari hisobiga bo‘yi uzaytiriladi (3.18-rasm,b). Bunday ishlov berishda zagotovkaning ko‘ndalang kesimi cho‘zil-magan joyini ketma-ket cho‘zishda uni o‘qi atrofida aylantirilib boriladi.

Agar zagotovkaning bir joyigina cho‘zilsa, unga mahalliy cho‘zish deb ataladi. Bu ishlovda uzayish koeffitsiyenti quyidagi formuladan aniqlash mumkin:

$$K_y = L / l \quad (3.4)$$

bu yerda L – zagotovkani cho‘zilgandan keyingi uzunligi, mm;
 l – zagotovkani cho‘zgungacha uzunligi, mm.

Zavod yoki korxonalar sexlarida yoki temirchilik ustaxonalarida zagotovkalardan pokovkalarni olishda $K_y = 1,3-2$ oralig‘ida bo‘lishi mumkin;

3-teshish operatsiyasi. Bunday ishlov berishda zagotovkadan ma’lum hajmdagi metall teshgich asbob bilan siqib chiqarilib, teshik ochiladi (3.18-rasm,d). Zaruriyatga ko‘ra qalin metallda teshik teshiladigan bo‘lsa, oldin zagotovkaning bir tomonidan chuqurcha qilinadi, so‘ngra orqa tomonidan ishlov berilib teshik ochiladi. Amaliyot tahlillariga qaraganda, zagotovka diametri 50 mm dan kichik teshiklar ochish iqtisodiy tomondan ma’qul emas;

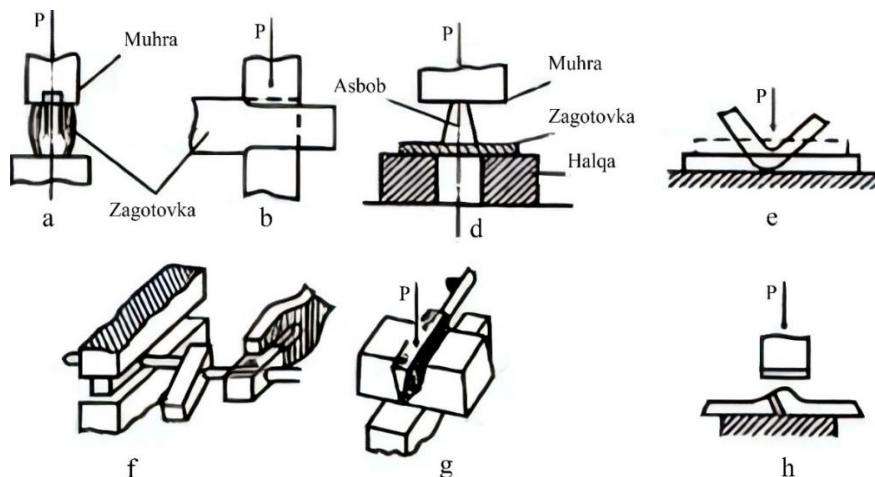
4-raskatkalash operatsiyasi. Odatda, halqali zagotovka teshik-chani kattalashtirish uchun raskatkalanadi. Buning uchun maxsus opravkaga kiydirilgan zagotovka uzluksiz aylantirish yo‘li bilan zarblanadi. Shunda metall zagotovkalar to‘liq raskatkalanib bo‘ladi, raskatkalangan metall buyumlardan foydalanish mumkin;

5-bukish operatsiyasi. Bunda metall zagotovka maxsus shtamp bo‘shlig‘i konturi bo‘ylab eguvchi mashinalarda bukiladi (3.18-rasm,e);

6-burash operatsiyasi. Bu operatsiyada metall zagotovkaning bir qismini ikkinchi qismiga nisbatan maxsus moslamalarda o‘qi bo‘yicha ma’lum burchakka buriladi (3.18-rasm,f);

7-kesish operatsiyasi. Bu ishlovda o‘lchamlari katta bo‘lgan zagotovka bir necha mayda bo‘laklarga kesib ajratiladi (3.18-rasm,g). Bu ishlov berishni bajarishda temirchilik boltalari va zubilaridan unumli foydalaniladi;

8-payvandlash operatsiyasi. Bu ishlovda kam uglerodli po‘latlarning zagotovkalarini 1100-1300°C haroratgacha qizdirilgandan so‘ng, ularni ustma-ust, qiya kertilgan yuzalari bo‘yicha yoki uchma-uch qilib payvandlash uchun po‘lat zagotovkalarining tashqi yuzalari chang, kir, moy va zanglardan tozalangach, bolg‘a yoki press ostida siqiladi (3.18-rasm,h). Odatda, tashqi yuzalari chang, kir, moy va zanglardan tozalangan po‘latlarni – metallarni uchma-uch qilib, siqib payvandlash mumkin, shunda ikkala metall bir-biriga yaxshi birikib payvandlanadi.



3.18-rasm. Metall zagotvokalarining asosiy bolg‘alash operatsiyalari: **a**-cho‘ktirish; **b**-cho‘zish; **d**-teshish; **e**-bukish; **f**-burash; **g**-kesish; **h**-payvandlash jarayonlarining ko‘rinishlari.

Demak, materiallarni erkin bolg‘alash operatsiyalariga cho‘ktirish, cho‘zish, teshish, bukish, burash, kesish, payvandlash va boshqalar kiradi. Bu operatsiyalar o‘z ahamiyatiga ega bo‘lib, ulardan turli xil shaklli va o‘lchamli buyumlar tayyorlanadi va belgilangan maqsadlar uchun qo‘llaniladi.

Materiallarni erkin bolg‘alash presslari va ularda bajariladigan ishlar. Umuman mashinasozlik sanoatlarida ishlatiladigan mexanik, pnevmatik, gidravlik va boshqa nomli presslar yoki press uskunalar asosan metall zagotvokalarini turli shakl va o‘lchamga keltirish uchun xizmat qiladi. Odatda, oddiy va kam uglerodli po‘latlarning zagotvokalari sovuq yoki issiq holda chizma talabi bo‘yicha bolg‘alab presslanadi.

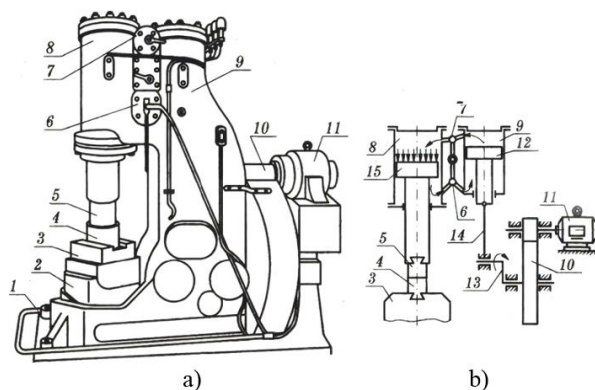
Metall zagotvokalarni bolg‘alarda dinamik zarb bilan kattaroq 6-7 m/s tezlikda ishlov berilsa, presslarda esa sekinroq 0,1-3 m/s tezlikda statik yuklamada katta bosim bilan ishlov beriladi.

Metall bolg‘alash presslari yoki uskunalari konstruksiyasining oddiyligi, juda oson rostlanishi, har xil tezlikda va turli kuch bilan ishlashi hamda boshqa ko‘rsatkichlariga ko‘ra ishlab chiqarish korxonalarining bolg‘alash-presslash tsexlarida juda miqdorda foydalaniladi.

Odatda, bolgʻalarning pnevmatik siqilgan havoda siqilgan bugʻ-havoda, mexanik tarzda ishlovchi va boshqa xillari boʻlsa (3.19-rasm), presslarning esa gidravlik siqilgan suvda, siqilgan bugʻ-havoda, krivoship, friktsion va boshqa xillari boʻladi (3.20-rasm).

Bolgʻalar yoki presslarning qaysi biridan foydalanish olinuvchi pokovkalar materialiga, shakli va oʻlchamlariga bogʻliq boʻladi. Masalan, mayda ogʻirligi 25-30 kg gacha boʻlgan pokovkalar olishda asosan pnevmatik bolgʻalardan, oʻrtacha ogʻirlikdagi pokovkalar olishda siqilgan bugʻ-havoda ishlovchi bolgʻalardan va yirik pokovkalar olishda esa gidravlik presslardan unumli foydalaniladi va turli xil ogʻirlikdagi har xil shaklli va oʻlchamli pokovka buyumlari olinadi.

Ishlash printsipiga qarab, bolgʻalar ham, presslar ham turli xil konstruktsiyali boʻladi. Aytaylik, siqilgan bugʻ-havoda ishlovchi bolgʻalar umumiy tuzilishiga koʻra oddiy va murakkab xillarga boʻlinadi: 1-oddiy xilli bolgʻalarda siqilgan bugʻ-havo zarb beruvchi qismlarni faqat yuqoriga koʻtarish uchun xizmat qiladi; 2-murakkab xilli bolgʻalarda esa siqilgan bugʻ-havo zarb beruvchi qismlarni faqat yuqorigagina koʻtarmay, balki pastga tushishida porshenga qoʻshimcha bosim ham beradi va bolgʻaning zarb quvvatini anchaga oshiradi. Shuning uchun bu bolgʻalar ishlab chiqarish sanoatlarining turli tarmoqlarida keng qoʻllaniladi.

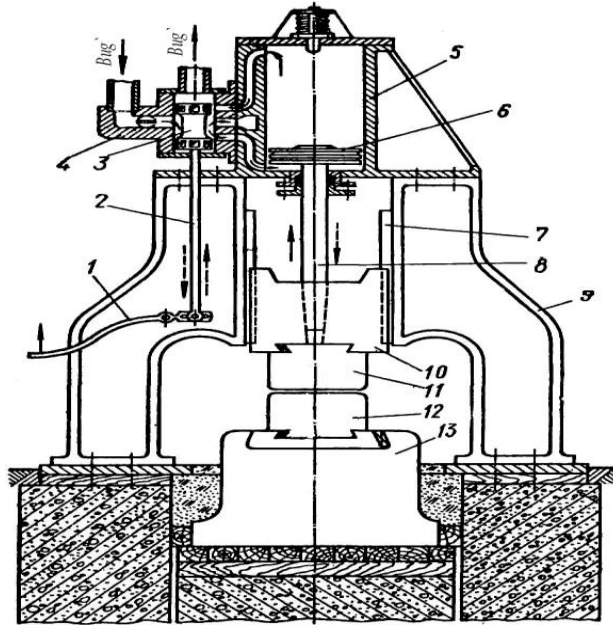


3.19-rasm. Ishlab chiqarish sanoatlarida qoʻllaniladigan pnevmatik bolgʻaning umumiy koʻrinishi (a) va ishlash sxemasi (b): 1-pedal; 2-shabot; 3-yostiqla; 4-pastki boyoq; 5-ustki boyoq; 6,7-havo taqsimlovchi mexanizm; 8-ish silindri; 9-kompressor silindri; 10-reduktor; 11-elektr dvigateli; 12-ish silindri porsheni; 13-kompressor porsheni; 14-krivoship-shatunli mexanizm; 15-ustki boyoq babasi.

Pnevmatik bolg‘a (3.19-rasmga qarang), siqilgan havoda ishlashi bilan bir qatorda, uning ikkita silindri bo‘ladi, ulardan biri kompressor silindri bo‘lsa, ikkinchisi ish silindri, ular siqilgan havoni taqsimlovchi mexanizmlari orqali bog‘langan bo‘ladi. Bolg‘aning kompressor silindridagi porshenga ilgarilama-qaytma harakat elektr dvigateli, reduktor va krivoship-shatunli mexanizmi orqali uzatiladi. Bolg‘aning ishlash printsipti bo‘yicha barcha mexanizmlar bir-biri bilan chambarchas bog‘liqdir.

Bolg‘aning kompressor silindri porsheni pastga harakatlanganda uning tagidagi siqilgan havo taqsimlovchi mexanizmi orqali ish silindri porsheni tagiga o‘tib, uni yuqoriga ko‘taradi va aksincha, porshen yuqoriga harakatlanganda siqilgan havo taqsimlovchi mexanizm orqali ish silindridagi porshening yuqorisiga o‘tib, uni pastga yurgizadi. Bunda u bilan bog‘langan baba boyoq pastga harakatlanadi va pastki boyoq ustidagi zagotovkani zarblab presslaydi. Agar juda zarur bo‘lsa, ustki boyoqni havo taqsimlovchi mexanizm yordamida ko‘tarilgan yoki tushirilgan holda saqlay oladi. Bu bolg‘alardan ko‘pincha mayda pokovkalar olishda foydalaniladi, sababi bu bolg‘alarda tushuvchi qismlar massasi 75-1000 kg gacha bo‘ladi va ular minutiga 95-225 martagacha zarba beradi. Hozirgi zamonaviy bolg‘alarda esa zarba berish kuchi bularga qaraganda, bir necha barobar ko‘proqdir.

Bu bolg‘alardan tashqari, siqilgan bug‘-havoda ishlovchi bolg‘alar ham bo‘ladi (3.20-rasmga qarang). Ular umumiy tuzilishi va ishlash printsipti bo‘yicha bir stoykali va ikki stoykali ko‘rinishda yasaladi.



3.20-rasm. Ishlab chiqarish sanoatlarida qo'llaniladigan ikki stoykali bug'-havoda ishlovchi bolg'aning umumiy ko'rinishi va ishlash printsipti: 1-richag; 2-tortqi; 3-zolotnik; 4-taqsimlovchi mexanizm; 5-tsilindr; 6-porshen; 7-yo'naltiruvchi; 8-shtok; 9-bolg'a staninasi-stoykasi; 10-babasi; 11-ustki boyoq; 12-pastki boyoq; 13-po'lat plitasi shabot.

Ma'lumki, siqilgan bug'-havoda ishlovchi bolg'alar ishlash qobiliyatiga ko'ra oddiy bug' uskunasi o'xshash bo'ladi va unda ham siqilgan bug' yoki havoni ikki tomonga taqsimlovchi mexanizmi, ya'ni zolotniki bo'ladi va u bug' yoki havoni (3.20-rasm) kerakli tomonga taqsimlab turadi.

Ikki stoykali bug'-havoda ishlovchi bolg'ani ishga tushirish uchun richagni, u bilan bog'langan tortqini pastga o'tkazilganda bug' yoki havoni taqsimlovchi mexanizmi orqali 0,7-0,9 MPa bosimda silindr porsheni tagiga kirib porshenni va u bilan bog'langan shtokni, baba va ustki boyoqni yuqoriga ko'taradi va aksincha, richagni, u bilan bog'langan tortqini yuqoriga o'tkazilganda bug' yoki havoni taqsimlovchi mexanizm orqali 0,7-0,9 MPa bosimli siqilgan bug' yoki havo silindri porsheni yuqorisiga kirib porshenni va u bilan bog'langan shtokni, baba va ustki boyoqni pastga harakatlantiradi. Bunda pastga harakatlanuvchi detallar massasiga bug' yoki havo

bosimi qo‘shilib, pastki boyoq muhrasi ustida qo‘yiluvchi zagotovkani zarblaydi-presslaydi.

Bunday holatda bolg‘a harakati va uni qanday holda saqlanishi zolotnikli taqsimlovchi mexanizm yordamida boshqariladi. Ana shunday bolg‘alash uskunalarning pastga tushuvchi qismlari massasi 0,5 dan 5 tonnagacha boradi. Bu uskunalarda massasi o‘rtacha 20-350 kg va ayrim paytlarda 2-3 tonnagacha bo‘lgan pokovkalar olinadi. Bir yoki ikki stoykali bug‘-havoda ishlovchi bolg‘alarda bolg‘alanadigan zagotovka pokovkalaridan turli xil shaklli va o‘lchamli metall buyumlar tayyorlanadi. Aslida metall buyumlarni tayyorlash ko‘proq ishlab chiqarish zavod-korxonalarida, kamroq esa kichik temirchilik tsexlarida amalga oshiriladi (bunda bolg‘alarning xillari katta ahamiyatga egadir).

Bolg‘alash presslari va uskunalarida zagotovka pokovkalaridan tayyorlanadigan buyumlar ancha puxta va sifatli bo‘ladi, chunki ularning shakllari va o‘lchamlari chizma talabidagi metall buyumlar talabiga mos keladi. Bolg‘alash presslarida pokovkalardan tayyorlangan ayrim po‘lat buyumlarga turli xil mexanik ishlovlar beriladi va termik jihatdan puxtalanadi, ayrimlariga esa mexanik ishlovlar berilmaydi va termik jihatdan puxtalanmaydi, bu po‘lat buyumlarining ishlash joylariga ham bog‘liqdir. Maboda talab qilinsa, yuqoridagi ishlovlar beriladi.

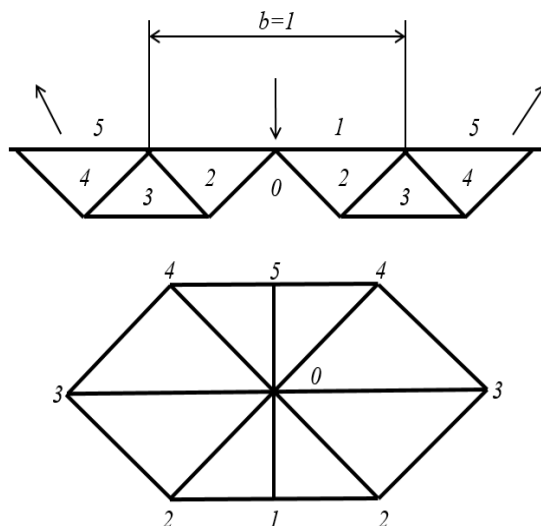
Bolg‘alash presslarida pokovkalarni bolg‘alash yordamida oddiyroq va oddiy, o‘rtaroq va o‘rta kichik, yirikroq va yirik massasi 10 kg dan 400 kg gacha va undan ortiq hamda ish zaruratlariga qarab, 2-3 tonnagacha bo‘lgan buyumlarini olish mumkin. Pokovkalardan tayyorlangan buyumlarning qattiqliklari Brinell (HB) yoki Rokvellda (HRC) o‘lchanadi. Davlat ST GOST bo‘yicha po‘lat buyumlarning chizmasida ko‘rsatilgan qattiqligi necha bo‘lsa, shu talabga yetkaziladi. Po‘lat buyumlarning qattiqliklari shu po‘latlar markasiga, kimyoviy tarkibiga va mexanik xossalriga hamda struktura tuzilishlariga bog‘liqdir. Qattiqliklari chizma talabida bo‘lgan po‘lat buyumlarning puxtaligi yuqori va sifatli bo‘ladi.

3.5. Metallarni presslash va shtamplash kuchlarini aniqlash usullari

Butun ketma-ketlik bo‘ylab materiallarga ishlov berish kuchlarini kinematik mumkin bo‘lgan sirpanish chiziqlari maydoni belgilaydi. Yassi puansonni plastik yarim kenglikka kiritish holati uchun tezliklarning uzilish chiziqlari bilan hosil bo‘lgan kinematik mumkin bo‘lgan sirpanish chiziqlari maydoni 3.21-rasmda keltirilgan. Uzluk-siz sirpanish chiziqlari maydoni va unga mos keluvchi tenglama Prandtl tomonidan yechilgan. Shunda bir xil tezlikka va 0, 1, 2, 3, 4, 5 raqamlarga ega bo‘lgan uchastkalarni chegaralaydigan simmetrik sohalarni belgilash mumkin bo‘ladi, godografni qurish esa 3.21-rasmning pastki qismida ko‘rsatilgan.

Qandaydir bir 0 nuqtadan boshlab godografni qurish uchun yo‘nalish va v_1 tezlikning kattaligi bo‘yicha puansonning 0 qo‘zg‘almas sohaga nisbatan harakatiga teng bo‘lgan 01 kesma qo‘yiladi.

Godografning 0 va 1 nuqtalaridan 2 nuqtada kesishguncha sirpanish chiziqlari maydonining 0-2 va 1-2 sohalarini ajratadigan chiziq-larga parallel qilib 0-2 va 1-2 chiziqlarni o‘tkazamiz. Godografning 0 va 2 nuqtalaridan 3 nuqtada kesishguncha sirpanish chiziq-lari maydonining 0-3 va 2-3 sohalarini ajratadigan chiziq-larga parallel qilib 0-3 va 2-3 chiziqlarni o‘tkazamiz. Godografning 0 va 3 nuqtalaridan 4 nuqtada kesishguncha sirpanish chiziqlari maydoni-ning 0-4 va 3-4 sohalarini ajratadigan chiziq-larga parallel qilib 0-4 va 3-4 chiziqlarni o‘tkazamiz. Nihoyat, godografning 0 va 4 nuqta-laridan 5 nuqtada kesishguncha sirpanish chiziqlari maydonining 0-5 va 4-5 sohalarini ajratadigan chiziq-larga parallel qilib 0-5 va 4-5 chiziqlarni o‘tkazamiz. Godografning simmetrik chap qismi ham xuddi shu tariqa quriladi. Puansonning v_i tezligi va uning b kengligini o‘lchov birligi sifatida qabul qilish juda qulay bo‘ladi.



3.21-rasm. Yassi puansonni kiritish uchun tezliklarning kinematik mumkin bo‘lgan maydoni.

Qurilmadan ko‘rinib turibdiki, sirpanish chiziqlari maydonining har bir sohasiga godografning qandaydir bir nuqtasi mos keladi. Maksvell diagrammalarining o‘zarolik xususiyati ana shundan iborat.

Puansonni kiritishning solishtirma kontakt kuchini (3.5) formula bo‘yicha aniqlaymiz, bunda $b = 1$, $v = 1$ deb taxmin qilamiz. Hisoblashlarni 3.8-jadvalga yozish qulay bo‘ladi. 3.8-jadvaldan foydalanish bilan (3.6) formula bo‘yicha

$$\frac{q}{2k} \leq \frac{\sum v_i l_i}{2bv} \quad (3.5)$$

ni topamiz.

Solishtirma kuchning aniq qiymati

$$\frac{q}{2k} = 1 + \frac{\pi}{2} \quad (3.6)$$

ni tashkil qiladi.

Sirpanish chiziqlari maydonining tashqi chegaralari orqali o‘tadigan tezliklar oqimining nolga tengligi sharti mazkur holatda (3.7) formula bo‘yicha bajarilishiga ishonch hosil qilish qiyin emas

$$\frac{\sum l_i v_i}{3} = 3 \quad (3.7)$$

Bu yerda $\sum l_i v_i$ – butun maydon uchun ko‘paytmalarning yig‘indisi.

3.8-jadval

Puansonni kiritishda formula bo‘yicha kuchni hisoblash uchun ma‘lumotlar

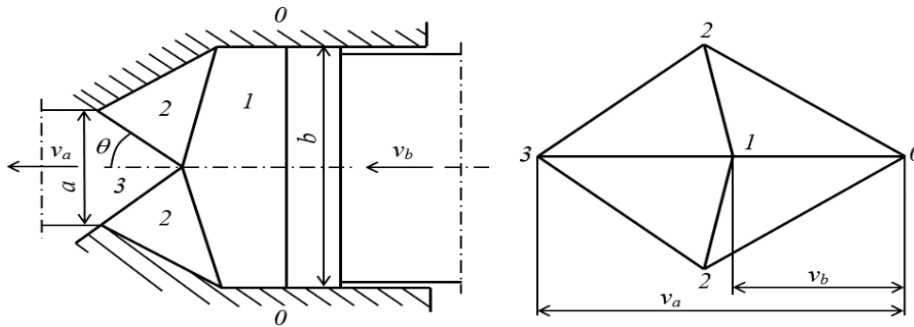
Belgilashlar (3.21-rasmga qarang)	l_i	v_i	$l_i v_i$
0–2	$\frac{\sqrt{2}}{4}$	$\sqrt{2}$	0,5
0–3	0,5	2	1
0–4	$\frac{\sqrt{2}}{4}$	$\sqrt{2}$	0,5
2–3	$\frac{\sqrt{2}}{4}$	$\sqrt{2}$	0,5
3–4	$\frac{\sqrt{2}}{4}$	$\sqrt{2}$	0,5

Hisoblashda qabul qilingan sirpanish chiziqlarining uzilish to‘ri, solishtirma kuch kattaligining yuqorigi bahosi yetarlicha aniq bo‘lishiga qaramasdan, sirpanish chiziqlari uzluksiz maydonining yetarlicha qo‘pol yaqinlashishi bo‘lib hisoblanadi.

3.22-rasmda metallni $\frac{b-a}{b} = 0,57$ ga teng bo‘lgan qisish kattaligida devorlari 40 grad egilish burchagiga ega bo‘lgan matritsa orqali presslash, mos keluvchi sirpanish chiziqlarining uzilish maydoni va godografning sxemalari ko‘rsatilgan.

Sirpanish chiziqlari maydonini qurishda 6 burchak o‘zgaruvchan parametr deb qabul qilingan. Godograf oldingi misolda ko‘rib chiqilgan usul bilan quriladi. Bunda (3.8) formula bo‘yicha kuchni hisoblashda suratga matritsaning devorlariga ishqalanishni hisobga oluvchi qo‘shiluvchilar qo‘shiladi.

$$\frac{q}{2k} \leq \frac{\sum v_i l_i}{2bv}. \quad (3.8)$$



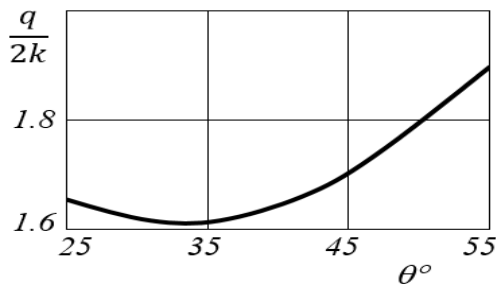
3.22-rasm. Presslash uchun sirpanish va tezliklar chiziqlarining kinematik mumkin bo‘lgan maydonlari.

Xuddi oldingi misoldagi kabi, hisoblashda b kattalikni o‘lchov birligi deb qabul qilish qulay bo‘ladi. Simmetriya oqibatida kuch faqatgina matritsaning yarmi uchun hisoblanadi. θ burchakni 25 dan 60° ga o‘zgartirish va mos keluvchi solishtirma kuchlarni hisoblash bilan solishtirma kuchlar egri chizig‘ini qurish mumkin. Bu egri chiziq bo‘yicha (3.23-rasm) (3.9) formula bo‘yicha solishtirma kuchning kattaligining minimal yuqorigi bahosi aniqlanadi:

$$\frac{q}{2k} < 1,62 \quad (3.9)$$

Sirpanish chiziqlarining uzluksiz maydonini qurish yo‘li bilan olingan yechim bu kattalikning qiymatini beradi (formula 3.10).

$$\frac{q}{2k} = 1,48 \quad (3.10)$$

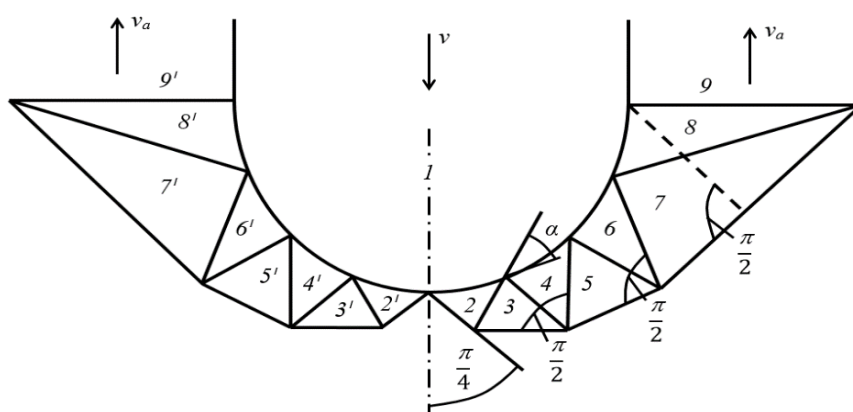


3.23-rasm. Solishtirma kuchning θ parametrga bog‘lanishi.

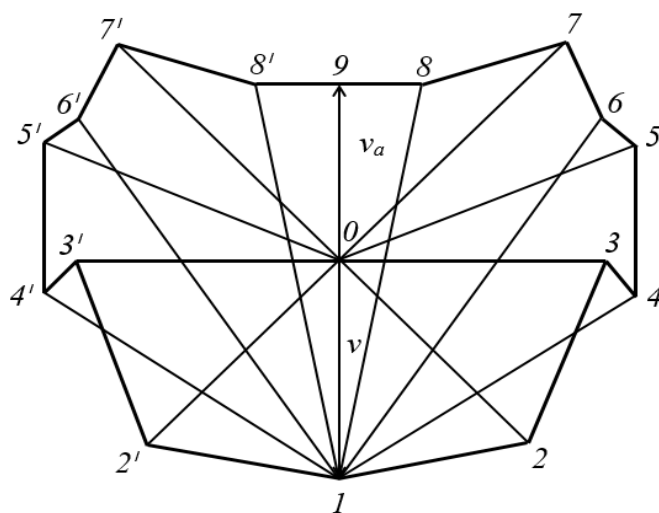
Ilgari dumaloqlangan puansonni kiritish uchun statik mumkin bo'lgan sirpanish chiziqlari maydoni qurilgan va (3.11) formula bo'yicha silindrik puansonni ishqalanishsiz kiritish solishtirma kuchi aniqlangan:

$$\frac{q}{2k} = 2 \quad (3.11)$$

Quyidagi 3.24 va 3.25-rasmlarda kinematik mumkin bo'lgan sirpanish chiziqlari maydoni va kinematik mumkin bo'lgan tezliklar maydoni ko'rsatilgan.



3.24-rasm. Dumaloqlangan puansonni kiritish uchun kinematik mumkin bo'lgan sirpanish chiziqlari maydoni.



3.25-rasm. Dumaloqlangan puansonni kiritish uchun kinematik mumkin bo'lgan tezliklar maydoni.

Bu rasmlar dumaloqlangan puansonning mos keluvchi kinematik mumkin bo'lgan sirpanish chiziqlari maydoni va kinematik mumkin bo'lgan tezliklar maydonini aniqlaydi.

3.5.1. Kuchlarni baholash uslubi

O'zgaruvchan parametr sifatida puansonning konturiga urinma chiziqlarning yo'nalishi va 2-3, 4-5, 6-7 sirg'alish chiziqlari o'rtasidagi α burchak tanlangan.

3.9-jadvalda parametrning solishtirma kuch minimal bo'ladigan $\alpha = \pi/4$ qiymati uchun tuzilgan hisoblash keltirilgan. Solishtirma kuch yuqorida ko'rsatilgan formula bo'yicha hisoblanadi. Formulaga b kenglikning o'rniga (3.12) formula bo'yicha aniqlanadigan silindrik puansonning d diametri qo'yiladi:

$$\frac{q}{2k} = \frac{0,5 \sum v_i l_i}{dv} = \frac{2,79}{1,1} = 2,79 \quad (3.12)$$

3.9-jadval

Dumaloqlangan puansonni ishqalanishsiz kiritish kuchini hisoblash uchun ma'lumotlar (puansonning diametri va tezligi birlik sifatida qabul qilingan)

Belgilashlar (3.24-rasmga qarang)	l_i	v_i	$l_i v_i$	Belgilashlar (3.24-rasmga qarang)	l_i	v_i	$l_i v_i$
0-2	0,17	1,17	0,20	0-5	0,27	1,43	0,39
2-3	0,16	0,73	0,12	5-6	0,29	0,20	0,06
0-3	0,21	1,17	0,25	6-7	0,33	0,37	0,12
3-4	0,21	0,17	0,04	0-7	0,71	1,43	1,01
4-5	0,25	0,68	0,17	7-8	0,66	0,65	0,43

Shunday qilib, yuqorida ko'rsatilgan formulalarga muvofiq solishtirma kuchning haqiqiy kattaligi (formula 3.13) bo'yicha

$$\frac{q}{2k} = 2 \div 2,79 \quad (3.13)$$

oraliqda bo'lad.

O'rtacha qiymatni qabul qilish bilan yakunda (formula 3.14) bo'yicha

$$\frac{q}{2k} = 2,4 \quad (3.14)$$

ni olamiz.

Solishtirma kuchning kontakt ishqalanishi bilan chaqiriladigan ortishini (3.15)

$$\frac{\Delta q}{2k} = \frac{\mu \sum v_r l_r}{dv} \quad (3.15)$$

formula bo'yicha hisoblash mumkin.

Bu yerda v_r – puanson konturining uchastkalari bo'ylab sirpanish tezliklari;

l_r – puanson konturi uchastkalarining mos keluvchi uzunliklari.

3.10-jadvalda (3.16) formulaning suratiga kiradigan kattalikni hisoblash keltirilgan. Topilgan qiymatlarni (3.16) formula o'rniga qo'yish bilan

$$\frac{\Delta q}{2k} = \mu \frac{2 \cdot 1,23}{1 \cdot 1} = 2,46\mu \quad (3.16)$$

ni olamiz.

Ishqalanishni hisobga olish bilan to'liq solishtirma kuch quyidagini tashkil qiladi:

$$\frac{q_\mu}{2k} = \frac{q + \Delta q}{2k} = 2,4 + 2,46\mu \quad (3.17)$$

Yuqorida ko'rsatilgan formulalardan

$$q_\mu \approx q(q + \mu) \quad (3.18)$$

ni olish lozim bo‘ladi.

Shunda (3.15) ni munosabati topiladi:

$$q_{\mu} = q\sqrt{1 + 2\mu}. \quad (3.19)$$

Formuladagi munosabat (3.12) tenglamaning yaqinlashuvchi ifodasi bo‘lib hisoblanishiga ishonch hosil qilish qiyin emas.

3.10-jadval

Solishtirma kuchning ishqalanish bilan chaqiriladigan kattaligini hisoblash uchun ma’lumotlar (puansonning diametri va tezligi birlik sifatida qabul qilingan, $l_r=0,196$)

No t/r	Belgilashlar	v_r	$l_r v_r$
1.	1—2	0,83	0,16
2.	1—4	1,58	0,30
3.	1—6	2,06	0,40
4.	1—8	1,89	0,37

Yaqinlashuvchi uslub nisbatan oson solishtirma kuch kattaligining minimal yuqorigi bahosini topish imkonini beradi. Bir qator masalalarning aniq yechimlari bilan solishtirish shuni ko‘rsatadiki, bunday usul bilan topilgan yuqorigi baholar aniq qiymatlarga yaqin bo‘ladi. Pastki bahoni statistik yo‘l qo‘yiladigan sirg‘alish chiziqlari maydoni beradi. Agar bu maydon kinematik yo‘l qo‘yiladigan maydon ham bo‘lib hisoblansa, u holda pastki baho haqiqiy qiymat bilan mos tushadi.

Kinematik mumkin bo‘lgan sirg‘alish chiziqlari maydonlari va tezliklar maydonlarini qurishda yuqorida ko‘rsatilgan formulalarga kiradigan v va l kattaliklarni qurish paytida tanlangan qandaydir bir 0 parametrning funksiyasi ko‘rinishida analitik tarzda ham ifodalash mumkin. Bu holda parametrning q solishtirma kuchning minimal yuqorigi bahosiga mos keladigan qiymatini

$$\frac{dq}{d\theta} = 0 \quad (3.20)$$

formula bo'yicha aniqlash mumkin.

Bu holda minimumni grafik tarzda aniqlashga hojat bo'lmaydi va solishtirma kuchning kattaligini jadval qiymati bilan emas, analitik ifoda bilan ifodalash mumkin.

3.5.2. Yuqorigi va pastki baholash uslublarining mohiyati

Oldingi boblarda ko'rsatib o'tilganidek, plastik deformatsiyalanadigan tayyorlanmaning ichidagi σ_{ij} kuchlanishlar, u_j zarrachalarining tezliklari va ε_{ij} deformatsiya tezliklari ba'zi bir shartlar yoki chegaralashlarni qanoatlantirishi lozim. Ular 3.26-rasmda ramkalarining ichiga yozilgan, bu yerda tenzor belgilashdan foydalanilgan va to'g'ri burchakli koordinatalar tizimida yig'indilash qoidalari keltirilgan.

Ellips ramkalarda σ_{ij} , ε_{ij} va u_i o'zgaruvchilar qanoatlantirishi lozim bo'lgan shartlar ko'rsatilgan. Keltirilgan tavsif tenglamasi (3.26-rasm), u o'zida plastiklik shartini taqdim qiladi, shuningdek, jarayonning kechish qonuni faqatgina kitobxonga to'liq tasavvurni berish maqsadida yozilgan.

Bu yerda tayyorlanmaning materiali qattiqplastik va siqilmas deb taxmin qilinadi. Muvozanat tenglamasida V_i – birlik hajmiy kuch. Yuza qatlami uchun muvozanat tenglamasida n_i – yuzaga o'tkazilgan tashqi normalning birlik vektori.

To'g'ri to'rtburchak ramkada tayyorlanmaning yuzasiga qo'yiladigan shart, ya'ni chegara sharti keltirilgan: $S = S_f + S_c$. S_p yuzada F_i kuchlar to'liq ma'lum. $F_i=0$ bo'ladigan erkin yuz S_f ga tegishli (3.27-rasm). S_c da yoki u_i zarrachaning tezligi yoki uning tarkibiy qismning yuzasiga ip normal ma'lum, chunki bu uskuna-tayyorlanmaning kontakt yuzasidir. Bu yuzada shuningdek, ishqalalanish kuchlari ham berilishi lozim.

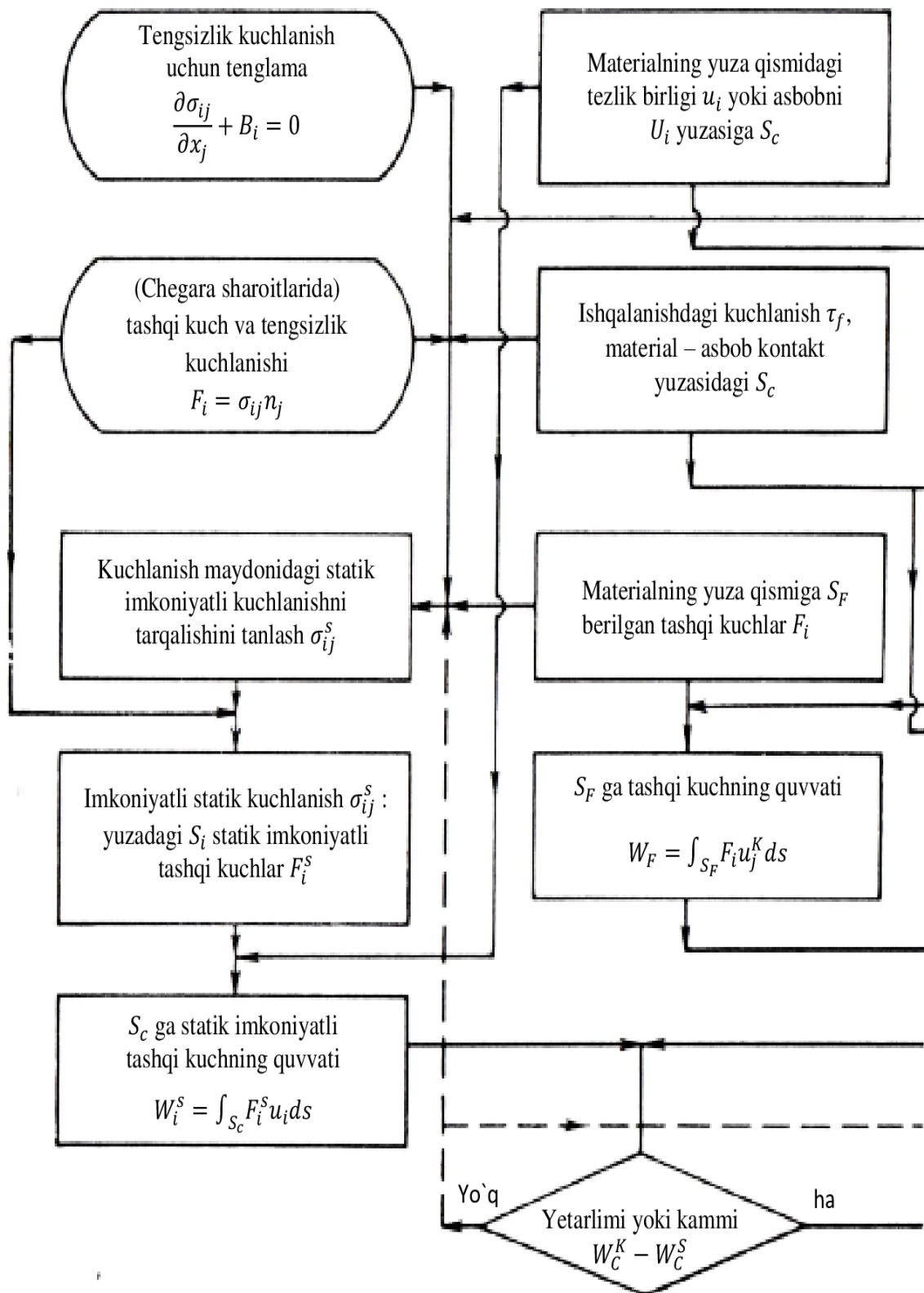
Metallarning deformatsiyalanish jarayonlarini tahlil qilish yoki loyihalash uchun boshlang'ich shartlardan boshlab deformatsiyalarning kichik ortishlarining ketma-ket bosqichlari (qadamlari) uchun

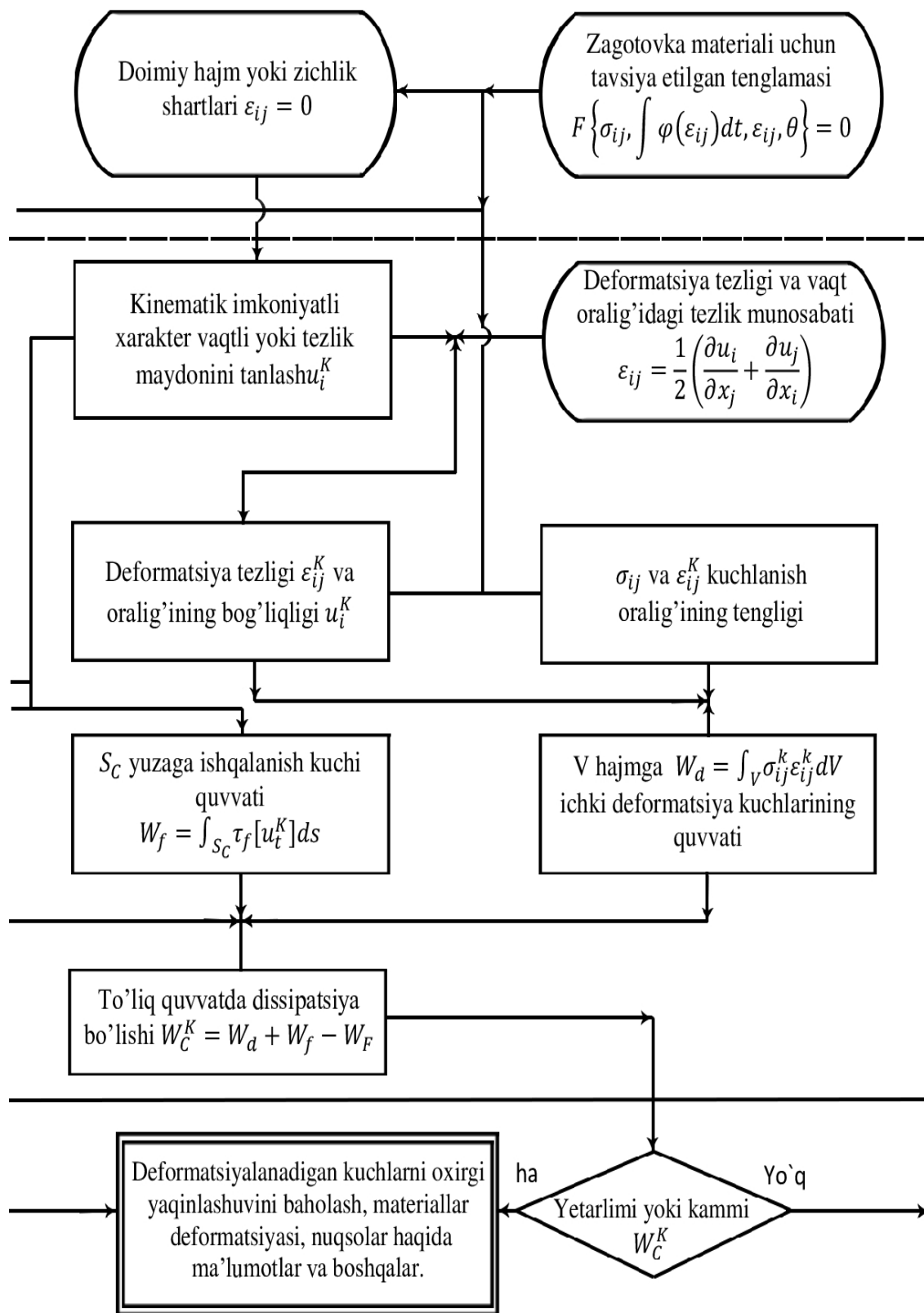
yuqorida sanab o‘tilgan shartlarni qanoatlantiradigan σ_{ij} , ε_{ij} va u_i larni aniqlash zarur bo‘ladi. Bu ko‘rib chiqiladigan holatlarning ko‘pchiligi uchun o‘ta murakkab masala bo‘lib hisoblanadi. EHM lardan foydalanish boshlanguncha bunday masalalar faqatgina ba’zi bir maxsus holatlar uchun yechilgan.

Yuqorigi va pastki baholar uslublari a_i va u uchun chegara shartlarini qanoatlantirishga intilishda qiyinchiliklarni istisno qilish uchun taklif qilingan, bu tariqa olingan natijalar o‘zining tabiatiga ko‘ra yaqinlashuvchi bo‘lib hisoblanadi, biroq ishlab chiqarish maqsadlari uchun yetarlicha foydali, shu bilan birgalikda hisoblashga ketadigan vaqt sarflari oxirgi element uslubi yoki boshqa uslubni qo‘llashga qaraganda anchagina kam. Bu yuqorigi va pastki baholar uslublari hozirgi kungacha ham katta ommaviylikka ega ekanligining sabablaridan birini izohlaydi. Boshqa bir sabab shundan iboratki, bu uslublar, ayniqsa, yuqorigi baho uslubi ishlab chiqarish muhandislariga oson tushuniluvchan, chunki ular (uslublar) ularning (muhandislarining) ishlab chiqarish faoliyati davomida olingan intuitsiyasiga tayanadi.

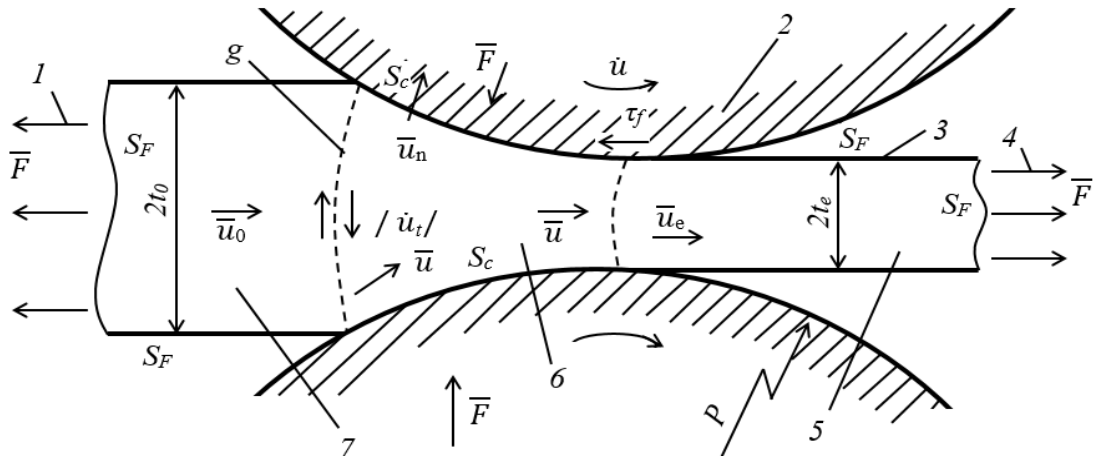
Yuqorigi va pastki baho uslublarining asoslarini, shuningdek, ularning metallarni deformatsiyalashning turli texnologik masalariga nisbatan qo‘llanilishini kitobxon mazkur uslublarga urg‘u berilgan turli kitoblar va maqolalardan topishi mumkin.

Mazkur bobda muallif yuqorigi va pastki baholar to‘g‘risidagi mavjud teoremlarni baholash va tizimlashtirishga va ularni deformatsiyalash muammolariga nisbatan qo‘llashga, bu uslublarning bugungi kundagi holatini ko‘rsatish uchun so‘nggi yutuqlardan foydalanishga, kitobxonga kelajakda bu yo‘nalishning rivojlanish yo‘llarini ko‘rsatishga harakat qiladi. Mazkur bobda rus tilidagi ishlarga ko‘pgina yo‘llanmalar tushirib qoldirilgan, chunki muallif, taassufki, ularni tushunmaydi, shuningdek, ushbu kitobda ushbu mavzuga bag‘ishlangan – rus millatiga mansub hammuallif tomonidan yozilgan boshqa bob bor.





3.26-rasm. Yuqorigi va pastki baholash uslubi bilan yechish ketma-ketligi.



3.27-rasm. Yuqorigi va pastki baholash uslubida qabul qilingan ramzlar va belgilashlar sxemasi: 1-orqa tortish; 2-uskuna (jo‘va); 3-tayyorlanma; 4-old kuchlanish; 5 va 7-qattiq soha; 6-plastik (deformatsiyalanadigan) soha.

Mazkur uslubning asosiy kontseptsiyasi. Yuqorigi va pastki baholash uslublarining mohiyati 3.26-rasmda keltirilgan yechish sxemasi bilan belgilanadi. u tezliklarining material elementida tezliklar uchun joriy chegara shartlarini qanoatlantiradigan har qanday taqsimlanishini “kinematik mumkin bo‘lgan tezliklar maydoni” deb ataymiz va u^k_i bilan belgilaymiz. Agar kuchlanishning taqsimlanishining haqiqiy kechishi uchun tayyorlanmaning geometrik shakli va chegara shartlari (τ_f , ishqalanish kuchlanishi ham) ma‘lum bo‘lsa, u holda W_d plastik deformatsiya energiyasining (quvvatining) sochilish (dissipatsiya) tezligini, W_f , kontakt yuzasida ishqalanish bilan yo‘qolish quvvatini hisoblab topish mumkin, ular $[u^k_i]$ nisbiy sirg‘alish tezligi va namunada S_f ga ko‘rsatiladigan F_1 kuch bilan rivojlantiriladigan W_F quvvat bilan bog‘lanadi.

Bu quvvatlarning o‘zida tanlangan uki uchun uskuna-tayyorlanma tizimining ichida to‘liq energiyaning (yoki to‘liq quvvatning) sochilish (dissipatsiya) tezligini taqdim qiladigan algebraik yig‘indisini, S_f ga ko‘rsatiladigan kuchlarning quvvatini ayirib tashlash bilan, W^k_c bilan belgilaymiz. Deformatsiya tezligiga ta‘sirchan bo‘lmagan materiallar uchun yuqorigi baho to‘g‘rsidagi teorema shunday deydi: W^k_c quvvat hech qachon tizimning tashqi kuchlar bilan S_c da rivojlantiriladigan

haqiqiy quvvatidan kichik bo‘la olmaydi, ya’ni $W_c^k - W_c$ uchun yuqorigi baho bo‘lib hisoblanadi.

$$W_c = \int_{S_c} F_i u_i dS \quad (3.21)$$

Boshqacha qilib aytganda, barcha kinematik mumkin bo‘lgan oqish tezliklari maydonlari orasida u_i^k va u_i haqiqiy maydon sochilishning (dissipatsiyaning) eng kichik (minimal) quvvatini (energiyaning tezligini) ta’minlaydi. Kechish tezliklarining haqiqiy maydoni deb shunday maydonga aytiladiki, u σ_{ij}^k kuchlanishlar maydoniga, u bilan bog‘langan oqish tezligi-deformatsiya tezligi nisbatlariga va bog‘lanish tenglamalariga mos keladi va jismning ichidagi muvozanat tenglamasini hamda S_f va S_s dagi kuchlanishlar uchun chegara shartlarini qanoatlantiradi.

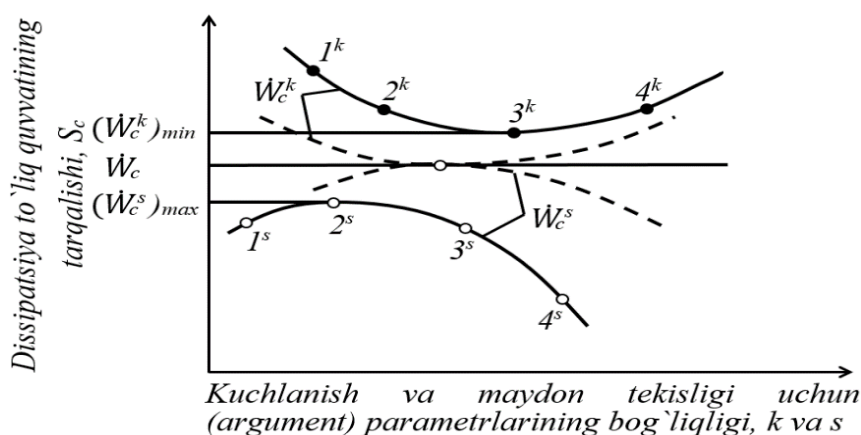
Ko‘pgina hollarda W_c^k ni bilish bilan S_c ga ko‘rsatiladigan P texnologik yuklamaning yuqorigi bahosini ham olish mumkin.

Muvozanat tenglamasi, plastiklik shartining tengsizligi va S_f va S_c ga qo‘yilgan F_i va τ_j ning chegara shartlarini qanoatlantiradigan, biroq kinematik shartlarni qanoatlantirishi shart bo‘lmagan σ_{sij} kuchlanishlar maydonini ko‘rib chiqamiz; σ_{sij} statik mumkin bo‘lgan kuchlanishlar maydoni deb ataladi. Pastki baho to‘g‘risidagi teorema shunday deydi: S_c ga ko‘rsatiladigan, σ_s bilan muvozanatlangan F_{si} kuchlar bilan rivojlantiriladigan W_{sc} quvvat hech qachon W_c haqiqiy kuchlanishdan kichik bo‘la olmaydi, ya’ni $W_{sc} - W_c$ uchun pastki baho bo‘lib hisoblanadi. Barcha statik mumkin bo‘lgan kuchlanishlar maydonlari orasidan σ_{sij} haqiqiy maydon S_j da tezliklar uchun berilgan – bog‘lanish tenglamasi va oqish tezligi-deformatsiya tezligi nisbatidan kelib chiqadigan chegara shartlarini qanoatlantiradigan u_{sc} tezliklar maydoni bilan bog‘lanadi.

Ixtiyoriy tanlangan u_i^k va σ_{ij} lar uchun W_w^k va W_{sc} ning qiymatlari kamdan-kam hollarda mos tushadi. Ko‘pchilik hollarda ularning farqi katta bo‘ladi (3.28-rasmdagi l^k va l^s ga qarang).

Biroq yaxshisi, u_i^k va σ_i^s ning yangi qiymatlarini tanlash yoki ularni aniqlashtirish bilan $W_c^k - W_c^s$ farq yetarlicha kichik bo‘lmaguncha ko‘proq past yuqorigi bahoni va ko‘proq yuqori pastki

bahoni olamiz. Shu tariqa biz W_c uchun yaqinlashishni va mos keluvchi yaqinlashuvchi texnologik yuklamani olamiz. Bu jarayon sxematik tarzda 3.28-rasmda ko'rsatilgan, bunda u_i^k va σ_{ij}^s ning qiymatlari birgina k va s mustaqil parametrlar (argumentlar) bilan tasvirlanadi deb taxmin qilinadi.



3.28-rasm. Yuqorigi va pastki baholarning yaqinlashish sxemasi.

Agar u_i^k va σ_{ij}^s ning qiymatlari u_i va σ_{ij} haqiqiy qiymatlar bilan mos tushsa, W_c^k va W_c^s ning ekstremal qiymatlari mos tushadi, va biz aniq yechimni olamiz (3.28-rasmdagi shtrix chiziq'larga qaralsin). Biroq bu kamdan-kam hollarda sodir bo'ladi. W_c^k va W_c^s chegaralashlar yordamida texnologik yuklamani aniqlash yuqorigi va pastki baholar uslubi deb, shuningdek, maydonning sxemasini qurishda chegaraviy tahlil qilish deb ataladi.

Ko'pchilik deformatsiyalash jarayonlari uchun yaxshi (ya'ni past) yuqorigi bahoni olish yaxshi (ya'ni yuqori) pastki bahoni olishga qaraganda anchagina oson.

Bu shu sababli sodir bo'ladiki, bizga tezliklar maydoni qanday bo'lishi lozimligini kuchlanishlar maydoni qanday bo'lishi lozimligiga qaraganda tasavvur qilish osonroq. Boshqa bir sabab shundan iboratki, σ_{ij} ikkita shartni – muvozanat shartini va plastiklik holati shartini qanoatlantirishi lozim. Shu sababli shakl berish jarayonlarining ko'pchilik tadqiqotchilari, mazkur bobning muallifi ham shular

qatoriga kiradi, pastki bahoni aniqlashdan voz kechadilar va o‘zlarining sa’y-harakatlarini imkon qadar yaxshiroq, ya’ni ko‘proq past yuqorigi bahoni olishga qaratadilar.

Bunday yondashuvning kamchiliklaridan biri shundan iboratki, biz haqiqiy quvvatni yoki texnologik yuklamani qay darajagacha oshiqcha baholayotganimizni bilmaymiz. Ikkinchi kamchilik – W_c^k uchun eng kichik qiymatni beradigan tezliklar maydoni haqiqiy qiymatga yetarlicha yaqin bo‘lishiga kafolat yo‘q. Uchinchi kamchilik yuqorigi baho uslubi bilan olingan yechim umuman olganda kuchlanishlarning taqsimlanishini aniqlash imkonini bermaydi. Oxirgi, biroq oldingilardan kam bo‘lmagan, shakl berishgacha bo‘lgan jarayonlarni tahlil qilish uchun ushbu uslubdan foydalanishda ma’lum bo‘ladigan, pastki baho uslubi ham shundan aziyat chekadigan kamchilik shu bo‘lib hisoblanadiki, ko‘pincha yuqorigi va pastki baholar to‘g‘risidagi teoremlarning adolatiligi ham shubha ostida qoladi. Bular shu bilan bog‘lanadiki, biz tayyorlanmaning haqiqiy shaklidan oldingi shaklini va oldingi kuchlanishlarning taqsimlanishini bilmaymiz, ular esa deformatsiyalashning keyingi bosqichida W_c^k va W_c^s ni hisoblash uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

Shu sababli muallif, agar tayyorlanmalar doimiy kuchlanishlarga ega bo‘lgan mutlaqo plastik bo‘lmasa va tayyorlanma yuzasining shakli qat’iy o‘zgarmas bo‘lmasa, deformatsiyalash masalalarini ko‘rib chiqishda bu analitik protseduralarni yuqorigi va pastki baholar uslublari deb atamaslikni ma’qul ko‘radi, Ehtimolki, bu uslublarning mohiyatini ta’riflash uchun “energetik uslub” yoki “variatsion uslub” degan atamalar ko‘proq to‘g‘ri keladi. Shunga qaramasdan, tajribaning ko‘rsatishicha, hatto σ_{ij} ning minimumiga mos keladigan nisbatan oddiy kinematik mumkin bo‘lgan tezliklar maydoni ham texnologik yuklama uchun, qoidaga ko‘ra, aniq yechimning natijasi yoki eksperimental qiymatdan 15% dan oshiq bo‘lmagan yuqorigi bahoni topish imkonini beradi. Bundan tashqari, real deformatsiyalash sxemalari, nuqsonlar hosil bo‘lishi va haroratlarning taqsimlanishi nisbatan oddiy tezliklar maydonlari bilan yaxshi tasvirlanishi ko‘p marta isbotlangan.

Shu sababli mazkur bobda yuqorigi va pastki baholar to‘g‘risidagi teoremlarni metallarni deformatsiyalash masalalariga nisbatan qo‘llashga misollar muhokama qilinadi.

Yuqorigi va pastki baholash to‘g‘risidagi teoremlar
(Yopishqoq bo‘lmagan qattiqplastik jismni kvazistatik deformatsiyalash)

Aytaylik, tayyorlanmaning materiali, masalan, Mizes plastiklik shartini qanoatlantiradigan materiallar kabi qattiqplastik bo‘lsin, tavsif tenglamasi esa plastik deformatsiya energiyasining maksimal sochilish (dissipatsiyalanish) tamoyiliga bo‘ysunsin:

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^s) \dot{\epsilon}_{ij} \geq 1 \text{ va } \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^s) \dot{\epsilon}_{ij} dV \geq 0 \quad (3.22)$$

Bu tamoyil plastik potensial va materialning $f(\sigma_{ij})=k_f$ plastiklik sharti teng va shartni to‘qqiz o‘lchamli σ_{ij} – kenglikda tasvirlaydigan yuza bo‘rtik deb taxmin qilishdan kelib chiqishini ko‘rsatish mumkin.

Aytaylik, kuchlanishlar yuzasi yoki F_i yuza kuchlarining yuzasi V to‘liq hajmga va S to‘liq yuza maydoniga ega bo‘lgan jismning yuzasining S_f qismida aniqlangan bo‘lsin va tezliklar yuzasi yuzaning boshqa S_c qismida aniqlangan bo‘lsin. Ixtiyoriy tanlangan, kenglikdagi koordinatalar bo‘yicha oxirgi birinchi ko‘paytmalarga ega bo‘lgan va S_c da ilgari aniqlangan uik tezliklar maydoniga teng bo‘lgan ik kinematik mumkin bo‘lgan tezliklar maydoni uchun yuqorigi baho to‘g‘risidagi teorema quyidagi ifoda bilan aniqlanadi (Xill, Prager, Druke va boshqalar tomonidan aniqlangan, uni virtual ish va tengsizlik tamoyilidan chiqarish mumkin):

$$\begin{aligned} \dot{W}_C &= \int_{S_C} F_i u_i dS \leq \int_V \sigma_{ij}^k \dot{\epsilon}_{ij}^k dV + \int_{r^k} k [\dot{u}_i^k] dS - \\ &- \int_{S_F} F_i \dot{u}_i^k dS \equiv W_d + W_n - W_F \equiv \dot{W}_i^k \end{aligned} \quad (3.23)$$

Tengsizlikda o'ng qismdagi birinchi va uchinchi a'zolar yuqorida aniqlangan, W_s bilan belgilangan ikkinchi a'zo kinematik mumkin bo'lgan tezliklarning uzilishlarining yuzalari bo'ylab ichki siljish bilan rivojlantiriladigan quvvatni bildiradi, Γ^k , k va $[u^k_i]$ mos ravishda urinma oquvchanlik kuchlanishi va uzilishning kattaligi yoki tezliklarning sapchishini bildiradi. Chunki sapchish cheksiz kata ϵ^{k}_{ij} deformatsiya tezligiga, ba'zi hollarda cheksiz to'liq deformatsiyaga olib keladi. Yopishqoq yoki deformatsiya tezligiga ta'sirchan bo'lgan materiallarni ko'rib chiqishda fizikaviy mulohazalardan kelib chiqish bilan G^k ni chiqarib tashlash lozim bo'ladi. Agar maydon Γ^k da $u^k_i = 0$ bo'lsa deformatsiya jarayonida mustahkamlanadigan materiallar uchun ham shunday qilish talab qilinadi.

Xuddi yuqorigi va pastki baholar uslublariga taalluqli ko'pchilik ishlardagi kabi, qisqacha bo'lishi uchun Mizes plastiklik sharti va Levi-Mizes kechish qonuniga bo'ysunadigan materiallarni ko'rib chiqish bilan cheklanamiz. Shunda uki hajmning doimiyligi shartini qanoatlantirishi lozim va tengsizlikdagi W_d ni quyidagicha yozamiz:

$$\dot{W}_d = \int_V \overline{\sigma^k \dot{\epsilon}^k} dV = \int_V k_f \dot{\epsilon}^k dV \quad (3.24)$$

Bu yerda $\overline{\dot{\epsilon}^k}$ – deformatsiya tezliklarining shiddati (intensivligi) $\left\{ \left(\frac{2}{3} \right) \dot{\epsilon}^k_{ij} \cdot \dot{\epsilon}^k_{ij} \right\}^{1/2}$;
 $\overline{\sigma^k}$ – urinma kuchlanishlarning shiddati

$$\left\{ \left(\frac{3}{2} \right) \dot{\sigma}^k_{ij} \cdot \dot{\sigma}^k_{ij} \right\}^2$$

$\sigma^k_{ij} - \dot{\epsilon}^k_{ij}$ ga mos keluvchi kuchlanishlar diviatori.

Postulatlangan (postulirovaniye) plastiklik shartidan σ^k oquvchanlik kuchlanishiga yoki k_f siljish oquvchanlik kuchlanishiga teng bo'lishi kelib chiqadi, albatta.

Agar tayyorlanmaning materiali ideal qattiqplastik bo'lsa va k_f butun deformatsiyalanadigan jismda bir xil bo'lsa, u holda tenglama quyidagi ko'rinishni oladi:

$$\dot{W}_d = k_j \int_V \overline{\dot{\epsilon}^k} dV \quad (3.25)$$

Bu ifoda birinchi marta Markov tomonidan olingan. Ixtiyoriy tanlangan, S_f yuzada chegara shartlarini, plastiklik sharti tengsizligini va materialning hajmida muvozanat tenglamasini qanoatlantiradigan σ ki statik mumkin boʻlgan kuchlanishlar maydoni uchun pastki baho toʻgʻrisidagi teoremani

$$\dot{W}_C = \int_{S_C} F_i \dot{u}_i dS \geq \int_{S_C} F_i^s \dot{u}_i dS \equiv \dot{W}_C^s \quad (3.26)$$

tengsizlikka muvofiq ifodalash mumkin.

Bu yerda F_i^s – S_C da σ_i^k da σ_i^k ni qanoatlantiradigan yuza kuchlari.

Shuni qayd qilamizki, S_c da ustivor boʻlgan τ_c^s statik mumkin boʻlgan urinma kuchlanish τ_f siljishda oquvchanlik kuchlanishidan oshiq boʻlmasligi lozim. Bunda σ ki tangentsial kuchlanishlarning uzilish yuzalari boʻlishi mumkin. Biroq bu tengsizlikni oʻzgartirmaydi.

3.5.3. Godografning tezliklar rejasini ketma-ket qurish

Bir paytlar sirpanish chiziqlari toʻriga mos keladigan asosiy tezliklar rejasini godograf bilan taqdim qilingan (2.4-rasmga qarang).

Baʼzi bir maʼlumotlarga koʻra, godografdan birinchi boʻlib Grin foydalangan. U yassi-plastik oqish uchun tezliklar planini sirgʻalish chiziqlari toʻriga qayta qurish mumkinligini koʻrsatgan, u ushbu chiziq boʻyicha cheksiz kichik masofada joylashgan ikkita P va Q nuqtalarga ega (2.4-rasm, a ga qarang).

Sirpanish chizigʻiga urinma yoʻnalishida asosiy choʻzilish tezligi nolga teng, shundan kelib chiqqan holda, Q tezlikning P ga nisbatan yoʻnalishi QP ga perpendikulyar boʻladi. Godografning tekisligida qutbning qoʻzgʻalmas koordinatalar boshi sifatida unda tezlik nolga teng boʻladigan nuqta tanlanadi. Qutbning koordinatalaridan sirgʻalish chiziqlari toʻrining nuqtalarida tezliklarni belgilaydigan vektorlar oʻtkaziladi.

Sirpanish chiziqlari toʻrining nuqtalari mos keluvchi vektorlarning eng chekka nuqtalari sifatida godografga koʻchirib

o'tkaziladi. Masalan, P va Q nuqtalar godograf tekisligiga P' va Q' sifatida ko'chirib o'tkaziladi (2.4-rasmga qarang), bu $OP = v_p$ va $OQ' = v_q - P$ ba Q nuqtalarning tezligi. $O'Q'$ – $v_{q/p}$ tezlik vektori Q nuqtalarning P ga nisbatan tezligini belgilaydi va PQ ga perpendikulyar bo'ladi. Sirg'alish chizig'ining PQ elementi godograf tekisligiga P'Q' sifatida qayta quriladi. Agar α -chiziq, masalan, godograf tekisligida α' -chiziqqa, β -chiziq esa – β' -chiziqqa mos kelsa, u holda α' va β' -chiziqlar sirpanish chiziqlari to'ri ega bo'lgan xuddi o'sha xususiyatlarga ega bo'lgan ortogonal to'rni hosil qilishini ko'rsatish mumkin.

Faqatgina ko'chadigan deformatsiyalanmaydigan sohalar godograf tekisligida bittayu-bitta nuqtaga mos keladi; unda tezlikning uzilishi sodir bo'ladigan α – chiziq godograf tekisligiga ko'chirib o'tkazishda tezlik uzilishining qiymatiga teng bo'lgan bir xil uzunlikdagi β' -chiziqlar bilan bog'langan ikkita parallel α' -chiziqlar bilan taqdim qilinadi. AV egri chiziq unda tezlikning uzilishi sodir bo'ladigan sirpanish chizig'ini taqdim qiladi (2.4-rasm,b,v larga qarang).

O nuqtada qutbga ega bo'lgan godograf tekisligida ab va a'b' chiziqlar - AV sirpanish chizig'iga ortogonal bo'lgan, tezlikning uzilish kattaligi bilan farq qiladigan ikkita ekvidistant egri chiziqlardir; masalan, aa va bb' chiziqlarning v tezligi mos ravishda A va V nuqtalarda sirpanish chizig'iga o'tkazilgan urinma ega bo'lgan yo'nalishga ega bo'ladi va tezlik uzilishining kattaligini belgilaydi.

Agar qaysidir bir sirpanish chizig'ida tezlik uzilishining kattaligi aniqlangan bo'lsa, u holda bu sirpanish chizig'ining har qanday davomida tezlikning uzilishi har doim mavjud bo'ladi. Sirpanish chizig'i qattiq shtampning yoki uskunaning ishchi yuzasining tekisligiga urinma bo'lib hisoblanadigan holat bundan mustasno.

Berilgan nuqtada yuzaga normal bo'lgan sirpanish chizig'i tezlik uzilishining chizig'i bo'lmasligi mumkin. Unda tezlikning tangensial tarkib toptiruvchisining uzilishi sodir bo'ladigan sirpanish chiziqlariga taalluqli bo'lgan yana bir umumiy qoida shundan

iboratki, bu sirpanish chiziqlari yoki deformatsiyalanadigan sohaning chegarasini hosil qiladi, yoki maydonning ichidagi kuchlanishning sigulyarlik nuqtasida boshlanadi yoki tugaydi. Bu chegaralashlar, qoidaga ko'ra, zarur, aks holda kinematik yechimning birlashuvchanligi buziladi. Shunda e'tiborni yana bir marta shunga qaratamizki, kuchlanishning uzilishi hech qanday holatda sirpanish chiziqlariga ko'ndalang tarzda sodir bo'lmasligi lozim. Kuchlanishlarning uzilishlari sirpanish chiziqlari to'ring ichida mavjud bo'lishi mumkin va ularni balkalar (to'sinlar) va konstruksiyaning boshqa elementlarini bukishda kuzatish mumkin.

Jamlangan kuchlar bilan yuklangan yarim halqani bukish uchun sirpanish chiziqlari to'ri - O nuqtada uchrashadigan to'rtta sirpanish chiziqlaridan tashkil topgan sirpanish chiziqlari to'ri bo'lishi mumkin (2.5 rasimga qaralsin). Bu nuqtada gidrostatik bosimning uzilishi sodir bo'ladi, buni Genki integralidan osongina ko'rish mumkin. Bu oquvchanlik zonalarida yoki O nuqtaning har ikkala tomonida σ_{xx} va σ_{yy} kuchlanishlarning uzilishiga olib keladi. Grin singulyar nuqtada tezliklarning uzilishi sodir bo'lmasligini ko'rsatib bergan. Hozirgi kunda sirpanish chiziqlari to'riga mos keladigan tezliklar planini turli usullar bilan aniqlash bo'yicha ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda.

3.5.4. Yuqorigi va pastki baholash uslublarining rivojlanishi va ularning qo'llanilishi

Xaytsorntsvaytning fikriga ko'ra, Gvozdev birinchi bo'lib konstruktsiyalarning ko'taruvchanlik qobiliyatini aniqlash uchun yuqorigi va pastki baholar to'g'risida teoremani taklif qilgan. Bu 1936-yilda bo'lgan. 40-yillarning oxiridan 50-yillarning boshigacha yuqorigi va pastki baholar, shuningdek, elastik va qattiqplastik materiallar uchun turli variatsion tamoyillar to'g'risida bir qator ekstremal teoremlar taklif qilingan. Bu teoremlar Markov, Xill, Prager va ular xodimlarining ishlari bo'lgan.

Bu teoremlarni plastik deformatsiyalash masalalariga nisbatan qo'llash birinchi bo'lib 1957-yilda Xill va Grin tomonidan yassi deformatsiya sharoitlarida chizish va yassi deformatsiya sharoitlarida

silliqlik yassi plitalar orasida yupqa qatlamni siqish uchun taklif qilingan. To'g'ri burchakli yoki dumaloq ko'ndalang kesimli sillikli yassi oldga ega bo'lgan puansonni mustahkamlanmaydigan materialning yassi materialiga bosib kiritish uchun zarur bo'ladigan deformatsiyalovchi kuchlarning Treskning plastiklik shartini qanoatlantiradigan yuqorigi va pastki baholari 1953 va 1955-yillarda Schild, Druker va Levin tomonidan olingan. Mizes plastiklik shartida ideal qattiqyopishqoqplastik jism uchun ekstremal teoremlar 1954-yilda Prager tomonidan taklif qilingan va 1956-yilda Xill tomonidan umumlashtirilgan. 1954-yilda Druker birinchi bo'lib Sc ga Kulon ishqalanishi sharoitida yuqorigi va pastki baholar to'g'risidagi teoremlarni taklif qilgan.

1955 va 1957-yillarda Kudo birinchi bo'lib yuqorigi baho uslubidan halqani o'q simmetriyalik siqish va ideal Mizes qattiqplastik materialini to'g'ri bosish uchun deformatsiyalovchi kuchning yaqinlashuvchi qiymati va deformatsiya sxemalarini olish uchun foydalangan. Garchi uning ishqalanish kuchlarini yengish uchun sarflanadigan quvvatni baholashi o'ta mavhum bo'lsada, natijalar eksperimental ma'lumotlarga teng bo'lib chiqqan.

1958-yildan 1960-yilgacha yuqorigi baho uslubini yassi deformatsiyada statsionar va nostatsionar zarb qilish va bosish jarayonlarining turli masalalariga nisbatan qo'llashga bag'ishlangan maqolalar seriyasi chop qilingan (Kudo va Jonson xodimlari bilan birgalikda, shuningdek, Kudo – o'q simmetrik jarayonlar uchun). Hatto kvadrat diskni o'tirg'izishning uch o'lchovlari masalalari ham ko'rib chiqilgan (Xeddou va Jonson). Ular eng kichik W_c^k ga mos keladigan u_i^k tezliklar maydonidan foydalanish bilan hatto tashqi qatlamning yopishishi, burmalar va ichki yoriqlar hosil bo'lishi kabi nuqsonlar mavjud bo'lishini oldindan ayta olganlar. Natijalar eksperimentlarning ma'lumotlari bilan yaxshi tasdiqlangan.

Tezliklar maydonidan shuningdek, oquvchanlik kuchlanishi haroratga bog'liq bo'lmaydi deb taxmin qilish bilan haroratning adiabatik o'zgarishini hisoblash uchun ham foydalanilgan. Mustahkamlanadigan materiallar uchun yaqinlashuvchi deformatsiyalovchi kuchlar turli olimlarning materiallarida rivojlantirilgan $\overline{\varepsilon_m^k} =$

$\int \overline{\varepsilon_m^k} df$ o'rtacha ekvivalent deformatsiya uchun olingan k_{fm} o'rtacha oquvchanlik kuchlanishi yordamida mustahkamlanmaydigan materiallarga qo'yiladigan yuklamalarning yuqorigi baholarining qiymatlaridan topilgan.

Yuqoridagi ishlarda foydalanilgan kinematik tezliklar maydonlari yetarlicha oddiy bo'lgan, ya'ni tezliklar maydonlarini tasvirlaydigan, W^k ni minimallashtirishda variatsiyalangan parameterlarning soni nisbatan unchalik katta bo'lmagan, shu sababli minimalashtirishni analitik yo'l bilan bajarish imkoniyati paydo bo'lgan. Yassi kesim uchun plastik deformatsiyalar bir-biriga nisbatan sirg'aladigan qattiq uchburchaklarning cheklangan soni bilan taqdim qilingan. O'q simmetriya mavjud bo'lganda yoki shunga o'xshash maydonlardan, yoki ularning meridional kesimlari deformatsiyalashdan oldin yoki keyin to'g'ri to'rtburchak yoki parallelogramm ko'rinishida bo'lgan bir nechta halqasimon sohalardan tashkil topgan maydonlar qo'llanilgan. Keyingi maydonlar parallel deformatsiya maydonlari deb atalgan.

Tezliklar maydonlarining ular uchun tezlikning tarkibiy qismlari oddiy polinomlar yoki o'tirg'izishda tayyorlanmaning yon yuzasining bochkasimon qiyshayishini tasvirlaydigan ikkita kenglikdagi koordinatalarning trigonometrik funksiyalari bilan ifodalangan boshqa tiplarini Tarnovski va boshqalarning monografiyasidan topish mumkin. Monografiyada yuqorigi baho uslubining yassi deformatsiya jaryonlari, o'q simmetriyali jarayonlar uchun olingan natijalar, shuningdek, 50-yillarning o'rtalaridan boshlab Rossiyada uch o'lchovli zarb qilish texnologik masalalari uchun olingan keng natijalar to'plangan.

Shu yillarda Sc ga Kulon ishqalanishi sharoitlarida yuqorigi va pastki baholar to'g'risidagi teoremlarni yaxshilashga urinishlar bo'lgan (Yamada, Kudo, Shindo va Oksli). Kudo va Gakaxashi 1964-yilda kontakt yuzasida siljish tipidagi ishqalanish sharoitlarida, ya'ni $\tau_f = mk$ da yuqorigi va pastki baholar to'g'risidagi teoremani isbotlaganlar, bu yerda m – ko'effitsiyent ishqalanish omilini va k – siljishda oquvchanlik kuchlanishini bildiradi.

1952-yildan boshlab yuqorigi baho uslubiga taalluqli bo'lgan juda ko'p maqolalar chop qilingan, va bor-yo'g'i bir nechta maqolalardagina pastki baho uslubi ham ko'rib chiqilgan. Bu uslubning rivojlanishi u^k_i ning eng kichik qiymatini olish W_j^k uchun ko'proq murakkab va noto'g'ri geometriyani tasvirlash uchun, shuningdek, materialning haqiqiy oqishini tasvirlash uchun asosan ko'proq murakkab va o'zgaruvchan uki tezliklar maydonlaridan foydalanish yo'lidan borgan.

1963-yilda Stepanskiy va Avittsur tomonidan o'q simmetriyali chizish va ponali va konus matritsalar orqali to'g'ri bosishda yassi deformatsiya uchun radial va markazga intilma oqish sxemalarining qo'llanilishiga bir nechta ajoyib misollar keltirish mumkin. O'q simmetriya sharoitlarida parallel oqish uchburchaklaridan tashkil topgan tezliklar maydonlari uchun godografni qurish uslubiyati 1965-yilda Xolding va Mitchell tomonidan rivojlantirilgan va Adbe va Aleksander tomonidan umumlashtirilgan.

Lambert va Kobayashi 1967-yilda birinchi bo'lib yassi deformatsiyaning o'q simmetrik statsionar masalalarining yuqorigi bahosini aniqlash uchun oqish funksiyasi uslubini kiritganlar, ular shuningdek, yuqorigi bahoni yaxshilash uchun funksiyalarning superpozitsiyasini ham taklif qilganlar. Nagnal va Altay 1975-yilda uch o'lchovli masalalar uchun dual oqish funksiyalaridan foydalana boshlaganlar.

Ixtiyoriy shakldagi kesimli matritsa orqali o'tadigan oqim yuzalarining ifodasi uchun konform qayta shakllantirish 1978-yilda Yaig va boshqalar tomonidan bajarilgan. 1979-yilda kuchlarning yuqorigi va pastki baholarini aniqlash uchun Kntaxara, Osakada va boshqalar, Tomita va Souyerbi oxirgi elementlar uslubida foydalanilganga o'xshash diskret uchburchak va to'g'ri to'rtburchak elementlar qatoridan tashkil topgan tezliklar va kuchlanishlar maydonlarini kiritganlar. Shundan keyin yuqorigi va pastki baholar uslubi bilan oxirgi element uslubi (OEU) o'rtasidagi farq yo'qola boshlagan.

Tezliklar yoki kuchlanishlar maydonlarini tasvirlaydigan parametrlarning soni oshganligi sababli hisoblash texnikasining

yutuqlari tufayli yangi minimallashtirish yoki maksimallashtirish uslubiyati kiritilgan.

Hozirgi kunda analitik hisoblashlar talab qilinmayapti, ularning o'rnini simpleks uslubi va chiziqli dasturlashtirish uslubi kabi sonli optimallashtirish uslublari egallagan. Hatto avtomatik jarayonlarni tasvirlash uchun «Tubext» (Laxotn va Altan) va «Aksiform» (Avittsur, Makdermott va boshqalar) tipidagi mashinalar uchun dasturlar ham yaratilgan. Biroq shu bilan birgalikda, bu - fizikaviy jarayonlarni tushinishda bizning intuitsiyamizning o'tmaslashishi xavfining ortishiga olib keladi.

Ideal qattiqplastik materiallarning boshlang'ich oqishi uchun aniqlangan yuqorigi baho to'g'risidagi teoremlar ularda teoremaning shartlari bajarilmaydigan deformatsiya jarayonlarini tahlil qilishda qo'llash uchun shiddat bilan o'zgartirilgan yoki modifyatsiyalangan. 1964-yilda Xolling va Mitchell mustahkamlanadigan materialni bosishda yassi deformatsiya uchun oqish chizig'i bo'ylab oquvchanlik kuchlanishi o'zgarishini hisobga olish bilan qattiq uchburchaklarning tezliklar maydonini birinchi optimallashtirishni bajarganlar. *uki* yordamida hatto bosilgan quymada qattqlikning taqsimlanishi ham hisobga olingan va muhokama qilingan.

Deformatsiya tezligiga ta'sirchan bo'lgan materiallarni to'g'ri bosish uchun zarur bo'ladigan bosim o'rtacha oquvchanlik kuchlanishi yordamida birinchi marta 1967-yilda Avittsur tomonidan, so'ngra 1975-yilda oquvchanlik kuchlanishining oqish chizig'i bo'ylab o'zgarishi yordamida Kristesku tomonidan yaqinlashuvchi tarzda hisoblangan. Har ikkala holdayam sferik qattiqplastik chegaralarga ega bo'lgan qotirilgan markazga intilma tezliklar maydonidan foydalanilgan. Deformatsiyaga va deformatsiya tezligiga ta'sirchan materiallarni o'tirg'izish va to'g'ri bosish ideal plastik materiallar uchun yuqorigi baho to'g'risidagi teoremani biroz o'zgartirish yordamida Laxoti va Altan va Fenton tomonidan ko'rib chiqilgan (har ikkala ish 1975 yilda bajarilgan). Bu ishlarda issiqlikni generatsiyalash va issiqlik o'tkazuvchanlik natijasida hosil bo'ladigan haroratlarning taqsimlanishi ham ko'rib chiqilgan. Yopishqoqplastik materiallar uchun yuqorigi baho to'g'risida birinchi bo'lib

Xill tomonidan aniqlangan haqiqiy teorema 1979-yilda Tomito va Souyerbi tomonidan yon tomondan bosish uchun qo'llanilgan.

Kukunsimon metallni presslash jarayoni qiziqish uyg'otganligi sababli 1974-yilda Oyin va uning xodimlari tomonidan g'ovak materiallar uchun yuqorigi baho to'g'risidagi teorema taklif qilingan va qo'llanilgan.

Tayyorlanmaning inertsia kuchlarining texnologik yuklamaga ta'siri ideal qattiqplastik materialni deformatsiyalash energiyasining (quvvatining) sochilish (dissipatsiya) tezligiga kinetik energiyani hisobga oladigan qo'shiluvchini qo'shish bilan 1972-yilda Avittsur va boshqalar tomonidan yaqinlashuvchi tarzda baholangan. Tirosh va Kobayashi 1976-yilda kuchlarning yuqorigi bahosi to'g'risidagi teoremani dinamik masalalarda ifodalashga urinib ko'rganlar. O'zlarining kvaziyuqorigi baho yondashuvi asosida ular ba'zi bir deformatsiyalash jarayonlarida sodir bo'ladigan kinematik hodisalar ustida bir qator qiziqarli kuzatishlarni o'tkazganlar, ular mazkur bobda batafsil ko'rib chiqiladi.

Yuqorida ko'rsatilganidek, yuqorigi baho to'g'risidagi teoremlarni katta deformatsiyaga ega bo'lgan nostatsionar jarayonlar uchun qo'llash to'g'risidagi masala hatto tayyorlanmaning materiali ideal qattiqplastik bo'lgan va uning oquvchanlik kuchlanishi deformatsiyalash tarixiga bog'liq bo'lmagan holat uchun ham yetarlicha muammoli, chunki ketma-ket keladigan deformatsion sxemalar hisoblangan oldingi shakllar asosida aniqlanadi. Pastki baho to'g'risidagi teoremlarda deformatsiya umuman ko'rib chiqilmaydi, shu sababli ularni qo'llash tayyorlanmaning shaklining o'zgarishini oldindan aytish imkonini bermaydi. Bu ayniqsa, halqani o'tirg'izish, ochiq va yopiq shtamlarda shtamplash, ko'p sonli teshiklar orqali to'g'ri va teskari bosish kabi jarayonlar uchun adolatli bo'ladi, bu jarayonlarda tayyorlanma katta oqish erkinligi darajasiga ega bo'ladi.

Shunga qaramasdan, ko'pgina tadqiqotchilar tomonidan tayyorlanmaning joriy shakli yoki haqiqiy shaklga yaqin bo'ladi yoki keyingi qadamda optimal tezliklar maydoniga unchalik katta ta'sir ko'rsatmaydi deb umid qilish bilan deformatsiyaning ortishlarini katta qiymatlargacha ketma-ket yig'indilash bajarilgan. Ular

o‘ylaganidek, kuchlarning oldindan aytilgan yuqorigi baholari va mikroskopik oqish sifat jihatidan yaxshi chiqqan, ko‘pgina hollarda esa miqdoriy jihatdan ham mustahkamlanmaydigan va mustahkamlanadigan materiallar uchun olingan - masalan halqani o‘tirg‘izish, ochiq va yopiq shtamlarda shtamplash, kombinatsiyalan to‘g‘ri bosishda olingan eksperimental ma’lumotlar bilan tasdiqlangan. Biroq shuni qayd qilish lozim bo‘ladiki, bunday jarayonlarda materialning mikroskopik oqishi nazariy jihatdan ham, eksperimental jihatdan ham kontakt yuzasida ishqalanish bilan chaqiriladigan – odatda aniq ma’lum bo‘lmaydigan τ urinma kuchlanishlarga katta darajada bog‘liq bo‘ladi.

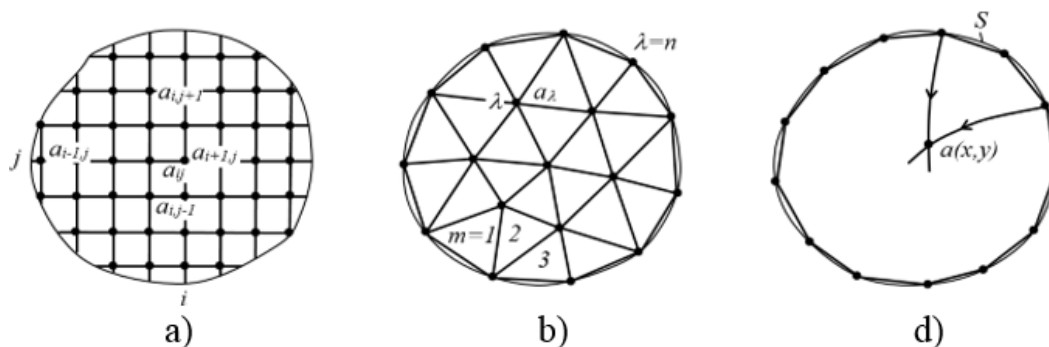
3.6. Oxirgi elementlar uslubi

Sonli yechish uslublari. Turli jarayonlar va hodisalarni matematik modellashtirish ko‘pgina hollarda differensial tenglamalarning ma’lum bir tizimlari uchun eng chekka masalalarni ifodalashga keltiriladi. Bunday tizimlarni to‘g‘ri integrallash faqat eng oddiy holatlardagina mumkin bo‘ladi. Vujudga keladigan qiyinchiliklarni yengish uchun bir qator muqobil qo‘yilmalar va yaqinlashuvchi yechish uslublari ishlab chiqilgan. Ulardan variatsion uslublari, matematik fizikaning to‘g‘ri uslublari, integral tenglamalar uslublari eng katta rivojlanishga ega bo‘lgan. Bu uslublari spetsifikligi va o‘ziga xos xususiyatlarga ega bo‘lganligi sababli ko‘rib chiqiladigan masalalar klassini kengaytirgan, biroq prinsipial xarakterdagi ko‘pchilik ziddiyatlarni bartaraf qila olmagan. Katta progressga eng chekka masalalarni zamonaviy EHM larda sonli yechish uslubini qo‘llash tufayli erishilgan.

Sonli yechishning birinchi qadami muhitni diskretlash bo‘lib hisoblanadi, u cheksiz erkinlik darajalari soniga ega bo‘lgan, kontinual yondashuv uchun xarakterli bo‘lgan masalalarni noma’lumlarining oxirgi soniga ega bo‘lgan masalalarga keltirish imkonini beradi. Odatda diskretlash qidiriladigan parametrlarga ega bo‘lgan tugun nuqtalarning qandaydir bir sonini tanlashni va differensial yoki integral operatorlarni tugundagi o‘zgaruvchilar

orqali ifodalangan ko‘proq oddiy algebraik operatorlar bilan almashtirishni o‘z ichiga oladi. Diskretlashning to‘rli, oxirgi elementli va chegara elementli sxemalari ma’lum. To‘rli diskretlashda (3.29-rasm,a) sohani Dekart yoki maxsus koordinatalar to‘ri bilan tugun nuqtalarda noma’lum kattaliklarga ega bo‘lgan bo‘laklarga ajratishdan foydalaniladi.

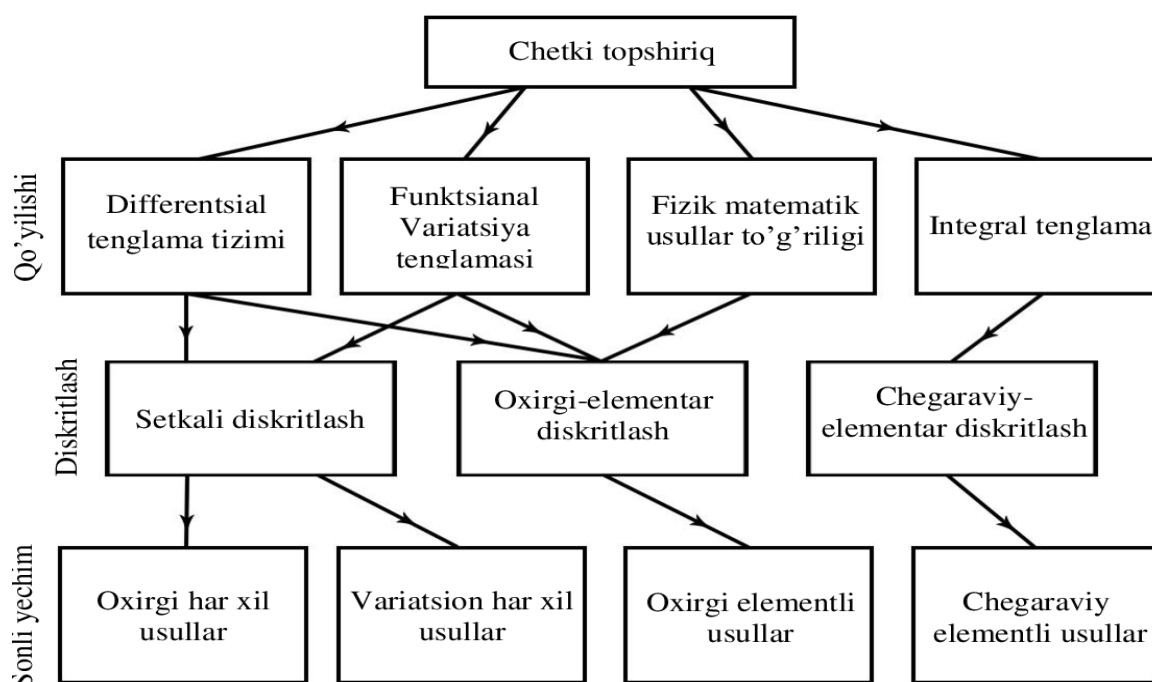
Tugun nuqtalar o‘rtasidagi farq munosabatlari aniqlanadi. Oxirgi elementli diskretlashda soha ixtiyoriy o‘lcham va shaklga ega bo‘lgan qandaydir bir sonli elementlarga ajratiladi, zaruriy operatorlar esa maxsus approksimatsiyalash funksiyalari yordamida tugundagi o‘zgaruvchilar orqali ifodalanadi (3.29-rasm,b). Chegara elementli diskretlash uchun bunday protsedura faqatgina sohaning chegarasida joylashgan tugun nuqtalarda bajariladi (3.29-rasm,d).



3.29-rasm. Diskretizatsiyalash (diskretlash) sxemasi: **a**-to‘rli; **b**-oxirgi-elementli; **d**-chegara-elementli.

Shu tariqa xususiy hosilalardagi differensial tenglamalar tugunlar ketma-ketligi uchun yozilgan algebraik tenglamalar tizimlari bilan, maxsus funkcionallar esa – tugundagi o‘zgaruvchilarning oxirgi sonining funksiyalari bilan almashtiriladi. Qidirilayotgan kattaliklarni keyingi hisoblash va holat parametrlarini aniqlashni sonli tahlil qilishning standart uslublari bilan bajarish mumkin. Ko‘rsatilgan operatsiyalar ketma-ketligi jamlanmasi: eng chekka masalaning qo‘yilishi – diskretlash sxemasi – hisoblashlar protsedurasi – sonli yechish uslubini belgilaydi (3.30-rasm).

Oxirgi farqlar uslubida (OFU) to'rtli sxemalar va OFU differentsial tenglamalarining mos keluvchi oxirgi farqli analoglaridan foydalaniladi, u gidrodinamika, issiqlik o'tkazuvchanlik masalalari va boshqa masalalarda muvaffaqiyatli qo'llanilgan birinchi sonli uslub bo'lib hisoblanadi. Uslubning kattagina chegaralanishlari chegara shartlarini hisobga olishning qiyinligi, mayda to'rtlardan foydalanish zarurligi, hisoblash jarayonining beqarorligi bilan bog'lanadi.



3.30-rasm. Eng chekka masalalarning qo'yilishi va sonli yechish uslublarining tasnifi.

Variatsion-farq uslubi (VFU) farq sxemalarini masalalarning differentsial qo'yilishiga nisbatan emas, variatsion (funksional) qo'yilishiga nisbatan qo'llashga asoslanadi, u iteratsion jarayonlarning barqarorligini, keng taxmin qilishlarda yechimning mavjud bo'lishi va o'xshash bo'lishini ta'minlaydi. Biroq to'rtli diskretlash tufayli chegara shartlarini approksimatsiyalashda va sohaning geometriyasida qiyinchiliklar saqlanib qoladi, variatsion shakl universal bo'lib hisoblanmaydi.

Oxirgi elementlar uslubining (OEU) paydo bo'lishi qurilish mexanikasi masalalari bilan chaqirilgan. Biroq OEU ni qayishqoqlik nazariyasi masalariga nisbatan qo'llashga bo'lgan dastlabki urinishlar butun yaxlit muhitlar mexanikasida revolyutsiya sodir bo'lishiga olib kelgan, va oxirgi 15 yilda bu yo'nalishda intuitsiyadan umumiylikkacha bo'lgan katta yo'l bosib o'tilgan.

Hozirgi kunda OEU shunday rivojlanish va ommaviylik darajasiga erishganki, imkoniyatlar va amalga oshirishning oddiyliги bo'yicha unga raqobat qila oladigan boshqa yondashuvlar borligiga shubha tug'iladi. Uslubning afzalliklariga tugun nuqtalarni erkin tanlash, soha va chegara shartlarining ixtiyoriy shakli, jismlarning turli modellari va har qanday o'lchamli masalalarga umumlash-tirishning oddiyliги, xususiyatlar va boshqa mahalliy effektlarning bir xil emasligini tabiiy hisobga olish, masalalarning butun boshli klassi uchun standart dasturlardan foydalanish kiradi.

Oxirgi elementlar uslubi qat'i asoslangan, uning turli shakl-larining differentsial va variatsion qo'yilishlarga, shuningdek, Ritts, Bubnov-Galerkin, eng kichik kvadratlar uslublarining maxsus holatlariga ekvivalentliги isbotlangan. Oxirgi holat oxirgi elementlar uslubiga matematik fizikaning universal uslubi sifatida qarash imkonini beradi. OEU ga ko'plab adabiy manbalar bag'ishlangan, uslubning qo'llanilish sohalari uzluksiz o'smoqda.

Chegara elementlari uslubi (ChEU) keyingi vaqtlarda OEU ga nisbatan elementlar sonining va hisoblash vaqtining kamayishi tufayli (taxminan 5-10 martaga) o'ziga e'tiborni tobora ko'proq jalb qilmoqda. Bunda yechim faqatgina sohaning chegarasida quriladi, har qanday ichki nuqtada esa yechim chegaralardan aniq integrallash bilan topiladi. Biroq uslubni masalalarning faqatgina chegara integral tenglamalariga keltiriladigan va sohada uzluksiz yechimga ega bo'lgan tor klassi uchun qo'llash mumkin.

Yechish uslubini tanlash, sanab o'tilgan xususiyatlardan tash-qari, katta darajada ko'rib chiqiladigan masalaning spetsifikasi bilan belgilanadi.

Plastiklik nazariyasi tenglamalarining chiziqli emasligi, yechimni noma'lum chegarali sohada qidirish zarurligi, rivojlangan

qattiq sohalarning bo'lishi, oqimning mahalliylishishi, turlicha uzilishlarning mavjud bo'lishi va hokazolar sababli to'rtli diskretlashga asoslangan oddiy hisoblash sxemalari kam samarali bo'lib chiqqan va sonli uslublarning boshqa sohalardagi muvaffaqiyatlariga qaramasdan, oxirgi elementlar uslubi keng tarqalish va rivojlanishga ega bo'lmaguncha ular plastiklik nazariyasida sezilarli rol o'ynamagan.

Quyida oxirgi elementlar uslubining (OEU) plastiklik nazariyasining metallarning shaklini o'zgartirish jarayonlari bilan bog'lanadigan texnologik masalalariga qo'yilishi ko'rib chiqilgan. Bunday jarayonlar uchun sohaning geometriyasi va materialning xususiyatlarining o'zgarishiga olib keladigan katta deformatsiyalar xarakterli bo'ladi, bu hollarda plastik holatning ko'pchilik o'ziga xos xususiyatlari namoyon bo'ladi, ular sonli yechishda qiyinchiliklarni chaqiradi. Vujudga keladigan hamma muammolar ham hali muvaffaqiyatli hal qilingan yo'q, biroq plastik shakl o'zgartirish jarayonlarini oxirgi elementli tahlil qilish usullari shiddat bilan rivojlanmoqda, hozirgi kunda ularning yuqori ilmiy va amaliy ahamiyatga ega ekanligiga shubha yo'q. OEU texnologiyani qat'iy prognozlanadigan va turli parametrlar bo'yicha optimal qilish uchun metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlarini yetarlicha aniqlik va to'liqlik bilan matematik modellashtirish uchun real asosni beradi. Ko'rib chiqilayotgan masalalarning batafsil sharhi mamlakatimizdagi adabiyotlar orasida mazkur kitobda keltirilgan.

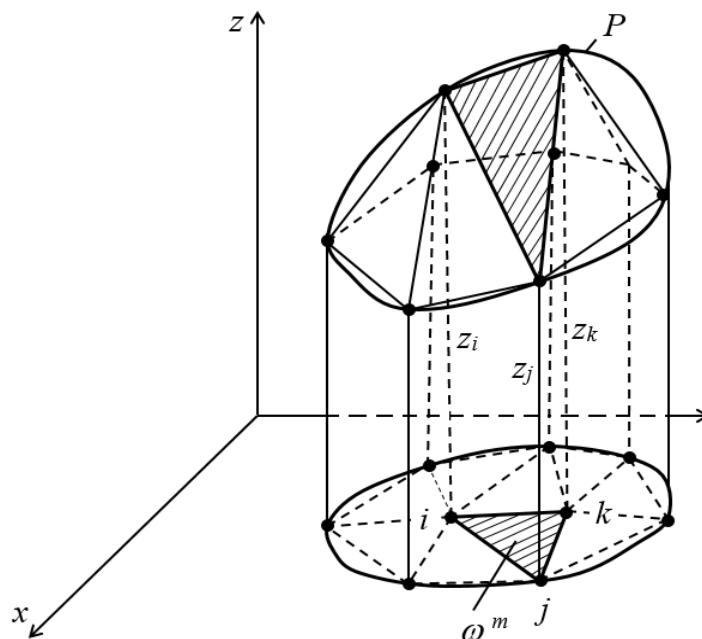
Oxirgi elementlarni diskretlash. Kontinual tasvirlashdan farqli o'laroq, oxirgi elementlar uslubida muhitni diskretlash bevosita eng boshidan boshlab kiritiladi, kontinium mexanikasi esa diskret mexanika bilan almashtiriladi.

Muhitni diskretlash. Ko'rib chiqilayotgan D sohani qandaydir bir sonli tagsohalarga - λ ($\lambda = 1, 2, \dots, N$) tugun nuqtalarga ega bo'lgan ω^m ($m = 1, 2, \dots, M$) oxirgi elementlarga ajratamiz (3.29-rasm,b). Elementlarning geometriyasini masalaning o'lchamliligini hisobga olish bilan tanlaymiz: yassi geometriya – yassi kuchlangan va yassi deformatsiyalangan holatlar uchun, halqa geometriya – o'q simmetriyali holat uchun, uch o'lchamli geometriya – hajmli holat

uchun. Tirqishlarsiz va bir-birini yopmasdan tutashadigan elementlar jamlanmasi soha va uning chegaralarining shaklini approksimatsiyalaydi. Elementlarning shakli odatda standart shablonlardan biriga – to‘g‘ri chiziqli yoki egri chiziqli uchburchaklar, to‘rtburchaklar, tetraedrlar va hokazolarga mos keladi.

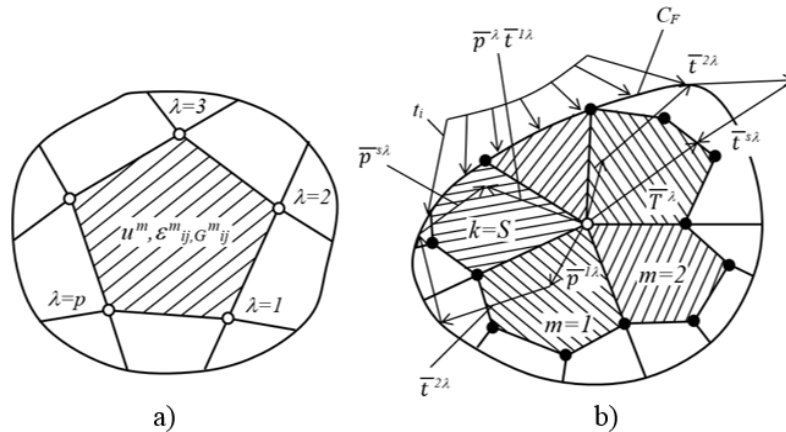
Har bir shablon uchun tugun nuqtalarning ma’lum bir to‘plami mavjud, bu nuqtalar elementlarning cho‘qqilari, qirralari yoki chegaralariga qo‘yiladi. Alohida elementlarning o‘lchamlari, to‘rning quyuqligi va turli sohalarning soni ixtiyoriy o‘rnatiladi, bu fizikaviy va intuitiv old yo‘llanmalar, shuningdek, to‘plangan tajriba va jarayonni tushunish asosida holatning o‘ziga xos xususiyatlarini hisobga olish imkonini beradi. Barcha hollarda elementlarga ajratish chegaralarning shakli, chegara shartlari, xususiyatlarning taqsimlanishi, maxsus nuqtalarning borligiga muvofiq amalga oshiriladi.

Oxirgi elementlarni approksimatsiyalash. Oxirgi elementli diskretlash asosida qidiriladigan funksiyalarning o‘zini haqiqiy tutishi uchun yaqinlashishni quramiz. Oddiy bo‘lishi uchun D sohada berilgan ikkita $z-z(x, u)$ o‘zgaruvchilarning skalyar funksiyasini ko‘rib chiqamiz, bu sohaga x, u, z uch o‘lchamli kenglikda P yuza mos keladi (3.31-rasm).



3.31-rasm. Yechimni oxirgi elementli approksimatsiyalash.

Sohani λ ($\lambda=1,2,\dots,N$) tugun nuqtalarda tutashadigan ω^m ($m=1,2,\dots,M$) oxirgi elementlarga ajratamiz. Aytaylik, D sohaning ixtiyoriy x, u nuqtasida uning qiymatlariga mos keladigan erkinlik darajalarining cheksiz soni o‘rniga $\lambda(z^1, z^2, \dots, z^N)$ tugun nuqtalarda z ning qiymatlarining diskret sonini beramiz. Har bir element doirasida $z(x, u)$ funksiyani ma’lum turdagi bo‘lakli-silliq tekisliklar bilan approksimatsiyalaymiz, bu tekisliklar tugun nuqtalarda z^λ funksiya-ning berilgan qiymatlari orqali o‘tadi va tutashadigan elementlarning chegaralarida uzluksizlik shartini qanoatlantiradi (3.32-rasm). Shu tariqa qidirilayotgan $z(x, u)$ funksiya alohida “qiyqimlar” dan – o‘zlarining tagsohalarida aniqlangan oddiy funksiyalardan “tikilgan” bo‘lib qoladi.



3.32-rasm. Oxirgi elementli uslubdagi almashinishning tarqalishi (a) va uzellisi (b) ko‘rinishlari.

Bu holat D elementga etarli kichik sohani egallashga va zaruriy funksiyalar yaqinlashuvini qulay bir sharoitga moslab qurishning printsiptial imkoniyatlarini ta’minlab beradi. z^λ va boshqa miqdorlarni hisoblash proseduralari, elementlar ichidan approksimatsiyalash funksiyalarini tanlash, sonlar va uzelli nuqtalar joylashuvi, elementlar shakllari, D sohaning sxemasini egallash, z funksiya o‘zini tutishi va oxirgi elementli uslub sonlari hamda boshqa faktorlar uchun ko‘rsatilgan imkoniyatlarni amaliy tomondan to‘liq realizatsiya qilish mumkin bo‘ladi. Bunday holatlar har bir element doirasida va

ma'lum funksiyalar atrofidagi bo'lakli-silliqlik tekisliklar bilan amalga oshirilishi mumkin.

Nazorat savollari

1. Metall materiallari (metallmas materiallar) qanday hollarda presslanadi?

2. Metall materiallarini presslashdan maqsad nima?

3. Materiallarni presslayotganda diametri necha mm dan ortiq bo'lgan chivichlar, devor qalinliklari va ichki diametrlari necha mm dan necha mm gacha bo'lgan quvurlar, ko'ndalang kesim o'lchami necha mm gacha bo'lgan turli shaklli va o'lchamli buyumlar tayyorlab olinadi?

4. Materiallarni presslashning necha xil usuli bor, shularni sxematik holda chizib tushuntiring.

5. Materiallarni shtamplash deb nimaga aytiladi va uning qanday usullarini bilasiz?

6. Sovuq va issiq holda shtamplash uchun ishlatiladigan shtamplar markalarini yozib bering.

7. listli materiallarni shtamplash deb nimaga aytiladi?

8. Yuqorigi va pastki baholash uslublarining mohiyati nimadan iborat?

9. Muhitni diskretlash mohiyatini va elementlar geometriyasi o'lchamlarini hisobga olish va tanlash jarayonlarini yozib bering.

10. Oxirgi elementlarni approksimatsiyalash jarayonini tushuntiring va uni sxematik ko'rinishini chizib bering.

4-BOB. YUQORIGI VA PASTKI BAHOLASHLAR TO‘G‘RISIDAGI TEOREMLAR

4.1. Yopishqoq bo‘lmagan qattiqplastik jismni kvazistatik deformatsiyalash

Aytaylik, zagotovkaning materiali, masalan, Mizes plastiklik shartini qanoatlantiradigan materiallar kabi qattiqplastik bo‘lsin, tavsif tenglamasi esa plastik deformatsiya energiyasining maksimal sochilish (dissipatsiyalanish) tamoyiliga bo‘ysunsin:

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^s)\varepsilon_{ij} \geq 1 \quad \text{yoki} \quad \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^s)\varepsilon_{ij} dV \geq 0 \quad (4.1)$$

Bu tamoyil plastik potensial va materialning $f(\sigma_{ij}) = k_f$ plastiklik sharti teng va shartni to‘qqiz o‘lchamli σ_{ij} – kenglikda tasvirlaydigan yuza bo‘rtik deb taxmin qilishdan kelib chiqishini ko‘rsatish mumkin. Aytaylik, kuchlanishlar yuzasi yoki F_i yuza kuchlarining yuzasi V to‘liq hajmga va S to‘liq yuza maydoniga ega bo‘lgan jismning yuzasining S_F qismida aniqlangan bo‘lsin va tezliklar yuzasi yuzaning boshqa S_c qismida aniqlangan bo‘lsin. Ixtiyoriy tanlangan, kenglikdagi koordinatalar bo‘yicha oxirgi birinchi ko‘paytmalarga ega bo‘lgan va S_C da ilgari aniqlangan u^k_i tezliklar maydoniga teng bo‘lgan u^k_i kinematik mumkin bo‘lgan tezliklar maydoni uchun yuqorigi baho to‘g‘risidagi teorema quyidagi ifoda bilan aniqlanadi (Xill, Prager, Druke va boshqalar tomonidan aniqlangan, uni virtual ish va tengsizlik tamoyilidan chiqarish mumkin):

$$W_C = \int_{S_C} F_i u_i dS \leq \int_V \sigma_{ij}^k \varepsilon_{ij}^k dV + \int_{G^k} k [u_i^k] dS - \int_{S_F} F_i u_i^k dS = W_d + W_S - W_F = W_C^k \quad (4.2)$$

Tengsizlikda o‘ng qismdagi birinchi va uchinchi a‘zolar yuqorida aniqlangan, W_S bilan belgilangan ikkinchi a‘zo kinematik mumkin bo‘lgan tezliklar uzilishlarining yuzalari bo‘ylab ichki siljish

bilan rivojlantiriladigan quvvatni bildiradi, G^k , k va $[u^k_i]$ mos ravishda urinma oquvchanlik kuchlanishi va uzilishning kattaligi yoki tezliklarning sapchishini bildiradi. Chunki sapchish cheksiz katta $\dot{\varepsilon}^k_{ij}$ deformatsiya tezligiga, ba'zi hollarda cheksiz to'liq deformatsiyaga olib keladi. Yopishqoq yoki deformatsiya tezligiga ta'sirchan bo'lgan materiallarni ko'rib chiqishda fizikaviy mulohazalardan kelib chiqish bilan G^k ni chiqarib tashlash lozim bo'ladi. Agar maydon G^k da $u^k_i = 0$ bo'lsa deformatsiya jarayonida mustahkamlanadigan materiallar uchun ham shunday qilish talab qilinadi. Xuddi yuqorigi va pastki baholar uslublariga taalluqli ishlardagi kabi, qisqacha bo'lishi uchun Mizes plastiklik sharti va Levi-Mizes kechish qonuniga bo'ysunadigan materiallarni ko'rib chiqish bilan cheklanamiz. Shunda u^k_i hajmning doimiyliги shartini qanoatlantirishi lozim va tengsizlikdagi W_d ni quyidagicha yozamiz:

$$W_d = \int_V \overline{\sigma^k} \overline{\varepsilon^k} dV = \int_V k_f \overline{\varepsilon^k} dV \quad (4.3)$$

Bu yerda $\overline{\varepsilon^k}$ – deformatsiya tezliklarining shiddati (intensivligi) $\left\{ \left(\frac{2}{3} \right) \dot{\varepsilon}^k_{ij} \cdot \dot{\varepsilon}^k_{ij} \right\}^{1/2}$;

σ^k – urinma kuchlanishlarning shiddati $\left\{ \left(\frac{3}{2} \right) \dot{\sigma}^k_{ij} \cdot \dot{\sigma}^k_{ij} \right\}^2$;
 $\sigma^k_{ij} - \varepsilon^k_{ij}$ ga mos keluvchi kuchlanishlar divigatori.

Postulatlangan plastiklik shartidan σ^k oquvchanlik kuchlanishiga yoki k_f siljish oquvchanlik kuchlanishiga teng bo'lishi kelib chiqadi, albatta.

Agar zagotovkaning materiali ideal qattiqplastik bo'lsa va k_f butun deformatsiyalanadigan jismda bir xil bo'lsa, u holda tenglama quyidagi ko'rinishni oladi:

$$W_d = \int_V k_f \overline{\varepsilon^k} dV \quad (4.4)$$

Bu ifoda birinchi marta Markov tomonidan olingan. Ixtiyoriy tanlangan, S_F yuzada chegara shartlarini, plastiklik sharti tengsizligini

va materialning hajmida muvozanat tenglamasini qanoatlantiradigan σ^k_i , statik mumkin bo‘lgan kuchlanishlar maydoni uchun pastki baho to‘g‘risidagi teoremani

$$W_C = \int_{S_C} F_i u_i dS \geq \int_{S_C} F_i^s u_i dS = W_C^s \quad (4.5)$$

tengsizlikka muvofiq ifodalash mumkin.

Bu yerda F_i^s – S_C da σ^k_i ni qanoatlantiradigan yuza kuchlari.

Shuni qayd qilamizki, S_C da ustuvor bo‘lgan τ^s_C statik mumkin bo‘lgan urinma kuchlanish τ_f siljishda oquvchanlik kuchlanishdan oshiq bo‘lmasligi lozim. Bunda σ^k_i tangensial kuchlanishlarning uzulish yuzalaribo‘lishi mumkin, biroq bu tengsizlikni uzaytirmaydi.

4.2. Tugunlardagi va elementning ichidagi o‘zgaruvchilar

Yuqorida keltirilgan materiallar shuni ko‘rsatadiki, oxirgi elementli diskretlash ikkita xildagi kattaliklarni–tugundagi o‘zgaruvchilarning diskret soni va qidirilayotgan parametrlarning elementlarning ichida taqsimlanishini approksimatsiyalaydigan maxsus turdagi funksiyalarni kiritish bilan bog‘lanadi. Bunda tugundagi o‘zgaruvchilar mustaqil parametrlar hisoblanadi, elementlarning ichidagi taqsimlanishlar esa ular orqali aniqlanadi. Kelgusida noma’lumlar sifatida kinematik kattaliklar–tugunlardagi tezliklar va siljishlarni tanlaymiz, chunki masalalarning shunday ifodalanishi OUE da ustuvor bo‘lib hisoblanadi.

Elementlarning ichida siljishlarning (tezliklarning) taqsimlanishini funksiyalar bilan tasvirlaymiz (3.32-rasm, a ga qarang):

$$u_i^m = u_1(a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^p; x_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.6)$$

Bu yerda u_i^m – m elementning ichida siljish vektorning Dekart koordinatalar tizimining x_i o‘qiga proyeksiyasi;

a_i^λ – m ($\lambda = 1, 2, \dots, p$) ko‘rib chiqilayotgan elementning λ tuguniningi yo‘nalishi bilan bog‘langan approksimatsiya koefitsiyentlari.

Tugun nuqtalardagi siljishlarni $u_i^\lambda = q_i^\lambda$ bilan belgilaymiz.

Formulani m elementning λ tugunlaridagi tezliklarning barcha proyeksiyalari uchun yozish va olingan tenglamalar tizimini a_i koeffitsiyentlarga nisbatan yechish bilan formulani quyidagi ko‘rinishga keltirish mumkin:

$$u_i^m = \sum_{\lambda=1}^p N_i^\lambda q_i^\lambda \quad (4.7)$$

Bu yerda N_i^λ – formulani approksimatsiyalaydigan funksiyani tanlash, elementning shakli va tugunlarning soni bilan aniqlanadigan funksional koeffitsiyentlar, ular shaklining funksiyalari deb ataladi.

Formuladan elementning ichida deformatsiyalarning taqsimlanishini aniqlaymiz:

$$\varepsilon_{ij}^m = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^m}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^m}{\partial x_i} \right) \quad (4.8)$$

Differentsiallashtirishni bajarish va a’zolari tugunlardagi siljishlar bo‘yicha guruhlashtirish bilan

$$\varepsilon_{ij}^m = \sum_{\lambda=1}^p B_{i/\gamma}^\lambda q_\gamma^\lambda, \quad i, j, \gamma = 1, 2, 3 \quad (4.9)$$

ni olamiz.

Formulada takrorlanuvchi indekslar bo‘yicha yig‘indilash qoidasidan foydalanilgan; $B_{i/\gamma}^\lambda$ koeffitsiyentlar ε_{ij}^m deformatsiyaning tarkibiy qismlarini ν elementda turli yo‘nalishlarda q_γ^λ tugunlardagi ko‘chishlarning proyeksiyalariga bog‘lanishini aniqlaydi ($\gamma = 1, 2, 3$).

Xuddi shu tariqa elementning ichida σ_{ij}^m taqsimlangan kuchlanishlar va C_F^m elementning chegaralarida berilgan t_i yuza kuchlanishlarini jamlangan tugun qiymatlariga keltirishni bajarish mumkin. Mos keluvchi keltirish kriteriyasi t elementning tugunlaridagi kuchlarning har bir tarkib toptiruvchisi uchun virtual ish tamoyili bilan aniqlanadi, ya’ni har bir λ tugunga elementga qo‘yilgan ichki va tashqi kuchlanishlarning ularning ishi berilgan tugundagi q_γ^λ

siljishlarga bog‘liq bo‘lgan qismi keltiriladi. m elementning ichki kuchlarining ishining variatsiyasi uchun ifodani tuzamiz:

$$\delta W_{BH}^m = \int_{\omega_m} \sigma_{ij}^m \delta \varepsilon_{ij}^m dw \quad (4.10)$$

Bu yerda ω_m – t elementning hajmi.

Bu yerga quyidagi formulani o‘rniga qo‘yamiz:

$$\delta W_{BH}^m = \sum_{\lambda=1}^p \delta q_{\gamma}^{\lambda} \int_{\omega_m} B_{ij\gamma}^{\gamma} \sigma_{ij}^m dw \quad (4.11)$$

Shu bilan birgalikda, σ_{ij}^m taqsimlangan kuchlanishlarga ekvivalent bo‘lgan, m elementning λ tuguniga i yo‘nalishda qo‘yilgan $p_i^{m\lambda}$ tugun kuchlari bilan tugunlardagi siljishlarning variatsiyalarida bajariladigan ish:

$$\delta W_{BH}^m = \sum_{\lambda=1}^p p_i^{m\lambda} \delta p_i^{m\lambda} \quad (4.12)$$

Olingan ifodalarni tenglashtirish bilan

$$p_i^{m\lambda} = \int_{\omega_m} B_{ij\gamma}^{\gamma} \sigma_{ij}^m dw \quad (4.13)$$

ni topamiz.

Xuddi shunday, t elementning ularda t mi taqsimlangan tashqi yuklama berilgan C_F^m chegaralari bo‘ylab yuza kuchlanishlari ishining variatsiyasi:

$$\delta W_t^m = \int_{C_F^m} t_i^m \delta u_i dS \quad (4.14)$$

Yoki yuqorida keltirilgan formulalarni hisobga olish bilan:

$$\delta W_t^m = \sum_{\lambda=1}^p \delta q_i^{\lambda} \int_{C_F^m} N_i^{\lambda} t_i^m dS \quad (4.15)$$

Xuddi shunday ish $\overline{t_i^{m\lambda}}$ ko'chishlarning mos keluvchi variatsiyalarida λ tugunlarda i yo'nalishda t element tomonidan qo'yilgan δq_i^λ jamlangan tugun kuchlari bilan ham bajarilishi lozim. Bundan

$$\overline{t_i^{m\lambda}} = \int_{C_F^m} N_i^\lambda t_i^m dS \quad (4.16)$$

ni olamiz.

Bu tenglamalar σ_{ij}^m taqsimlangan ichki kuchlanishlar va t_i^m berilgan yuza yuklamalarini ekvivalent tugun kuchlari bilan almashtirish imkonini beradi.

Elementlar jamlanmasi. Elementlar tutashtirilganda ixtiyoriy X tugunda barcha $t = 1, 2, \dots, s$ elementlar tomonidan q_i^λ tugunlardagi siljishlarning tengligi avtomatik tarzda qanoatlantiriladi, ular uchun bu tugun umumiy cho'qqi bo'lib hisoblanadi (3.32-rasm,b ga qarang). Shu tariqa formulada funksiyalarni tanlash hisobiga elementlarning umumiy chegaralari bo'ylab siljishlarning (tezliklarning) uzluksizligi ham qanoatlantiriladi. Shu sababli alohida elementlarning kinematik parametrlari ularning jamlanmasi uchun ham saqlanadi.

σ_{ij}^m kuchlanishlar taqsimlanishining elementlarning chegaralari bo'ylab uzluksizligi kinematik qo'yilishda odatda ta'minlanmaydi, chunki bu shartning bajarilishi yo'l qo'yiladigan funksiyalar klassiga kuchli chegaralashlarni qo'yadi. Shu sababli buning o'rniga elementlarning tugunlaridagi jamlangan kuchlarning mos keluvchi tarkibiy qismlarini qo'shish amalga oshiriladi. $m = 1, 2$ va S elementlarning umumiy cho'qqisi bo'lib hisoblanadigan qandaydir bir X tugunni tanlaymiz (3.32-rasm,b ga qarang). Har bir element tomonidan λ tugunga yuza kuchlanishlari va ichki kuchlanishlarga ekvivalent bo'lgan, λ tugunga har bir element tomonidan ta'sir ko'rsatuvchi $t_i^{m\lambda}$, $p_i^{m\lambda}$ kuch vektorlari qo'yilgan. λ tugundagi kuchlarning mos keluvchi tarkibiy qismlarini yig'indilash bilan jamlangan

yuza kuchlari va ichki kuchlarning to‘liq tarkib toptiruvchilarini topamiz

$$T_i^\lambda = \sum_{m=1}^s \bar{t}_i^{m\lambda}, \quad P_i^\lambda \sum_{m=1}^s p_i^{m\lambda} \quad (4.17)$$

Demak, tugundagi kuchlarning mos keluvchi tarkibiy qismlarini yig‘indilash bilan jamlangan yuza kuchlanishlari va ichki kuchlanishlarni topish mumkin. Bu elementlarning ekvivalent holatini aniqlash imkonini beradi.

4.2.1. Elementlarni tanlash va konkret shaklni qabul qilish

Elementning xili tanlangandan keyin OEU ning asosiy nisbatlari konkret shaklni qabul qiladi. Elementning xili dasturlashtirish bosqichida ham, keyingi hisoblashlarni bajarishda ham katta rol o‘ynaydi. Elementlar va approksimatsiyalaydigan funksiyalarni tanlashga qo‘yiladigan umumiy talablarni OEU ning yaqinlashuvchanlik kriteriysi o‘rnatadi.

Uslubning yaqinlashuvchanligi. Sonli uslublarning asosiy tavsifi aniqlik, ya’ni hisoblangan qiymatlarning haqiqiy qiymatlarga yaqinligi bo‘lib hisoblanadi. Aniqlikning ob’ektiv bahosini maxsus tanlangan masalalarning (test masalalarining) sonli va analitik yechimlarini taqqoslash beradi. Agar uning yaqinligi ta’minlansa, odatda uslubning aniqligi yetarli deb hisoblanadi, yaqinlashuvchanlik deganda qurilgan yechimning elementlarning maydalanishi va ularning soni ortishiga qarab aniq yechimga juda yaqin yaqinlashishi tushuniladi.

Elementlarning o‘lchamlari kichrayganda diskretlash xatolari (soha va uning chegaralarining yaqinlashishining noaniqligi) avtomatik tarzda bartaraf bo‘ladi; approksimatsiya xatolarini (elementlar doirasida funksiyalarning yaqinlashishining noaniqligi) bartaraf qilishga esa “chegaralangan yaqinlashuvchanlik kriteriylarini” bajarish bilan erishiladi:

a) elementning ichidagi o'zgaruvchini n darajaning minimumi sifatida to'liq polinomlar ko'rinishida taqdim qilish, bu yerda n – funksionalga kiruvchi hosilalarning eng yuqori tartibi;

b) elementlarning chegaralari orqali o'tishda funksiyaning o'zi va uning hosilalarining to $(n - 1)$ tartibgacha uzluksizligini ta'minlash.

Elementlarning xillari. Masalaning spetsifikasiga bog'liq ravishda elementning talab qilinadigan aniqlikka erishish uchun minimal vaqt sarfini ta'minlaydigan qandaydir bir optimal varianti mavjud deb hisoblanadi. Biroq mavjud tavsiyalar, yetarli yaqinlashuvchanlik kriteriyalari ham elementning xilini tanlash uchun katta erkinlik beradi, bu tanlash elementlarning murakkabligi va ularning soni o'rtasida mutanosiblikni o'rnatishdan tashkil topadi.

Shu sababli oxirgi elementlarning keng nomenklaturasi ishlab chiqilgan, ularni bir qator alomatlar bo'yicha tasniflash mumkin:

1) elementlarning chiziqli o'lchamliligi bo'yicha: ikki o'lchamli (yassi, yuzali), hajmli;

2) geometrik shakl bo'yicha – uchburchakli, to'rtburchakli, tetraedrik, prizmatik;

3) chegaralarning shakli bo'yicha – to'g'ri chiziqli, yassi, egri chiziqli, izoparametrik;

4) approksimatsiyalaydigan funksiyaning tartibi bo'yicha – simpleks, kompleks va multipleks-elementlar, yuqori tartibli elementlar;

5) approksimatsiyalaydigan funksiyaning matematik turi bo'yicha – Lejandr polinomlari, Ermit polinomlari, splaynlar, Sirendipov ko'paytuvchilari.

Har xil tipdagi elementlarning detalli tasvirlanishi, shuningdek, ularni qurishning umumiy nazariyasi oxirgi elementlar uslubi bo'yicha asos bo'lib hisoblanuvchi ko'pgina ishlarda keltirilgan.

Yuqori tartibli elementlarning afzalliklariga o'zgaruvchilarning soni va boshlang'ich ma'lumotlar hajmining kamayishi, hisoblash vaqtining qisqarishi va xatolar ehtimolining kamayishi kiradi. Biroq bunda yechimning yuqori aniqligi faqatgina shaklning standart

funksiyalarining o'zini qanday tutishining xarakteri tadqiq qilindigan kattaliklarning haqiqiy o'zgarishiga mos kelgan hollardagina ta'minlanadi. Yuqori tartibli (ikkinchi, uchinchi) elementlar yetarlicha silliq funksiyalarni yaqinlashtirish uchun yoki elementning tipi moslashtirilganda, masalan, plastinkalar va qobiqlar nazariyasidagi kabi ko'rib chiqiladigan masalaning spetsifikasiga moslashtirilganda samarali bo'lib hisoblanadi.

Agar tadqiq qilinadigan funksiyalarning o'zini qanday tutishining xarakteri oldindan ma'lum bo'lmasa va uning unchalik silliq emasligi kutilayotgan bo'lsa, u holda qanoatlanarli yaqinlashishning birdan-bir kafolati mayda elementlarda bo'lakli-silliq approksimatsiyalardan foydalanish bo'lib hisoblanadi. Ularga ko'ra elementlarni maydalash effektlari ularning tartibini oshirishga qaraganda kattaroq rol o'ynashi mumkin bo'ladigan bir qator boshqa sabablar ham bor.

Tugunlardagi o'zgaruvchilarning ta'siri tugun nuqtalar elementlarning cho'qqilari bilan mos tushganda eng kuchli va tugun nuqtalar elementlarning ichida joylashganda eng kuchsiz bo'ladi.

Elementlarning oxirgi sonida ko'pchilik tugunlar cho'qqilar bilan mos tushishi maqsadga muvofiq bo'ladi. Bunday holat past tartibli elementlar uchun ta'minlanadi.

Yaqinlashuvchanlik kriteriysiga muvofiq, elementlarning o'lchamining kichrayishi har doim yechimning aniqligining ortishiga olib keladi, approksimatsiyalarni yaxshilashning bunday tendentsiyalari esa noma'lumligicha qolmoqda.

Xususan, global approksimatsiyaning butun soha bitta element bilan mos tushadigan eng chekka vaziyati murakkab koordinata funksiyalaridan foydalanilishiga qaramasdan qoniqarli natijalarga olib kelmaydi.

Elementlarning tartibi faqatgina funksionalga kiradigan hosilalarni hisoblashni ta'minlashi lozim. Bunda tenglamalarning bir qismi (siqilmaslik tenglamasi, muvozanat tenglamasi) elementlarning alohida ichki nuqtalarida bajariladi. Oraliq nuqtalarda mos keluvchi kattaliklarni interpolyatsiyalash aniqligi elementning o'lchami kichrayishi bilan ortadi.

Nostatsionar jarayonlarni tahlil qilish ketma-ket bosqichlarni katta gradiyentlarga va oqish yo‘nalishining keskin o‘zgarishlariga ega bo‘lgan sohalarni mayda elementlarga ajratish bilan ko‘rib chiqishni talab qiladi. Bunday sohalarning holati oldindan ma‘lum bo‘lmasligi, elementlarni qayta qurish protsedurasi esa ko‘p mehnat qilishni talab qilishi sababli, butun sohani mayda bo‘laklarga ajratishni qo‘llashga to‘g‘ri keladi.

Yemirilish va nuqsonlar hosil bo‘lishi bilan bog‘lanadigan hodisalarni tahlil qilishda matematik modelning yechish qobiliyati jismning xarakterli o‘lchamlaridan bir necha tartibga kichik bo‘lgan mahalliy hajmlarda holatni baholash uchun yetarli bo‘lishi lozim. Bu hollarda muhitni yetarlicha mayda masshtablarda diskretlash zarur bo‘ladi. Shundan kelib chiqqan holda, aksariyat hollarda past tartibli mayda standart elementlardan foydalanish strategiyasi o‘zini oqalaydi, ular dasturlashtirishning oddiyligini, zaruriy aniqlikni, qabul qilsa bo‘ladigan vaqt tavsiflarini ta‘minlaydi. Qayishqoqlik va plastiklik masalalari uchun variatsion funktsionallar birinchi tartibdan oshiq bo‘lmagan ($n = 1$) siljishlardan (tezliklardan) olingan hosilalarni o‘z ichiga oladi, ya‘ni yaqinlashuvchanlik kriteriysi chiziqli polinomlar uchun bajariladi.

Mos keluvchi eng oddiy simpleks-elementlar tugunlarning soni masalaning o‘lchamidan barga oshiq bo‘lganda amalga oshadi. Shunday qilib, optiaallik sharti bilan belgilangan ikki o‘lchamli holatlarni (yassi yoki o‘q simmetrik) yassi yoki halqa uchburchak elementlar, hajmli holatni esa – tetraedlar qanoatlantiradi.

Yassi uchburchak elementlar. Yassi oqishning kinematikasi siljishlarning (ko‘chishlarning) u_x, u_y (v_x, v_y) tarkibiy qismlarga ega bo‘lgan vektor maydoni bilan x, u koordinata o‘qlari yo‘nalishida beriladi. i_x, i_i skalyar funksiyalarning har biri t uchburchak elementlarda berilgan bo‘lakli-uzluksiz chiziqli funksiyalar bilan approksimatsiyalanadi:

$$u_y^m = a_0^m + a_1^m x + a_2^m y;$$

$$u_y^m = b_0^m + b_1^m x + b_2^m y, \quad (4.18)$$

Bu yerda $a^{m_0}, a^{m_1}, a^{m_2}, b^{m_0}, b^{m_1}, b^{m_2} - m$ elementga tegishli bo'lgan approksimatsiya koeffitsiyentlari.

Keyinchalik t indeks tushirib qoldiriladi. x, u tekislikda uchburchak elementlarni tanlash va approksimatsiyalash sxemasi 4.1-rasmda keltirilgan. Formulaga muvofiq approksimatsiya koeffitsiyentlarini tugundagi o'zgaruvchilar – elementning i, j, k cho'qqilarida siljishlarning qiymatlari orqali ifodalaymiz (aylanish yo'nalishi soat mili yo'nalishiga teskari). Buning uchun har bir cho'qqi uchun (4.19) formulani yozamiz:

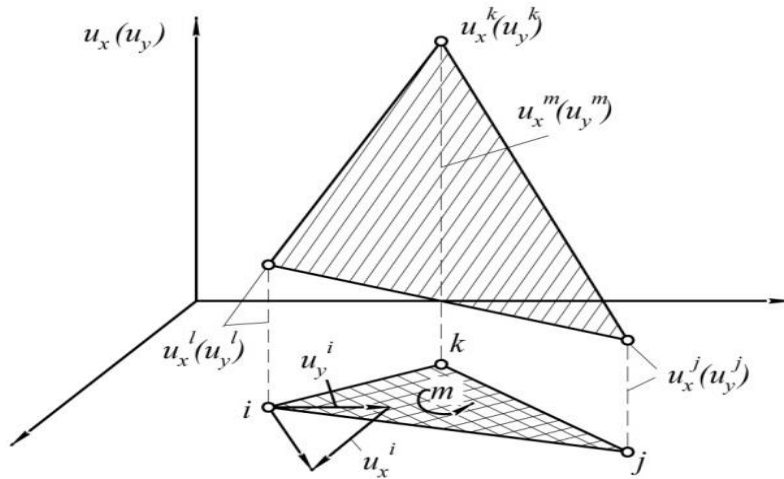
$$\begin{aligned} u_{xi} &= a_0 + a_1x_i + a_2y_i; \\ u_{xj} &= a_0 + a_1x_j + a_2y_j; \\ u_{xk} &= a_0 + a_1x_k + a_2y_k; \end{aligned} \quad (4.19)$$

va xuddi u_y ning proyeksiyasidagi kabi, olingan (4.19) tenglamalar tizimini a_0, a_1, a_2 ga nisbatan yechish bilan

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2w} [(x_jy_k - x_ky_j)u_{xi} + (x_ky_i - x_iy_k)u_{xj} + (x_iy_j - x_jy_i)u_{xk}]; \\ a_1 &= \frac{1}{2w} [(y_j - y_k)u_{xi} + (y_k - y_i)u_{xj} + (y_i - y_j)u_{xk}]; \\ a_2 &= \frac{1}{2w} [(x_k - x_j)u_{xi} + (x_i - x_k)u_{xj} + (x_j - x_i)u_{xk}], \\ w &= \frac{1}{2}(x_iy_k - x_ky_i + x_iy_j - x_jy_i + x_jy_k - x_ky_j) \end{aligned} \quad (4.20)$$

ni topamiz.

Bu yerda $u_y - m$ elementning maydoni; b_0, b_1, b_2 uchun ifodalar formula bo'yicha shu formulaga muvofiq o'zgaruvchilarni oddiy Me bilan topiladi.



4.1-rasm. Yassi uchburchak elementlar bilan approssimatsiyalash.

Formulani o‘rniga qo‘yish elementning ichida siljishlarning proyeksiyalarining taqsimlanishining mos keluvchi tugun siljishlari va tugunlarning koordinatalari orqali ifodalangan tenglamalarini beradi. Bu tenglamalar x, u ka nisbatan chiziqli bo‘lib, elementlarning cho‘qqilarida tugunlardagi siljishlarning tengligini va qo‘shni elementlarning chiziqli chegaralari bo‘ylab siljishlarning uzluksizligini ta‘minlaydi (bundan ularning butun sohada uzluksizligi kelib chiqadi). Ko‘rib chiqilayotgan elementda deformatsiyalarning tarkibiy qismlarini hisoblaymiz:

$$\varepsilon_x^m = \frac{\partial u_x^m}{\partial x}, \quad \varepsilon_y^m = \frac{\partial u_y^m}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^m = \frac{\partial u_x^m}{\partial y} + \frac{\partial u_y^m}{\partial x} \quad (4.21)$$

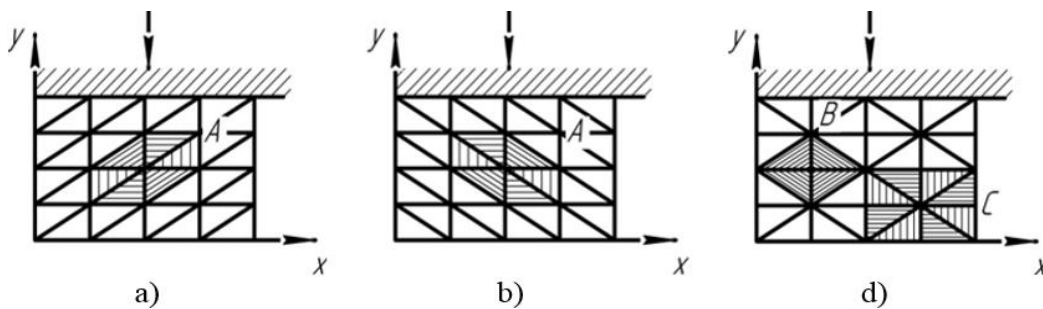
Formulani differensiallash bilan (t indeks) quyidagini olamiz:

$$\varepsilon_x = a_1, \quad \varepsilon_y = b_2, \quad \gamma_{xy} = a_2 + b_1 \quad (4.22)$$

Formulalardan elementlar doirasida deformatsiyaning taqsimlanishi bir xil ekanligi kelib chiqadi.

Tasvirlashning oddiyligi va qulayligi uchburchak elementga katta ommaviylik keltirgan va uning asosida EMK bo‘yicha ko‘p ishlar qilingan. Bu “sohani modellashtirishda katta sonli elementlardan foydalanish lozimligi tufayli, sohani uchburchaklarga ajratish, ehtimolki, ajratishning eng yaxshi usulidir” degan xulosaga

kelish imkonini beradi. Elementning kamchiliklariga uning “geometrik anizotropiyasi” va deformatsiya erkinligining kichik darajasi kiradi. Ulardan birinchisi yechimni elementlarning qaratilishiga bog‘liqligi bilan bog‘lanadi (4.2- rasm,a,b), soha yetarlicha qo‘pol bo‘lingan bo‘lganda uning ta’siri sezilarli bo‘ladi. “Izotrop” sxema (4.2-rasm,d) bunday kamchilikka ega emas, biroq “anizotrop” sxemalarga qaraganda pastroq yaqinlashuvchanlik tezligini ta’minlaydi (ayniqsa, elementlarni V tutashtirish variantida). Deformatsiyaning erkinlik darajasi deganda bitta elementga to‘g‘ri keladigan N_f kinematik erkinlik darajasining N_c qo‘yiladigan chegaralashlar soniga nisbati tushuniladi.



4.2-rasm. Uchburchak elementlarga ajratish sxemasi: **a)** va **b)** – elementlarning anizotrop qaratilishi; **d)** – izotrop.

Yassi deformatsiyada har bir uchburchak elementga (mayda bo‘laklash holatida) $1/2$ tugun to‘g‘ri keladi, unda tezlikning ikkita kompoziti variatsiyalanishi mumkin. Shunday qilib, $N_f = 1/2 \cdot 2 = 1$. Chegaralashlar chegara shartlari yoki ba’zi bir umumiy talablar bilan, masalan, siqilmaslik sharti bilan qo‘yilishi mumkin. Chegaralar bo‘ylab joylashgan, ular uchun tezliklar berilgan elementlar uchun $N_c = 2$ ga, ichki elementlar uchun $N_c = 1$ ga egamiz. Bundan uchburchak elementlarning deformatsiyasining erkinlik darajasi $0,5 < N_f/N_c < 1$ bo‘lishi kelib chiqadi. Ko‘rsatilgan holat yechimning sohani bo‘laklash sxemasiga bog‘liq bo‘lishiga olib keladi, bu ayniqsa elementlarning soni kam bo‘lganda va uskunaning ta’siri katta bo‘lganda bilinadi. Bu kamchilik mayda elementlarni tanlash va siqilmaslik shartini yumshatish bilan bartaraf qilinadi.

Matritsali belgilashlar. Oxirgi elementlar uslubining nisbatlariga matritsalar algebrasi apparati yordamida oddiy analitik shaklni berish mumkin. Matritsali belgilash dasturlarni tuzishda va EHM da hisoblashlarni bajarishda ayniqsa, qulay bo‘ladi, chunki bu holda bor-yo‘g‘i matritsalarini shakllantirish qoidasini berish zarur bo‘ladi, barcha keyingi operatsiyalar esa avtomatik tarzda bajariladi.

Dekart koordinatalar tizimining o‘qida k , tugun uchun siljishlar, m elementning tugun siljishlari va butun jismning tugun siljishlarining proyeksiyalarining vektor-ustunlarini tuzamiz:

$$\{q^\lambda\} = \begin{pmatrix} u_x^\lambda \\ u_y^\lambda \\ u_z^\lambda \end{pmatrix}; \{q\}^m = \begin{pmatrix} \{q^1\} \\ \vdots \\ \{q^s\} \end{pmatrix}; \{q\} = \begin{pmatrix} \{q^1\} \\ \vdots \\ \{q^N\} \end{pmatrix};$$

Bu yerda d^λ – har bir keyingi matritsaning tarkibiy qismlari, oldingi matritsalarining elementlar va ularning tugunlari bo‘yicha tuzilgan qiymatlar ko‘pligi bilan hosil qilingan. Xuddi shu tariqa elementlar bo‘yicha va butun jism uchun proyeksiyalarning approksimatsiyalari uchun vektor-ustunlarni yozish mumkin:

$$\{u\}^m = \begin{pmatrix} u_x^m \\ u_y^m \\ u_z^m \end{pmatrix}; \{u\} = \begin{pmatrix} \{u^1\} \\ \vdots \\ \{u\}^M \end{pmatrix};$$

So‘ngra uch o‘lchamli oqishlar uchun $(3s \times Z)$ o‘lchamli va ikki o‘lchamli oqishlar uchun $(2s \times 3)$ o‘lchamli $[N]$ elementning shaklining funksiyalarining matritsasini kiritamiz. Bu yerda s – t elementning tugunlarining soni, matritsaning koeffitsiyentlari formulalarni matritsalarini ko‘paytirishning ma‘lum qoidalari bo‘yicha olish mumkin bo‘ladigan qilib tuzilgan.

$$\{u\}^m = [N] \{q\}^m$$

Yassi uchburchak element uchun

$$\{u\}^{mT} = \{u_x^m, u_y^m\}; \quad \{q\}^{mT} = \{u_{xi}u_{xj}u_{xk}u_{yi}u_{yj}u_{yk}\},$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} & N_{15} & N_{16} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} & N_{25} & N_{26} \end{bmatrix},$$

ga ega bo‘lamiz.

Bu yerda T – indeks matritsalarni transponirlash operatsiyasini – ustunlar va qatorlarni qayta shakllantirishni bildiradi, undan berilgan holatda yozuvlarni qisqartirish maqsadida foydalaniladi. [N] matritsaning elementlari uchun konkret ifodalarni formulalarni o‘rniga qo‘yish va tugunlardagi siljishlarning bir xil proyeksiyalariga ega bo‘lgan a‘zolari guruhlashtirish bilan topish qiyin emas:

$$\begin{aligned} N_{11} &= N_{24} = \frac{1}{2W} [(x_j y_k - x_k y_j) + x(y_j - y_k) + y(x_k - x_j)] \\ N_{12} &= N_{25} = \frac{1}{2W} [(x_k y_i - x_i y_k) + x(y_k - y_i) + y(x_j - x_k)] \\ N_{13} &= N_{26} = \frac{1}{2W} [(x_i y_j - x_j y_i) + x(y_i - y_j) + y(x_j - x_i)] \\ N_{14} &= N_{15} = N_{16} = N_{21} = N_{22} = N_{23} = 0 \end{aligned}$$

t element bo‘yicha deformatsiyalarning taqsimlanishi uchun xuddi shunday matritsa tenglamalarini yozamiz

$$\{\varepsilon\}^m = [B]\{q\}^m$$

Bu yerda {e}m vektor elementning deformatsiyasining tarkibiy qismlaridan tuzilgan

$$\{\varepsilon\}^{mT} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx}\},$$

[V] matritsa uch o‘lchamli holat uchun (3s X6) o‘lchamga va ikki o‘lchamli holat uchun (2s Xz) o‘lchamga ega, elementning tugun siljishlari vektori esa formuladagi nisbatlar bilan aniqlanadi. Yassi uchburchak element uchun [V] matritsaning xususiy shakli

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & B_{26} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} B_{11} = B_{34} &= \frac{1}{2w} (y_j - y_k), & B_{12} = B_{35} &= \frac{1}{2w} (y_k - y_i), \\ B_{13} = B_{36} &= \frac{1}{2w} (y_i - y_j), & B_{24} = B_{31} &= \frac{1}{2w} (x_k - x_j), \\ B_{25} = B_{32} &= \frac{1}{2w} (x_i - x_k), & B_{26} = B_{34} &= \frac{1}{2w} (x_j - x_i), \\ B_{14} = B_{21} &= B_{15} = B_{22} = B_{16} = B_{23} = 0 \end{aligned}$$

tenglama bo'yicha topiladi.

Elementning deformatsiyalar va tugun siljishlari vektorlarining mos keluvchi qiymatlari

$$\{\varepsilon\}^{mT} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_{xy}\}; \quad \{q\}^{mT} = \{u_{xi} u_{xj} u_{xx} u_{yi} u_{yj} u_{yk}\} \text{ ga teng.}$$

Halqa uchburchak elementlar. O'q simmetriyali holat uchun siljishlar maydoni (r, z) silindrik koordinatalar tizimining o'qiga u_r , u_z proyeksiyalar bilan beriladi (4.3-rasm,a). Shu sababli elementlar doirasida siljishlarning taqsimlanishi uchun o'zgaruvchilarni $x-r$, $u-z$ almashtirish bilan formulaning nisbatlari saqlanadi. Tegishli almashtirishda formulalar deformatsiyasining tarkibiy qismlari uchun bu tenglamalar ham adolatli bo'lib qolaveradi:

$$\varepsilon_r^m = \frac{\partial u_r^m}{\partial r}; \quad \varepsilon_z^m = \frac{\partial u_z^m}{\partial z}; \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r^m}{\partial z} + \frac{\partial u_z^m}{\partial r};$$

Ular har bir element uchun doimiy bo'ladi, biroq $\varepsilon_\theta^m = u_r^m (r, z) / r$

Aylana deformatsiya element bo'ylab o'zgaruvchan bo'ladi. O'rtacha qiymat to'g'risidagi teoremaga muvofiq, elementni bo'laklash yetarlicha mayda bo'lganda uning og'irlik markazida hisoblangan, $\overline{\varepsilon_\theta^m}$ qiymatdan foydalanish mumkin:

$$\bar{\varepsilon}_\theta^m = u_r^m(r_c, z_c)/r_c,$$

Bu yerda $r_c = \frac{1}{3}(r_i + r_j + r_k)$, $z_c = \frac{1}{3}(z_i + z_j + z_k)$ og'irlik markazining koordinatalari. Elementning ichidagi deformatsiyalar uchun matritsa tenglamalari

$$\{\varepsilon\}^m = [B] \{q\}^m,$$

$$\{\varepsilon\}^{mT} = \{\varepsilon_r^m \varepsilon_z^m \varepsilon_\theta^m \gamma_{rz}^m\}; \quad \{q\}^m = \{u_{ri} u_{rj} u_{rk} u_{zi} u_{zj} u_{zk}\},$$

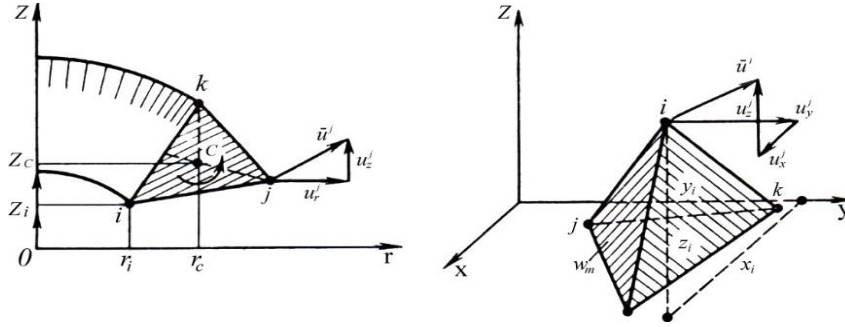
ko'rinishda qabul qiladi.

[B] – 6x4 matritsa, uning tarkibiy qismlari

$$\begin{aligned} B_{11} = B_{44} &= \frac{1}{2w} (z_j - z_k); & B_{12} B_{45} &= \frac{1}{2w} (z_k - z_i); \\ B_{13} = B_{46} &= \frac{1}{2w} (z_i - z_j); & B_{24} B_{41} &= \frac{1}{2w} (r_k - r_j); \\ B_{25} = B_{42} &= \frac{1}{2w} (r_i - r_k); & B_{26} B_{43} &= \frac{1}{2w} (r_j - r_k), \\ B_{31} &= \frac{1}{2wr_c} [(r_j z_k - r_k z_j) + r_c (z_j - z_k) + z_c (r_k - r_j)], \\ B_{32} &= \frac{1}{2wr_c} [(r_k z_i - r_i z_k) + r_c (z_k - z_i) + z_c (r_i - r_k)], \\ B_{33} &= \frac{1}{2wr_c} [(r_i z_j - r_j z_i) + r_c (z_i - z_j) + z_c (r_j - r_k)], \\ B_{14} = B_{15} = B_{16} = B_{21} = B_{23} = B_{34} = B_{35} = B_{36} &= 0, \end{aligned}$$

Bu yerda w – element kesimining maydoni.

Hajmli tetraedr element. Element doirasida siljishlarning (tezliklarning) noli x, u, z Dekart koordinatalarining chiziqli funksiyalari bilan approksimatsiyalanadi. Hajmli tetraedr elementning sxemasi 4.3-rasm, b da ko'rsatilgan.



4.3-rasm. Halqa (a) va tetraedr (b) simpleks-elementlar tuzilishlari.

$$\begin{aligned} u_x^m &= a_0^m + a_1^m x + a_2^m y + a_3^m z; \\ u_y^m &= b_0^m + b_1^m x + b_2^m y + b_3^m z; \\ u_z^m &= c_0^m + c_1^m x + c_2^m y + c_3^m z. \end{aligned}$$

Xuddi oldingi holatlardagi kabi, a_0^m, \dots, c_0^m koeffitsiyentlarni elementning tugun nuqtalarida siljish vektorlarining proyeksiyalari va mos keluvchi i, j, k, l cho‘qqilarning koordinatalari orqali ifodalash mumkin. Masalan, tugun nuqtalardagi u_x^m proyeksiyalarning qiymatlarini yozamiz (m indeks tushurib qoldirilgan):

$$\begin{aligned} u_{xi} &= a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 z_i; \\ u_{xj} &= a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + a_3 z_j; \\ u_{xk} &= a_0 + a_1 x_k + a_2 y_k + a_3 z_k; \\ u_{xl} &= a_0 + a_1 x_l + a_2 y_l + a_3 z_l; \end{aligned}$$

Formulaning yechimi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} u_{xi} & x_i y_1 & z_i \\ u_{xj} & x_j y_j & z_j \\ u_{xk} & x_k y_k & z_k \\ u_{xl} & x_l y_l & z_l \end{vmatrix}; \quad a_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & u_{xi} y_1 & z_i \\ 1 & u_{xj} y_j & z_j \\ 1 & u_{xk} y_k & z_k \\ 1 & u_{xl} y_l & z_l \end{vmatrix}; \\ a_2 &= \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & x_i u_{xi} & z_i \\ 1 & x_j u_{xj} & z_j \\ 1 & x_k u_{xk} & z_k \\ 1 & x_l u_{xl} & z_l \end{vmatrix}; \quad a_3 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & x_i y_1 & u_{xi} \\ 1 & x_j y_j & u_{xj} \\ 1 & x_k y_k & u_{xk} \\ 1 & x_l y_l & u_{xl} \end{vmatrix}; \end{aligned}$$

$$\Delta = 6V \begin{vmatrix} 1 & x_i y_1 & z_i \\ 1 & x_j y_j & z_j \\ 1 & x_k y_k & z_k \\ 1 & x_l y_l & z_l \end{vmatrix}.$$

bu yerda V – elementning hajmi, qo‘shaloq qirralar aniqlagichlarni belgilaydi. b_0, \dots, b_3 va s_0, \dots, s_3 koeffitsiyentlar uchun xuddi shunday ifodalar tezliklarning proyeksiyalarini tegishlicha almashtirish orqali formuladan topiladi.

Matritsali formula

$$\{u\}^m = [N]\{q\}^m, \text{ ko‘rinishga ega bo‘ladi,}$$

bu yerda $\{u\}^{mT} = \{u_x^m u_y^m u_z^m\}$; $[N]$ – (12×3) o‘lchamli shakl funksiyalarini matritsasi bu formula bilan

$$\{q\}^{mT} = \{u_{xi} u_{xj} u_{xk} u_{xl} u_{yi} u_{yj} u_{yk} u_{yl} u_{zi} u_{zj} u_{zk} u_{zl}\},$$

elementning deformatsiyasi esa quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^m &= \frac{\partial u_x^m}{\partial x} = a_1^m; \quad \varepsilon_y^m = \frac{\partial u_y^m}{\partial y} = b_2^m; \quad \varepsilon_z^m = \frac{\partial u_z^m}{\partial z} = c_3^m; \\ \gamma_{xy}^m &= \frac{\partial u_x^m}{\partial y} + \frac{\partial u_y^m}{\partial x} = a_2^m + b_1^m; \quad \gamma_{yz}^m = \frac{\partial u_y^m}{\partial z} + \frac{\partial u_z^m}{\partial y} = b_3^m + c_2^m; \\ \gamma_{zx}^m &= \frac{\partial u_z^m}{\partial x} + \frac{\partial u_x^m}{\partial z} = c_1^m + a_3^m. \end{aligned}$$

Formulaning tarkibiy qismlari har bir element uchun doimiy bo‘lib, ularni $\{\varepsilon\}^m = [B]\{q\}^m$, matritsa tenglamasi yordamida yozish mumkin.

Bu yerda $\{\varepsilon\}^{mT} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx}\}$, $[B]$ – 12×6 o‘lchamli matritsa, uning elementlari boshqa formuladagi qolgan approksimatsiya koeffitsiyentlari uchun bir xil bo‘lgan nisbatlardan foydalanish bilan formuladan topiladi. Oxirgi ifodalar juda kattaligi (ulkanligi) sababli keltirilmagan.

4.3. Oxirgi element usulining differensial va variatsion shakllari

Asosiy muvozanat tenglamalari. Muhitni kontinual tasvirlashda kuchlanishlar maydonlari muvozanat tenglamasi va berilgan chegara shartlarini qanoatlantirishi lozim

$$C_F \text{ da } \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad \sigma_{ij} n_j = t_i,$$

bu tenglamalar muhitning mahalliy xususiyatlarini aks ettiradi va diskret tasvirlashga o'tishda mahalliy tarzda bajarilishi lozim. Shunda X tugunda muvozanat tenglamasi ichki va tashqi kuchlarning to'liq vektorlarining tengligiga mos keladi $P_i^\lambda = T_i^\lambda$ yoki $P_i^\lambda - T_i^\lambda = 0$, $i = 1, 2, 3$. Tenglamalar barcha tugun nuqtalar uchun yoziladi va muvozanat tenglamasi va chegara shartlarining diskret analogi bo'lib hisoblanadi. Ularning shakli differensial emas, balki algebraik bo'lganligi sababli, agar formula bilan birgalikda muhitning holat tenglamalaridan foydalanilsa, bu qidirilayotgan o'zgaruvchilarni – q^k tugundagi siljishlarni aniqlash uchun oddiy hisoblash sxemasini qurish imkonini beradi.

Plastiklik nazariyasi masalalari uchun shu tariqa olingan tizim nochiziqli bo'lib hisoblanadi va chiziqli (kvazichiziqli) masalalar ketma-ketligiga keltirish yo'li bilan yechiladi. Bunda OEU ning differensial shakli uchun elastik kuchlanishda amalga oshadigan chiziqli holat o'ynaydigan rol ochiq-oydin ko'rinib turibdi.

Elastik (qayishqoq) jism. Izotrop elastik jism uchun kuchlanishlarning deformatsiyalar bilan bog'lanishi

$$\sigma_{ij} = (\lambda \delta_{ij} - 2\mu) \varepsilon_{ij}$$

ko'rinishga ega bo'ladi,

bu yerda λ , μ , – Lyame konstantalari; δ_{ij} – Kroneker simvoli.

Bu formuladan elementning ichida kuchlanishlarning taqsimlanishini topamiz.

$$\sigma_{ij}^m = (\lambda\delta_{ij} + 2\mu) \sum_{\lambda=1}^p B_{ij\gamma}^\lambda q_\gamma^\lambda$$

Element bo‘ylab taqsimlangan kuchlanishlarni elementning tugunlaridagi jamlangan kuchlar bilan almashtirish bilan quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$p_i^{\lambda m} = \sum_{\lambda=1}^p q_j^\lambda K_{ij\lambda}^{\lambda m}$$

bu yerda $K_{ij\lambda}^{\lambda m} = \int_{\omega_m} (\delta_{ij\lambda} + 2\mu) B_{ij\lambda}^\lambda B_{ij\lambda}^\lambda d\omega$ - qattqlik koeffitsiyentlari, elementning xili va approksimatsiyalaydigan funksiyaning turiga bog‘liq bo‘ladi.

Formulani muvozanat tenglamasiga o‘rniga qo‘yish algebraik tenglamalarni q_i^λ tugunlardagi ko‘chishlarning noma’lumlariga nisbatan yechadigan tizimga olib keladi:

$$\sum_{m=1}^s \left(\sum_{\lambda=1}^p q_i^\lambda K_{ij\lambda}^{\lambda m} \right) - T_i^\lambda = 0.$$

Xuddi shunday tenglamalarni siljishlar qidiriladigan kattalik bo‘lib hisoblanadigan barcha tugunlar uchun yozish mumkin. Kontinual masaladan farqli o‘laroq, tizimlarni standart sonli uslublar bilan yechish mumkin, chunki qattqlik koeffitsiyentlari mustaqil tarzda aniqlanadi.

Kuchlanishlar uchun asosiy tenglamalarni matritsa shaklida yozamiz. m elementning λ tuguniga jamlangan kuchlarning vektor-ustunlari va m elementning ichki va tashqi kuchlarining to‘liq vektorini kiritamiz:

$$\{p^{\lambda m}\} = \begin{Bmatrix} p_x^{\lambda m} \\ p_x^{\lambda m} \\ p_x^{\lambda m} \end{Bmatrix}; \{p\}^m = \begin{Bmatrix} \{p^{1m}\} \\ \vdots \\ \{p^{pm}\} \end{Bmatrix}; \{\bar{t}\}^m = \begin{Bmatrix} \{\bar{t}^{-1m}\} \\ \vdots \\ \{\bar{t}^{pm}\} \end{Bmatrix}.$$

Yoqorida keltirilgan formula tenglamalarining o‘rniga

$$\{p\}^m = \int_{\omega^m} [B]^{mT} \{\sigma\}^m d\omega; \quad \{t\}^m = \int_{C_F^m} [N]^{mT} \{\bar{t}\}^m dS$$

ga ega bo‘lamiz,

bu yerda $\{\sigma\}^m, \{t\}^m$ – elementning taqsimlangan ichki va tashqi kuchlanishlarining mos keluvchi kattaliklarning Dekart koordinatalar tizimining o‘qiga proyeksiyalaridan tuzilgan vektor-ustunlari.

λ tugunda kuchlarning to‘liq vektorlari

$$\{P\}^\lambda = \sum_{k=1}^s \{p\}^m, \quad \{T\}^\lambda = \sum_{k=1}^s \{t\}^m,$$

muvozanat tenglamalarining matritsa shakli esa

$$\{P\}^\lambda - \{T\}^\lambda = 0,$$

elementning ichida kuchlanishlarning taqsimlanishi

$$\{\sigma\}^m = [D]^e \{\varepsilon\}^m = [D]^e [B] \{q\}^m \quad \text{ga teng bo‘ladi:}$$

bu yerda

$$[D]^e = \begin{vmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{vmatrix}$$

D^e – elastiklik (qayishqoqlik) koeffitsiyentlari matritsasi.

Ichki tugun kuchlarining matritsasi $\{p\}^m = [K]^m \{q\}^m,$

bu yerda $[K]^m = \int_{\omega} [B]^T [D]^e [B] d\omega$ - elementning qattiqlik matritsasi.

$[K]^m$ dan butun tizimning to'liq qattiqlik matritsasini tuzish bilan, $\{p\}^m$ vektorlardan esa butun jism uchun $\{R\}$ ichki tugun kuchlarining to'liq vektorini tuzish bilan

$$\{P\} = [K]\{q\} \text{ deb yozish mumkin.}$$

bu yerda $[K] = \sum_{m=1}^M [K]^m$ to'liq qattiqlik matritsasi. λ ($\lambda = 1, 2, \dots, N$) esa tugunlarda muvozanat tenglamasi

$$[E_1]([K]\{q\} - \{T\}) = 0$$

bu yerda $[E_1]$ - birlik matritsa, uning tarkibiy qismlari siljishlar berilgan tugunlarda - nolga, siljishlar qidiriladigan kattalik bo'lib hisoblanadigan tugunlarda - birga teng. $[E_1]$ ga muvofiq $\{T\}$ berilgan tashqi yuklamalar uchun (q) noma'lum qiymatlarga nisbatan chiziqli tenglamalar tizimini shakllantirish va yechish bajariladi.

Ko'rib chiqilgan simpleks-elementlar uchun $[B]$ matritsaning qiymatlari elementlar doirasida doimiy bo'lib saqlanadi va shundan kelib chiqqan holda elementning

$$[K]^m = [B]^T [D]^e [B] \omega^m$$

xili tanlangan bo'lsa va sohani bo'laklash bajarilgan bo'lsa, u holda $[B]$ matritsa konkret shaklni qabul qiladi va uni har bir element uchun hisoblash mumkin bo'ladi. $[K]^m$ elementlarning qattiqlik matritsasini keyingi hisoblash formulaga muvofiq, matritsalarini ko'paytirish standart dasturi bo'yicha bajariladi. $[K]^m$ ni yig'indilash va to'liq qattiqlik matritsasini shakllantirish elementlarni birlashtirish shartiga muvofiq amalga oshiriladi.

Genki elastik-plastik jismi. Ushbu model uchun kuchlanishlar va deformatsiyalar o'rtasidagi munosabatlar

$$\sigma_{ij} = (\lambda' \delta_{ij} + 2\mu') \varepsilon_{ij}, \lambda' = \frac{1}{(3K)} + 2g(G); \mu' = g(G)$$

ko‘rinishni qabul qiladi,
 bu yerda K – hajmiy siqiluvchanlik koeffitsiyenti; $g(G)$ – mustahkamlanish funksiyasi. Formulani matritsa shaklida yozamiz:

$$\{\sigma\} = [D]^p \{\varepsilon\}$$

bu yerda $[D]^p$ – plastiklik matritsasi, $\lambda \rightarrow \lambda'$, $\mu \rightarrow \mu'$ almashtirish yo‘li bilan formuladan topiladi. Biroq $[D]^e$ matritsadan farqli o‘laroq, $[D]^p$ matritsa $[D]^p = [D(\varepsilon)]^p$ deformatsiyalarga bog‘liq bo‘ladi va ichki tugun kuchlari uchun

$$\{p\}^m = [K]^m \{q\}^m$$

ga ega bo‘ladi,

bu yerda $[K]^m = \int_{\omega^m} [B]^T [D(\varepsilon)]^p [B] d\omega$ - elementning mos keluvchi qattqlik matritsasi, u tufayli yechadigan tenglamalar tizimi o‘zining ko‘rinishini saqlaydi. $[K]$ - $\{\varepsilon\}$ ga, ya’ni yuqorida keltirilgan formulaga muvofiq $\{q\}$ ga bog‘liq bo‘lishi sababli, hosil bo‘ladigan tenglamalar tizimi nochiziqli bo‘lib hisoblanadi. Uni yechish uchun yuklamani oshirish uslubidan foydalaniladi, shunda boshlang‘ich qayishqoq holatdan boshlab bir qator bosqichlarda $[D]^p$ qiymatlar ketma-ket hisoblanadi, yoki kesuvchi modullar uslubidan foydalaniladi, bunda $[D]^p$ matritsa $[D]^p = [D]^e$ qiymatdan boshlab berilgan bosqich uchun iteratsion tarzda aniqlashtiriladi.

Prandtl–Reyss elastik-plastik jismi. Bu model pastki formuladagi

$$d\sigma_{ij} = 2G \left(d\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \delta_j d\varepsilon_{ij} - \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{ij} d\varepsilon_{kl}}{S} \right),$$

munosabatlar bilan bog‘langan kuchlanishlar va deformatsiyalarning ortishlari bilan operatsiyalar bajaradi:

bu yerda ushbu tenglamani $S = \frac{2}{3} \bar{\sigma}^2 \left(1 + \frac{H'}{3G} \right)$

matritsa shaklida yozish mumkin.

$$\{d\sigma\} = [D]^p \{d\varepsilon\}$$

$[D]^p$ plastiklik matritsasi uchun aniq ifoda formulada keltirilgan. Uning tarkibiy qismlari kuchlangan holat bilan aniqlanadi, ya'ni

$$[D]^p = [D(\varepsilon)]^p$$

Bundan, elementning ikki tugun kuchlarning ortishi

$$\{dp\}^m = [K]^m \{dq\}^m$$

Bu yerda $[K]^m = \int_{\omega^m} [B]^T [D(\sigma)]^p [B] d\omega$ - elementning qattqlik matritsasi.

Yechadigan tenglamalar tizimi noxiziqli bo'lib chiqadi:

$$[E_1] = ([K(\sigma)]\{dq\} - \{dT\}) = 0.$$

Matritsa tenglamasi $\{\sigma\}$ joriy qiymatni o'z ichiga oladi va uni bevosita yuklanishning qandaydir bir momenti uchun $\{dq\}$ siljishlarning ortishiga nisbatan yechib bo'lmaydi. Bu holda boshlang'ich holatdan boshlab butun yuklanish tarixini ko'rib chiqish va elementlarning qayishqoq holatdan plastik holatga o'tishini ketma-ket kuzatib borish zarur bo'ladi. $[K(\sigma)]$ matritsa har bir i bosqichda avval oldingi bosqich bo'yicha ($i-1$) aniqlanadi va so'ngra yechish jarayonida aniqlashtiriladi, tenglama esa $\{dq^j\}$ siljishlarning ortishiga nisbatan yechiladi.

“Fizikaviy” noxiziqlikni ko'rib chiqilgan holatlaridan tashqari “teometrik” noxiziqlik ham bo'lishi mumkin, bunda deformatsiyalar oxirgi bo'ladi va aylanish effektini hisobga olish zarur bo'ladi.

OEU ning variatsion shakli. Yaxlit muhitlar mexanikasida differentsial shakldan tashqari masalalarni yechishni ma'lum bir funktsionallarning statsionar qiymatlarini qidirishga keltirish imkonini beradigan muqobil yondashuv keng tarqalishga ega bo'lgan. Bu muqobil shakl deformatsiyalanadigan jismning integral xususiyatlaridan foydalanadi va mexanikaning variatsion tamoyillariga asoslanadi. OEU muhitni diskretlash usuli bo'lib hisoblanishi sababli, tabiiyki u variatsion qo'yilish holatiga ham tarqaladi.

Variatsion teoremlarning ko'pchiligi ichki va tashqi kuchlarning ishining (quvvatining) tengligi umumiy tenglamasidan foydalanishga asoslanadi:

$$F = \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV - \int_{C_F} t_i u_i dS.$$

Integrallarga kiruvchi har bir a'zoni elementlar va ularning chegaralari bo'yicha mos keluvchi kattaliklarning yig'indisiga ajratish mumkin:

$$\int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \simeq \sum_{m=1}^M \int_{\omega^m} \sigma_{ij}^m \varepsilon_{ij}^m d\omega. \int_{C_F} t_i u_i dS \simeq \sum_{m=1}^M \int_{C_F^m \in C_F} t_i^m u_i^m dS.$$

Formulada t indeksli kattaliklar elementlar bo'yicha taqsimlangan kuchlanishlar, deformatsiyalar va siljishlar bo'lib, shuningdek, S_f berilgan tashqi yuklamalarga ega bo'lgan jismning chegaralariga tegishli bo'lgan C_F^m elementlarning chegaralaridagi t_i yuza kuchlanishlari bo'lib hisoblanadi. Masalaning kinematik qo'yilishida bu kattaliklar holat munosabatlari va tenglamalari yordamida siljishlarning (tezliklarning) tugun qiymatlari orqali ifodalanishi lozim.

Keyingi yechish mos keluvchi funktsionalga statsionar qiymatni ma'lum qiladigan tugun qiymatlarni qidirishdan tashkil topadi.

Shu bilan birgalikda taqsimlangan kattaliklardan yuqorida ko'rsatilgan formulalar bo'yicha tugun o'zgaruvchilariga o'tish mumkin va quyidagini yozish mumkin:

$$\int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \simeq \sum_{\lambda=1}^N p_i^\lambda q_i^\lambda; \int_{C_F} t_i u_i dS \simeq \sum_{\lambda=1}^N T_i^\lambda q^\lambda$$

Formulada statsionarlik sharti

$$\frac{\partial}{\partial q_i^\lambda} = 0, \lambda = 1, 2, \dots, N.$$

bo‘lishini ko‘rsatish mumkin.

Bu bevosita OEU ning differentsial shakli ular bilan bog‘lanadigan muvozanat tenglamalariga olib keladi, biroq energetik nuqtai-nazardan ikkala yondashuv ham ekvivalentdir. Hisoblash nuqtai-nazardan differentsial shakl ma‘lum bir afzalliklarga ega, chunki algebraik tenglamalarni yechishning sonli uslublari odatda funksionallarni minimallashtirish uslublari qaraganda samaraliroq.

Biroq o‘zgaruvchilarning soni oshganda va matritsalarni shakllantirish hamda tizimlarni yechish vaqti, ayniqsa, nohiziq tizimlarni yechish vaqti katta xotira hajmi va katta hisoblash tezligiga ega bo‘lgan EHM dan foydalanish zaruratini chaqirish bilan oshganda bu afzalliklar arziyasiz bo‘lib qoladi.

O‘z navbatida, variatsion uslublarning “energiya” bo‘yicha yaqinlashuvchanligi umuman olganda bir tekis emas, bu mahalliy parametrlarni baholashni qiyinlashtiradi. Bundan tashqari, plastik oqishlarni tadqiq qilishda holatning tezliklarning uzilishi, qattiq sohalarning uzilishi, maxsus nuqtalarning uzilishi va hokazolar kabi muhim xususiyatlarini hisobga olish imkoniyati printsiptial ahamiyat kasb etadi.

4.4. Plastiklikning energetik shartini geometrik ma‘nosi

Ma‘lumki, plastiklikning energetik shartini geometrik ma‘nosi turli tenglamalar va formulalar bo‘yicha aniqlanadi. Aytaylik, agar (4.23) tenglamada aks ettirilgan σ_1 , σ_2 va σ_3 kuchlanishlarga joriy koordinatalar sifatida qaralsa, u holda (4.23) tenglama o‘zida uzunlik

bo'yicha chegaralanmagan dumaloq silindrning yuzasini taqdim qiladi, bu silindrning o'qi koordinatalar boshidan o'tadi va koordinata o'qlariga nisbatan bir xil egilgan bo'ladi, ya'ni o'qlarning har biri bilan kosinusi $1/3$ ga teng bo'lgan burchak hosil qiladi.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (4.23)$$

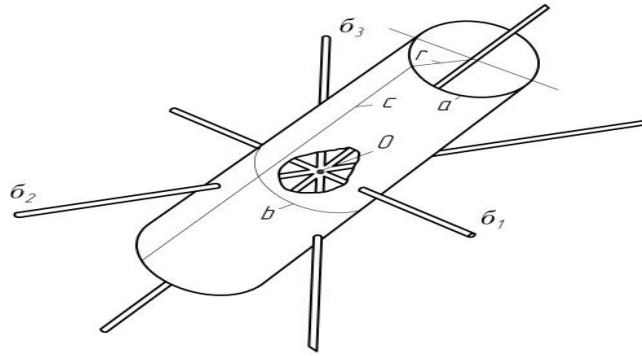
Agar jismning elementidagi bosh normal kuchlanishlar silindrning yuzasida yotadigan qandaydir bir nuqtani belgilaydigan bo'lsa, u holda bu element plastik holatda bo'ladi.

Shunday qilib, (4.23) ga muvofiq yuza plastiklikning energetik sharti bo'yicha «*plastik deformatsiyalashning eng chekka yuzasi*» bo'lib hisoblanadi. 4.4-rasmda ushbu silindr yaqqol tasvirlangan.

Agar jismning elementidagi bosh normal kuchlanishlar silindrning ichida yotadigan nuqtani belgilaydigan bo'lsa, u holda berilgan σ_s da nuqta qayishqoq kuchlangan holatda bo'ladi. Silindrning yuzasida bo'lmagan nuqtalarni belgilaydigan kuchlanishlarning kombinatsiyalari esa fizikaviy ma'noga ega bo'lmaydi.

Bosh normal kuchlanishlarning (4.23) tenglamani qanoatlantiradigan kattaliklarining cheklanmagan sonli kombinatsiyalari mavjud bo'lishi o'z-o'zidan tushunarli albatta, chunki silindr yuzasida nuqtalarning soni cheksiz ko'p. Demak, silindrning yuzasidagi aylanalar (4.4-rasmga qarang), masalan, silindrning uning o'qiga normal bo'lgan tekisliklar bilan kesish bilan olingan a lar o'zida nuqtalarning eng chekka kuchlangan holatni belgilaydigan geometrik joyini taqdim qiladi, bu nuqtalar uchun bosh normal kuchlanishlarning yig'indisi doimiy bo'ladi, ya'ni kuchlangan holatlar bir xil shar tenzoriga (gidrostatik bosimga) ega bo'ladi.

Xususan, silindrni 0 koordinatalar boshi orqali o'tuvchi tekislik bilan kesish bilan hosil qilingan aylana uchun bu yig'indi nolga teng bo'ladi (ya'ni deformatsiya sof deviatorli bo'ladi). Silindrni hosil qiluvchilar, masalan, s ular uchun uchta bosh kuchlanishlarning farqi doimiy bo'lgan nuqtalarning geometrik joylari bo'lib hisoblanadi, ya'ni bir xil deviatorli kuchlangan holatlarni belgilaydi (4.4-rasmga qarang).



4.4-rasm. Silindrning umumiy va yuza holati.

Bunday silindrlar uchun (4.23) yuzaning $\sigma_3 = 0$ koordinata tekisligi bilan kesilgan kesimini olamiz; shunda $\sigma_3 = 0$ ni (4.23) tenglamada taqdim qilish bilan (4.24) tenglamani olamiz:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2 = 2\sigma_s^2$$

yoki

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_s^2 \quad (4.24)$$

Boshqa ikkita $\sigma_2 = 0$ va $\sigma_1 = 0$ koordinata tekisliklari bilan kesilgan asosiy kesimlar mos ravishda qo‘yadigan bo‘ladi:

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3 = \sigma_s^2 \quad (4.24,a)$$

yoki

$$\sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_2\sigma_3 = \sigma_s^2 \quad (4.24,b)$$

Keltirilgan (4.24) tenglamalar markazi koordinatalar boshida bo‘lgan va koordinata o‘qlariga nisbatan 45° ga egilgan o‘qlarga ega bo‘lgan mutlaqo bir xil ellipslarni belgilaydi. Shunday qilib, barcha bu ma’lumotlar plastiklikning energetik shartini belgilaydi.

4.5. Asosiy geometrik tadqiqot qilish uslublari

Eksperimental-analitik tadqiqotlarda tajriba ma'lumotlari deformatsiyalanadigan jismning zarrachalarini ko'chish maydonlarini tasvirlaydigan analitik bog'lanishlar bilan approksimatsiyalanadi. So'ngra kuchlanishlar va deformatsiyalar yoki deformatsiya tezliklari o'rtasidagi bog'lanish tenglamalaridan foydalanish bilan deformatsiyalar yoki ularning tezliklari hisoblanadi, kuchlangan holat, uskunaga tushadigan yuklama va hokazolar aniqlanadi. Tadqiq qilish uslublarning bir qismi deformatsiyalangan holatni tadqiq qilmasdan turib deformatsiyaning kuch shartlarini va kontakt kuchlanishlarining taqsimlanishini baholash imkonini beradi.

Mazkur guruhga quyidagi uslublari kiradi: koordinatalar to'ri uslubi, materiallarning plastik deformatsiyaga qarshiligi uslubi (MPDQU), vizioplastiklik uslubi, muar uslubi, elektrogidrodinamik analogiya uslubi (EGDA) va qatlamli modellar uslubi. Endi ulardan ba'zilarini ko'rib chiqamiz.

Koordinatalar to'ri uslubi. Uslub to'rning og'ishgan deformatsiyasini o'rganishga asoslangan va deformatsion plastiklik nazariyasi yoki plastik oqish nazariyasining munosabatlariga tayanadi. Uni ko'rib chiqishda deformatsiyalanadigan materialning izotropligi va to'rning katagi doirasida deformatsiyaning bir kelib chiqishliligi to'g'risidagi gipoteza kiritiladi, deformatsiyalangan holatning hisoblangan tarkibiy qismlari esa o'rtacha deb hisoblanadi va katakning markaziga kiritiladi. To'r yoki ramkalar tizimi o'q simmetrik tayyorlanmaning meridional kesimiga yoki asimmetrik tayyorlanmaning cho'zuvchi kuchlanishlar bo'lmagan yoki hisobga olmasa bo'ladigan darajada kichik bo'lgan tekisligiga kiritiladi. Mazkur uslubdan foydalanishda odatda vintlar, shtiftlar, simlar, panjaralar va boshqalarning kenglikdagi tizimlari ham ko'rib chiqiladi.

Oltita shtiftga va ichida sezuvchan elementga ega bo'lgan ichi bo'sh sharsimon elementlar ko'rinishidagi datchiklar olimlar tomonidan o'rganib chiqilgan. Koordinata to'rining kataklari odatda aylanalalar, to'g'ri to'rtburchaklar yoki kvadratlar shakliga ega bo'ladi. Ular ko'pincha tipografik usul yoki tirnash bilan chiziladi.

Shuningdek, to'rti kovlash, changlash, bosish, eritish bilan, 3 mm diametrli mis naychalar to'rtlamidan tashkil topgan elektrod yordamida elektroerozion usul bilan hosil qilish usullari ma'lum.

Deformatsiyalar o'zgarishining katta gradiyentlari - bir tomondan, yuqori aniqlikdagi kichraytirilgan to'rti qurishning murakkabligi - boshqa tomondan to'rtining o'lchamlarini chegaralab qo'yadi. Boshlang'ich to'rti tipografik usul bilan olishning qanoatlanarli aniqligiga katakning o'lchami 1 mm bo'lganda, tirnash usulida esa - chiziqning 1,5...2 mkm qalinligida 0,2 mm bo'lganda erishiladi.

Qaynoq deformatsiyalash jarayonlarida deformatsiyalangan to'rti ajratishning qiyinligi tufayli kataklarining o'lchami 2...4 mm bo'lgan to'rtidan foydalaniladi.

To'rtga chiziqlar va o'lchamlarni kiritish uchun olmos indentor va mikroqattqlikni o'lchaydigan PMT-3 pribori va optik tizimli UIM-21 metallografik mikroskoplar qo'llaniladi.

Izotrop jism uchun Genkning deformatsion nazariyasi kuchlanishlar va deformatsiyalarning bosh o'qlarining ellipsoidning yonida mos tushishini ko'zda tutadi, bu ellipsoidda boshlang'ich sfera qayta shakllantiriladi. Bunda deformatsiyaning shiddatini jismning fizikaviy holati va jismning shaklini plastik o'zgartirish uchun sarflanadigan ish belgilaydi. Deformatsion nazariyaning munosabatlari oddiy yuklash va faol deformatsiya sharoitlarida amalga oshadigan kichik qayishqoqplastik deformatsiyalar uchun qat'iy adolatli bo'ladi. Agar materialning bir juft nuqtalari o'rtasida masofaning ortishini 10 boshlang'ich masofaga yoki 1 deformatsiyadan keyingi masofaga kiritishning farqi bo'lmasa, deformatsiya kichik deformatsiya deb hisoblanadi:

$$\frac{l-l_0}{l_0} \cong \frac{l-l_0}{l} < \frac{(l-l_0)^2}{l_0^2} \quad (4.25)$$

«Kichik deformatsiya» tushunchasi uning o'lchami bilan emas, hisoblashlarning (4.25) tengsizlikning o'ng qismi bilan beriladigan zaruriy aniqligi bilan belgilanadi. Agar barcha tashqi kuchlar qandaydir bir parametrga proporsional tarzda oshsa, yuklanish oddiy

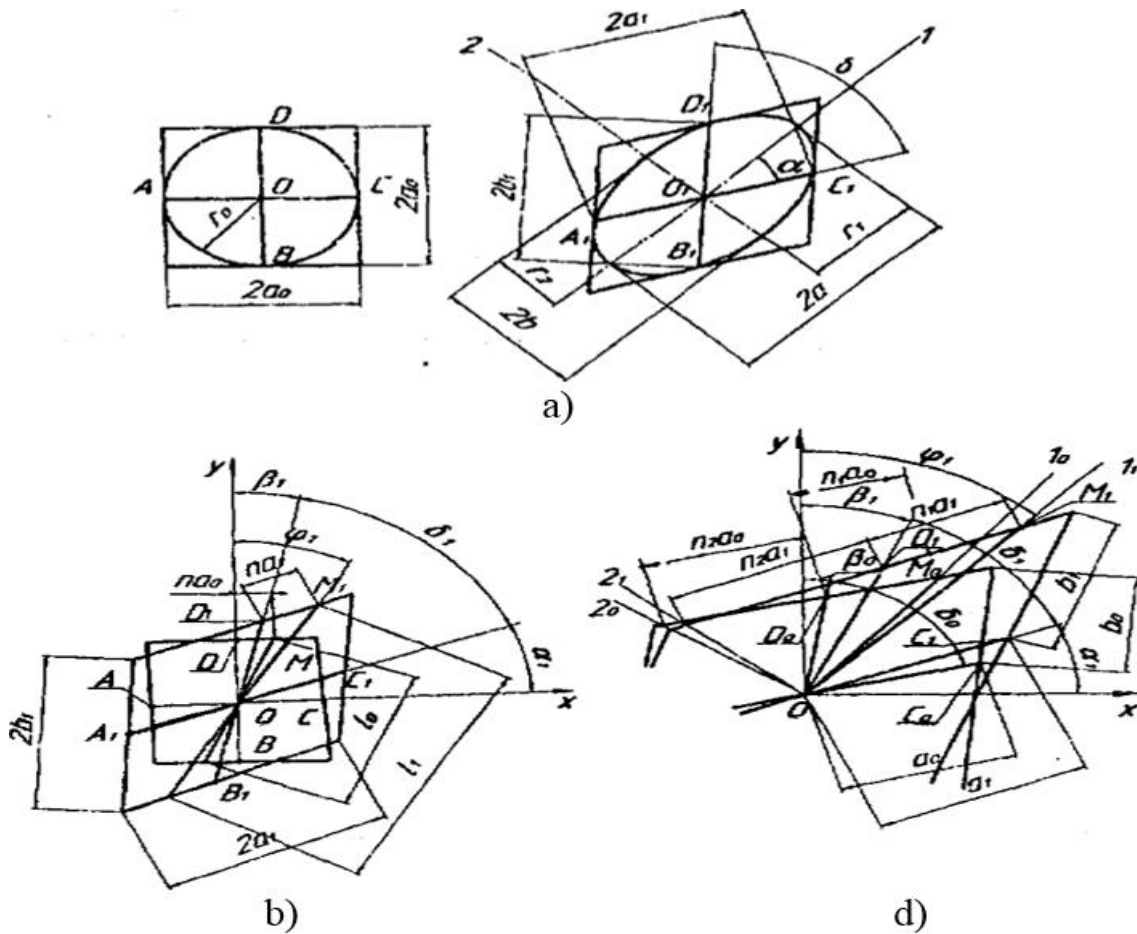
yuklanish deb hisoblanadi. u chiziqli kuchlangan holatda vujudga keladi.

Agar jarayonda kuchlanishlar va deformatsiyalarning shiddatlarining qiymatlari doimo oshib borsa, jarayon faol jarayon deb hisoblanadi. Oddiy yuklanish sharti har doim ham bajarilavermasligi sababli kamroq qat'iy bo'lgan deformatsiyaning monoton tarzda kechishi shartidan foydalaniladi. Bu shartga rioya qilinganda kichik qayishqoqplastik deformatsiyalarning munosabatlaridan bosqichma-bosqich tadqiq qilish uslubi va oxirgi deformatsiyalar uslubida foydalanish mumkin. Oxirgi holatda koordinata to'ring boshlang'ich va oxirgi shakllari va o'lchamlarini taqqoslashda hajmiy deformatsiya hisobga olinmaydi, chunki rivojlangan plastik deformatsiyada siqilmaslik sharti qabul qilingan. Har ikkala uslubda deformatsiyalar Koshi kichik deformatsiyalarining tarkibiy qismlarida (e deb belgilangan) va Genki deformatsiyalarining tarkibiy qismlarida ($e = 1/(1 + e)$ deb belgilangan) aniqlanadi. Deformatsiya tenzorining tarkibiy qismlarining logarifmik ko'rinishi additivlik xususiyatiga ega va oxirgi deformatsiyalarni hisoblashda yuqori tartibli cheksiz kichik kattaliklarni tushirib qoldirish imkonini beradi. Oqish nazariyasining munosabatlaridan foydalanilganda ko'rsatilgan chegaralashlar bo'lmaydi.

Murakkab yuklanish bo'yicha tajribalarni umumlashtirish bilan shu narsa aniqlanganki, plastik deformatsiyada kuchlanishlar tenzorining deviatori deformatsiya tezliklari tenzorining deviatoriga proporsional bo'ladi, bosh normal kuchlanishlarning va bosh cho'zilish tezliklarining yo'nalishlari esa mos tushadi.

Oxirgi deformatsiyalar uslubidan, masalan, avtomobil zavodlarida murakkab shaklli detallarni cho'zish jarayonlarini tadqiq qilish uchun foydalaniladi. List tayyorlanmaning qalinligi yo'nalishidagi σ_3 kuchlanish hisobga olinmaydi, kuchlangan holat yassi deb hisoblanadi. Shtamplashdan oldin yassi tayyorlanmaga tayyorlanmaning tadqiq qilinadigan uchastkasining shakli yoki yuzasining maydoniga bog'liq ravishda boshlang'ich kvadratga kiritilgan 5...20 mm diametrli aylanalar ko'rinishida koordinatalar to'ri chiziladi.

Siljish hamrohlik qiladigan bir xil deformatsiyadan keyin aylana – ellipsga, kvadrat esa – parallelogrammga aylanadi. To‘rning o‘zgarishi ellips va parallelogrammning A, B, C, D tegish nuqtalarining koordinatalari bo‘yicha baholanadi. Koordinata to‘riga E. Zibel uslubi bo‘yicha ishlov berishda $2a_1$, $2b_1$ tutashgan diametrlar va ularning o‘rtasidagi δ burchak qayd qilinadi (4.5-rasm).



4.5-rasm. Zibel (a), Pashkov (b) va Renne (d) bo‘yicha koordinata to‘rining boshlang‘ich katagining qiyshayish grafiklarining tuzilishlari.

Ellipslarning bosh o‘qlari va bosh eng katta deformatsiyaning yo‘nalishi, ya’ni katta tutashgan diametr va ellipsning katta bosh o‘qi o‘rtasidagi burchak formulalar bo‘yicha aniqlanadi.

$$2a = 2 \sqrt{0.5(a_1^2 + b_1^2) + 0.5 \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}} ;$$

$$2b = 2 \sqrt{0.5(a_1^2 + b_1^2) - 0.5 \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0.5(1 - b^2/a^2) \operatorname{tg} \delta - 0.5 \sqrt{(1 - b^2/a^2) \operatorname{tg}^2 \delta - 4b^2/a^2},$$

Silliq yuzaga to‘r kiritilganda bosh deformatsiyalar

$$e_1 = \ln \frac{2a}{2a_0} = 0.5 \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2};$$

$$e_2 = \ln \frac{2b}{2a_0} = 0.5 \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2};$$

ga teng bo‘ladi.

O.P.Pashkov qo‘shimcha ravishda to‘rning katagining markazi α_1 i β_1 burchaklarga ega bo‘lgan katakning o‘rtasida bo‘lgan Oxus qo‘zg‘almas koordinatalar o‘qiga nisbatan burilishini qayd qilishni, deformatsiyaning bosh o‘qlarining yo‘nalishini esa $n_0 = \operatorname{tg} \varphi_0$ parametr bo‘yicha aniqlashni taklif qilgan, deformatsiyaning bir kelib chiqishliligi sharti tufayli bu parametrning qiymati doimiy bo‘lib hisoblanadi. n_0 dan foydalanish bilan l_0 gacha cho‘zilish deformatsiyasi va katakning o‘rtasini kesib o‘tadigan hamda uning qarama-qarshi tomonlarini bog‘laydigan boshlang‘ich yo‘nalishga (φ_0 burchakka) ega bo‘lgan qandaydir bir l_0 kesmaning yo‘nalishi (φ_1 burchagi) aniqlanadi. Koordinata to‘riga har ikkala ishlov berish uslubida boshlang‘ich katak kvadrat deb hisoblanadi, ularning har ikkalasi oxirgi deformatsiyalarni o‘rganish uchun moslashtirilgan va hisoblashlarda e_1 va e_2 bir xil natijalarni beradi.

I.P.Renne ma‘lum uslublarni barlashtirgan va boshlang‘ich katak uchun qo‘zg‘almas koordinatalar tizimiga nisbatan qotirilgan

burchaklarga ega bo'lgan parallelogramm ko'rinishidagi bog'lanishlarni taklif qilgan (xuddi Pishkov qilgani kabi). Umumlashirilgan uslub plastik deformatsiyani bosqichma-bosqich o'rganishda maqsadga muvofiq bo'ladi.

Bosh deformatsiyalar quyidagi formulalar bo'yicha topiladi («O» va «1» indekslar deformatsiyalash bosqichining boshi va oxiriga tegishli):

$$e_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{b_1^2 + n_1^2 a_1^2 + 2n_1 a_1 b_1 \cos \delta_1}{b_0^2 + n_1^2 a_0^2 + 2n_1 a_0 b_0 \cos \delta_0}; \quad e_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{b_1^2 + n_2^2 a_1^2 + 2n_2 a_1 b_1 \cos \delta_1}{b_0^2 + n_2^2 a_0^2 + 2n_2 a_0 b_0 \cos \delta_0};$$

Bu yerda $n_{1,2} = (B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}) / 2A$; $A = a_0 b_0 a_1^2 \cos \delta_0 - a_1 b_1 a_0^2 \cos \delta_1$;

$$B = a_0^2 b_1^2 - a_1^2 b_0^2; \quad C = a_0 b_0 b_1^2 \cos \delta_0 - a_1 b_1 b_0^2 \cos \delta_1;$$

bosh o'qlarining yo'nalishlari

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{b_0 \sin \beta_0 + n_{1,2} a_0 \cos \alpha_0}{b_0 \cos \beta_0 + n_{1,2} a_0 \sin \alpha_0}; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 \\ &= \frac{b_1 \sin \beta_1 + n_{1,2} a_1 \cos \alpha_1}{b_1 \cos \beta_1 + n_{1,2} a_1 \sin \alpha_1} \end{aligned}$$

formulalar bo'yicha aniqlanadi.

Shaklni o'zgartirish jarayoni monoton tarzda kechganda, bunda deformatsiyaning bosh o'qlari butun jarayon davomida jismning xuddi o'sha material tolalari bilan mos tushadi, n_1 va p_2 qiymatlar o'zgarmas bo'lib qolishi lozim.

Deformatsiyaning shiddati

$$e_i = 1.15 \sqrt{e_1^2 + e_1 e_2 + e_2^2} \quad (4.26)$$

ga teng.

A.D.Tomlenov $e_{i_{\text{kp}}}$ deformatsiyaning kritik shiddati – listli metallning shaklini o'zgartirish jarayonlarida amalga oshadigan deformatsiyaning barqaror shiddatining eng katta qiymati tushunchasini kiritgan:

$$e_{i_{kr}} = \frac{2n\sqrt{1-m+m^2}}{(2-m)} \quad (4.27)$$

Bu yerda n – materialning mustahkamlanish ko‘rsatkichi, bir o‘qli cho‘zish sinovlarining natijalari bo‘yicha aniqlanadi; m – kuchlangan holat sxemasining ko‘rsatkichi

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2e_2 + e_1}{2e_1 + e_2}$$

σ_1, σ_2 – maksimal va minimal bosh kuchlanishlar.

Bir o‘qli cho‘zishda $\sigma_i = \sigma_x$ (σ_x – oquvchanlik kuchlanishi); $\sigma_2 = 0$;
 $m = 0$; $e_{i_{kp}} = p$

bo‘ladi. Ikki o‘qli cho‘zishda $\sigma_1 = \sigma_2$; $m = 1$; $e_{i_{kp}} = 2p$ bo‘ladi. Shunday qilib, ikki o‘qli cho‘zishda bir o‘qli cho‘zishga qaraganda ikki marta katta deformatsiya shiddatiga erishish mumkin.

(4.27) bog‘lanish matritsa o‘yig‘ining konturiga tutashuvchi uchastkalardan tashqari tayyorlanmaning butun yuzasi uchun adolatli. Bu uchastkalar uchun $e_{i_{kp}}$ quyidagi formula bo‘yicha hisoblanadi:

$$e_{i_{kp}} = 2n\sqrt{1-m+m^2} / (1+m)$$

e va e_2 bosh deformatsiyalar, e_m deformatsiyaning shiddati, t kuchlangan holat ko‘rsatkichi hisoblangandan keyin va berilgan material uchun ma‘lum bo‘lgan n mustahkamlanish ko‘rsatkichi bo‘yicha $e_{i_{kp}}$ deformatsiyaning shiddati aniqlangandan keyin metallning plastiklik resursidan foydalanish koeffitsiyenti topiladi:

$$\Omega = \frac{e_i}{e_{i_{kp}}}$$

Agar $\psi > 1$ bo‘lsa, u holda metallning uzilish ehtimoli mavjud bo‘ladi. Kataklarining radiusi r_0 bo‘lgan koordinata to‘ri yordamida

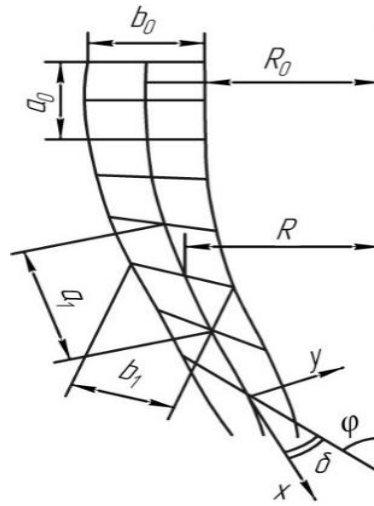
o‘q simmetrik plastik oqishni tadqiq qilishda (4.5-rasmga qarang) deformatsiya tenzori va bosh deformatsiyalarning tarkibiy qismlari quyidagi bog‘lanishlar bo‘yicha aniqlanadi:

$$e_{\varphi} = \ln(R/R_0); \quad e_z = 0.5 \left[e_{\varphi} + \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cos 2\varphi \right]; \quad e_p = \\ 0.5 \left[e_{\varphi} - \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cos 2\varphi \right] \\ \gamma_{\rho z} = \ln(r_1/r_2) \sin 2\varphi; \quad e_1 = \ln(r_1/r_0); \quad e_2 = \ln(r_2/r_0),$$

Bu yerda e_{φ} , e_z , e_p , $\gamma_{\rho z}$, e_1 , e_2 - mos ravishda meridional kesimdagi aylana, o‘q, radial, siljish va bosh deformatsiyalar; R_0 va R – deformatsiyaning boshi va oxirida simmetriya o‘qidan ko‘rib chiqilayotgan nuqtagacha bo‘lgan masofa; r_1 va r_2 – boshlang‘ich aylana unga aylangan ellipsning yarim o‘qlari; φ – r_1 ellipsning katta yarim o‘qining yo‘nalishi va namunaning e_1 bosh deformatsiyaning yo‘nalishini belgilaydigan o‘qi o‘rtasidagi burchak.

Oqish nazariyasining munosabatlaridan foydalanilganda to‘rning katagining shakli va o‘lchamlarining o‘zgarishiga vaqt parametrlarining yoki jarayonning geometriyasining uzluksiz funksiyalari sifatida qaraladi. Koordinata to‘ri meridional tekislikka uning bo‘ylama chiziqlari metallning oqish yo‘nalishi bilan mos tushadigan qilib va statsionar oqish jarayonida oqish chizig‘ini imitatsiyalaydigan qilib joylashtiriladi. To‘rning kataklarining markazlari bilan bog‘langan markazga ega bo‘lgan qo‘shimcha ko‘chma Oxu kordinatalar tizimi kiritiladi, uning o‘qlaridan biri oqish chizig‘iga urinma bo‘yicha yo‘naltiriladi. O‘q simmetrik masalada har bir katakda bitta chiziq va uchta burchak o‘lchamlari o‘tkaziladi. Ular oqish chizig‘i bo‘ylab deformatsiyalangan katakning o‘lchamlarini va (a, b) ko‘ndalang chiziqlarning yo‘nalishini, ular o‘rtasidagi (δ) burchak va simmetriya o‘qidan (R) katakning markazigacha bo‘lgan masofani o‘z ichiga oladi (4.6-rasm). Deformatsiya tezliklarining tarkibiy qismlari Oxu koordinatalarda eksperimental yo‘l bilan olingan ma’lumotlar massivlari bo‘yicha vaqtning funksiyalari sifatida topiladi: $a(t)$, $b(t)$, $R(t)$, $\delta(t)$. Ular quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\dot{\epsilon}_{\varphi} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t}; \quad \dot{\epsilon}_x = \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial t}; \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{1}{b} \frac{\partial b}{\partial t} - \operatorname{ctg} \delta \frac{\partial \delta}{\partial t}; \quad \gamma_{xy} = \left(\frac{1}{b} \frac{\partial b}{\partial t} - \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial t} \right) \operatorname{ctg} \delta - \frac{\partial \delta}{\partial t}$$



4.6-rasm. O‘q simmetrik oqishda bo‘luvchi to‘rning to‘g‘ri to‘rtburchak katagi shaklini o‘zgarishning sxematik grafiki.

Bosh o‘qlarning yo‘nalishlari va bosh deformatsiya tezliklarining qiymatlari

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} 2\alpha &= \dot{\gamma}_{xy} / (\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y); \quad \dot{\epsilon}_{1,2} \\ &= \left[\left(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y \pm \sqrt{(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + \dot{\gamma}_{xy}^2} \right) \right] / 2, \end{aligned}$$

formulalar bo‘yicha aniqlanadi.

Bu yerda α burchak Ox o‘qning musbat yo‘nilashidan boshlab hisoblanadi.

Deformatsiya tezliklarining shiddati va deformatsiya darajasi quyidagi formulalar bo‘yicha aniqlanadi:

$$\dot{\epsilon}_i = 1.15 \sqrt{\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_2^2}; \quad e_i = \int_0^i \dot{\epsilon}_i dt \quad (4.28)$$

$\dot{\varepsilon}_z$ va $\dot{\varepsilon}_p$ qiymatlarini hisoblash uchun Opz ko'chma tizimda u bilan Oxy: shartli qo'zg'almas tizim o'rtasiga φ burchak kiritiladi:

$$\begin{aligned} 2\dot{\varepsilon}_\rho &= (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y) - (\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y) \cos 2\varphi - \dot{\gamma}_{\rho z} \sin 2\varphi; \\ 2\dot{\varepsilon}_z &= (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y) - (\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y) \cos 2\varphi - \dot{\gamma}_{\rho z} \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Yassi deformatsiyada a va b chiziqlar oilasi bo'ylab koordinata to'riining tugun nuqtalari o'rtasidagi masofa eksperimentdan aniqlanadi. Bu holda hisoblash formulalari quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\dot{\varepsilon}_x = -\dot{\varepsilon}_y = \frac{\partial}{\partial t} \left(\ln \frac{a}{a_0} \right) = \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial t}; \quad \dot{\gamma}_{xy} = \left[\frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial t} (2 - A) + \frac{1}{b} \frac{\partial b}{\partial t} A \right] \frac{1}{\sqrt{A-1}},$$

bu yerda $A = \left(\frac{ab}{a_0 b_0} \right)^2$ bo'ladi.

Kichik elastik-plastik deformatsiyalar uchun deformatsion nazariya qo'llanilganda deformatsiyalangan holatning deformatsiyasi aniqlangandan keyin kuchlangan holatning parametrlaridagi

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_{sr} &= \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_x - \varepsilon_{sr}); & \tau_{xy} &= \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \gamma_{xy}; \\ \sigma_y - \sigma_{sr} &= \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_y - \varepsilon_{sr}); & \tau_{zy} &= \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \gamma_{zy}; \\ \sigma_z - \sigma_{sr} &= \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_{sr}); & \tau_{zx} &= \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \gamma_{zx}, \end{aligned} \quad (4.29)$$

ifodalar bo'yicha aniqlanadi.

bu yerda $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ - kuchlanishlar tenzorining tarkibiy qismlari.

$$\sigma_{sr} = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3;$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)};$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)};$$
(4.30)

bu yerda σ_i, ε_i – kuchlanishlar va deformatsiyaning shiddatlari;
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ - kichik elastikplastik deformatsiyalar
 tenzorining tarkibiy qismlari; ε_{cp} - hajmli elastikplastik deformatsiya

$$\varepsilon_{sr} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3} \quad (4.31)$$

Oddiy yuklanishda oxirgi deformatsiya uchun deformatsion nazariyaning munosabatlari quyida keltirilgan.

Har qanday deformatsiyalar uchun oqish nazariyasining munosabatlari quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_{sr} &= \frac{2\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \dot{\varepsilon}_x; & \tau_{xy} &= \frac{\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \dot{\gamma}_{xy}; \\ \sigma_y - \sigma_{sr} &= \frac{2\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \dot{\varepsilon}_y; & \tau_{yz} &= \frac{\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \dot{\gamma}_{yz}; \\ \sigma_z - \sigma_{sr} &= \frac{2\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \dot{\varepsilon}_z; & \tau_{zx} &= \frac{\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \dot{\gamma}_{zx}. \end{aligned} \quad (4.32)$$

(4.28) va (4.32) munosabatlardan shu narsa kelib chiqadiki, jismning berilgan zarrachasining shaklining o‘zgarishining kinematikasi ma’lum bo‘lsa, u holda har doim faqatgina kuchlanishlar tenzori deviatorining tarkibiy qismlarining kuchlangan holatning shiddatiga nisbatlarining qiymatlarini aniqlash mumkin bo‘ladi.

Oddiy yuklashda shakl o‘zgarishi kinematikasining parameterlarini kuchlangan holatning bosh o‘qlarining yo‘nalishi o‘rnatadi va bor-yo‘g‘i kuchlangan holatning turini ko‘rsatuvchi uchinchi invariant tavsifni belgilaydi. Kuchlangan holatning birinchi ikkita

invariant tavsiflari $\sigma_{sr} = -r$ (p–gidrostatik bosim) va σ_i o‘zgarmasdan qoladi. Umumiy holatda, deformatsion nazariyaga muvofiq, kuchlangan holatning turi deformatsiyaning turiga mos kelmasligi mumkin, deformatsiyalar va kuchlanishlarning bosh o‘qlari mos tushishi shart emas.

Kichik elastikplastik deformatsiyalarda elastik zonada $\sigma_i/\varepsilon_i = Y_e$ bo‘ladi (E – birinchi turdagi qayishqoqlik moduli, Yung moduli). Puasson koeffitsiyenti 0,5 ga teng bo‘lganda plastik zonada ε_i (4.27) bog‘lanish bilan aniqlanadi. Odatda σ_i kattalik ε_i bilan $\sigma_i = F(\varepsilon_i)$ ko‘rinishda bog‘langan deb taxmin qilinadi.

Umumiy ko‘rinishda deformatsiya parametrlariga bog‘liqlik, deformatsiyalanadigan jismning o‘zini qanday tutishining tanlangan reologik modeliga muvofiq, real jarayonni modellashtiradigan termotezlik sharoitlarida jismning namunalarini bir o‘qli cho‘zish-siqish sinovlarining natijalari bo‘yicha aniqlanadi. Bu (4.28) va (4.32) munosabatlardan kuchlanishlar deviatorining tarkibiy qismlarini aniqlash imkonini beradi. ε_i – σ_i bog‘liqlikdan foydalanish bilan ε deformatsiya ε_{qay} va ε_{pl} tarkib toptiruvchilarga ajratiladi.

Agar plastik sohaga tegishli bo‘lgan egri chiziqning nuqtasidan egri chiziqning boshlang‘ich (elastik) uchastkasiga parallel bo‘lgan va abstsissalar o‘qiga ($\varepsilon_{o'q}$) perpendikulyar bo‘lgan ikkita nur o‘tkazilsa, u holda abstsissalar o‘qida boshlanish nuqtasi va parallel nur bilan kesishish nuqtasi o‘rtasidagi kesmaning uzunligi ε_{pl} ga mos keladi, nurlarning abstsissalar o‘qi bilan kesishish nuqtalari o‘rtasidagi kesma esa – ε_{qay} ga mos keladi. E_{pl} va ε_{qay} ga mos keluvchi kuchlanishlarning teng bo‘lishini ko‘rsatish mumkin.

Kuchlanishlar tenzorining normal tarkibiy qismlarining qiymatlarini aniqlash $\sigma_{o'rt} = -r$ ni bilishga bog‘liq bo‘ladi. Ideal plastik jismning ($\sigma_i = \sigma_s = \text{const}$) yassi deformatsiya, yassi kuchlangan holat va yassi plastik oqish sharoitlarida kichik qayishqoqplastik deformatsiya masalalarini yechish uchun sirg‘alish chiziqlarining xususiyatlaridan foydalaniladi. Shunday qilish mumkin, chunki ko‘rsatilgan uchta sharoitlarda deformatsiyani ko‘rsatuvchi differentsial tenglamalar tizimini kuchlanishlarni ko‘rsatuvchi tenglamalar tizimiga keltirish mumkin.

Ma'lumki, sirpanish chiziqlari material tolasining ko'proq tez uzayish yoki qisqarish yo'nalishi bilan 45° li burchak tashkil qiladigan urinma kuchlanishlarning absolyut qiymatlar bo'yicha maksimal trayektoriyalari bo'lib hisoblanadi. Bitta oilaning har bir chizig'i bo'ylab $r + 1,15\sigma_i$, φ shart saqlanadi. Ortogonal oilaning chiziqlari bo'ylab $r + 1,15\sigma_i$, φ shart saqlanadi, bu yerda φ – Oxy koordinatalar tizimida sirg'alish chiziqlariga urinmaning burchagi. Sirpanish chiziqlari mantiqiy xulosalardan yoki tavsiflar uslubi bilan differentsial tenglamalar tizimini sonli yoki analitik integrallash priyomlari yordamida topiladi.

Ideal plastik moddaning plastik oqishi o'q simmetrik masalasi kuchlanishlar tenglamalar tizimiga keltirilmaydi. Bunda v_p va v_z oqish tezliklarining ko'chishlarning tarkibiy qismlari bilan bog'lanishini chegaralashlar bilan ikkita yechishga misol keltiriladi. Ideal yopishqoq o'q simmetrik oqishda r uchun differentsial tenglamalar nisbatan oddiy bo'lib hisoblanadi. r ni aniqlashda ko'chishlarning koordinatalarga bog'lanishini aniqroq approksimatsiyalaydigan ifodalarni qidirish uchun variatsion uslublardan foydalanish istiqbolli yo'nalish bo'lib hisoblanadi. Kuchlanishlar tenzorining tarkibiy qismlarini r ni aniqlamasdan oxirgi deformatsiyaning munosabatlari bo'yicha aniqlash yuqorida keltirilgan.

Koordinatalar to'ri uslubining yutug'i nisbatan katta deformatsiyalar, yuqori haroratlar va yuqori dinamik yuklamalarda deformatsiyalarni tadqiq qilish imkoniyati bo'lib hisoblanadi. Uning kamchiligi – burchak kattaliklarini o'lchashning aniqligi yuqori emasligidan iborat. Aniqroq natijalar to'r tugunlarining faqatgina chiziqli koordinatalarini o'lchashda hisobga olinadi.

Nazorat savollari

1. Yuqorigi va pastki baholashlar deganda nimani tushunasiz?
2. Mizes plastiklik sharti va Levi-Mizes kechish qonuniga bo'ysunadigan materiallarni tushuntirib bering.
3. Elementlarni tanlash va konkret shaklni qabul qilish jarayonlarini aytib bering.

4. Elementlarning xillari deb nimaga aytiladi va spetsifikasiyaga bog‘liq ravishda elementning talab qilinadigan aniqlikka erishish uchun minimal vaqt sarfini ta‘minlaydigan qandaydir bir optimal varianti mavjud bo‘lishini tushuntiring.

5. Oxirgi elementlarning beshta nomenklaturalarini yozib bering.

6. Oxirgi element usulining differensial va variatsion shakllari qanday amalga oshiriladi?

7. Genki elastik-plastik jismidagi model uchun kuchlanishlar va deformatsiyalar o‘rtasidagi munosabatlar formulasini yozib bering.

8. Plastiklikning energetik shartini geometrik ma‘nosi nimadan iborat?

9. Geometrik tadqiqot qilish uslublari qanday amalga oshiriladi?

10. Genki deformatsiyalarining tarkibiy qismlarini tushuntirib bering.

5-BOB. METALLARNI DEFORMATSIYALASH JARAYONIGA DEFORMATSIYA HARORATI VA TEZLIGINING TA'SIRI

5.1. Yoqori haroratlarda deformatsiyalash, metallarning qaytishi va rekristallanishi

Oldingi bobda mustahkamlanish hamrohlik qiladigan sovuq deformatsiyalash mexanizmi tasvirlangan edi. Mazkur bobda esa oshirilgan haroratlarda deformatsiyalash, metallarning qaytishi (dam olishi) va rekristallanishini tasvirlaymiz.

Deformatsiyalanadigan metallning harorati oshirilganda metalda mustahkamlanishga qarama-qarshi bo'lgan yangi jarayonlar, aynan esa metallarning qaytishi (dam olishi) va rekristallanishi sodir bo'ladi. Shunday qilib, oshirilgan haroratlarda deformatsiyalash jarayonida bir paytning o'zida mustahkamlanish jarayonlari ham, mustahkamlikning kamayish jarayonlari ham sodir bo'ladi.

O'tkazilgan ilmiy-tadqiqot eksperimentlarining ko'rsatishicha, sovuq deformatsiyalashda alohida donalarda sirpanish tekisliklarining turlicha yo'nalganligi, tayyorlanmaning hajmida deformatsiyalarning notekis taqsimlanishi, donalarning shakli, o'lchamlari va xususiyatlaridagi farqlar oqibatida donalar kattaligi bo'yicha turlicha qayishqoq deformatsiyani oladi. Natijada tashqi kuchlar olingandan keyin sovuq deformatsiyalangan metallda qoldiq kuchlanishlar vujudga keladi.

Ma'lum bir haroratlargacha qizdirish bilan deformatsiyalashda atomlarning issiqlik tebranishlarining amplitudasi shunchalik ortadiki, bu atomlarning muvozanat holatiga qaytishini osonlashtiradi.

Shu bois deformatsiyalashda vujudga keladigan donalarning yuqorida ko'rsatilgan elastik deformatsiyalari katta darajada tenglashadi, bu tashqi kuchlar olingandan keyin qoldiq kuchlanishlarning kamayishini ta'minlaydi (agar deformatsiyalashdan keyin tayyorlanmani notekis sovutishda vujudga kelishi mumkin bo'lgan termik kuchlanishlar hisobga olinmasa). Bu hodisa metallning qaytishi (dam olishi) deb ataladi.

Ma'lumki, toza metallar uchun qaytish (0,25-0,30) T_{erish} dan yuqori absolyut haroratlarda namoyon bo'ladi, bu yerda T_{erish} – absolyut erish harorati. Metallarda eruvchan aralashmalarning bo'lishi metallning qaytish (dam olish) haroratining ortishiga olib keladi.

Ishlov berish jarayonida qaytish deformatsiyaga qarshilikning biroz kamayishiga va plastiklikning ortishiga olib keladi. Shunga qaramasdan, metallning qaytish (dam olish) haroratlarida deformatsiyalashga mustahkamlanish hamroqlik qiladi, biroq uning shiddati biroz pastroq bo'ladi.

Qaytish donalarning shakliga va o'lchamlariga ta'sir ko'rsatmaydi, ular qaytishning (dam olishning) bo'lishi bilan deformatsiyalashda, xuddi qaytish (dam olish) bo'lmagandagi kabi, metallning ko'proq shiddatli oqishi yo'nalishida cho'ziladi. Qaytish shuningdek deformatsiyalashda tekstura hosil bo'lishiga ham to'sqinlik qilmaydi.

Qaytish vaqtda kechadi; harorat ortishi bilan qaytish (dam olish) tezligi ortadi. Shu bois qaytish hodisasi deformatsiyalash harorati va tezligi o'rtasidagi munosabatga bog'liq bo'ladi. Berilgan haroratda deformatsiya tezligining ortishi qaytish hodisasini kamaytirishi mumkin. Qaytish shuningdek, metall sovuq deformatsiyalanganidan keyin uni sovutishda (bo'shatishda) ham sodir bo'ladi.

Sovuq deformatsiyalangan metallni qaytish haroratigacha bo'lgan harorat bilan qizdirish uning mexanik ko'rsatkichlarining xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi (mustahkamlik ko'rsatkichlari biroz kamayadi, plastiklik ko'rsatkichlari esa biroz ortadi).

Yuqorida keltirilgan ma'lumotlardan kelib chiqish bilan shuni qayd qilish lozimki, qaytish sovuq deformatsiyalangan metallning korroziyaga qarshiligini oshiradi va o'z-o'zidan darz ketish imkoniyatini keskin kamaytiradi. Darz ketish hodisasi sovuq shtamplash bilan olingan detallarda, ayniqsa, latundan olingan detallarda kuzatiladi va metallning kristallitlararo korroziyalanishi hisobiga yemirinishga qarshilik kamayganda qoldiq kuchlanishlar ta'siri ostida sodir bo'ladi.

Shu bilan birga aytib o'tish zarurki, ba'zi bir metallar va qotishmalarda, masalan, uglerodli po'latda qaytish haroratlarida qaytishning mexanik xususiyatlarga ta'siriga teskari bo'lgan eskirish

hodisasi vujudga kelishi mumkin, Eskirish mustahkamlik ko'rsatkichlarining ortishiga va shu bilan birgalikda plastiklik ko'rsatkichlarining kamayishiga olib keladi.

Eskirishning fizikaviy tabiati hali oxirigacha aniqlanmagan. Eskirish jarayonida mexanik xususiyatlarning o'zgarishi aralashmalarining kichik dispers zarrachalarining sirpanish tekisliklariga to'kilishi oqibatida sodir bo'ladi deb taxmin qilinadi.

Deformatsiyalanadigan metallning haroratini qaytish haroratidan yuqoriga yanada oshirish rekristallanish jarayoni vujudga kelishiga olib keladi.

Plastik deformatsiyada rekristallanish deformatsiyalangan metallarning o'rniga homilalarning vujudga kelishi, o'sish paytida yangi donalarning vujudga kelishidan iborat bo'ladi.

Rekristallanishning asosiy imkoniyati shu bilan shartlanadiki, deformatsiyalanadigan metallning haroratining ortishi atomlarning energetik potensialini shunchalik oshiradiki, natijada atomlar qayta guruhlashish va shiddatli joy almashish imkoniyatini qo'lga kiritadi.

Yangi donalarning homilalari deformatsiyalanadigan metallda mavjud bo'ladigan – deformatsiya jarayonida og'ishmagan, nisbatan to'g'ri panjarali kataklar (mozaikaning alohida bloklari, sirpanish tekisliklaridagi, chegara qatlamlaridagi va donalararo qatlamlardagi don bo'laklari) bo'lib hisoblanadi.

Bu homilalarga, panjaraning parametrlariga muvofiq, donalarning homilalari bilan qo'shni atomlar birika boshlaydi va yangi donlar o'sib chiqa boshlaydi. Donalarning o'lchami ortadi va vaqt o'tishi bilan deformatsiyalangan donalarning atomlarini to'liq yutishi mumkin. Homilaning atrofida donalarning barcha yo'nalishlar bo'yicha o'sish imkoniyati bir xil bo'lishi oqibatida homilalardan yangi hosil bo'lgan donalar teng og'irlikli bo'ladi, ya'ni hamma yo'nalishlar bo'yicha o'rtacha bir xil o'lchamlarga ega bo'ladi.

Shunday qilib, metallni rekristallanish haroratidan yuqori haroratda deformatsiyalash ikkita qarama-qarshi va bir paytda ta'sir ko'rsatuvchi ikkita jarayon – donalarning mustahkamlanish bilan deformatsiyalanishi va ularning rekristallanishi bilan birgalikda kuzatiladi.

Rekristallanish jarayoni qandaydir bir tezlik bilan vaqtda sodir bo‘ladi, bu tezlikning kattaligi deformatsiyalash harorati va deformatsiya darajasiga bog‘liq bo‘ladi. Deformatsiyalanadigan jism oladigan deformatsiyalash harorati va deformatsiya darajasi qanchalik yuqori bo‘lsa, rekristallanish tezligi shunchalik yuqori bo‘ladi.

Yakuniy natija deformatsiya tezligi va rekristallanish tezligi o‘rtasidagi nisbatga bog‘liq bo‘ladi.

Agar deformatsiya jarayonida rekristallanish deformatsiyalangan metallning barcha donlari natijada teng o‘qli shaklni oladigan, ularning kristall tuzilishi esa deformatsiyalanmagan donalarning tuzilishiga mos keladigan tezlik bilan borsa, u holda metallning xususiyatlarining mustahkamlanish bilan chaqiriladigan o‘zgarishlari sodir bo‘lmaydi.

A.A.Bochvarning ma’lumotlariga ko‘ra, toza metallar uchun rekristallanishning boshlanish harorati $T_{\text{rekr}} \sim 0,4 T_{\text{erish}}$ munosabatdan aniqlanadi, bu yerda T_{rekr} – absolyut rekristallanish harorati; T_{erish} – absolyut erish harorati.

Eruvchan aralashmalarning bo‘lishi rekristallanish haroratini biroz oshiradi. Qotishmalarda rekristallanishning boshlanish harorati odatda qotishmani tashkil qiladigan metallarga qaraganda yuqori bo‘ladi, biroq erish harorati – past bo‘ladi. Bu aftidan, turli atomlardan kelib chiqqan panjaraning qayta qurilishi yuqoriroq energetik potensialni talab qilishi bilan tushuntiriladi.

Rekristallanish jarayonida kristallitlarning ichida ham, donlarning chegaralari bo‘ylab ham atomlarning diffuziyalanishi oshadi, bu donalarning kimyoviy bir jinsli emasligining tekislanishiga va donalarning chegaralari bo‘ylab kristallitlararo deformatsiya natijasida vujudga keladigan shikastlanishlarning bartaraf bo‘lishiga ko‘maklashadi.

Rekristallanish bor bo‘lganda deformatsiyalangan metallda teng o‘qli donalarning ko‘pgina o‘lchamlari rekristallanish sodir bo‘ladigan haroratga, deformatsiya darajasiga, shuningdek, deformatsiya tezligiga bog‘liq bo‘ladi. Rekristallanish bilan deformatsiyadan keyin donaning o‘lchami, deformatsiyalash harorati va deformatsiya darajasi o‘rtasidagi bog‘lanish odatda ikkinchi turdagi

rekristallanish hajmiy diagrammalari bilan taqdim qilinadi, ular maxsus o'tkaziladigan eksperimentlarning natijalari bo'yicha quriladi va har bir metall va qotishma uchun xarakterli bo'ladi. Past uglerodli po'latning rekristallanish hajmiy diagrammasi 5.1-rasmda keltirilgan.

Diagrammada donaning kattaligi, deformatsiya va qizdirish harorati ko'rinib turibdi. Boshqa metallar va ularning qotishmalari uchun ham rekristallanish diagrammalari xuddi shunday xarakterga ega bo'ladi. Rekristallanish hajmiy diagrammasi bo'yicha past uglerodli po'latda donaning kattaligi (mikronlarda MK), deformatsiya (% larda) va qizdirish haroratining nisbatlarini esa ($^{\circ}\text{C}$ da) aniqlash mumkin bo'ladi.

Rekristallanish bilan deformatsiyadan keyin donaning kattaligini deformatsiya darajasiga bog'liqligining o'ziga xos xususiyati kritik deformatsiya darajalarining bo'lishi bo'lib hisoblanadi, bu deformatsiyalarda rekristallangan donalarning o'lchamlarini keskin ortishi kuzatiladi. Kritik deformatsiya darajasining kattaligi rekristallanish boshlanadigan haroratga yaqin haroratlarda odatda 8-10% dan oshmaydi va harorat ortishi bilan kamayadi (kritik deformatsiya darajalari zonasi koordinatalar boshiga qarab siljiydi).

Kritik deformatsiya darajalarining bo'lishini quyidagicha tushuntirish mumkin. Deformatsiyaning boshlang'ich bosqichida deformatsiya donani o'rab turadigan kristallitlararo moddaga putur yetkazmasdan kristallitlarning ichidagi jarayonlar hisobiga sodir bo'ladi. Buning oqibatida rekristallanishda birlashish yo'li bilan donalarning o'lchamlarini ortishi qiyin bo'ladi. Bundan tashqari, deformatsiya kattaligi nisbatan kichik bo'lganda hosil bo'lgan bloklar – kristallit siniqlarining soni unchalik katta bo'lmaydi, demak mumkin bo'lgan rekristallanish markazlarining soni ham unchalik katta bo'lmaydi. Kritik darajalarda rekristallanish markazlarining soni kichikligicha qoladi (biroz oshadi), biroq kristallitlararo modda qisman yemiriladi, bu kristallitlarning bevosita bir-biriga tegishiga olib keladi. Rekristallanish jarayonidagi bu holat qo'shni donalarning atomlarini rekristallanish markazidan o'sib chiqayotgan yangi donaga qo'shilishini osonlashtiradi, bu pirovardida bir nechta

deformatsiyalanadigan donalarning bitta bo‘lib birlashishiga, ya’ni rekristallangan donalarning o‘lchamlarining ortishiga olib keladi. Deformatsiya darajasining keyingi ortishi rekristallanish markazlari sonining ortishiga olib keladi, va shundan kelib chiqqan holda, rekristallangan donalar sonining ham ortishiga olib keladi, bu jismning berilgan hajmida donalarning o‘lchamlarining kichrayishini beradi.

Harorat ortishi bilan kristallitlararo moddaning mustahkamligi kamayadi, kristallitlarning bir-biriga bevosita tegishi endilikda kichikroq deformatsiya darajalarida sodir bo‘ladi. Bu kritik deformatsiya darajalarining koordinatalar boshiga qarab siljishini chaqiradi. Bundan tashqari, harorat ortishi bilan atomlarning harakatchanligi ortadi, bu rekristallanish jarayonida qo‘shni donalarning birlashishini osonlashtiradi, bu barcha deformatsiya darajalarida rekristallangan donaqlarning o‘lchamlarining ortishiga olib keladi.

Ma’lumki, po‘latlarning ba’zi bir sortlarida o‘ta yuqori deformatsiya darajalarida rekristallanish egri chiziqlarida ikkinchi maksimumning paydo bo‘lishi kuzatiladi. Rekristallanishdan keyin donaning kattaligi qizdirilgan metallni rekristallanish haroratidan yuqori bo‘lgan haroratlarda ushlab turish davomiyligiga ham bog‘liq. Uzoq vaqt ushlab turilganda, ilgari ishlov berish rekristallanishidan farqli o‘laroq, to‘planma rekristallanish kuzatiladi, uning mohiyati shundan iboratki, ishlov berish rekristallanishi natijasida olingan turlicha o‘qli donalarning o‘lchamlari ularning birlashishi hisobiga ham ortadi. To‘planma yoki yuzadagi rekristallanish ishlov berish rekristallanishiga qaraganda sekinroq kechadi. To‘planma rekristallanishda donalarning o‘sish imkoniyati qayta qurilish jarayonida atomlarning potensial energiyaning minimumiga javob beradigan holatni egallashga intilishi bilan shartlanadi. Donalarning yuza qatlamlarida mavjud bo‘lgan atomlarning o‘zaro to‘g‘ri joylashishdan chetlashishi polikristallda to‘plangan potensial energiyani oshiradi.

Donalarning o'lchamlari oshganda ularning yig'indi yuzasi kamayadi, va shundan kelib chiqqan holda, jismda to'plangan potensial energiya ham kamayadi. To'planma rekristallanish rekristallanish boshlanadigan haroratdan anchagina yuqori bo'lgan haroratlarda ayniqsa shiddat bilan sodir bo'ladi.

Rekristallanish shuningdek, sovuq deformatsiyalangan metallni metall materiallarning rekristallanishi boshlanadigan haroratdan biroz yuqori haroratda qizdirishda ham (past yoki rekristallash bilan kuydirish) sodir bo'ladi. Sovuq deformatsiyalangan metallning rekristallanishi natijasida olingan donlarning kattaligi tayyorlanma yoki uning alohida uchastkalari olgan deformatsiya darajasi, rekristallanish harorati va shu haroratda ushlab turish vaqtiga bog'liq bo'ladi.

Donaning kattaligini bu omillarga bog'liqligining xarakteri oldin ko'rib chiqilgan holat bilan bir xil. Bu holda ham kritik deformatsiya darajalari mavjud bo'ladi, bu deformatsiyalarda rekristallangan donalarning o'lchamlari kattagina ortishi kuzatiladi, bunda metallni qizdirish harorati qanchalik yuqori bo'lsa, donalarning o'lchamlarini ortishi shunchalik katta bo'ladi. Demak, shuni aytish mumkinki, dastlabki sovuq deformatsiya darajasi ortishi bilan rekristallanish harorati biroz kamayadi. Bu deformatsiyalangan metall atomlarining mustahkamlanishda energetik potensialining ortishi bilan tushuntiriladi.

O'ta katta deformatsiya darajasini olgan va deformatsiya teksturasiga ega bo'lgan metallni sovuq deformatsiyalangan rekristallizatsion kuydirish teksturaning yo'qolishiga olib kelishi mumkin. Biroq rekristallanish har doim ham uning yo'qolishiga olib kelavermaydi. Deformatsiya teksturasiga ega bo'lgan metallni rekristallizatsion kuydirish natijasida rekristallangan teng o'qli donlarning kristallografik o'qlari kenglikda asosan bir tomonga qarab qoladigan rekristallanish teksturasi hosil bo'lishi mumkin (ko'pchilik donlar kristallografik o'qlarning kenglikda bir tomonga yo'nalgan joylashishiga ega bo'ladi). Rekristallanish teksturasi deformatsiyaning boshlang'ich teksturasi bilan bir xil bo'lishi mumkin, biroq

undan farq qilishi ham mumkin, ya'ni rekristallanishdan keyin jismda kristallografik o'qlarning qaratilish yo'nalishlari o'zgaradi.

Rekristallanish teksturasining vujudga kelishi shu bilan tushuntiriladiki, deformatsiyalangan metallda mavjud bo'lgan yangi don homilalari kenglikda kristallografik o'qlarning asosan bir tomonga qaratilishiga ega bo'ladi. Rekristallanish teksturasi, shuningdek deformatsiya teksturasining kuydirishdan keyin yangi tekstura hosil qilmasdan yo'qolish imkoniyati qotishmaning tarkibi va aralashmalar miqdoriga, sovuq deformatsiyalashda olingan deformatsiya darajasiga, deformatsiya teksturasining xarakteriga, kuydirish harorati va kuydirish davomiyligiga bog'liq bo'ladi.

Rekristallanish teksturasining bo'lishi kuydirilgan metallda mexanik xususiyatlarning anizotropiyasiga olib kelishi mumkin, bu bosim bilan ishlov berish bilan olingan detalning xizmat xususiyatlariga yoki keyingi plastik deformatsiyalashda kuydirilgan tayyorlanmaning o'zini qanday tutishiga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Masalan, dumaloq yassi tayyorlanmadan stakanni cho'zishda festonlar (quloqlar) hosil bo'lishi yoyilgan (va kuydirilgan) metallda (metall listda) rekristallanish teksturasi bo'lishining oqibati bo'lib hisoblanadi.

5.2. Metallarga bosim bilan ishlov berishda deformatsiyaning asosiy turlari

Yuqorida aytib o'tilganlardan ko'rinib turibdiki, metallga bosim bilan ishlov berishda umumiy holatda bir paytning o'zida bir-biriga qarama-qarshi jarayonlar kechishi mumkin: mustahkamlanish jarayoni va mustahkamlikning kamayish jarayoni (qaytish va rekristallanish). Unisi ham, bunisi ham ma'lum bir tezliklar bilan vaqt oralig'ida kechadi, bu tezliklar deformatsiya sharoitlari (harorat, deformatsiya tezligi va deformatsiya darajasi) va deformatsiyalanadigan metallning tabiati bilan shartlanadi.

Jarayonlardan qaysi biri ustun bo'lishiga bog'liq ravishda deformatsiyaning natijalari turlicha bo'lishi mumkin. S.I.Gubkinning ma'lumotlariga ko'ra, qaynoq, to'liq qaynoq bo'lmagan, to'liq sovuq

bo‘lmagan va sovuq deformatsiyalarga ajratiladi. Issiq yoki qaynoq deformatsiya deb shunday deformatsiyaga aytiladiki, bunda rekristallanish to‘liq sodir bo‘lishga ulguradi. Issiq deformatsiya natijasida metall to‘liq rekristallangan teng o‘qli makrostrukturani oladi, bunda biror-bir mustahkamlanish izlari bo‘lmaydi.

To‘liq issiq bo‘lmagan deformatsiyada rekristallanish to‘liq sodir bo‘lmaydi. To‘liq issiq bo‘lmagan deformatsiyada, shuningdek metallni deformatsiyalash tugagandan keyin metall bir paytning o‘zida ikkita turli tipdagi mikrostrukturaga ega bo‘ladi: 1 - rekristallangan (turlicha o‘qli donalar bilan) va 2 - rekristallanmagan (cho‘zilgan donalar bilan).

Deformatsiyalangan donalar bilan bir qatorda rekristallanmagan donalarning bo‘lishi deformatsiyaning notekisligining ortishiga olib keladi, bu metallning plastikligining kamayishiga va yemirilish ehtimolining ortishiga yordam beradi.

To‘liq issiq bo‘lmagan deformatsiyaga tortilgan metall qiymati bo‘yicha kattagina qoldiq kuchlanishlarga ega bo‘ladi, bu kuchlanishlar plastiklik yetarlicha bo‘lmaganda metallning yemirilishini chaqirishi mumkin. Termik ishlov berish yordamida qoldiq ichki kuchlanishlarni keskin kamaytirish mumkin.

To‘liq issiq bo‘lmagan deformatsiya rekristallanish boshlanadigan haroratdan unchalik oshiq bo‘lmagan deformatsiya haroratlarda o‘rinli bo‘lishi mumkin, bunda deformatsiya tezligi ortishi bilan uning vujudga kelish ehtimoli ortadi. Amaliyotda to‘liq qaynoq bo‘lmagan deformatsiyadan iloji boricha qochish kerak bo‘ladi, chunki u past bosish sifatini shartlaydi. Deformatsiyaning bu turi kichik rekristallanish tezligiga ega bo‘lgan qotishmalarda (masalan, ko‘p fazali, metabarqaror tizimlarni taqdim qiladigan ba’zi bir alyuminiy va magniy qotishmalarida hamda boshqa qotishmalarda) oson vujudga keladi. Shu sababli ularni deformatsiyalash kichik tezliklar bilan amalga oshiriladi.

To‘liq sovuq bo‘lmagan deformatsiya deb bunda rekristallanish bo‘lmaydigan, biroq qaytish jarayoni sodir bo‘lishga ulguradigan deformatsiyaga aytiladi. To‘liq sovuq bo‘lmagan deformatsiya natijasida metall rekristallanish izlarisiz polosali mikrostrukturani

oladi, katta deformatsiyalashda esa – deformatsiya teksturasini oladi. Uning plastiklik xususiyatlari qaytish bo‘lmaganda deformatsiyalangan metallga qaraganda yuqori, mustahkamlik xususiyatlari esa biroz pastroq bo‘ladi.

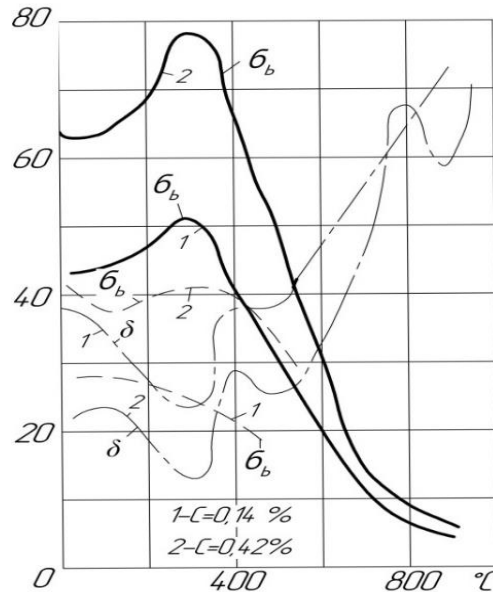
To‘liq sovuq bo‘lmagan deformatsiya qaytish boshlanadigan haroratga qaraganda kattaroq deformatsiya haroratida o‘rinli bo‘lishi mumkin, bunda deformatsiya tezligi shunday bo‘lishi kerakki, bunda qaytish to‘liq sodir bo‘lishga ulgursin. Sovuq deformatsiyada rekristallanish va qaytish butunlay bo‘lmaydi va deformatsiyalangan metall mustahkamlanishning barcha alomatlariga ega bo‘ladi. Sovuq deformatsiya qaytish boshlanadigan haroratdan pastroq haroratlarda kechadi.

Shunday qilib, harorat-tezlik shartlari deformatsiyalangan metallning tuzilishiga katta ta’sir ko‘rsatadi.

5.2.1. Metallarning plastikligiga va deformatsiyalanish qarshiligiga haroratning ta’siri

Metall haroratining ortishi, hammasidan tashqari, uning mexanik tavsiflariga katta ta’sir ko‘rsatadi. Harorat ortishi bilan mustahkamlik ko‘rsatkichlarining, ular bir paytning o‘zida deformatsiyaga qarshilikni ham tavsiflaydi, va plastiklik ko‘rsatkichlarining o‘zgarishining borishi to‘g‘risida 5.1-rasmda keltirilgan grafiklar bo‘yicha fikr yuritish mumkin. Grafiklardan ko‘rinib turibdiki, uglerodli po‘latning haroratini taxminan 100° gacha oshirish plastiklik ko‘rsatkichlarini biroz oshiradi va deformatsiyaga qarshilikni kamaytiradi.

Haroratni taxminan 300° gacha yanada oshirish plastiklik ko‘rsatkichlarining kattagina kamayishini va mustahkamlik ko‘rsatkichlarining ortishini beradi. Bu taxminan karbidlarning mayda zarrachalarining xuddi eskirish jarayonidagi kabi sirpanish tekisliklari bo‘ylab to‘kilishi bilan tushuntiriladi. Haroratning yanada ortishi mustahkamlik ko‘rsatkichlarining asta-sekin, biroq kattagina kamayishiga olib keladi.



5.1-rasm. Harorat ortishi bilan mustahkamlik ko‘rsatkichlarini va ular bir paytning o‘zida deformatsiyaga qarshilikni tavsiflagan holda plastiklik ko‘rsatkichlarining o‘zgarishi.

Bizga ma’lumki, agar harorat 1000° atrofida bo‘lsa, unda mustahkamlik chegarasi 10 martadan ko‘proqqa kamayadi.

Plastiklik ko‘rsatkichlariga keladigan bo‘lsak, to‘liq issiq bo‘lmagan deformatsiya mumkin bo‘ladigan haroratlar sohasida va faza aylanishlari haroratlari sohasida (ko‘pincha bu ikkala hodisa deyarli bir xil haroratlarda sodir bo‘ladi) ularning biroz kamayishi kuzatiladi. Faza aylanishlari sohasida plastiklikning kamayishi deformatsiyalanadigan jismda bir paytning o‘zida turlicha xossalarga ega bo‘lgan ikkita fazaning bo‘lishi bilan tushuntiriladi, bu kuchlangan holatning notekisligining ortishiga olib keladi.

Shuni qayd qilish lozimki, erish haroratidan biroz pastroq haroratlarda plastiklik ko‘rsatkichlarining keskin kamayishi kuzatiladi, bu donaning anchagina kattalashishi va keyinchalik metallning kuyishi (donalar chegaralarining oksidlanishi) natijasi bo‘lib hisoblanadi.

Boshqa metallar va qotishmalar uchun ham mustahkamlik va plastiklik ko‘rsatkichlarining bog‘lanish grafiklari ham xuddi shunday xarakterga ega bo‘ladi.

Bundan shuni aytish mumkinki, barcha metallar va ularning qotishmalari uchun umumiy qoida shu bo‘lib hisoblanadiki, ular eng katta plastiklikka rekristallanish haroratlarida, ya’ni issiq deformatsiya sharoitlarida ega bo‘ladi, bu sharoitlarga bir paytning o‘zida mustahkamlik ko‘rsatkichlarining kichik qiymatlari va shundan kelib chiqqan holda deformatsiyaga qarshilikning ham kichik qiymatlari mos keladi. Shuni qayd qilish lozimki, plastiklikning kamayishi kuzatiladigan xavfli harorat zonalari ularda faza aylanishlari, to‘liq issiq bo‘lmagan deformatsiya yoki eskirish va mo‘rtlik hodisasi sodir bo‘lishi mumkin bo‘ladigan zonalar hisoblanadi.

Issiq yoki qaynoq deformatsiya haroratlarigacha qizdirishda plastiklikning ortishi atomlarning harakatchanligining ortishining oqibati bo‘lib hisoblanadi, biroq plastiklikning ortishiga yana boshqa ba’zi bir hodisalar ham ko‘maklashadi. Masalan, qaynoq deformatsiya sharoitlarida odatda oshirilgan aralashmalar miqdorini o‘z ichiga oladigan kristallararo qatlamlarning plastikligi anchagina ortadi. Bu shu bilan tushuntiriladiki, oshirilgan aralashmalar miqdoriga ega bo‘lgan chegara qatlamlari kichikroq termodinamik barqarorlikka ega bo‘ladi va asosiy metallning donalarining erish haroratiga qaraganda kichikroq erish haroratiga ega bo‘ladi.

Issiq yoki qaynoq deformatsiya haroratlarigacha qizdirishda donalararo qatlamlarning mustahkamligi donalarning mustahkamligiga qaraganda ko‘proq shiddat bilan kamayadi, metallning umumiy deformatsiyasida kristallitlararo deformatsiyaning ulushi esa ortadi.

Bir paytning o‘zida bu qatlamlarning mo‘rtligi kamayadi va shundan kelib chiqqan holda ularda mikroyoriqlarning hosil bo‘lishi ham kamayadi. Mikroyoriqlar hosil bo‘lishi xavfining kamayishi deformatsiya jarayonida ularning “davolanishi” mumkinligi bilan tushuntiriladi.

Ikki fazali qotishmalarni deformatsiyalash jarayonida mikroyoriqlarning “davolanishi” mumkinligini tushuntirishda A.A. Bochvar tomonidan aniqlangan bir faza kristallitlari atomlarining boshqa fazaning kristallitlariga sapchib o‘tishi hodisasi katta ahamiyatga ega. A.A. Bochvar bu hodisani plastik deformatsiyaning eritmali-cho‘kindili xili deb atagan.

Atomlarning fazalararo ko‘chishida mikroskopik yoriqlarning “davolanishi” sodir bo‘ladi, chunki mikrog‘ovakliklarda metallning cho‘kishi osonroq sodir bo‘ladi. Harorat ortishi bilan atomlarning harakatchanligi ortishi sababli, mikroyoriqlarning “davolanishi” ham metallarni issiq (qaynoq) deformatsiyalash haroratlarida osonroq amalga oshadi.

5.2.2. Issiq deformatsiyani metallarning mexanik xossalariga ta’siri

Har qanday metall zagotovkalari metallurgik quyish usuli bilan olinadi. Quyilgan strukturaga ega bo‘lgan tayyorlanmalar (masalan, quyilgan zagotovkalar yoki tayyorlanmalar, slitkalar-yombilar yoki prokat) odatda issiq deformatsiya sharoitlarida bosim bilan ishlov berishga tortiladi. Quyilgan strukturaga ega bo‘lgan quyma zagotovkalar-tayyorlanmalar ularda birlamchi kritallanishning yirik kristallitlarining bo‘lishi bilan tavsiflanadi, ularning chegaralari bo‘ylab aralashmalar va nometall moddalarga boy bo‘lgan qatlamlar joylashadi.

Quyma strukturaning deformatsiyalanishi kristallitlarning maydalanishiga va ularning metallning ko‘proq shiddatli oqish yo‘nalishida cho‘zilishiga olib keladi. Shu bilan bir paytda xuddi shu yo‘nalishda nometall moddalarni o‘z ichiga oladigan kristallitlararo qatlamlarning ham cho‘zilishi sodir bo‘ladi (bunday o‘zgarishlar faqatgina metallda bo‘lishi mumkin).

Deformatsiya darajasi yetarlicha katta bo‘lganda bu nometall moddalar metallning ko‘proq shiddat bilan oqish yo‘nalishida cho‘zilgan o‘rimlar ko‘rinishini oladi, makrostrukturaning polosaliligini hosil qiladi (biroq makrostrukturaning polosaliligi qaynoq deformatsiya sharoitlarida bo‘lmaydi). Makrostrukturaning polosaliligi shlifni eritishda namoyon bo‘ladi va nometall moddalar miqdori katta bo‘lganda qurollanmagan ko‘z bilan ham, yoki biroz kattalashtirilganda (o‘n martagacha) ko‘rinadi Bunda makronamunada metallning tuzilishi tolasimon ko‘rinishni oladi. Bunday

makrostruktura 5.2-rasmda ko'rsatilgan. Makrostruktura polosaliligining vujudga kelishi bir paytning o'zida mexanik xossalarning vektorialligiga (anizotropiyasiga) olib keladi.



5.2-rasm. Tolasimon tuzilishga ega bo'lgan metall namuna (detal).

Plastiklikning asosiy ko'rsatkichlari tolalarning bo'ylama va ko'ndalang yo'nalishlari bo'yicha kattagina farq qiladi, bunda bu ko'rsatkichlarning qiymatlaridagi farq deformatsiya darajasi ortishi bilan ortadi. Bo'ylama yo'nalishda (tolalar bo'ylab) plastiklik ko'rsatkichlari deformatsiya darajasi ortishi bilan ortadi, biroq bu ortishning shiddati asta-sekin kamayadi.

Agar deformatsiya darajasining ko'rsatkichi sifatida nisbiy siqilish (boshlang'ich ko'ndalang kesim maydonining uning joriy qiymatiga nisbati) qabul qilinsa, u holda bo'ylama yo'nalishda plastiklik ko'rsatkichi $F_0/F_1 \leq 4$ siqilish darajasigacha ortadi, so'ngra $F_0/F_1 = 10$ gacha sekin ortadi, siqilish darajasi yanada oshganda esa – amalda o'zgarmaydi. Tolaga nisbatan ko'ndalang yo'nalishda plastiklik ko'rsatkichi siqilish darajasi ortishi bilan kamayadi ($F_0/F_1 \leq 6$ siqilish darajasigacha ko'proq shiddat bilan va siqilish darajasi yanada oshganda kamroq shiddat bilan).

Bo'ylama va ko'ndalang yo'nalishlarda plastiklik ko'rsatkichlari o'rtasidagi asosiy farq ko'ndalang kesim maydonining nisbiy kamayishida kamroq yaqqol ko'zga tashlanadi (po'lat uchun $F_0/F_1 \approx 10$ da farq taxminan 10% ni tashkil qiladi), nisbiy cho'zilishda esa biroz ko'proq ko'zga tashlanadi va zarba yopishqoqligi uchun eng katta qiymatga ega bo'ladi (po'lat uchun $F_0/F_1 \approx 10$ da farq 20% ga yetadi).

Metallning mustahkamlik tavsiflari tolalarning bo'ylama va ko'ndalang yo'nalishlari bo'yicha unchalik ko'p farq qilmaydi, bunda

deformatsiya darajasining ortishi amalda ularning kattaligiga ta'sir ko'rsatmaydi.

Shunday qilib, metallarning plastik deformatsiyalanishiga metallning mexanik xususiyatlariga ta'sir ko'rsatadigan, shuningdek, ularning fizikaviy-kimyoviy xususiyatlarining o'zgarishiga olib keladigan bir qator hodisalar hamrohlik qiladi. Ularni anglangan tarzda hisobga olish va boshqarish bilan metallarga bosim bilan ishlov berishda olingan detal eng yaxshi xizmat tavsiflariga ega bo'ladigan deformatsiya sharoitlarini ta'minlash mumkin.

Metallarga bosim bilan ishlov berishda odatda deformatsiya jarayonini makrostrukturaning tolalari ishlash sharoitlarida detal zo'riqqanda vujudga keladigan eng katta normal kuchlanishlar yo'nalishida joylashadigan qilib olib borishga harakat qilinadi.

Shunday qilib, bir qator hollarda mustahkamlanish hodisasidan metallning mustahkamlik ko'rsatkichlarini oshirish uchun foydalaniladi. Demak, deformatsiya jarayoniga haroratdan tashqari, deformatsiya tezligi ham katta ta'sir ko'rsatadi.

Hajmning doimiyligi sharti bilan dastlabki tanishish

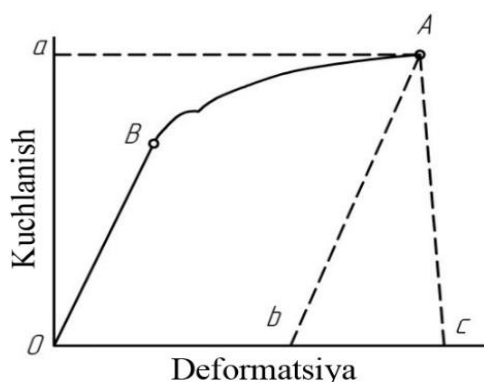
Ma'lumki, deformatsiya tezligining deformatsiya jarayoniga ta'siri to'g'risidagi masalani ko'rib chiqishda avvalambor, deformatsiya tezligini qanday qilib aniqlash kerakligini aniqlab olish lozim bo'ladi. Buning uchun dastlab hajmning doimiyligi sharti va deformatsiya darajasi va siljigan hajm tushunchalari bilan tanishamiz. Plastik deformatsiya natijasida metallning zichligi unchalik ko'p o'zgarishsizligi sababli va bu o'zgarish amalda ahamiyatga ega bo'lmasligi sababli, kuchlanishlar va deformatsiyalar bilan bog'lanadigan masalalarni yechishda odatda quyidagi shart qabul qilinadi: deformatsiyalanadigan jismning hajmi o'zgarishsiz qoladi, yoki boshqacha qilib aytganda, jismning deformatsiyadan oldingi hajmi uning deformatsiyadan keyingi hajmiga teng bo'ladi.

Bu bosim bilan oldindan issiq ishlov berishga tortilgan metallga tegishli bo'ladi. Quyilgan metallni birlamchi deformatsiyalash

natijasida uning zichligi unda mavjud bo'lgan g'ovakliklarning bartaraf bo'lishi hisobiga biroz (0,1% gacha) ortadi.

Bunday jismning hajmi plastik deformatsiyalash paytida unga tashqi kuchlar qo'yilganda yuklama olingandan keyingi hajmga teng bo'lishi kelib chiqmaydi.

Jismning plastik deformatsiyasiga har doim uning qayishqoq deformatsiyasi hamrohlik qiladi, bu qayishqoq deformatsiyaning kuchlanishlarga bog'lanishi **Guk qonuni** bilan aniqlanadi. Demak yuklanishning oxirgi momentida jismning o'lchamlari yuklama olingandan keyingi o'lchamlardan farq qiladi. 5.3-rasmda sinov mashinasida olingan cho'zilishning odatdagi diagrammasi keltirilgan. Ordinatalar o'qiga – kuchlar, abstsissalar o'qiga – deformatsiyalar qo'yilgan. Qandaydir bir momentda O_a kesma bilan belgilanadigan kuch qo'yilganda deformatsiya O_c kesma bilan ifodalanadi.



5.3-rasm. Sinov mashinasida olingan cho'zilish diagrammasi (kuchlar va deformatsiyalar bo'yicha).

Agar A nuqtadan OB parallel to'g'ri chiziq o'tkazilsa, bu yerda B nuqta proporsionallik (elastiklik-qayishqoqlik) chegarasiga mos keladi, u holda absissalar o'qidagi o'zida namuna yuklangan holatda to'liq deformatsiyani taqdim qiladigan O_s kesma ikki qismga bo'linadi.

Birinchi bc qism o'zida qayishqoq deformatsiyani taqdim qiladi, ikkinchi Ob qism esa plastik deformatsiyani taqdim qiladi.

Yuklama olingandan keyin namunaning uzunligi bc kattalikka kamayadi, biroq bu uzunlik boshlang'ich uzunlikdan Ob kesma bilan

belgilanadigan qoldiq (plastik) deformatsiya kattaligiga katta bo‘ladi. Ravshanki, BOs va Abc burchaklarning tangenslari o‘zida Yung modulini (E) ifodalaydi.

Metallarga bosim bilan qaynoq ishlov berishda plastik deformatsiya katta bo‘lganda qayishqoq deformatsiyaning bo‘lishini hisobga olmaslik mumkin. Aksincha, ba’zi bir hollarda, masalan, sovuq bukishda qayishqoq deformatsiya juda sezilarli bo‘ladi.

Amaliyotda bu hodisa prujinalanish deb ataladi. Texnologik jarayonlarni loyihalashda u bilan hisoblashish zarur bo‘ladi. Masalan, sovuq bukishda shtampning burchagini prujinalanish burchagini hisobga olish bilan talab qilinadigan bukish burchagidan biroz farq qiladigan qilib yasash kerak bo‘ladi. Shundagina texnologik jarayonlarni loyihalash, hisoblashish va boshqa ishlarni bemalol bajarish mumkin bo‘ladi.

5.2.3. Deformatsiya tezligining deformatsiyaga qarshiligi va plastikligiga ta’siri

Metallarning mexanik xossalarini odatdagi aniqlashlar 10 mm/sek dan oshmaydigan deformatsiya tezliklari bilan sinov mashinalarida amalga oshiriladi. Metallarga presslar va bosish mashinalarida bosim bilan ishlov berish mashinaning ishchi organining 0,1 dan 0,5 m/sek atrofida oraliqdagi o‘rtacha tezligi bilan olib boriladi.

Bolg‘a (molot) bilan ishlov berishda metallga ko‘rsatiladigan ta’sir dinamik xarakterga ega bo‘ladi: bolg‘aning zarba berish momentidagi tezligi 5-10 m/sek ni tashkil qiladi, bir zarba paytida butun deformatsiya jarayoni esa bor-yo‘g‘i sekundning yuzlik ulushlari davomida davom etadi. Sekundiga yuzlab metrlar bilan o‘lchanadigan katta deformatsiya tezliklari bugungi kunda sanoatga muvaffaqiyatli joriy qilinayotgan portlash bilan shtamplash jarayonlarida vujudga keladi.

Shu sababli bosim bilan ishlov berish jarayonlarini loyihalash va tahlil qilishda metallarning mexanik xususiyatlari to‘g‘risidagi odatdagi sinovlar yo‘li bilan olingan ma’lumotlardan foydalanish mumkinmi yoki yo‘qligini bilish muhim bo‘ladi. Boshqacha qilib

aytganda, deformatsiya tezligi plastiklik va oquvchanlik kuchlanishiga qanday ta'sir ko'rsatishini bilish juda muhim bo'ladi.

Birinchi yaqinlashish bilan shuni aytish mumkinki, deformatsiya tezligi oshirilganda oquvchanlik kuchlanishi ortadi, plastiklik esa kamayadi. Deformatsiya tezligi ortishi bilan ba'zi bir magniy qotishmalari, yuqori legirlangan po'lat va mis qotishmalarining plastikligi ayniqsa, keskin kamayadi. Ko'pchilik alyuminiy qotishmalari, past legirlangan uglerodli konstruksion po'lat deformatsiya tezligiga nisbatan anchagina kam sezuvchan. Bu po'latlar qaynoq ishlov berishda amalda qo'llaniladigan har qanday deformatsiya tezliklarida yetarlicha plastiklikka ega bo'ladi.

Bosim bilan sovuq ishlov berishda deformatsiya tezligining ta'siri issiq yoki qaynoq ishlov berishdagiga qaraganda anchagina kam. Bu ta'sirning o'sish shiddati kichik tezliklar diapazonida (mm/min) katta va katta tezliklar diapazonida juda kichik bo'ladi. Biroq keltirilgan ma'lumotlar aniqlashtirishni talab qiladi. Avvalambor ikkita muhim holatni hisobga olish zarur bo'ladi: 1 – issiq plastik deformatsiyalashda ikkita qarama-qarshi jarayonlar – mustahkamlanish va mustahkamlikning kamayishining (qaytish va rekristallanish) bo'lishi; 2 – plastik deformatsiyaning issiqlik effekti.

Qaytish va rekristallanish to'g'risida ilgari gapirib o'tilgan edi. Issiqlik effekti shunda ifodalanadiki, bunda plastik deformatsiyalashga sarflanadigan energiya asosan issiqlikka aylanadi. Boshqa sharoitlar teng bo'lganda issiqlik effekti deformatsiya harorati ortishi bilan ortadi, chunki harorat ortishi bilan oquvchanlik kuchlanishi pasayadi va shu sababli deformatsiyalash uchun talab qilinadigan energiya kamayadi. Shu sababli berilgan namunaning sovuq va qaynoq holatdagi xuddi o'sha bitta deformatsiya darajasida keyingi holatda issiqlik kamroq ajralib chiqadi.

Agar deformatsiya tezligi kichik bo'lsa, u holda issiqlik sochiladi va jarayon deyarli izotermik tarzda kechadi. Aksincha, katta deformatsiya tezliklarida ajralib chiqayotgan issiqlik jismning haroratini oshiradi, boshqacha qilib aytganda, harorat effekti kuzatiladi.

Yuqorida aytilganlarga muvofiq, issiq deformatsiyada harorat effekti kamroq issiqlik ajralib chiqishi tufayli ham, ajralib chiqadigan

issiqlik qizigan metallning issiqlik miqdoriga nisbatan kichik bo'lishi tufayli ham kichikroq bo'ladi.

Bosim bilan sovuq ishlov berishda mustahkamlikni kamaytiradigan jarayonlar sodir bo'lmaydi. Oquvchanlik kuchlanishi mustahkamlanish natijasida deformatsiya darajasi bilan birgalikda ortadi, tezlikning ba'zi bir oraliqlarda o'zgarishi jarayonning borishiga kam ta'sir ko'rsatadi. Bosim bilan sovuq ishlov berishning ba'zi bir hollarida esa deformatsiya tezliklari katta bo'lganda harorat effekti natijasida qaytish hodisasi vujudga kelishi mumkin.

Pastroq tezliklardagiga qaraganda oquvchanlik kuchlanishi kamayadi, plastiklik esa ortadi.

Issiq deformatsiyada rekristallanish jarayoni boradi. Deformatsiya tezligi qanchalik katta bo'lsa va rekristallanish tezligi qanchalik kichik bo'lsa, oquvchanlik kuchlanishi shunchalik katta va plastiklik shunchalik kichik bo'ladi.

Po'lat past qizdirish haroratlarida va magniy qotishmalari normal bosish harorati intervalida juda kichik rekristallanish haroratiga ega bo'ladi. Shu sababli deformatsiya tezligining ortishi ishlov berishning xarakterini o'zgartirishi mumkin: u qaynoq ishlov berishdan to'liq qaynoq bo'lmagan ishlov berishga aylanishi mumkin, bu plastiklikning keskin kamayishi va bir paytning o'zida oquvchanlik kuchlanishining ortishini chaqiradi.

Agar ishlov berish mo'rtlik zonalariga yaqin haroratlarda amalga oshirilsa, deformatsiya tezligining o'zgarishi boshqa hodisalarga olib kelishi mumkin. Masalan, texnik toza temirda (armko-temir) mo'rtlik zonasi 825-1100 °C harorat intervalida yotadi. Agar masalan, 825°C haroratda katta deformatsiya tezligi bilan bosish amalga oshirilsa, u holda deformatsiyaning harorat effekti oqibatida metall mo'rtlik zonasida bo'lib qoladi. 1100°C ga yaqin haroratda xuddi o'sha harorat effekti metallni mo'rtlik zonasidan olib chiqishi mumkin.

Shunday qilib, tezlikning ortishi ba'zi bir hollarda oquvchanlik kuchlanishining ortishi va plastiklikning kamayishiga olib keladi, boshqa hollarda esa – harorat effekti tufayli teskari natijalarga olib kelishi mumkin.

Bu yo‘nalishlar bilan ko‘pgina tadqiqotchilar shug‘ullanishgan va berilgan harorat va deformatsiya darajasida oquvchanlik kuchlanishining deformatsiya tezligiga bog‘lanishini analitik tarzda ifodalashga urinishgan. P.Lyudvik tomonidan taklif qilingan.

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + n \ln \omega / \omega_0, \text{ va A.Reyto tomonidan taklif qilingan}$$

$$\sigma_s = \sigma_{s0} (\omega / \omega_0)^m.$$

formular eng katta e'tiborga molik, bu yerda σ_s va σ_{s0} – mos ravishda ω va ω_0 deformatsiya tezliklarida oquvchanlik kuchlanishi, n va m – eksperimental tarzda aniqlanadigan konstantalar.

Rossiyalik olim S.I.Gubkinning fikriga ko‘ra, birinchi formuladan to‘liq va to‘liq bo‘lmagan mustahkamlanish bilan deformatsiyalash haroratlarida foydalanish, ikkinchi formulani esa mustahkamlikning to‘liq va to‘liq bo‘lmagan kamayishi bilan deformatsiyalash haroratlari uchun qo‘llash maqsadga muvofiq bo‘ladi.

Amaliy hisoblashlarda deformatsiya tezligining ta’sirini tezlik koeffitsiyenti deb ataluvchi koeffitsiyent yordamida hisobga olish mumkin. Bu koeffitsiyent deformatsiya tezligi qanchaga oshganda oquvchanlik kuchlanishi necha martaga ortishini ko‘rsatadi. Bu ma’lumotlar 5.1-jadvalda keltirilgan.

5.1-jadval

S.I.Gubkin bo‘yicha tezlik koeffitsiyentining qiymatlari

Deformatsiya tezliklarining nisbati ω_2/ω_1	Deformatsiya haroratlari, °C			
	$T/T_{erish} < 0,3$	$T/T_{erish} = 0,3 \div 0,5$	$T/T_{erish} = 0,5 \div 0,7$	$T/T_{erish} > 0,7$
10	1,05 – 1,10	1,10 – 1,15	1,15 – 1,30	1,30 – 1,30
100	1,10 – 1,22	1,22 – 1,32	1,32 – 1,70	1,70 – 2,25
1000	1,16 – 1,34	1,34 – 1,52	1,52 – 2,20	2,20 – 3,40
$\omega = 10^{-1} \text{ cek}^{-1}$ tezlikdan o‘tishda	1,10 – 1,25	1,25 – 1,75	1,75 – 2,50	2,50 – 3,50

Eslatma: T- absolyut deformatsiya harorati; T_{erish} - absolyut erish harorati.

O'ta katta deformatsiya tezliklarida, masalan, portlash bilan shtamplash jarayonlarida metallning o'zini qanday tutishi hali yetarlicha o'rganilmagan. Masalan, ba'zi bir tajribalarning ko'rsatishicha, uglerodli va legirlangan konstruksion po'latlar, shuningdek, rangli metallarning plastik qotishmalari yuqori deformatsiya tezliklarida cheklanmagan deformatsiya darajasiga yo'l qo'yadi. Past plastiklikka ega bo'lgan qotishmalarda esa plastiklikning sezilarli darajada ortishi kuzatilmaydi. Boshqa tomonlama esa, ma'lumki, odatdagi sharoitlarda qiyin deformatsiyalanadigan ba'zi bir qotishmalarga portlash ta'siri ostida muvaffaqiyatli ishlov beriladi.

Shunday qilib, ko'pgina metallar va ularning qotishmalari, jumladan, uglerodli va legirlangan, konstruksion va mashinasozlik po'latlari, shuningdek, rangli metallarning plastik qotishmalari cheklanmagan deformatsiya darajasiga yo'l qo'yadi. Bu holda portlash bilan shtamplash jarayonlariga mos keladigan katta deformatsiya tezliklarida metallning o'zini qanday tutishini yetarlicha to'liq o'rganish mumkin bo'ladi.

5.3. Materiallarning plastik deformatsiyalarga qarshiligi usuli

Materiallarning plastik deformatsiyaga qarshiligining asosiy usullari, aynan esa ularning nazariy asoslari G.A.Smirnov-Alyaev va V.M.Rozenberg tomonidan ishlab chiqilgan. Mazkur usullardan oxirgi shakl o'zgarishi masalalarini yechishda, xususan, berilgan shakl o'zgarishi bo'yicha kuchni, berilgan yuklama yoki tashqi kuchlarning berilgan ishi bo'yicha deformatsiyani, jismning oxirgi shakli ma'lum bo'lganda uning oraliq o'tishlardagi shaklini aniqlash uchun foydalaniladi. Bunda ko'proq G.A.Smirnov-Alyaev va V.M.Rozenberg usullari qo'l keladi.

Deformatsiyaning ko'p tonliligi ikkita shart bilan tasvirlanadi. Birinchisiga ko'ra, materialning deformatsiyaning har qanday bosqichida eng tez cho'zilishni boshdan kechiradigan tolasi (deformatsiya tezligining birinchi bosh o'qi) deformatsiyaning butun oldingi bosqichida eng ko'p cho'zilgan bo'lishi va natijali deformatsiyaning birinchi bosh o'qi bo'ylab joylashgan bo'lishi lozim.

Deformatsiya sodir bo'lishining birinchi sharti bosh o'qlarning har qanday shartli qo'zg'almas koordinatalar tizimiga nisbatan burilishi mumkinligini istisno qilmaydi, bunda bosh o'qlarning bir-biriga nisbatan burilishi bo'lmasligi lozim. Birinchi shart quyidagi ko'rinishga ega:

$$v_{\varepsilon} = v_e = v_{\dot{\varepsilon}} = v_{\sigma} = \text{const}, \quad (5.1)$$

$$\text{Bu yerda: } v_{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}; v_e = \frac{2e_2 - e_1 - e_3}{e_1 - e_3}; v_{\dot{\varepsilon}} = \frac{2\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_3}{\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_3}; v_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Ikkinchi shart: deformatsiyaning o'zgarmasligi bo'lib, bu deformatsiya tezliklarining bosh tarkibiy qismlarining nisbatlarining o'zgarmasligini anglatadi, bunda bu tarkibiy qismlar umumiy parametrga proporsional tarzda o'zgarishi mumkin. $\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 = 0$ siqilmaslik shartini hisobga olish bilan (5.1) ifodadan olingan ikkinchi shart quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_1}{3 - v_{\dot{\varepsilon}}} = \frac{\dot{\varepsilon}_3}{3 + v_{\dot{\varepsilon}}} = \frac{\dot{\varepsilon}_2}{2 + v_{\dot{\varepsilon}}}, \quad (5.2)$$

Deformatsiyaning turini aniqlash uchun zarur bo'ladigan ifodalarni deformatsiyalar va kuchlanishlar uchun Mor aylanalarining geometrik o'xshashlik shartidan yoki deformatsiyalar tenzorining uchinchi invariantini tahlil qilish bilan topish mumkin. Monoton jarayonda deformatsiya tezligi va deformatsiya shiddatining qiymatlari teng bo'ladi. Chiziqli cho'zilish uchun

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 < 0; \varepsilon_1 > 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0; \sigma_1 > 0; v_{\varepsilon} - v_{\sigma} = -1,$$

$$\sigma_1 > 0; v_{\varepsilon} - v_{\sigma} = -1.$$

Chiziqli siqilish uchun

$$\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 > 0; \varepsilon_3 < 0; \sigma_1 < 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0; v_{\varepsilon} = v_{\sigma} = 1.$$

Oddiy siljish uchun

$$\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2; \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2; \nu_\varepsilon = \nu_\sigma = 0.$$

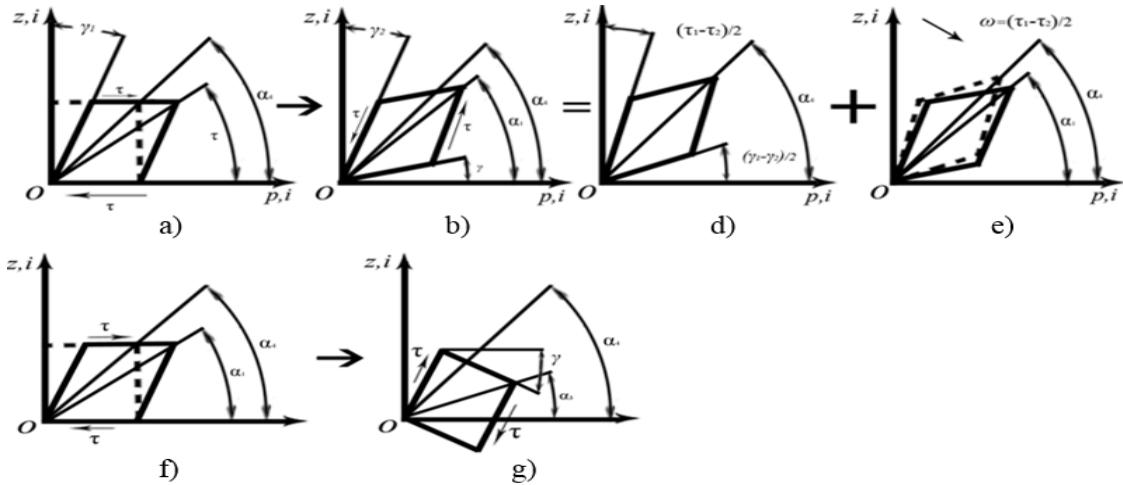
Sof siljish uchun

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3; \varepsilon_2 = 0; \sigma_1 = \sigma_3; \sigma_2 = 0; \\ \nu_\varepsilon = \nu_\sigma = 0.$$

Jarayonning monotonligi, ayniqsa, σ_s ning o'zgarishlarini hisobga olish yoki listli materialning yupqalashishida o'lchamlarni hisoblash zarur bo'lgan hollarda jarayonni tahlil qilishni osonlashtiradi. O'q simmetriyali cho'zish va listli materialni bortlash operatsiyalarida deformatsiyalash yaqinlashuvchi monoton jarayon deb hisoblanadi. Monoton plastik deformatsiyalash jarayonida kuchlanishlar va deformatsiyalarning bog'lanish munosabatlari quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\frac{e_1 - e_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{e_2 - e_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{e_3 - e_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \frac{e_i}{\sigma_i} = \frac{2\varepsilon_i}{2\sigma_i} = \frac{1}{2G'} \quad (5.3)$$

Eksperimental tarzda $1/(2G')$ koeffitsiyent (G' –ikkinchi turdagi plastiklik moduli) va solishtirma shakl o'zgartirish ishi o'rtasidagi bog'lanish aniqlangan. Monoton jarayon uchun mutlaqo adolatli bo'lgan “yagona egri chiziq” gipotezasiga ko'ra, e_i va σ_i o'rtasidagi funktsional bog'lanish nominal deformatsiya kuchiga bog'liq bo'lmaydi va deformatsiyalashning berilgan harorat-tezlik rejimida materialning xususiyatlari bilan belgilanadi. U material namunalarini bir o'qli cho'zish sinovlarining natijalari bo'yicha yaqinlashuvchi tarzda qurish yo'li bilan aniqlanadi. Urinma kuchlanishlarning shartlaridagi deformatsiyalar (5.4-rasm) quyidagi ko'rinishlarda bo'ladi.



5.4-rasm. Urinma kuchlanishlar juft-juft degan shartiga rioya qilinganda va rioya qilinmaganda elementar prizmaning deformatsiyalar sxemasi.

Bir tekis deformatsiyaning to‘xtashi va bo‘yin hosil bo‘lishi uchun $\sigma_i = \eta \sigma_i$ bo‘ladi, bu yerda $\eta < 1$. Mazkur ishda $\eta (F_v / F_{\min})$ bog‘lanish keltirilgan, bu yerda F_v – bo‘yin hosil bo‘lish momentida namunaning bo‘yindan tashqarida ko‘ndalang kesim maydoni; F_{\min} – bo‘yinning ko‘ndalang kesim maydonining joriy qiymati. Diagrammaning bo‘yin uchastkasida σ_i va e_i ning joriy qiymatlari quyidagi bog‘lanishlar bo‘yicha aniqlanadi:

$$\sigma_i = \eta \frac{q}{F_{\min}}; \quad e_i = \ln \frac{F_0}{F_{\min}}, \quad (5.4)$$

bu yerda Q – kuchning joriy qiymati; F_0 – namunaning ko‘ndalang kesimining boshlang‘ich maydoni.

Ishning muallifi muhandislik aniqligi bilan hisoblashlarda $e_i - \sigma_i$ diagrammani qurish uchun to‘rtta tayanch nuqtasining bo‘lishi yetarli bo‘ladi deb hisoblaydi. Ularga oquvchanlik maydonining boshi va oxiri, bir tekis deformatsiyaning oxiri va yemirilish nuqtasi kiritiladi. Kuchlangan holatni baholash uchun ifodalar quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\sigma_1 - \sigma_{sr} = \frac{2}{3} \sigma_i \frac{e_1}{e_i}; \quad \sigma_2 - \sigma_{sr} = \frac{2}{3} \sigma_i \frac{e_2}{e_i}; \quad \sigma_3 - \sigma_{sr} = \frac{2}{3} \sigma_i \frac{e_3}{e_i}, \quad (5.5)$$

Ular bosh o‘qlarga o‘tishda $\varepsilon_{o'rt} = 0$ ni hisobga olish bilan (5.5) ifodalardan olingan. Tizimni yechishning xususiy holati – tizimga $\sigma_{o'rt}$ ni o‘z ichiga olmaydigan, o‘ng qismi ma’lum bo‘lgan ikkita tenglamani keltirishdan iborat bo‘ladi. Tizim erkin yuza bor bo‘lganda va kuchlanishlarning tarkibiy qismlaridan biri nolga teng bo‘lganda listli shtamplash jarayonlari uchun ($\sigma_3=0$) yechimga ega. Tizimning o‘rniga $v\varepsilon = v\sigma$ monotonlik shartidan foydalaniladi, bunda $\beta = 2/\sqrt{(3 + \nu^2)}$ Lode koeffitsiyenti $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s$ ko‘rinishda plastiklik sharti hisoblanadi, u v_σ ni aniqlaydigan nisbatga o‘rniga qo‘yiladi. Zarrachadan-zarrachaga o‘tish bilan umumiy kuchlangan holat aniqlanadi. Monoton plastik deformatsiyada maksimal kuch masalasini yechish algoritmi adabiyotlarda keltirilgan.

5.4. Plastik deformatsiyaning asosiy qonunlari va usullari

Oldingi bo‘limda plastik shakl o‘zgartirishda hajmning doimiy-ligi sharti va qayishqoq deformatsiyaning bo‘lishi qonuni ko‘rsatib o‘tildi. Biz endi metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlarini tahlil qilish uchun zarur bo‘ladigan boshqa holatlarni ifodalaymiz.

O‘xshashlik tamoyili. O‘xshashlik tamoyilini quyidagicha ifodalash mumkin: agar o‘xshash sharoitlarda bir xil materialdan ishlangan geometrik o‘xshash jismlarni bir xil plastik deformatsiyalash jarayonlari amalga oshirilsa, u holda deformatsiyalash uchun zarur bo‘ladigan solishtirma kuchlar o‘zaro teng bo‘ladi, to‘liq deformatsiya kuchlarining nisbati mos keluvchi chiziqli o‘lchamlarning nisbatlarining kvadratiga, sarflanadigan ishlarning nisbati esa – mos keluvchi chiziqli o‘lchamlarning nisbatlarining kubiga teng bo‘ladi.

Mazkur tamoyil 1879-yilda I.Barba va F.Kik tomonidan ilgari surilgan va qayishqoq deformatsiya uchun 1874-yilda V.L.Kirpichev tomonidan ifodalangan plastik deformatsiyaning o‘xshashlik qonuniga yoyiladi. O‘xshashlik tamoyili juda katta ahamiyatga ega, chunki “model” yoki “namuna” ni sinovlardan o‘tkazish bo‘yicha “natu-

rani” deformatsiyalash jarayonini amalga oshirish uchun mos keluvchi parametrlarni aniqlash, ya’ni metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlarini modellashtirish imkonini beradi.

Biroq plastik deformatsiyalashga, ayniqsa, qizdirilgan metallni plastik deformatsiyalashga V.L.Kirpichevning o‘xshashlik qonunini bevosita qo‘llash mumkin emas, chunki plastik deformatsiya o‘zida anchagina murakkab hodisani taqdim qilish bilan jarayonlarning o‘xshashligini ta’minlaydigan murakkab sharoitlar majmuasini talab qiladi.

Plastik shakl o‘zgartirish jarayonlarining o‘xshashlik shartlari va modellashtirish uslublarini o‘rganishga S.I.Gubkin, A.A.Ilyushin, N.M.Zolotuxin, Ye.N.Moshnin, S.A.Dovnar va boshqalarning bir qator ishlari bag‘ishlangan. Biz Siz bilan plastik deformatsiyalash jarayonlarining eng asosiy o‘xshashlik shartlarini ko‘rib chiqamiz:

1. Tamoyilda ko‘rsatilganidek, deformatsiyalanadigan jismlar geometrik o‘xshash bo‘lishi lozim. Buning uchun “natura” va “model” ning mos keluvchi (yoki o‘xshash) o‘lchamlarining nisbati bir xil bo‘lishi zarur,

$$l_H/l_M = a_H/a_M = h_H/h_M \text{ va hokazolar} = n \quad (5.6)$$

Bu yerda n ni modellashtirish masshtabi deb ataymiz. Bunda natura va modelning mos keluvchi yuzalarining nisbatlari n modellashtirish masshtabining kvadratiga, hajmlarning nisbati esa – kubiga teng bo‘ladi. Shuni qayd qilish lozimki, natura va modelning u yoki bu F_k yuzasining V_u hajmga nisbati turlicha bo‘ladi. n modellashtirish masshtabi ortishi bilan naturada F/V nisbat bu masshtabga teskari proporsional tarzda kamayadi;

2. Natura va modelni deformatsiyalaydigan uskunalarning ishchi qismlarining shakllari geometrik o‘xshash bo‘lishi lozim, ularning mos keluvchi (yoki o‘xshash) o‘lchamlarining (masalan, matritsaning dumaloqligi va boshqalar) n modellashtirish masshtabiga teng bo‘lishi lozim;

3. Model va naturaning deformatsiya darajalari taqqoslanadigan momentlarda bir xil bo‘lishi lozim

$$\varepsilon_M = \varepsilon_H \quad (5.7)$$

Bu talabga rioya qilish, bir tomondan, deformatsiyalashning taqqoslanadigan momentlarida natura va modelning geometrik o'xshashligini ta'minlaydi, boshqa tomonlama esa, boshqa sharoitlar teng bo'lganda mustahkamlanish va mustahkamlanishning kamayishining bir xil darajasini belgilab beradi;

4. Deformatsiyalaydigan uskuna va metallning tutashadigan (kontakt) yuzalari o'rtasida ishqalanish koeffitsiyentlari bir xil bo'lishi lozim. Buning uchun material va uskunaning ishchi yuzalariga ishlov berish, texnologik moylash, shuningdek model va naturaning kontakt yuzalarining tok haroratlari va metallning kontakt yuzalari bo'ylab us sirg'alish tezliklari bir xil bo'lishi zarur,

$$t_{kM}^o = t_{kN}^o, \quad v_{cM} = v_{sN} \quad (5.8)$$

Oxirgi tenglik o'z navbatida model va naturaning deformatsiya tezliklarining, ya'ni ishchi uskunaning harakatlanish tezliklarining teng bo'lishini talab qiladi,

$$v_M = v_n \quad (5.9)$$

Shunda model va naturaning ω deformatsiya tezliklari va t deformatsiyalash vaqti uchun yuqorida keltirilgan tenglama asosida (5.9) nisbatga rioya qilish zarur bo'ladi.

$$\omega_M = n\omega_n \quad \text{ba} \quad t_M = 1/nt_n \quad (5.10)$$

Agar qizdirilgan metallni deformatsiyalashda, moylash bor bo'lganda, erkin yuzalar va kontakt yuzalardan issiqlik berilish sharoitlari bir-biriga yaqin deb hisoblansa, u holda bu tenglamalar bo'yicha tezlik shartlari deformatsiyalashda model va naturaning yuzalarining haroratlari teng bo'lishini ham belgilaydi;

5. Model va natura fizikaviy o'xshash bo'lishi lozim, ya'ni barcha mos keluvchi nuqtalarda bir xil kimyoviy tarkib, bir xil makro

va mikrostruktura, bir xil faza holati, bir xil mustahkamlanish va mustahkamlikning kamayish darajasiga ega bo'lishi lozim. Bularning barchasi pirovardida model va naturaning bir xil mexanik xususiyatlarini yoki ularning hajm bo'ylab bir xil taqsimlanishini belgilaydi.

Boshqa sharoitlar teng bo'lganda fizikaviy o'xshashlik uchun avvalambor, model va naturani deformatsiyalash jarayonining davomiyligi bir xil bo'lishi zarur

$$t_m = t_n,$$

bu o'z navbatida deformatsiya tezliklarining tengligini shartlaydi

$$\omega_m = \omega_n,$$

va n marta kichik modelni deformatsiyalash tezligini shartlaydi

$$v_m = 1/n v_n.$$

Bu talablar taqqoslanadigan jismlarni plastik deformatsiyaga hamrohlik qiladigan fizikaviy va fizikaviy-kimyoviy jarayonlarning, masalan, rekristallanish, kristallitlararo shikastlanishlarning davolanishi va hokazolar kabi jarayonlarning kechish vaqti bo'yicha bir xil sharoitlarga qo'yish zarurligi bilan shartlanadi.

Shu bilan birgalikda bu talablar sinovdan o'tkaziladigan jismlarni deformatsiya tezligining qarshilikka ta'siri bo'yicha bir xil sharoitlarga qo'yadi, bu qizdirish bilan deformatsiyalashda ayniqsa, muhim bo'ladi. Fizikaviy o'xshashlikni ta'minlash uchun yuqorida keltirilgan tenglamalar bilan ifodalanadigan tezlik shartlariga rioya qilishdan tashqari, model va naturaning issiqlik o'xshashligi ham zarur bo'ladi. Issiqlik o'xshashligi uchun bir xil boshlang'ich deformatsiya harorati yetarli bo'lmaydi.

Amaliyot va tajribadan ma'lumki, bir xil materialdan ishlangan, bir xil boshlang'ich haroratgacha qizdirilgan geometrik o'xshash

tayyorlanmalarga bosim bilan ishlov berishda tayyorlanmaning o'lchamlari ortishi bilan solishtirma deformatsiya kuchi kamayadi. Uskunaning katta harakat tezliklari bilan sovuq deformatsiyalash sharoitlarida xuddi shuning o'zi, biroq kamroq darajada kuzatiladi.

Bu hodisani avvalambor shu bilan tushuntirish mumkinki, bir xil boshlang'ich harorat deformatsiya jarayonining o'zida bir xil haroratlarni va ularning teng taqsimlanishini ta'minlamaydi, chunki deformatsiyalanadigan jism va atrof-muhit o'rtasida, shuningdek, uskuna bilan ham issiqlik almashinishi sodir bo'ladi.

Katta o'lchamli jismga geometrik o'xshash bo'lgan kichik o'lchamli jismda yuzaning hajmga nisbati kattaroq bo'ladi va shundan kelib chiqqan holda, boshqa sharoitlar teng bo'lganda deformatsiya jarayonida issiqlik berilishi ko'proq va harorat pastroq bo'ladi, bu solishtirma kuchning ortishiga olib keladi.

Agar qizdirilgan tayyorlanmalarni deformatsiyalashda issiqlik berish faqatgina kuyindi va moylardan toza kontakt yuzalaridan sodir bo'ladi deb qabul qilinsa, u holda issiqlik o'xshashligi deformatsiyalashning tezlik shartida mavjud bo'ladi.

Tezlik shartlarini yuqorida keltirilgan tenglamalar bilan taqqoslash bilan shuni ko'rish mumkinki, ishqalanishning o'xshashligi va fizikaviy o'xshashlikka bir xil tezlik shartlari bilan erishib bo'lmaydi. Buning ustiga, fizikaviy o'xshashlikni ta'minlash uchun zarur bo'ladigan tenglamalarni birlashtirib bo'lmaydi.

Yuqorida aytilganlardan shunday xulosaga kelish mumkinki, aniq modellashtirishni amalga oshirish qiyin, biroq ba'zan amalga oshirsa bo'ladi. Bunda asosiy vazifa yaqinlashuvchi modellashtirish uslublarini aniqlashdan iborat bo'ladi. Bu yo'nalishlar bo'yicha yaqinlashuvchi modellashtirishning boshqa uslublari ham taklif qilingan, biroq umum tomonidan qabul qilingan modellashtirish uslubiyati hozircha mavjud emas, biroq yaqin orada bo'lib qoladi. Amalda to'liq o'xshashlik sharoitlarini yaratish imkoniyati borligiga qaramasdan, o'xshashlik tamoyilini hatto u buzilgan taqdirda ham qo'llashga to'g'ri keladi, bunda eksperimental tarzda aniqlanadigan koeffitsiyentlardan foydalanish bilan tuzatmalar kiritish zarur bo'ladi.

Bu holda tezlik, masshtab va hajm koeffitsiyentlari mavjud bo‘ladi, ulardan deformatsiya kuchlari o‘xshash bo‘lganda foydalalanish mumkin.

Eng kichik qarshilik qonuni

Plastik deformatsiyaga nisbatan G. Treska tomonidan 1865-yilda aytilgan eng kichik qarshilikning asosiy qonuni bugungi kunda S.I. Gubkin tomonidan quyidagicha ifodalangan: «Agar deformatsiyalanadigan jismning nuqtalari turli yo‘nalishlarda ko‘chish imkoniyatiga ega bo‘lsa, u holda deformatsiyalanadigan jismning har bir nuqtasi eng kichik qarshilik yo‘nalishida ko‘chadi».

Eng kichik qarshilik qonunining to‘g‘ridan-to‘g‘ri oqibati, masalan, ochiq shtamlarda shtamplashda burma hosil bo‘lishi bo‘lib hisoblanadi. Metall (5.5-rasm,a) shtamplashning boshlang‘ich davrida yon tomonlarga, shtampning figurasidan tashqariga, yuqorigi va pastki shtamp o‘rtasidagi a oraliqqa oqib chiqq boshlaydi.

Agar metallning b burmaga oqishga qarshiligi bo‘shliqning u yoki bu uchastkalariga oqishga qarshiligidan katta bo‘lsa, shtamp bo‘shlig‘ining elementlarini to‘ldirish mumkin.

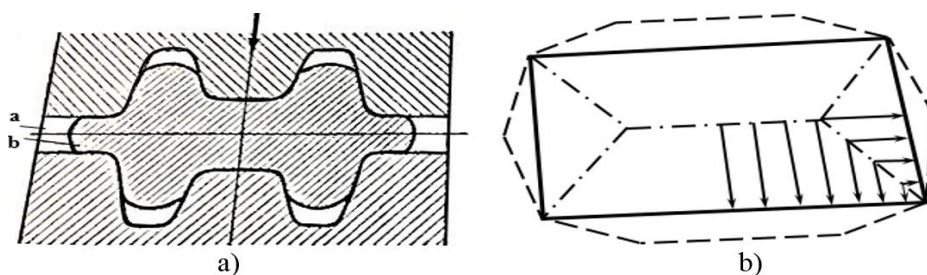
Metallning burmaga oqishga qarshiligi yuqorigi shtampning harakatlanish jarayonida metallning qalinligi kamayishi bilan ortadi, bu pirovardida bo‘shliqning barcha elementlarining to‘lishiga olib keladi.

Eng kichik qarshilik qonunini amalda qo‘llash uchun trayektoriyaning unda joylashgan nuqtalar uchun oqishga qarshilik eng kichik bo‘ladigan yo‘nalishini bilish zarur bo‘ladi.

Kontakt tekisliklari bo‘ylab ishqalanish bor bo‘lganda prizmatik va silindrik jismlarni parallel plitalar (boykalar) orasida siqish holati uchun bu trayektoriyalar eng qisqa normal tamoyili bo‘yicha aniqlanadi, u A.F.Golovin tomonidan quyidagicha ifodalangan: har qanday nuqtaning tashqi kuchning ta‘siriga perpendikulyar bo‘lgan bo‘shliqda ko‘chishi kesimning perimetriga eng qisqa normal bo‘yicha sodir bo‘ladi. E.Zibel tomonidan ham xuddi shunday tamoyil aytilgan. Bu yerda shuni qo‘shimcha qilish lozim bo‘ladiki,

jism maksimal oxirgi deformatsiyani eng ko‘p sonli nuqtalar harakatlanadigan yo‘nalishlar bo‘yicha oladi.

Boshqa bir holatda, aytaylik, to‘g‘ri burchakli asosga ega bo‘lgan prizma siqilayotgan bo‘lsin, uning qandaydir bir tekislik bilan kesilgan kesimi ta’sir qiluvchi kuchning yo‘nalishiga normal bo‘lsin (5.5-rasm,b) da keltirilgan. Nuqtalarning perimetrga qarab eng qisqa normal bo‘yicha ko‘chishi tamoyiliga muvofiq, to‘g‘ri to‘rtburchakni (5.5-rasm,b ga qarang) o‘zida chegara chiziqlarini yoki oqishni ajratuvchi chiziqlarni taqdim qiladigan chiziqlar bilan (shtrix-punktir chiziqlar) ikkita uchburchak va ikkita trapetsiyaga ajratish mumkin, chunki bu chiziqlarda yotadigan nuqtalarning har ikkala tomonidan kesimning perimetriga o‘tkazilgan normallarning uzunligi bir xil bo‘ladi. Nuqtalarning harakatlanish yo‘nalishi 5.5-rasm,b da strelkalar bilan ko‘rsatilgan. Shu bois jismning berilgan kesimda oqish yo‘nalishida joylashgan nuqtalarining sonini hisobga olish bilan qandaydir bir siqishdan keyin kesim 5.5-rasm,b da punktir chiziq bilan ko‘rsatilgan shaklni oladi deb taxmin qilish mumkin. Ravshanki, bizning misolimizda ko‘rib chiqilayotgan jismni siqish darajasi oshirilganda uning ko‘ndalang kesimlarining perimetrlari ellips shakliga qarab intiladi, keyinchalik bu ellipslar aylanalarga aylanadi va shundan keyin nuqtalarning harakati radiuslar bo‘ylab sodir bo‘ladi.



5.5-rasm. Metall shtamplashning boshlang‘ich davrida yon tomonlarga, shtampning figurasidan tashqariga yuqorigi va pastki shtamp o‘rtasidagi *a* oraliqqa oqib chiqa boshlaydi (a) va uning qandaydir bir tekislik bilan kesilgan kesimi ta’sir qiluvchi kuchning yo‘nalishiga normal bo‘lgan to‘g‘ri burchakli asosga ega bo‘lgan prizma siqilmoqda (b).

Siqishda jismning ko'ndalang kesimlarining shaklining o'zgarishining bunday qonuniyati 1908-yilda S.Zobbe tomonidan aniqlangan, natijada u eng kichik perimetr tamoyilini ifodalagan. Bu tamoyilni quyidagicha ifodalash mumkin:

«Prizmatik yoki silindrik jismning ko'ndalang kesimining har qanday shakli jism kontakt ishqalanishi bor bo'lganda plastik siqilganda berilgan maydonda eng kichik perimetrغا ega bo'lgan shaklni qabul qilishga intiladi, ya'ni chegaralar aylanaga qarab intiladi».

Eng kichik perimetr tamoyili A.F.Golovin, S.I.Gubkin, L.A.Shofman va boshqalarning ishlarida ko'p marta diqqat bilan eksperimental tarzda tekshirishga tortilgan.

Eng kichik perimetr tamoyili deformatsiyalanadigan jismning nuqtalari eng qisqa normallar bo'ylab ta'sir qiluvchi kuchning yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan kesimlarning perimetrlariga qarab harakatlenganda adolatli bo'ladi. Keyinchalik eng qisqa normal har doim ham eng kichik qarshilikning yo'nalishi bo'lib hisoblanavermasligi, bu faqatgina quyidagi shartlarda mumkin bo'lishi aniqlangan:

1 – agar metall bilan uskunaning kontakt yuzalarida ishqalanish izotrop bo'lsa, ya'ni barcha yo'nalishlar bo'yicha bir xil bo'lsa;

2 – agar kontakt ishqalanish ko'effitsiyentining qiymati katta bo'lsa.

Eng kichik qarshilik qonunini nazariy tadqiqotlarni o'tkazishda va amaliy masalalarni yechishda hisobga olish lozim bo'ladi. Masalan, dumaloq quymani siqish bilan shtamplashni ko'pgina hollarda kvadrat ko'ndalang kesimga ega bo'lgan tayyorlanma bilan amalga oshirish mumkin.

Deformatsiyalarning notekisligi va qo'shimcha kuchlanishlar qonuni

Ilgari aniqlanganidek, nuqtaning kuchlangan holati to'liq kuchlanishlar tenzori bilan belgilanadi. Jismning bir nuqtasidan boshqasiga o'tishda kuchlanishlar tenzorining tarkibiy qismlari, umumiy

holatda, o'zgaradi, bosh o'qlarning yo'nalishlari ham o'zgaradi. Shu sababli jismning kuchlangan holati to'g'risida to'liq tasavvurni olish uchun uning barcha nuqtalarining kuchlangan holatini bilish, boshqacha qilib aytganda, kuchlanishlarning taqsimlanishini bilish zarur bo'ladi.

Ba'zi bir xususiy hollarda jismning barcha nuqtalari xuddi o'sha bitta kuchlanishlar tenzori bilan tavsiflanadigan bir xil kuchlangan holatga ega bo'lishi mumkin. Masalan, namunani bo'yin hosil bo'lish momentigacha chiziqli cho'zishda namunaning har qanday nuqtalaridagi (qisish joylaridan uzoqda bo'lgan) kuchlanishlar bir xil bo'ladi, namunaning kuchlangan holati bir jinsli bo'ladi, deformatsiya ham bir jinsli bo'ladi.

Bir jinsli deformatsiyada siqiladigan parallelepiped ko'ndalang kesimlari boshlang'ich parallelepipedning ko'ndalang kesimlariga o'xshash bo'lgan parallelepipedga aylanib qoladi. Bir jinsli deformatsiya umumiy holatda shu bilan tavsiflanadiki, ko'chishlarning u_x , u_y va u_z tarkibiy qismlari koordinatalarning chiziqli funksiyalari bo'lib hisoblanadi va berilgan har qanday yo'nalishda jismning barcha nuqtalari uchun bir xil bo'ladi.

Tekisliklar va to'g'ri chiziqlar deformatsiyalash paytida ham, undan keyin ham tekislik va to'g'ri chiziqlicha qolaveradi; jismda ajratilgan shar ellipsoidga aylanadi; geometrik o'xshash bo'lgan va bir xil joylashgan elementlar deformatsiyalash jarayonida qiyshaysada, geometrik o'xshash bo'lib qolaveradi.

Metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlarida plastik deformatsiyalashda bir jinsli deformatsiya amalda bo'lmaydi, biroq masalalarni nazariy yechishda tekisliklar va to'g'ri chiziqlar deformatsiyalashda og'ishmaydi deb hisoblashga shartli ravishda yo'l qo'yiladi.

Metallarga bosim bilan ishlov berishda, qoidaga ko'ra, kuchlangan holatning bir jinsli emasligi, va shundan kelib chiqqan holda, deformatsiyaning ham bir jinsli emasligi vujudga keladi. Bu masala bir qator tadqiqotchilar tomonidan o'rganilgan, ularning orasidan birinchi navbatda I.M.Pavlov, S.I.Gubkin, N.I.Korneyev va boshqalarni eslatib o'tish joiz bo'ladi.

Deformatsiyaning bir jinsli bo'lmashligi sababli plastik deformatsiyalanadigan jismning alohida qatlamlari va elementlari o'lchamlarning turlicha o'zgarishiga qarab intiladi. Shu bilan birgalikda jismning alohida qatlamlari va elementlari qo'shni qatlamlar va elementlarga ta'sir ko'rsatmasdan o'zlarining o'lchamlarini mustaqil ravishda o'zgartira olmaydi.

S.I.Gubkinning fikriga ko'ra, «*Shu sababli o'lchamlarini o'rtacha (qandaydir bir) o'rtacha qiymatga qaraganda kattaroq qilib o'zgartirishga intiladigan qatlamlar va elementlar o'lchamlarini kichikroq qilib o'zgartirishga intilayotgan qatlamlar va elementlarga o'lchamlarning o'zgarishini oshiradigan kuchlarni beradi. O'lchamlarini o'rtacha (qandaydir bir) o'rtacha qiymatga qaraganda kichikroq qilib o'zgartirishga intiladigan qatlamlar va elementlar o'lchamlarini kattaroq qilib o'zgartirishga intilayotgan qatlamlar va elementlarga o'lchamlarning o'zgarishini kamaytiradigan kuchlarni beradi*».

Natijada jismda qo'yilgan tashqi kuchlarni muvozanatlaydigan ichki kuchlardan tashqari, bir-birini o'zaro muvozanatlaydigan ichki kuchlar ham vujudga keladi, bu kuchlar konturdagi sharoitlar va muvozanat tenglamalari bilan qaytarilmaydigan kuchlanishlarni shartlaydi. Ular kuchlangan holatning tashqi kuchlarga mos keladigan sxemasi bilan aniqlanmaydi. Bu o'zaro muvozanatlanadigan kuchlanishlar S.I.Gubkin tomonidan «*qo'shimcha kuchlanishlar*» deb atalgan va kuchlangan holatning bir jinsli bo'lmashligini hisobga olish bilan S.I.Gubkin uni «*qo'shimcha kuchlanishlar qonuni*» deb ifodalagan.

Demak, «*shakl har qanday plastik o'zgartirilganda jismning o'lchamlarini kattaroq qilib o'zgartirishga intilyotgan qatlamlari va elementlarida ularning belgisi o'lchamlarning kichrayishiga javob beradigan qo'shimcha kuchlanishlar vujudga keladi, jismning o'lchamlarini kichikroq qilib o'zgartirishga intilayotgan qatlamlari va elementlarida esa ularning belgisi o'lchamlarning ortishiga javob beradigan qo'shimcha kuchlanishlar vujudga keladi*».

Qo‘shimcha kuchlanishlar uchta turda bo‘ladi:

1 – 1-turdagi qo‘shimcha kuchlanishlar, jismning alohida qatlamlari o‘rtasida muvozanatlanadi;

2 – 2-turdagi qo‘shimcha kuchlanishlar, alohida kristallitlar o‘rtasida muvozanatlanadi;

3 – 3-turdagi qo‘shimcha kuchlanishlar, kristallitlarning alohida elementlari o‘rtasida muvozanatlanadi.

Qo‘shimcha kuchlanishlar deformatsiyalanadigan jismda vujudga kelish bilan:

a – yuklama olingandan keyin jismda «*qoldiq kuchlanishlar*¹» ko‘rinishida qolishi mumkin, bu umumiy holatda metallning plastiklik xususiyatining pasayishi, kimyoviy bardoshlilikning kamayishi, tasmalar, burmalar va hokazolarning hosil bo‘lishiga olib kelishi mumkin;

b – qatlamlar va elementlarda qo‘shimcha siljishlar hisobiga vujudga keladigan plastik deformatsiya hisobiga bartaraf bo‘lishi mumkin;

d – alohida qatlamlar va elementlarda jismning yaxlitligining buzilishi hisobiga bartaraf bo‘lishi, ya’ni makro va mikroyoriqlarni chaqirishi mumkin, bu bosim bilan ishlov berish orqali olinadigan tayyorlanmalarni yaroqsizga chiqaradi.

Deformatsiyalash jarayonida qo‘shimcha kuchlanishlarning vujudga kelishi metallarga bosim bilan ishlov berishda xohlanmaydigan quyidagi oqibatlarini chaqiradi:

a – deformatsiyaga qarshilikning ortishi;

b – plastiklikning kamayishi;

d – jismda kuchlanishlarning konturdagi shart-sharoitlar va muvozanat shartlaridan kelib chiqadigan taqsimlanish manzarasidan og‘ishish.

Eslatma: ¹Ko‘pgina adabiyotlarda ba’zan «*qoldiq kuchlanishlar*» atamasining o‘rniga «*tashqi*» kuchlanishlar mavjud emasligini hisobga olmasdan «*ichki kuchlanishlar*» degan noto‘g‘ri atama qo‘llaniladi.

Kuchlangan holatning notekisligi umumiy holat bo‘lib, bir jinsli deformatsiya esa – xususiy holat bo‘lib hisoblanishi sababli, notekis kuchlangan holatni chaqiradigan sabablar to‘g‘risida bir narsa deyish qiyin.

Plastik deformatsiyalashda kontakt ishqalanishi

Metallarga bosim bilan ishlov berish operatsiyalarining katta qismi ishlov beriladigan metallning bosadigan uskuna bilan tutashishi sharoitlarida amalga oshiriladi. Bunda deformatsiyalanadigan metall uskunaning yuzasi bo‘ylab sirg‘alishga intiladi, natijada bu sirg‘alishni qiyinlashtiradigan kontakt ishqalanish kuchlari vujudga keladi.

Metallarga bosim bilan ishlov berishda, ba’zi bir operatsiyalardan tashqari, ishqalanish katta rol o‘ynaganda (masalan, prokatlash, dumaloqlash), u zararli omil bo‘lib hisoblanadi:

1 – kontakt ishqalanishi deformatsiyaning bir jinsli bo‘lmasligining vujudga kelishiga olib keladi va agar bir jinsli bo‘lmaslik amalga oshiriladigan operatsiyaning xarakteri bilan belgilansa – bu bir jinsli bo‘lmaslikni kuchaytiradi. Bu shu bilan tushuntiriladiki, kontakt yuzasining har bir nuqtasida deformatsiyalanadigan jismning kontakt yuzalariga har bir berilgan nuqtada uskunaning yuzasiga nisbatan metallning yo‘nalishiga teskari yo‘nalishda yo‘nalgan elementar urinma kuchlanishlar vujudga keladi. Natijada kuchlangan holatning sxemasining o‘zi ham o‘zgarishi mumkin;

2 – kontakt ishqalanishi pirovardida faol yuklama bilan yengib o‘tiladi. Shundan kelib chiqqan holda, kontakt ishqalanishi zaruriy deformatsiyalovchi kuchni va deformatsiya ishini oshiradi. Kuchning ortishi juda sezilarli bo‘ladi – u bir necha marta ortadi;

3 – kontakt ishqalanishi kontakt yuzasining bevosita yedirilishi natijasida ham, yuzaning qo‘shimcha qizishi va deformatsiyalaydigan kuchning ortishi bois kuchlanishlarning ortishi natijasida ham uskunaning bardoshlilikini kamaytiradi.

Plastik deformatsiyalashdagi ishqalanish kinematik juftliklardagi sirg‘alish ishqalanishidan katta farq qiladi.

Kinematik juftliklarda tutashuvchi yuzalar o‘rtasidagi bosim nisbatan kichik bo‘ladi va bu yuzalar qayishqoq deformatsiyalangan holatda bo‘ladi.

Plastik deformatsiyalashda uskunaning yuzasi qayishqoq deformatsiyalangan bo‘ladi, ishlov beriladigan jism esa plastik deformatsiyalanadi va uning yuzasi ezilishga tortiladi va uskuna yuzasining shaklini qabul qilishga intiladi. Natijada haqiqiy tutashish maydoni ikkinchi holatda kattaroq bo‘ladi, bu yuqori solishtirma bosim bor bo‘lganda kattagina molekulyar tishlashish kuchlarini chaqirishi mumkin.

Kinematik juftliklarda ishqalanuvchi yuzalarning yedirilish mahsulotlarining mexanik ajralishi bilan yedirilishi va yaroqsiz holga kelishi sodir bo‘ladi. Chunki materiallarda doimiy ravishda ishqalanish va yedirilish holatlari kuzatiladi.

Plastik deformatsiyalashda deformatsiyalanadigan jismning kontakt yuzasining uzluksiz “yangilanishi” asosiy ahamiyat kasb etadi, chunki deformatsiyalash jarayonida bu yuzaga pastdan yangi metall zarrachalari uzluksiz chiqib kelaveradi.

Ko‘rsatilgan holatlar shundan dalolat beradiki, mashinalardagi odatdagi ishqalanishni tavsiflash uchun yetarlicha aniq bo‘lmagan **$R=\mu N$ Kulon qonuni** plastik deformatsiyalashda ishqalanish kuchlanishlarining kattaliklarini aniqlash uchun yanayam kamroq darajada yaroqli bo‘ladi. Biroq plastik ishqalanish hodisasi yetarlicha o‘rganilmaganligi sababli metallarga bosim bilan ishlov berish operatsiyalarini tahlil qilishda, yo‘l qo‘yilish sifatida, Kulon qonunidan foydalanishga to‘g‘ri keladi.

μ ishqalanish koeffitsiyentining qiymati plastik deformatsiyalash sharoitlari uchun maxsus aniqlanadi. To‘g‘ri, bu qiymatlarni topishning yetarlicha aniq uslubi hozircha mavjud emas. Shuni hisobga olish lozimki, ishqalanish koeffitsiyentlarining mashinalarda ishqalanish sharoitlari uchun topilgan qiymatlari plastik deformatsiyalashda kontakt ishqalanish kuchlarini aniqlash uchun hech qandayiga to‘g‘ri kelmaydi.

Umuman olganda shuni aytish mumkinki, plastik deformatsiyada ishqalanish koeffitsiyentining qiymatlari odatdagi sirg‘alish ishqalanishiga qaraganda katta bo‘ladi.

Bu yo‘nalishlar bo‘yicha ko‘plab tadqiqotlar o‘tkazilgan, S.I.Gubkin, M.V.Vratskiy, I.M.Pavlov va boshqalar tomonidan

o‘tkazilgan tadqiqotlarning ko‘rsatishicha, kontakt ishqalanish koeffitsiyentining qiymati metallning uskuna yuzasi bo‘ylab nisbiy sirg‘alish tezligi ortishi bilan, ya’ni deformatsiyalash tezligi ortishi bilan ortadi. Xususan, bolg‘a (molot) bilan ishlov berishda kontakt ishqalanish koeffitsiyenti presslarda ishlov berishga qaraganda 20-25% ga kichik. Bundan tashqari, ishqalanish koeffitsiyentiga yuklamaning xarakteri ham ta’sir ko‘rsatadi.

Moylash ishqalanish koeffitsiyentini kamaytirish uchun o‘ta katta ahamiyat kasb etadi. Ratsional tanlangan moylash ishqalanish koeffitsiyentini bir necha marta kamaytiradi. Moylash yaxshi moylaydigan plenka hosil qilishi, kontakt yuzalariga yaxshi yopishishi va shu bilan birgalikda ishlov berish tugagandan keyin oson tozalanadigan bo‘lishi lozim. Shu sababli bu ishlov berishlar orasida bosadigan uskunaning yuzasiga ishlov berish sifatini oshirish va turlicha mo‘ljallanishli uskunalar uchun moylashni qo‘llash ko‘proq samarali bo‘lib hisoblanadi.

5.5. Materiallarning vizioplastiklik uslublari

Bu uslub E.Tomsen tomonidan taklif qilingan. U plastik deformatsiyaning kichik ortishlarining yo‘nalishlari deformatsiya tezliklarining yo‘nalishlariga mos keladi deb taxmin qilish bilan koordinata to‘rining og‘ishishlari bo‘yicha oqish tezliklarini aniqlash imkonini beradi. Uslub asosan qaror topgan plastik shakl o‘zgartirish jarayonlarining kinematikasini tadqiq qilish uchun qo‘llaniladi. Tayyorlanmaning meridional kesimiga koordinatalar to‘ri kiritiladi, bunda chiziqlar tizimi oilalaridan bittasi oqish chiziqlari bilan mos tushishi uchun metallning oqish yo‘nalishida yo‘naltiriladi. Deformatsiyalash Δt vaqt davomida intervallar bilan olib boriladi. Har bir to‘xtashdan keyin to‘rning og‘ishishi qayd qilinadi, deformatsiyalar aniqlanadi, ularning ortishi bo‘yicha esa (masalan, $\Delta \epsilon_r$) to‘rning tugunlarida deformatsiya tezliklari topiladi $\dot{\epsilon}_p = \Delta \epsilon_p / \Delta t$.

Uslubning boshqa M.V.Storojev variantida og‘ishgan to‘rni qayd qilish o‘rniga oqish chizig‘iga urinmalarning bo‘ylama

koordinatalar o'qiga nisbatan burchagi aniqlanadi. Bu holda oqish tezligini tarkib toptiruvchilar

$$v_x = v_0 \frac{a}{a_0} \sin \alpha; \quad v_y = v_0 \frac{a}{a_0} \sin \alpha \quad (5.11)$$

ifodalar bilan aniqlanadi, bu yerda v_0 – deformatsiyalashning boshlang'ich tezligi; a, a_0 – boshlang'ich momentda va Δt vaqtda oqish chizig'idagi qo'shni belgilar o'rtasidagi masofa.

Har ikkala uslub birinchi holatda deformatsion nazariyadan va ikkinchi holatda oqish nazariyasidan foydalanadigan bosqichli uslub bo'lib hisoblanadi.

Uslubni takomillashtirish oqish nazariyasidan foydalanilganda faqatgina oqish to'rining oqish chiziqlari deb ataluvchi bo'ylama chiziqlarining og'ishishini tasvirlaydigan oqish funksiyasini kiritish hisobiga oxirgi deformatsiyalarni olish bilan bog'lanadi.

Funksiya toki va chizig'i nima? Umumiy holatda har qanday zarrachaning harakatini zarrachaning qutb deb ataluvchi nuqtasi orqali o'tadigan oniy o'qqa nisbatan ilgarilanma, deformatsion va aylanma harakatiga yoyish mumkin. Bu harakatni tasvirlash uchun gidromexanikada asosan qo'zg'almas koordinatalar tizimiga ega bo'lgan Eyler uslubidan foydalaniladi. Harakat to'g'risida ko'proq to'liq ma'lumotlarni beradigan Lagranj uslubi esa oqimda joylashgan qo'zg'aluvchan koordinatalar tizimi bilan bog'lanadi va ko'proq ulkan deb hisoblanadi.

Gidromexanikada qattiq jismni real suyuqlik oqimi yalaganda chegara qatlam va tashqi oqim sohalari ajratiladi. Tashqi oqim sohasida suyuqlikka siljituvchi va cho'zuvchi kuchlarga qarshilik ko'rsatmaydigan, yopishmaydigan va siqilmaydigan muhit sifatida qaraladi. Bunday suyuqlikning statsionar harakatining barcha parametrlari koordinatalar va vaqtga bog'liq bo'ladi. Bunday oqish girdobsiz oqish deb hisoblanadi. Girdob yoki rotor yaxlit muhit zarrachalarining v oqish tezliklari vektor maydonining tavsiflaridan biri bo'lib hisoblanadi va uning aylanishining ω burchak tezligining yarmiga teng bo'ladi.

Gidromexanikada fizikaviy girdob – suyuqlik zarrachalari guruhining xuddi qattiq jismga o‘xshab oniy o‘q atrofida bir xil burchak tezligi bilan aylanishi va hisobiy girdob ajratiladi, hisobiy girdobning tarkibiy qismlari oqish tezligining tarkibiy qismlarining hosilalari orqali aniqlanadi va

$$\begin{aligned}\omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = 0; \quad \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) = 0; \quad \omega_z \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = 0\end{aligned}$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.

Bundan

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial y}; \quad \frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial x}; \quad \frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial y} \quad (5.12)$$

Shunday qilib, girdobli oqimda v chiziqli tezlik va ω burchak tezlikning vektor maydonlari mavjud bo‘ladi.

Harakatni geometrik taqdim qilishni oqish chiziqlari maydonini qurish yordamida tuzish mumkin. Oqish chizig‘i uchun unga o‘tkazilgan urinma har bir nuqtada shu nuqtadagi tezlikning yo‘nalishi bilan mos tushadi. Uning tenglamasi

$$\partial x/v_x = \partial y/v_y = \partial z/v_z \quad (5.13)$$

ko‘rinishga ega boladi.

Qaror topgan oqishdan oqih chiziqlari va zarrachalarning harakat trayektoriyalari mos tushadi. Qaror topmagan oqishdan oqih chiziqlari va trayektoriyalarning shakillarni solishtirish ma’noga ega bo‘lmaydi, chunki oqish chizig‘i vaqt momenti uchun quriladi, harakat trayektoriyasi esa uning oxirgi oralig‘i uchun quriladi.

Yassi va o‘q simmetrik potensial oqishlarda $F(x, y, t)$ va $F(p, z, t)$ koordinatalar funksiyalari mavjud bo‘ladi, ular tezliklar maydonini belgilaydi va oqish funksiyalari deb ataladi. Oqish chig‘ining

umumiy xususiyati – uning barcha nuqtalarida oqish funksiyasining qiymatining doimiyligi bo‘lib hisoblanadi. Ikkita turli chiziqlar uchun oqish funksiyasining qiymatlari o‘rtasidagi farq ular o‘rtasidagi suyuqlik sarfiga teng bo‘ladi va oqish chiziqlarining shakliga bog‘liq bo‘lmaydi. Uch o‘lchovli potensial oqish uchun oqish funksiyasi mavjud emas. Bu – oqimda ularda oqish tezliklari hamma joyda ularga urinma bo‘ladigan yopiq yuzalar yo‘qligini bildiradi.

Siqilmaydigan suyuqlikning oqishida oqish funksiyaidan koordinatalar bo‘yicha olingan xususiy hosilalar quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\frac{\partial F}{\partial y} = v_x; \quad \frac{\partial F}{\partial x} = -v_y; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial \rho} = -v_z; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial z} = v_p \quad (5.14)$$

Bunday funksiyaning mavjud bo‘lishi uchun zaruriy va yetarli shart oqishning usluksizligi shartining bajarilishi bo‘lib hisoblanadi. Bu shartga quyidagi tenglamalarni qanoatlantiradigan oqish funksiyasi mos keladi:

$$\begin{aligned} \text{yassi oqish uchun} \quad & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial x} = 0; \\ \text{o‘q simmetrik oqish uchun} \quad & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = 0. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Tashqi oqimda oqish tezligining vektor maydoni girdobsiz bo‘lganligi sababli oqish tezligi $\psi(x, u, z, t)$ potensialga ega. Formuladagi tenglik uning mavjud bo‘lishining zaruriy va yetarli shartlari bo‘lib hisoblanadi. Shunda

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad v_y = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v_z = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (5.16)$$

ni olamiz.

Potensialning teng darajasining chiziqlari (ekvipotensiallar) oqish chiziqlariga ortogonal bo‘ladi va potensial oqimning to‘rini hosil qiladi.

Yassi potensial oqimda tezlik va oqish potentsiali funksiyalari o‘rtasidagi bog‘lanishlar

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial y}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad (5.17)$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.

O‘q simmetrik potensial oqimda tezlikning potentsiali va oqish funksiyasi ortogonal bo‘lib qolaveradi, biroq turlicha o‘lchamlilikka ega bo‘ladi va turli bog‘lanishlar bilan tasvirlanadi:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial \rho}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial z} \quad (5.18)$$

Yassi va o‘q simmetrik potensial oqimda tezlikning potentsiali va oqish funksiyasi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘lgan Laplas tenglamasini qanoatlantiradi:

yassi oqish uchun

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0; \quad \text{yoki} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0;$$

O‘q simmetrik oqish uchun

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = 0 \quad \text{yoki} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} = 0. \quad (5.19)$$

Uch o‘lchovli oqish uchun Laplas tenglamasi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (5.20)$$

Plastik oqishda siljish burchaklari (tezliklari) $\gamma_1 \neq \gamma_2$ ($\gamma_1 \neq \gamma_2$) bo‘lganda elementar prizmaning siljish deformatsiyasini (deformatsiya tezligini) sof siljish (siljish tezligi) va qattiq burilishga (aylanishga) yoyish mumkin. Sof siljish (sof siljish tezligi) deformatsiya tenzorining (deformatsiya tezligining) simmetrik qismi bilan tasvirlanadi va prizmaning qirralari bo‘ylab $(\gamma_1 + \gamma_2) / 2$ ($(\gamma_1 + \gamma_2) / 2$) ga teng bo‘lgan bir xil siljishlarni (siljish tezliklarini) ko‘zda tutadi.

Prizmaning ω burchak tezligi bilan, oqish tezligi vektorining girdobi (yoki rotori) bilan tavsiflanadigan qattiq aylanishi deformatsiya tezligi tenzorining qiyshiq simmetrik qismi bilan aniqlanadi.

Plastik oqishni umumiy matematika fanida tan olingan model-lardan birida tasvirlashda elementar prizmani deformatsiyalash uning qo'shnilaridan izolyatsiyalangan tarzda ko'rib chiqiladi. Bu deforma-tsiya tenzorining (deformatsiya tezligining) qiyshiq simmetrik qismini nolga teng deb hisoblash imkonini beradi, bu o'zgaruvchilar sonining kamayishi hisobiga matematik hisoblashlarni soddalash-tiradi. Elementar prizmaning muvozanat sharti bajarilishi uchun urinma kuchlanishlarning juft-juftligi shartini qabul qilish talab qilinadi. Bu shart chiziqli qayishqoqlik klassik nazariyasida qonun bo'lib va kuchlanishlarning o'zarolik qonunining xususiy holati bo'lib hisoblanadi.

Katta kuchlanishlar gradiyentiga ega bo'lgan katta deforma-tsiyalar holati uchun (nochiziqli qayishqoqlik nazariyasi masalalari va plastiklik nazariyasining ba'zi bir masalalari uchun) deforma-tsiyaning boshqa aniqlashtirilgan modeli mavjud. U elementar priz-maning har qanday maydonchasidagi kuchlanishlar vektori, ayniqsa agar bu prizma tayrlanmaning chekkasida joylashgan deb hisoblansa, ko'rib chiqilayotgan maydonchaning markaziga nisbatan qandaydir bir ekstsentrisitetga ega deb hisoblashga yo'l qo'yadi. Kuchlanish-larning tarkibiy qismlarini elementar prizmaning qirralarining marka-ziga ko'chirib o'tkazishda muvozanat tenglamalarida normal va urinma kuchlanishlardan tashqari "momental" kuchlanishlar paydo bo'ladi. Umumiy ko'rinishda bu tenglamalar urinma kuchlanish-larning juft-juftligiga rioya qilishni talab qilmaydi va kuchlanishlar va deformatsiya tenzori nosimmetrik bo'lib qoladi. Biroq hozirgi kunda kuchlanishlar va deformatsiya (deformatsiya tezliklari) tenzor-larining qiyshiq simmetrik qismlari o'rtasida, bu tenzorlarning sim-metrik qismlari uchun qabul qilinganidek, tenzorlar nisbati aniqlan-magan.

Shuni qayd qilamizki, agar urinma kuchlanishlarning juft-juftligi shartiga rioya qilinsa, u holda faqatgina deformatsiya varianti mumkin bo'ladi. Bu shartdan voz kechilganda unda cheksiz kichik

bir xil siljishlar natijasida prizmaning qattiq burilishi sodir bo'ladigan variant ham mumkin bo'ladi. Shundan kelib chiqqan holda, plastik deformatsiya sodir bo'lishi mumkin, biroq u birinchi modelga muvofiq uni tahlil qilishga bo'lgan yondashuvda sezilarli bo'lmaydi.

Prizmaning amaldagi plastik deformatsiyasi energiya sarflash bilan qo'shni zarrachalarga ta'sir ko'rsatadi. Girdob gradiyentini voronkaning klotoid bo'yicha ishlangan bukilgan-bo'rtik profili bilan ishlangan matritsalarini qo'llash bilan minimallashtirish bosishda plastik oqishning notekisligini kamaytirish imkonini bergan va qiyin deformatsiyalanadigan materiallarga ishlov berish imkoniyatini ta'minlagan. Tayyorlanma metallining plastik deformatsiyalanadigan chegara qatlamiga burilishning girdob yordamida tasvirlanadigan almashuvchan yo'nalishiga ega bo'lgan yaxmalaklar tizimi sifatida qarash bosishda moylashning tayyorlanmaga oqish yo'nalishida ta'sir ko'rsatishi mexanizmini tushuntirish imkonini bergan.

Moylash bilan statsionar o'q simmetrik bosish ishini tahlil qilishda (5.6-rasm) plastik zonaga kirishda oqish funksiyasi $F_i = \pi R_i^2 v_0$ ifoda bilan, chiqishda esa $F_i = \pi r_i^2 v_0 \mu_B$ ifoda bilan aniqlangan, bu yerda R_i, r_i – plastik zonaning boshi va oxirida Oz simmetriya o'qidan i-oqish chizig'igacha bo'lgan masofa; $\mu_B = \frac{R_0^2}{r_0^2}$ – cho'zilish koeffitsiyenti. Oqish tezligining radial va o'q tarkibiy qismlari

$$v_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi_i}{\partial z}; \quad v_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho}. \quad (5.21)$$

formulalar bo'yicha aniqlanadi.

Tarkibiy qismlarning belgisi OZ o'qning yo'nalishi bilan belgilanadi.

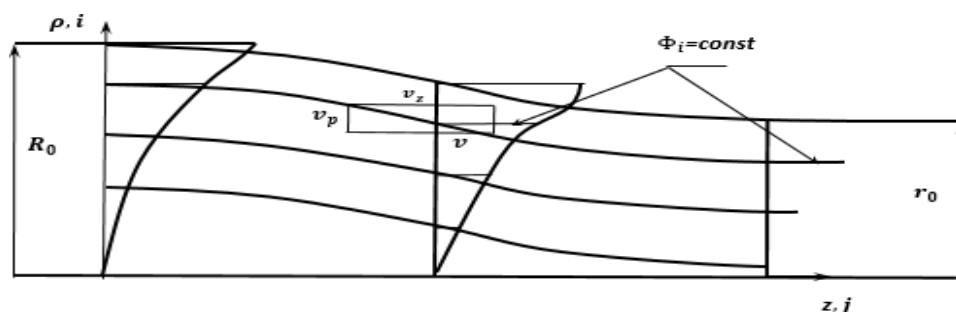
Deformatsiya tezligi tenzorining tarkibiy qismlari va deformatsiya tezliklarining shiddati

$$\dot{\epsilon}_\varphi = \frac{v_\rho}{\rho} = -\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z}; \quad \dot{\epsilon}_\rho = \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho \partial z}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho \partial z}; \quad (5.22)$$

$$\dot{\gamma}_{\rho z} = \frac{\partial v_{\rho}}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2};$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{3} \sqrt{2 \left[(\dot{\varepsilon}_{\rho} - \dot{\varepsilon}_{\varphi})^2 + (\dot{\varepsilon}_{\varphi} - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_{\rho})^2 + 3\dot{\gamma}_{\rho z}^2 \right]}.$$

ko‘rinishga ega bo‘ladi.



5.6-rasm. Bosishda oqish chiziqlarining va oqish funksiyasi taqsimlanishining sxematik ko‘rinishi.

Kuchlanishlar tenzorining tarkibiy qismlari oqish nazariyasi-ning bog‘lanishlari va Maksvell – Guber – Mizes $\sigma_i = \sigma_s$ plastiklik sharti bo‘yicha aniqlanadi:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\rho} - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_{\varphi})^2 + (\sigma_{\varphi} - \sigma_{\rho})^2 + 6\tau_{\rho z}^2} = \sigma_s(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (5.23)$$

bunda avval

$$\tau_{\rho z} = \dot{\gamma}_{\rho z} \frac{\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} = \frac{\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} \right) \quad (5.24)$$

aniqlanadi.

$\sigma_{o'rt}$ ni aniqlamasdan turib σ_z ni topish uchun silindrik koordinatalar tizimida

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{\rho z}}{\rho} = 0; \quad \sigma_z = \sigma_{z_0} + \int_0^{z=a} \left(\frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{\rho z}}{\rho} \right) \partial z \quad (5.25)$$

ko‘rinishga ega bo‘lgan muvozanat tenglamasi integrallanadi.

Integrallash doimiysi puansonidagi qattiq va plastik zonalarning chegarasi bo‘ylab doimiy bo‘lgan va $\sigma_{z_0} = Q/\pi R_0^2$ ga teng bo‘lgan o‘rtacha solishtirma kuch sifatida aniqlanadi, bu yerda Q – “yurish-kuch” diagrammasining gorizontaal uchastkasida qayd qilinadigan bosish kuchi.

Kuchlanishlar tenzorining boshqa tarkibiy qismlari (5.26) bog‘lanishlar bo‘yicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= \sigma_z + 2 \frac{\sigma_i}{3\dot{\epsilon}_i} (\dot{\epsilon}_\rho - \dot{\epsilon}_z) = \sigma_{cp} + 2 \frac{\sigma_i}{3\dot{\epsilon}_i} \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial F}{\partial z} - 2 \frac{\sigma_i}{3\dot{\epsilon}_i} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 F}{\partial \rho \partial z}; \\ \sigma_\varphi &= \sigma_z + 2 \frac{\sigma_i}{3\dot{\epsilon}_i} (\dot{\epsilon}_\varphi - \dot{\epsilon}_z) \sigma_{cp} - 2 \frac{\sigma_i}{3\dot{\epsilon}_i} \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial F}{\partial z}; \\ \sigma_z &= \sigma_{cp} + 2 \frac{\sigma_i}{3\dot{\epsilon}_i} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 F}{\partial \rho \partial z}. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Belgilangan z da oqish chiqirlari maydonini r yo‘nalishda approksimatsiyalash uchun M.V.Storojevning ishida $F_{ij}^{(\rho)} = a_j \rho^{b_j} e^{c_j \rho}$ bog‘lanishdan foydalanilgan. Belgilangan ρ da $F_{ij}^{(\rho)}$ qiymatlar z yo‘nalishida Lagranj polinomi bilan approksimatsiyalangan

$$F_{ij}^{(z)} = d_i z^5 - f_i z^4 + k_i z^3 + m_i z^2 + n_i z - q_i \quad (5.27)$$

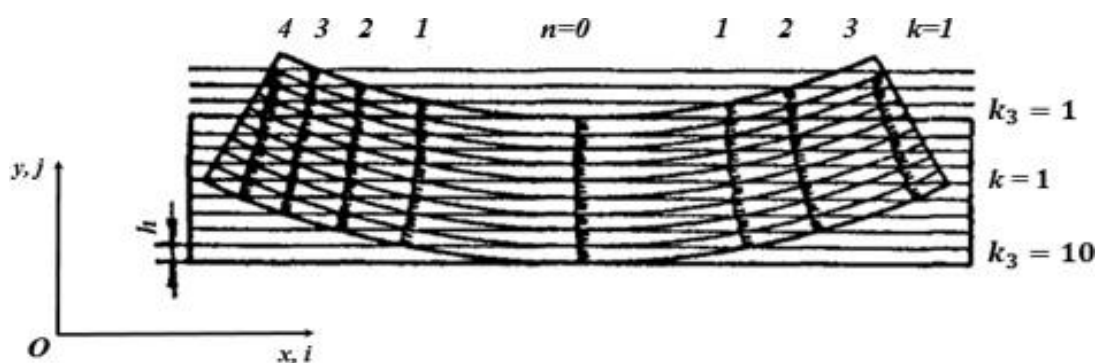
Har ikkala approksimatsiyalovchi bog‘lanishlarning a, b, s, d, fk, m, n, q koeffitsiyentlari eng kichik kvadratlar uslubi bilan aniqlangan. Approksimatsiyalashning sifati ikkinchi hosilaning o‘zgarish xarakteri buyicha baholangan. U belgisini o‘zgartirmasligi lozim. Bu deformatsiya o‘chog‘ida belgisini navbatma-navbat

almashtiradigan kuchlar yoʻqligini koʻrsatadi va jarayonning statsionar xarakteriga mos keladi. Eksperimental maʼlumotlarni approksimatsiyalash toʻgʻrisida koʻproq batafsil maʼlumotlar N.A.Chinenevning ishida keltirilgan.

5.6. Muar uslubi va yorugʻlik kvaziinterferentsiyasi hosil boʻlishining natijalari

Muar uslubi. Muar hodisasi 1874-yilda Rele tomonidan yozilgan. Uslub XX asrning 40-yillarida, mayda va aniq toʻrlarni sanoat miqyosida tayyorlash oʻzlashtirilgandan keyin qoʻllanila boshlagan. Uslub yorugʻlikning kvaziinterferentsiyasi (geometrik) hodisasiga asoslangan, u yaqin davriylik tartibiga ega boʻlgan ikkita yoki undan koʻp ixtiyoriy rastr tizimlar birlashtirilganda kuzatiladi. Rastr deb plastinkadan yorugʻlik oʻtganda yoki qaytganda plastinkada hosil boʻlgan navbatlashuvchi oq va qora polosalar tizimiga aytiladi. Tizimlardan biri deformatsiyalanadigan jismga kiritiladi, ikkinchi tizim – etalon boʻlib hisoblanadi. Ikkita zich chiziqlar tizimi qoʻyilganda (1 mm ga 2... 10 ta yoki 1 mm ga 4...40 ta) bu chiziqlarning qadami va yoʻnalishi mos tushmaydigan polosalar manzaralari hosil boʻladi. Muar polosalarining hosil boʻlishi yorugʻlik panjaralarning shaffof boʻlmagan polosalari orqali oʻtganda uning shiddatining (intensivligining) taqsimlanishining oʻzgarishi bilan tushuntiriladi. Odamning koʻzi obyektning koʻrinish burchagi bir minutdan kichik boʻlgan detallarini payqamaydi, faqatgina ob'ektdan kelayotgan yorugʻlikning oʻrtacha muddatini qabul qiladi; bunda birlamchi panjaralarning chiziqlarini koʻrmaydi. Agar panjaralar yetarlicha zich boʻlsa, u holda ularni qurollanmagan koʻz bilan kuzatishda muar polosalari uzluksiz boʻlib koʻrinadi, birlamchi panjaralarning chiziqlari esa koʻrinmaydi. Muar polosalari jismning zarrachalarining etalon rastrning chiziqlariga perpendikulyar yoʻnalishda siljish darajalari – izotekalar sifatida talqin qilinadi. Bunda koordinatalar toʻridan farqli oʻlaroq, oʻlchanadigan kattaliklarning diskret qiymatlari emas, balki uzluksiz maydonlar mavjud boʻladi.

Bukiladigan to‘sinning (balka) yon yuzasiga rastr – h qadam bilan chiziqlar panjarasi kiritilgan (5.7-rasm). To‘sinning har qanday nuqtasida f_y vertikal ko‘chish deformatsiyadan oldin va keyin nuqtaning koordinatalarini ayirish bilan aniqlanadi. Etalon rastrni deformatsiyalangan rastrga qo‘yish bilan ham xuddi shu natija olinadi. Deformatsiyalangan rastrning chiziqlarining raqamlarini k_j orqali, etalon rastrnikini esa – k_{ej} orqali belgilash bilan $f_y = (k_j - k_{ej})h = nh$ ni olamiz, bu yerda n – kesishish nuqtasining raqami (yoki tartibi).

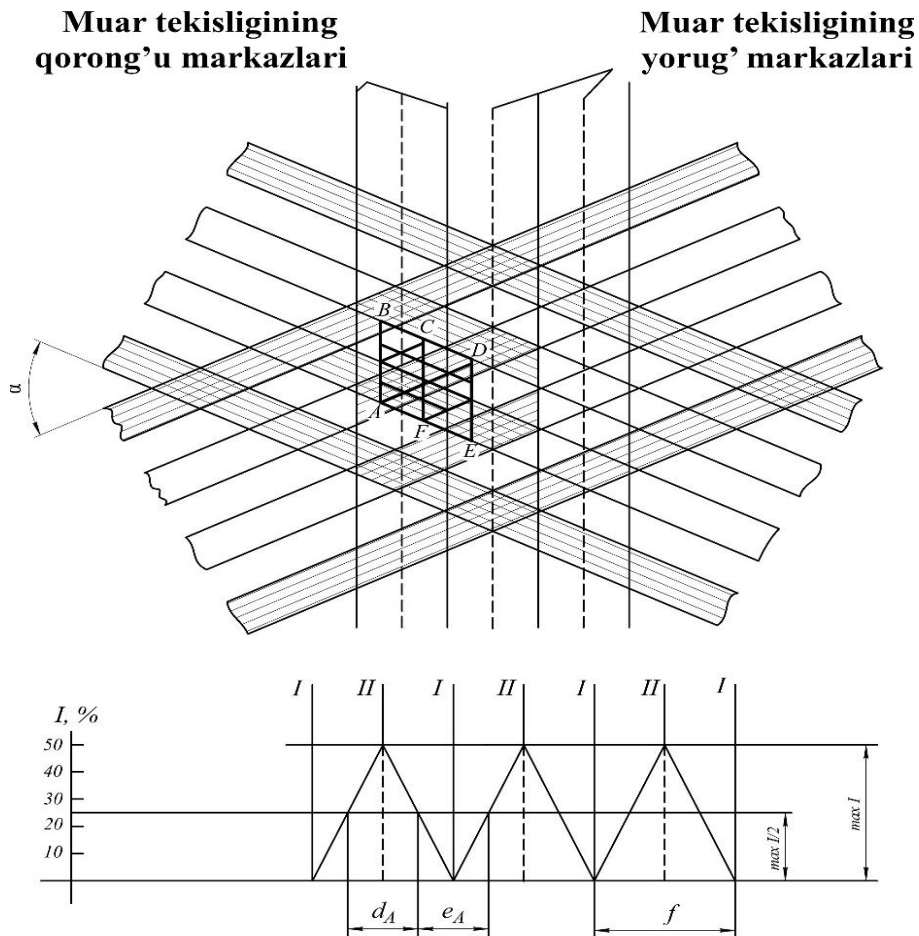


5.7-rasm. Teng vertikal ko‘chishlar polosalariga ega bo‘lgan muar manzarasini hosil qilish sxemasi.

h ni kamaytirish bilan bir xil f_y ga ega bo‘lgan nuqtalarni yaxlit chiziq qilib birlashtirishga muvaffaq bo‘linadi, bu muar polosasi deb ataladi. Ko‘chishlarning ikkinchi tarkibiy qismini olish uchun vertikal rastr kiritiladi. Gorizontaal ko‘chish $f_x = (l_i - l_{3i})h = nh$ ni tashkil qiladi, bu yerda l_i – deformatsiyalangan va nazorat rastrlari chiziqlarining indeksleri.

Bir xil geometrik parametrlarga ega bo‘lgan ikkita panjara bir-biriga ustma-ust qo‘yilganda ko‘p sonli oq va qora romblar hosil bo‘ladi. Qora romblar orasidan oddiy qora va birlamchi panjaralarning ikkita qora chiziqlari bir-birini yopganda vujudga keladigan ikki baravar qora romblarni ajratish mumkin (5.8-rasm). Har ikkala panjaraning qora chiziqlari ingichka chiziqlar bilan taqdim qilingan, ularning tasvirlari esa oshirilgan masshtabda ishlangan. I–I uzluksiz chiziqlar bilan oddiy qora romblarning kichik diagonallarining

ketma-ketligi bilan mos tushadigan to'g'ri chiziqlar ko'rsatilgan. II–II shtrix chiziqlar navbatlashuvchi oq va ikki baravar qora romblarning kichik diagonallarining ketma-ketligiga mos keladi. Bir-bining ustiga qo'yilgan panjaralarni I–I uzluksiz chiziq bo'ylab kuzatishda ko'z uzluksiz qora polosani ko'radi, II–II shtrix chiziq bo'ylab kuzatishda esa – yorug' uzluksiz polosani ko'radi.



5.8-rasm. Yorug'lik bir-birining ustiga burchak ostida qo'yilgan ikkita bir xil chiziqli panjaralar orqali o'tganda muar polosalarining hosil bo'lish sxemasi (a) va o'tayotgan yorug'likning o'rtacha shiddatining taqsimlanishi (b).

Bir-birining ustiga qo'yilgan, har birining shaffofligi 50% ga teng bo'lgan panjaralar orqali o'tadigan yorug'likning I o'rtacha shiddatining taqsimlanishi uchburchak qonuniga bo'ysunadi. Garchi geometrik qurilishdan qora muar polosaning kengligi nolga tengligi kelib chiqsada, amalda ko'rinadigan (samarali) kenglik anchagina

katta bo‘ladi, bu ko‘zning yechish qobiliyati bilan bog‘lanadi. O‘rtacha shiddat chiziqli tarzda o‘zgarishi sababli qora muar polosaning samarali kengligi sifatida uning ichida shiddatning (intensivlikning) qiymatlari uning maksimal kengligining yarmidan oshmaydigan polosa qabul qilinadi. Boshqa bir holatda qora va yorug‘ muar polosalarining samarali kengligi bir xil bo‘ladi va $d = ye = f/2$ ga teng bo‘ladi. ABCF va CDEF parallelogrammlardan yorug‘ polosa 6 ta oq va 10 ta qora elementar uchburchaklarni, qora polosa esa – 2 ta oq va 14 ta qora elementar uchburchaklarni o‘z ichiga olishi kelib chiqadi. Xuddi shu tarzda, o‘rtacha shiddatning taqsilanishidan qora muar polosa tushayotgan yorug‘likning bor-yo‘g‘i 12,5 % ini o‘tkazishi, yorug‘ muar polosa esa – 37,5 % ini o‘tkazishi kelib chiqadi. Shundan kelib chiqqan holda, qora va yorug‘ muar polosalar ko‘proq darajada qora sohalardan tashkil topadi va sof oq yoki sof qora bo‘lib hisoblanmaydi (5.8-rasmga qarang).

5.9-rasmdan oq romblarning diagonallari bilan beriladigan ikkita muar bo‘lishi geometrik jihatdan mumkin bo‘lishi kelib chiqadi, bunda har ikkala muarning polosalarida oq va qora rangning miqdori bir xil bo‘ladi. Biroq barcha romblarning kichik diagonallari orqali o‘tadigan yorug‘ muar polosalari o‘rtasidagi masofa shu romblarning katta diagonallari orqali o‘tadigan polosalar o‘rtasidagi masofadan katta bo‘ladi. Ko‘z polosalar o‘rtasidagi masofalar eng katta bo‘lgan muarni ko‘radi. Shu sababli muar polosalari kesishadigan bir xil rastrlarning to‘g‘ri chiziqlari o‘rtasidagi α burchakning bissektrisasiga perpendikulyar bo‘ladi va ularning qadami quyidagiga teng:

$$f = h_1 / (2 \sin \alpha / 2) \quad (5.28)$$

α burchak oshganda polosaning qadami kichrayadi va aksincha bo‘ladi. Agar α burchak 0 yoki 60° ga teng bo‘lsa, muar polosalari g‘oyib bo‘ladi. Biroq amaliy diapazon kichik bo‘lib hisoblanadi va yetarlicha yaxshi manzarani 40° dan kichik bo‘lgan burchaklarda olish mumkin.

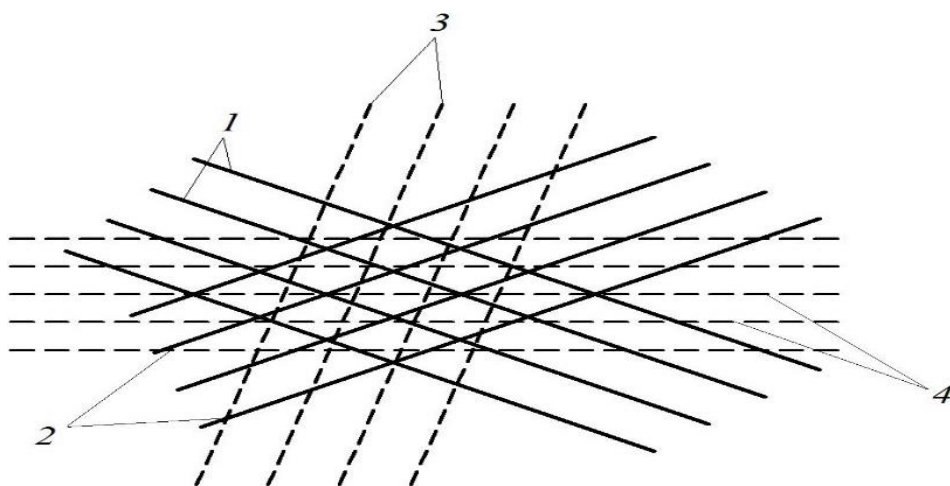
Chiziqlarning yoʻnalishi mos keladigan va turlicha qadamga ega boʻlgan ($h_1 > h_2$) rastrlar ustma-ust qoʻyilganda vujudga keladigan muar polosalari - panjaraning chiziqlariga parallel boʻlgan va

$$f = h_1 h_2 / (h_1 - h_2) \quad (5.29)$$

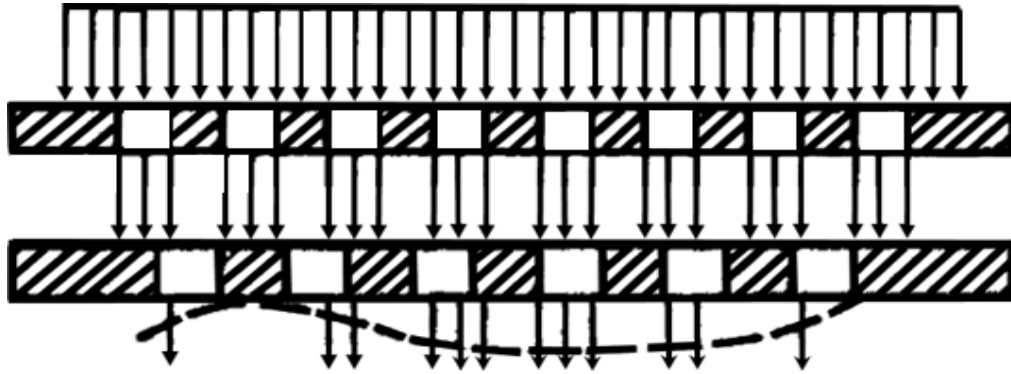
qadam bilan joylashadigan toʻgʻri chiziqlar boʻladi.

Oʻtadigan yorugʻlikning shiddatining taqsimlanishini turlicha kenglikdagi toʻgʻri toʻrtburchaklar koʻrinishida taqdim qilish mumkin (5.10-rasm). Yorugʻlikning shiddati oʻrtachalashtirilgan kattalik boʻlib hisoblanishi sababli, maydonning kuzatiladigan yorugʻligi koʻproq yoki kamroq silliq funksiya boʻladi. Bu funksiyaning choʻqqilari oʻrtacha shiddat maksimumga erishgan joylarda boʻladi va koʻz faqatgina yorugʻ polosalarni qayd qiladi.

Chuqurliklar oʻtgan yorugʻlikning oʻrtacha shiddatining minimumiga mos keladi va qora muar polosalari koʻrinishida qayd qilinadi. (5.28) va (5.29) formulalarni tahlil qilish shuni koʻrsatadiki, panjaralarning qadamidagi kichik nisbiy burchak siljishlari va farqlariga muar polosalarining nisbatan katta qadami mos keladi. bu hodisadan kichik siljishlarni oʻlchash uchun foydalaniladi.



5.9-rasm. Toʻgʻri chiziqli panjaralar uchun qora (1,2) va yorugʻ (3,4) muar polosalarining hosil boʻlish sxemasi.



5.10-rasm. Yorug'likning (strelkalar) ustma-ust qo'yilgan turlicha qadamli ikkita parallel panjara orqali o'tish sxemasi (shtrix chiziq bilan yorug'likning qayd qilinadigan o'rtacha shiddati ko'rsatilgan).

Turli rastrlar α burchak ostida ustma-ust qo'yilganda muar polosalari o'zida φ burchak ostida joylashgan va f qadamga ega bo'lgan to'g'ri chiziqlar tizimini taqdim qiladi.

$$\operatorname{tg} \varphi = h_1 \sin \frac{\alpha}{(h_1 \cos \alpha - h_2)}; f = \frac{h_1 h_2}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 - 2h_1 h_2 \cos \alpha}}. \quad (5.30)$$

h_1 qadamga ega bo'lgan konsentrik aylanalardan h_2 qadamli parallel to'g'ri chiziqlardan tashkil topgan rastrga qo'yilganda ellipslar ($h_1 < h_2$), giperbolalar ($h_1 = h_2$) va parabolalar ($h_1 > h_2$) ko'rinishidagi muar polosalari olinadi.

Barcha zaruriy ma'lumotlar fotosuratlarda bo'ladi, bu fotosuratlar ma'lum bir vaqt momentida tadqiq qilinayotgan yuzadagi holatni qayd qiladi, bu muar uslubini sekin va tez kechadigan jarayonlarni tahlil qilish uchun qo'llash imkonini beradi. Muar polosalarining ikkita qayd qilingan manzaralari bo'yicha grafik tarzda yoki jadvallar ko'rinishida to'rtta funksiya aniqlanadi:

$$\begin{aligned} f_{y_1} &= \varphi(x, y = \text{const}); f_{y_2} = \varphi(y, x = \text{const}); \\ f_{x_1} &= \varphi(y, x = \text{const}); f_{x_2} = \varphi(x, y = \text{const}). \end{aligned} \quad (5.31)$$

Muar polosalari deformatsiyalangan holatni tavsiflaydi, shu sababli ko'chishlar Eyler koordinatalarining funksiyalari sifatida

qayd qilinadi. Keyingi ishlov berishlar x va u bo'yicha f_y va f_x xususiy hosilalarni olish bilan bog'lanadi.

Qo'shni polosalar o'rtasida deformatsiyalarning taqsimlanishi bir tekis deb hisoblash bilan differensiallash oxirgi farqlar bilan almashtiriladi. f_y va f_x qiymatlar orqali silliq egri chiziqlar o'tkaziladi va har qanday nuqtada hosilalar urinma chiziqlarning egri chiziq'larga nisbatan egilish burchaklarining tangenslari sifatida aniqlanadi. Hosilalar shuningdek, deformatsiyalangan rastrning ikkita bir xil tasvirini Δh siljish bilan ustma-ust qo'yish bilan ham topiladi. Vujudga keladigan muar polosalari xususiy hosilaning darajasining to'g'ri chiziqlari bo'lib hisoblanadi, bunda doimiy polosalar $h/\Delta h$ ni tashkil qiladi.

Vaqtda qo'shni bo'lgan bosqichlarda deformatsiyalangan rastrlar birlashtirilganda muar polosalari tezlikning O_x va O_u yo'nalishlardagi proyeksiyalarining daraja chiziqlari bo'lib hisoblanadi. Xususiy hosilalarni ularning zichligi kam bo'lgan joylarda kasr tartibli muar polosalarini kiritish bilan har bir polosani bo'lakli-chiziq'li approksimatsiyalash yo'li bilan olish mumkin.

h rastrning qadami kutiladigan o'rtacha deformatsiya va $h = \Delta l/n$ bog'lanish bo'yicha muar polosalarining p kutiladigan sonidan kelib chiqish bilan tanlanadi, bu yerda Δl – namunaning absolyut siqilishi yoki cho'zilishi.

Rastrlar, tirnash, qirish, eritish ($h \geq 40$ mkm), eritilgan rastrni galvanik vannada qoplash ($h \geq 80$ mkm), yoyish, ko'chib tushadigan asosga ega bo'lgan plenkani yopishtirish, namunaga fotoemulsiya surkash bilan suratga olish va keyinchalik unda bevosita rastrni suratga olish bilan hosil qilinadi. Yopishtirilgan plenkalar $t \leq 200^\circ\text{C}$ haroratda ε deformatsiyani 20 % gacha, foto – rastrlar – 40% gacha ushlab turadi. Xromlangan rastrlar $t \leq 800^\circ\text{C}$ haroratda ishlaydi.

5.7. Elektrogidrodinamik analogiya uslubi

Buralishda deplanlanish tenglamalari, kuchlanishlarda deformatsiyalarning uzluksizligi tenglamalari va boshqa shu kabilar Laplas

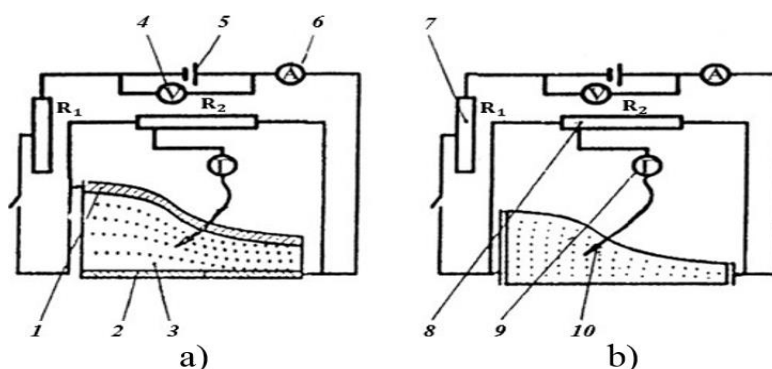
tenglamalari bo‘lib hisoblanadi. Bu tenglamalarni yechishning analitik, grafik, sonli va analogli uslublari ma’lum. Analitik yechimlarning har xil turlari garmonik funksiyalar bo‘lib hisoblanadi. Grafik yechishda oqimning kesimlarida sarflarni hisoblash bilan ketma-ket yaqinlashiishlar uslubi yordamida oqish chiziqlari va tezliklarnng teng potentsiali ortogonal to‘ri qurmladi. Sonli uslub, ehtimolki, eng keng tarqalgan bo‘lib hisoblansa kerak. Uning asosida hisobiy to‘rning har bmr tuguni uchun differentsial tenglamaning hosilalarini oxirgi farqlar tenglamalar tizimi bilan almashtirish yotadi. EHM da amalga oshirish qulay bo‘lishi uchun iteratsion yechish uslublaridan foydalaniladi.

Analogli yechish muhitning singdiruvchanligi doimiy bo‘lganda va siqilmaydigan suyuqlik potentsial oqqanda yassi bmr jinsli elektr yoki magnit maydonlarining tenglamalari Laplas qonuniga bo‘ysunishiga asoslanadi.

“Minus” belgisi bilan olingan U elektr potentsialiga matematik analogiya mavjud va bunda ψ_m magnit potentsialiga ψ oqish tezligi potentsiali mos keladi, elektr maydonining J solishtirma zichligi va magnit maydonining H kuchlanganligiga esa – suyuqlikning v oqish tezligi mos keladi. Maydonlar va oqimning geometrik o‘xshashligida va teng chegara shartlarida parametrlarning geometrik o‘xshash ortogonal to‘rlariga ega bo‘lgan teng yechimlar olinadi. Bu o‘lchana-digan (oqish tezligining potentsialidan farqli o‘laroq) elektr va magnit potentsiallariga ega bo‘lgan elektrogidrodinamik analogiya (EGDA) va magnitogidrodinamik analogiya (MGDA) deb ataladi.

Metallning plastik oqishida oqish chiziqlarining manzaralarini siqilmaydigan suyuqlikning potentsivl oqimining oqish chiziqlarining manzaralari bilan approksimatsiyalash mumkin. Hajmiy plastik oqishni yassi potentsial oqish orqali modellashtirishda yassi potentsial maydonda oqish chiziqlari hajmiy oqish ularga ajraladigan alohida oqimlarning chegaralarining projektsiyalari deb hisoblashga yo‘l qo‘yiladi. Bunday oqimlar, masalan, silindrik tayyorlanmadan turlicha shaklli profillar ko‘rinishidagi presslangan buyumlarni bosishda (ugoloklar, shvellerlar, dvutavrlar va boshqalar) hosil bo‘ladi.

Uslub birinchi marta V.V.Pavlovskiy tomonidan ishlab chiqilgan qurilmaga o'xshash qurilmada amalga oshiriladi. Qurilma uchta asosiy qismdan tashkil topgan: elektr modeli, oziqlantiruvchi zanjir va o'lchash zanjiri (5.11-rasm). Elektr modeli yassi va uning oqish sohasi ideal suyuqlikka geometrik o'xshash bo'lishi lozim. Model mis yoki yumshoq listli po'latdan ishlangan shinalarga ega bo'lgan elektr o'tkazuvchan qog'ozdan tayyorlanadi, bu shinalar chegara ekvipotensiallariga mos keladigan konturlar bo'ylab o'rnatiladi.

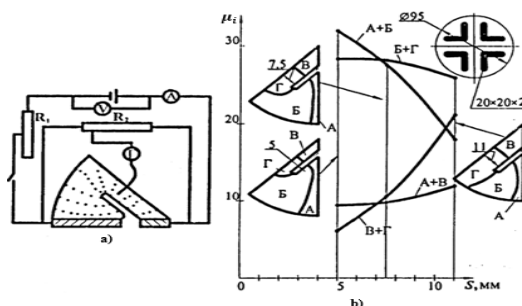


5.11-rasm. EGDA uslubini amalga oshiradigan qurilmaning sxemasi. Bosishni modellashtirishda oqish (a) va ekvipotensiallar (b) chiziqlarini aniqlashda elektr modeli elementlarining joylashuvi: 1-3—elektr modeli (1,2—shinalar, 3—elektr o'tkazuvchan qog'oz); 4-7—oziqlantiruvchi zanjir (4—voltmetr, 5—doimiy tok manbai, 6—ampermetr, 7—reostat); 8-10—o'lchash zanjiri (8—galvanometr, 9—reostat, 10—o'lchash ninasi).

Elektr o'tkazuvchan qog'ozda teng elektr potentsiali chizig'ini qurish uchun R_2 reostatni kerakli belgiga qo'yish va qog'ozda o'lchash ninasi bilan galvanometr nol qiymatlarni beradigan nuqtalarni belgilash kerak bo'ladi. Bu nuqtalar orqali o'tadigan to'g'ri chiziq teng potensial chizig'i bo'ladi, bunda shinadan chiziqqacha potensial tushishi R_2 reostatda berilgan kuchlanish tushishiga mos keladi. Boshqa chiziqlarni qurish uchun shinalarni oziqlantirish zanjiriga parallel bo'lgan o'lchash zanjiridagi reostat ma'lum bir belgilarga qo'yiladi va u bilan galvanometr orqali bog'langan o'lchash ninasi bilan elektr o'tkazuvchan qog'ozda galvanometrning nol ko'rsatkichlariga ega bo'lgan nuqtalar belgilanadi.

Shinalarni 5.11-rasm, a da ko'rsatilganday qilib matritsa voronkasining konturlari va bosish o'qi bo'ylab joylashtirishda ekvipotensiallar oilasi oqish chiziqlari deb ataladi. Har bir oqish chizig'i bo'ylab $F_i = \text{const}$; $\partial\psi_j/\partial n = 0$ shartlar bajariladi. Ilgari qurilgan ekvipotentsiqlarga ortogonal bo'lgan ekvipotensiallar to'rini qurish uchun shinalar oqish sohasi modelining boshiga va oxiriga o'rnatiladi (5.11-rasm, b). Ekvipotensiallarning har biri bo'ylab $\psi_j = \text{const}$; $\partial F_i/\partial n = \text{const}$ shartlar bajariladi. Kenglikda modellashtirishda hajmli model elektrolitli vannaga yoki o'tkazgichlar tizimiga ega bo'lgan magnet maydoniga o'rnatiladi.

EGDA 9-60 qurilmada plastik oqishni modellashtirishga "ugolok" tipidagi profillarni to'rt ipli bosishda 95 mm diametrli yassi matritsaning oynasida shakl hosil qiluvchi elementlar - ochkolarning optimal holatini aniqlash masalasi misol bo'lib xizmat qila oladi (5.12-rasm). Bir tomondan, ochkolarning bosish o'qiga nisbatan ko'chish imkoniyatlari matritsaning ochkolari o'rtasidagi tutashmalarga qo'yiladigan mustahkamlik talablari bilan chegaralanadi. Ikkinchi tomondan, yassi matritsaning har bir ochkosining bosish o'qidan uzoqligi metallni "o'lik" zona hajmidan bosishda profil yuzasida g'adir-budurliklar hosil bo'lmasligi uchun 0,75...0,80 radiusdan oshiq bo'lmasligi lozim. Shunday qilib, matritsaning ochkolari bir-biriga maksimal yaqinlashtirilganda tutashmaning kengligi 10 mm ni, minimal yaqinlashtirilganda esa – 22 mm ni tashkil qiladi. Ochkolarning o'rtacha joylashuvida ularning o'rtasidagi tutashmaning kengligi 15 mm ni tashkil qiladi.



5.12-rasm. 95 mm diametrli konteynerdan 20x20x2 mm kesimli ugolokni to'rt ipli bosishda matritsa ochkosining joylashuviga bog'liq ravishda oqish chizig'ining proyeksiyalarini aniqlash sxemasi (a) elementma-element μ_i cho'zilishdarning o'zgarishi (b).

Elektr o'tkazuvchan qog'ozdan ishlangan modellarda ochkoning yarmi uning simmetriya o'qi bo'ylab turlicha joylashishga ega bo'lgan matritsa oynasining 1/8 qismiga elektroshinalar o'rnatiladi. So'ngra yuqorida tasvirlangan tarzda konteynerdan (ko'rsatilmagan) A, B, V, G oqish sohalari chegaralarining matritsa ochkolarining turli elementlariga (ularning chegaralari 5.12 b-rasmda qalin chiziq bilan ko'rsatilgan) oqish ekvipotensiallarining (oqish chiziqlarining) holati aniqlanadi. So'ngra elementma-element μ i cho'zilishlar hisoblanadi, ular qo'shni oqish chiziqlari va sakkiz qismga bo'lingan matritsa ochkosining mos keluvchi elementlari o'rtasidagi nisbat bilan aniqlanadi.

5.12-rasmda keltirilgan natijalarni tahlil qilishdan matritsa oynasining diametri va o'lchamlari va ochkolar sonining berilgan geotetrik nisbatlarida barcha to'rtta sohada μ i ning tengligiga erishib bo'lmasligi kelib chiqadi. 5.12-rasmdagi egri chiziqlar ikkita oqish sohalari maydonlari yig'indisining ochkoning mos keluvchi chora-giga nisbati sifatida aniqlanadigan elementma-element cho'zilishlarning o'zgarishini ko'rsatadi. Shuni qayd qilamizki, tutashmaning kengligi 21 mm bo'lganda ($s=10,5$ mm) A + B va V + G sohalari uchun elementma-element cho'zilishlar taxminan 19 birlikka teng bo'ladi. Biroq ochkoning xuddi o'sha holatida A + V va B + G sohalari uchun cho'zilishlar keskin farq qiladi va mos ravishda 11 va 19 birlikni tashkil qiladi. Amaliyotda kompromiss variant – 10,5 mm dan foydalaniladi.

5.7.1. Qutblanish-polyarizatsiya – optik usullari

Qutblanish - polyarizatsiyalash – optik uslublarga fotoqayish-qoqlik, fotoplastiklik, optik-sezuvchan qoplamalar va golografiya usullari kiradi. Endi ulardan ba'zilarini ko'rib chiqamiz.

Optik-sezuvchan material (OSM) deb shunday shaffof materialga aytiladiki, undan ishlangan modelning har bir nuqtasida tashqi kuchlar ta'siri ostida ular bo'ylab yorug'lik turlicha tezlik bilan tarqaladigan ikkita o'zaro perpendikulyar bosh optik o'qlar paydo bo'ladi, bu tezliklar nominal deformatsiyalovchi kuchga bog'liq

bo‘ladi. Bu hodisa sun‘iy qo‘shaloq nur sinishi deb ataladi va Vertgeym fotoqayishqoqligi qonuni deb ataluvchi ifoda bilan tasvirlanadi:

$$\Delta = 2\pi s_M (c_1 - c_2) (\sigma_1 - \sigma_2) / \lambda, \quad (5.32)$$

Bu yerda s_m – model plastinkasining qalinligi; λ – yorug‘likning to‘lqin uzunligi; c_1 va c_2 – model materialining xususiyatlari va λ bilan belgilanadigan optik-mexanik koefitsiyentlar.

Tashqi yuklamaning ta‘siriz material xususiyatlarining anizotropiyasi hisobiga Δ ning vujudga kelishi tabiiy qo‘shaloq nur sinishi deb ataladi.

Muhandislik amaliyotida (5.32) Vertgeym qonuni quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = m \sigma_0^{1,0} / s_M \quad (5.33)$$

bu yerda $m = \Delta/2\pi$ – yurishning nisbiy farqi, interferentsion polosalarning soni bilan o‘lchanadi; $\sigma_0^{1,0} = \lambda/(c_1 - c_2) = (\sigma_1 - \sigma_2)s_M/m$ – polosaning kuchlanishlar bo‘yicha bahosi, bosh kuchlanishlarning modelda $s_m = 1$ sm qalinlikdagi polosa paydo bo‘lishiga olib keladigan farqiga teng; MPa/sm.

Guk qonuniga bo‘ysunadigan materiallar uchun deformatsiyalarda Vertgeym qonuni

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = m \varepsilon_0^{1,0} / s_M \quad (5.34)$$

ko‘rinishda yoziladi.

Bu yerda $\varepsilon_0^{1,0} = \frac{(1+\mu)}{E} \sigma_0^{1,0}$ material polosasining deformatsiyalar bo‘yicha bahosi; sm/polosa.

Oxirgi deformatsiyalarning plastik sohasi uchun ($\varepsilon < 30\%$) Vertgeym qonuni

$$\Delta = c_e s_M (e_1 - e_2) \quad (5.35)$$

ko‘rinishda yoziladi.

Bu yerda $c_e = 2\pi E(c_1 - c_2)/(1 + \mu)\lambda$ - deformatsiyalar bo‘yicha optik doimiy.

Qonunni o‘shirlarda yozish ko‘proq umumiy bo‘lib hisoblanadi:

$$\delta\Delta = c_e s_M (\delta e_1 - \delta e_2) \quad (5.36)$$

bu yerda $\delta\Delta$ – optik-sezuvchan material deformatsiyalanganda ikkita ketma-ket yuklama berish bosqichlari nuqtasida Δ qiymatlarining farqi; δe_1 va δe_2 – joriy momentda deformatsiyalarning ortishi.

Qonun yassi va aylana qutblagichlarda amalga oshiriladi, ular tushayotgan va qaytarilgan yorug‘likdan foydalanadi va yorug‘lik manbai, qutblagich va yorug‘lik vektori bilan belgilanadigan qutblash tekisliklarida yorug‘likni o‘tkazadigan analizatoridan tashkil topadi. Yassi qutblashda yorug‘lik vektori bu tekislikda tebranadi. Aylana va ellipssimon qutblashda yorug‘lik vektorining oxiri tekislikda yorug‘likni tarqalish yo‘nalishiga perpendikulyar bo‘lgan aylana yoki ellips chizadi.

Yassi qutblangan yorug‘lik nuri optik-sezuvchan materialdan (OSM) ishlangan modelning ikkita bosh optik o‘qlariga nisbatan $\theta = 0$ yoki $\theta = \pi/2$ burchak ostida yo‘naltirilganda, yorug‘lik to‘g‘ri chiziqli qutblanadi. $\Delta = \pi/2$ da aylana ($\theta = \pi/4$) yoki ellipssimon ($\theta = 0; \pi/4; \pi/2$) qutblanish olinadi. Qutblagich va analizatorning o‘qlarini turlicha joylashtirish bilan, o‘qlar perpendikulyar joylashganda ekranda yorug‘likning so‘nishi (qora maydon) yoki kuchayishi (oq maydon) olinadi. Yorug‘lik nuri optik-sezuvchan materialdan (OSM) ishlangan qutblagich orqali $2\pi vt$ (A – amplituda, v – yoritishning rangiga bog‘liq bo‘lgan chastota, t – vaqt) garmonik ko‘ndalang tebranishlar ko‘rinishida o‘tganda, u mm tekislikda qutblanadi (5.13-rasm) va Ox va Oy tekisliklarda mos ravishda $OA_1 = A \cos \theta$ va $OA_2 = A \sin \theta$ amplitudali tarkibiy qismlarga yoyiladi. Bunda yorug‘lik vektori ko‘chishining tarkibiy qismlari

$x_1 = A \cos \theta \cos 2\pi vt$; $y_1 = A \sin \theta \cos 2\pi vt$ ko‘rinishga ega bo‘ladi.

Shuni qayd qilamizki, Ox va Oy tekisliklar σ_1 va σ_2 bosh kuchlanishlar joylashadigan tekisliklar bo'lib hisoblanadi.

Yuklangan modelda p'ezooptik hodisa tufayli yorug'lik vektori ikkita o'zaro perpendikulyar bo'la oladigan, modelning chiqishida bosh yo'nalishlar bo'yicha $\Delta=2\pi vt$ (t_1-t_2) ga ega bo'lgan tarkib toptiruvchilarga ajraladi. Bunda yorug'lik vektorining analizator-gacha yetib kelgan tarkibiy qismlari

$$x_2 = A \cos \theta \cos \omega; \quad y_2 = A \sin \theta \cos(\omega - \Delta).$$

ga teng bo'ladi.

Bu yerda $\omega = 2\pi vt + const$.

Analizatorning pp qutblash tekisligi qutblagichning tt qutblash tekisligiga perpendikulyar joylashgan (5.13-rasmga qarang). Analizator tomonidan o'tkazilgan tebranishlar gorizont va vertikal tarkib toptiruvchilarga ajraladi. Vertikal tarkib toptiruvchilar so'nadi, gorizontalk tarkib toptiruvchilar esa interferentsiyalanadi va quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\begin{aligned} x_2 \sin \theta &= 0,5A \sin 2\theta \cos \omega; \quad -y_2 \cos \theta \\ &= 0,5A \sin 2\theta \cos(\omega - \Delta/2). \end{aligned}$$

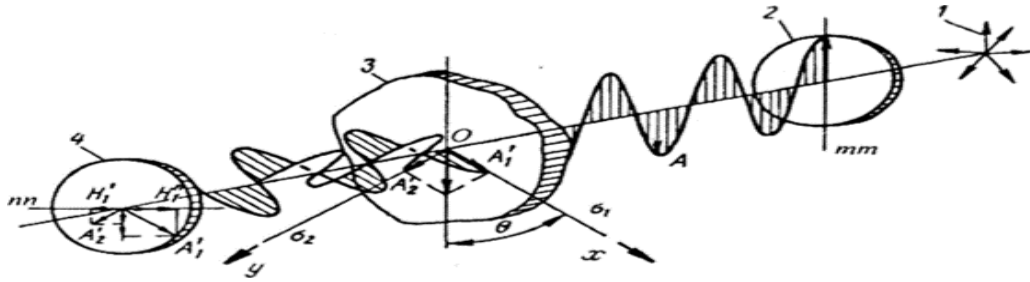
pp analizator bo'ylab yig'indi tebranishlar

$$\begin{aligned} 0,5A \sin 2\theta [\cos \omega - \cos(\omega - \Delta)] &= \\ -A \sin 2\theta \sin(\Delta/2) \sin(\omega - \Delta/2). \end{aligned}$$

teng bo'ladi.

Uning amplitudasi $A \sin 2\theta \sin(\Delta/2)$ ni tashkil qiladi.

Yorug'likning so'nishi $\sin 2\theta$ yoki $\sin(\Delta/2)$ nolga teng bo'lganda sodir bo'ladi. $\sin 2\theta = 0$ da, bu yerda $p = 0, 1, 2$ da $2\theta = 2\pi p$ bo'ladi, σ_1 va σ_2 ning yo'nalishlari qutblanish o'qlariga parallel bo'ladi.



5.13-rasm. Yasii qutblagichning maydonida yuklangan model: 1– yorug‘lik manbai; 2–qutblagich; 3–model; 4–analizator.

Modelning bunday nuqtalari orqali o‘tgan nurlar so‘nadi. Ekranida λ ga bog‘liq bo‘lmagan har doim qora rangda bo‘lgan polosalar paydo bo‘ladi, ular izoklinlar deb ataladi. Ular bosh kuchlanishlardan birining egilish burchagi doimiy bo‘lgan nuqtalarning geometrik joyi bo‘lib hisoblanadi. Bu nuqtalarning joylashgan joyi qutblagichlar birgalikda aylanganda o‘zgaradi.

$\Delta = 2\pi n$ da, bu yerda $p - 1, 2$, yorug‘likning so‘nishi shu bilan shartlanadiki, bunda yorug‘likning tebranishlarining gorizontalk tarkib toptiruvchilari qarama-qarshi fazada bo‘ladi. Izotrop nuqtalardan tashkil topgan polosalar hosil bo‘ladi, ularda Vertgeym qonuniga muvofiq farq $\sigma_1 - \sigma_2 = \text{const}$ bo‘ladi, uning ortishi esa p ning ortishiga mos keladi. Ular izoxromalar deb ataladi, chunki ular oq yorug‘likdan foydalanilganda qandaydir bir rangli polosaning so‘nishiga ko‘maklashadi.

Agar oq yorug‘likdan foydalanilsa, u holda (5.32) bog‘lanishga muvofiq turlicha to‘lqin uzunligiga ega bo‘lgan yorug‘likning so‘nishi bir paytda sodir bo‘lmaydi. Shu sababli izoxromalar qandaydir qo‘shimcha to‘lqin rangiga ega bo‘ladi. Yurish farqining ortishi binafsha rangdan tortib qizilgacha spektral ketma-ketlikdagi ranglarning to‘lqin uzunliklarining so‘nishiga va ularning kontrastligining kamayishiga olib keladi. Masalan, qora rangni faqatgina nolinchii izoxromada ($\Delta = 0$ va $\sigma_1 = \sigma_2$) kuzatish mumkin, moviy rangga faqatgina birinchi izoxroma ega bo‘ladi, to‘rtinchi tartibdan boshlab faqatgina qizil va yashil ranglarni farqlash mumkin. Shunday qilib, oq yorug‘likdan foydalanish har ikkala oilaning polosalarini ajratish imkonini beradi, chunki monoxromatik yorug‘likda ular

oʻrtasida ranglar farqi kuzatilmaydi va ixoxromaning tartibi ortishi yoki kamayishi koʻrinmaydi. $\sigma_1 - \sigma_2$ ni topish uchun polosaning tartibini va birinchi polosa uchun bu farqni bilish kerak boʻladi.

Kuchlanishlarning konsentratsiyalarini tadqiq qilishda izoxromalarning manzaralari yetarli boʻladi. Izoklinlarni chiqarib tashlashga ($\Delta = 2\pi p$ da yorugʻlikning soʻnishiga) aylana qutblagichlarda modelning har ikkala tomoniga $\Delta = \pi/2$ ga ega boʻlgan chorak toʻlqinli plastinkalarni oʻrnatish bilan erishiladi. Birinchi plastinka dumaloq qutblanishni hosil qiladi, ikkinchi plastinka esa uni yassi qutblanishga aylantiradi. Aylana qutblagichlar maydonning har qanday nuqtasida 0,1 polosagacha aniqlik bilan oʻlchashlarni bajarish imkonini beradi. Ba'zi bir qutblagichlarning konsruksiya usulining tasvirlanishi N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan. Agar yurish farqini kattaroq aniqlik bilan oʻlchash zarur boʻlsa, u holda N.A.Chinenevning kompensatsiya usulidan foydalaniladi.

Modelga qoʻyiladigan yuklama N.A.Chinanev modelining 1 sm qalinligiga 10 ... 20 ta polosani olishni taʼminlashi lozim.

5.7.2. Namunalarning rasmelastiklik va rasmplastiklik usullari

Rasmelastiklik uslubi. Rasmelastiklik usulidan foydalanilganda qutblash-optik qurilmaning qutblagichi va analizatori 0...900 intervalda sinxron ravishda aylantirilganda aniqlanadigan izoklinlar oilasi bosh kuchlanishlar va deformatsiyalarning yoʻnalishlariga mos keladi deb hisoblanadi.

Rasmelastiklik uslubi bilan teshiklar va burchaklarning yaqinida kuchlanishlarning konsentratsiyalarini tadqiq qilishda ayniqsa muhim natijalar olingan. Kuchlanishlar erkin chegarada maksimumga erishadi. Ular optik qurilma uslubi bilan aniqlanadi, chunki bosh kuchlanishlardan biri nolga teng boʻladi. Shu sababli bu ishlarni bajarishda optik usulidan foydalaniladi.

Modelda oʻtkazilgan tadqiqotlarning natijalarini rasmelastiklik uslubi bilan natural poʻlat namunalarga koʻchirib oʻtkazish oʻxshashlik nazariyasi sharoitlarida modellashtirishda mumkin boʻladi.

Ikki o‘lchamli model uchun odatda N.A.Chinenevning (5.37) shartiga rioya qilinadi:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_M l_M s_M Q_H}{l_H s_H Q_M}; \quad u_H = \frac{u_M Q_H s_M E_M}{Q_M s_H E_H}, \quad (5.37)$$

bu yerda σ , l , s , Q , u – mos ravishda model (m) va naturaning (n) kuchlanishi, chiziqli o‘lchami, qalinligi, tashqi yuklamasi va ko‘chishi.

Elastiklik masalalarini modellashtirish uchun (masalan, tayyorlanmani deformatsiyalaydigan uskuning kuchlanishlarini aniqlash uchun) mo‘ljallangan ideal material quyidagilarga ega bo‘lishi lozim: minimal sochilish koeffitsiyenti; izoxromalarning tartibi, kuchlanishlar va deformatsiyalar o‘rtasida minimal chiziqli bog‘lanish; minimal optik va mexanik izotroplik; barqaror optik-mexanik tavsiflar; yuqori elastiklik moduli va N.A.Chinenev bo‘yicha yuqori mustahkamlik chegarasi. Real optik-sezuvchan materiallar (OSM) barcha talablarni qanoatlantirmaydi. Ular eksperimentning maqsadiga muvofiq tarzda tanlanadi.

Aksariyat hollarda epoksid smolalari asosidagi polimer materiallar qo‘llaniladi, chunki ular ko‘proq yuqori optik-mexanik xususiyatlarga ega bo‘lib, bu xususiyatlarni plastifikatorlarni kiritish bilan boshqarish mumkin. Ba’zi bir optik-sezuvchan materiallarning tavsiflari N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan.

Deformatsiyalanadigan tayyorlanmaning model materiali sifatida odatda qo‘rg‘oshin yoki uning tellur yoki surma qo‘shilgan qotishmalaridan foydalaniladi, bunda tayyorlanma Ye.P.Unksov bo‘yicha 50% dan kam bo‘lmagan siqish darajasi bilan albatta oldindan deformatsiyalanadi.

Modelning nominal deformatsiya kuchini miqdoriy baholash uchun model tayyorlangan material polosasining $\sigma_0^{1,0}$ qiymatini aniqlash zarur bo‘ladi. U odatda har bir eksperimentdan oldin aniqlanadi.

Rasmelastiklik uslubida $\sigma_0^{1,0}$ kattalik kalibrlash sinovlarida - $b \times s$ kesimli yassi namunani cho‘zishda yoki to‘g‘ri burchakli kesimli to‘sinni sof bukishda yoki diskni diametral siqishda aniqlanadi.

Sinovlarda polosaning tartibi oq va qora maydonlarning ketma-ket navbatlashishi ko‘rinishida qayd qilinadi va yuklashning har bir darajasida yuklamaning mos keluvchi qiymati qayd qilinadi. Cho‘zishda

$$\sigma_1 = Q/(bc); \sigma_2 = \sigma_3 = 0, \quad (5.38)$$

bu yerda Q – yuklamaning ortishi.

Olingan ma’lumotlarni (2) ga qo‘yish bilan $\sigma_0^{1,0} = (\sigma_1 - \sigma_2)s_M/m = Q/(bm)$ deb yozamiz. Besh-oltita yuklashlarning ma’lumotlari bo‘yicha $Q(m)$ grafik quriladi. Bu nuqtalar orqali o‘tkazilgan va Q/m ga teng bo‘lgan to‘g‘ri chiziqning egilish burchagining tangensi kuchlarni va polosaning tartibini o‘lchash xatoligini o‘rtachalashtirish imkonini beradi. Kalibrlash uslubiyati ko‘proq batafsil N.A.Chinenev, A.N.Patrashev va M.V.Storojevning ishlarida keltirilgan.

Yuklama noldan berilgan qiymatgacha oshirilganda polosalarining umumiy soni ortishi va izoxromalar kichik tartiblar tomonga qarab siljishi sababli modelning belgilangan nuqtasida izoxroma polosasining tartibi oldingi polosalarni bevosita sanash yoki grafik ekstrapolyatsiyalash uslubi bilan aniqlanadi (5.14-rasm,a,b). Izoxromalarning tartibi nolinch polosadan boshlab polosalarning manbasi yo‘nalishida sanaladi, yuklama qo‘yilgan nuqta ana shunday manba bo‘lib hisoblanadi.

Modelning yuklanmagan turtib chiqib turuvchi burchaklari sanoq boshi bo‘lib xizmat qiladi, chunki ularda kuchlanishlar nolga teng bo‘ladi, shundan kelib chiqqan holda polosaning tartibi ham nolga teng bo‘ladi. Nolinch polosaning turlaridan biri ularda $\sigma_1 = \sigma_1$ bo‘ladigan izotrop nuqtalar bo‘lib hisoblanadi.

Nolinch polosalari va izotrop nuqtalar oq yorug‘likni qo‘llash bilan aniqlanadi, chunki ular oq yorug‘likda har doim qora bo‘lib ko‘rinadi, qolgan maydon esa rangli bo‘lib ko‘rinadi. Yuklamani o‘zgartirish yoki yorug‘lik to‘lqinlarining ikkita turli rejimlari bilan nurlatish bilan ham xuddi shunday natijaga erishiladi.

Izoxroma polosasining tartibi ma'lum bo'lganda bosh normal kuchlanishlarning farqi (5.32) formula bo'yicha aniqlanadi.

Umumiy holatda modelning butun maydoni bo'ylab τ_{\max} maksimal urinma kuchlanishni aniqlash uchun σ_1 va σ_2 bosh normal kuchlanishlarni ajratish zarur bo'ladi. Bu yassi kuchlangan va bosh normal kuchlanishlar belgisi bo'yicha turlicha bo'lgan yoki erkin konturda maksimal urinma kuchlanishlar bosh kuchlanishlardan qaysi biri konturga urinma bo'yicha ta'sir ko'rsatishiga bog'liq ravishda mos ravishda $\tau_{\max}=(\sigma_1-\sigma_2)/2$ va $\tau_{\max}=\sigma_1/2$ yoki $\tau_{\max}=\sigma_2/2$ bo'ladigan holat uchun o'rinli bo'ladi.

Izoxromning parametri – eng katta bosh kuchlanishning yo'nalishi va Ox o'qning musbat yo'nalishi o'rtasidagi θ burchak bo'lib hisoblanadi. U soat strelkasi yo'nalishiga teskari sanashda $\mp 90^\circ$ intervalda musbat va o'zgaruvchan deb hisoblanadi. Bu holda θ va τ_{xy} urinma kuchlanishlarning belgilari mos tushadi, shu sababli kuchlanishlar (5.39) formulalar bo'yicha aniqlanadi:

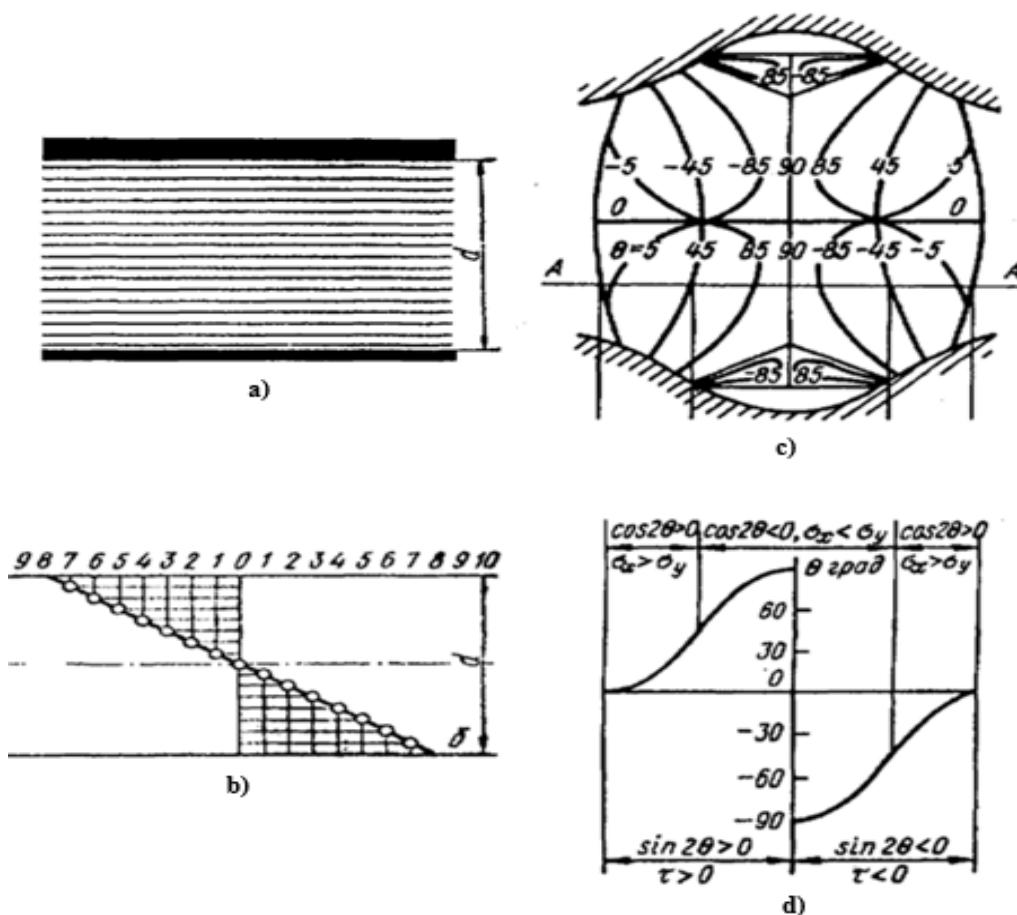
$$2\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta; \quad \sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (5.39)$$

Izoxrom parametrining boshlang'ich qiymati yoki chegara shartlaridan yoki fizikaviy mulohazalardan kelib chiqish bilan aniqlanadi. Izoklinlar tashqi kuchlar qo'yilgan nuqtalar orqali o'tadi. Simmetriya o'qida izoklinning parametri doimiy bo'ladi (5.14-rasm,c,d). Izotrop nuqta orqali o'tishda izoklinlarning parametrlari 90° ga o'zgaradi.

Agar izotrop nuqta konturda yotmasa, u holda u orqali barcha parametrlarning izoklinlari o'tadi. Agar konturning bir qismida cho'zuvchi kuchlanishlar, qolgan qismida esa - siquvchi kuchlanishlar ta'sir ko'rsatsa, u holda ular konturdagi kuchlanishning nolli qiymati bilan ajratilishi lozim, nolli qiymatga $\sigma_1 = \sigma_2$ ga ega bo'lgan nuqta mos keladi. Yuklanmagan yoki urinma kuchlanishlardan holi konturda izoklinlar konturga normal yo'naladi.

Agar geometrik simmetriya o'qlari izotrop nuqtalar orqali o'tmasa, u holda ular bitta parametrning izoklinlari bo'lib hisoblanadi. Izoklinlarning ma'lum maydoni bo'ylab qayishqoq izotrop jism

uchun bosh kuchlanishlarning trayektoriyalari – izostatlar, ya’ni N.A.Chinenevning bosh kuchlanishlarining yo‘nalishlari bilan mos tushadigan urinma yoki normal chiziqlar quriladi.



5.14-rasm. Simni ekstrapolyatsiyalash bilan bukishga sinovlardan o‘tkazishda izoxromalarning manzaralari (a) va kvadrat tayyorlanmani profil boykalar bilan bosishda A-A kesim uchun chekkadagi izoxromalarni (b) va θ (c) epyurali izoklinlarni (d) aniqlash.

Umumiy holatda kuchlanishlarni ajratish uchun qo‘shimcha eksperimental ma’lumotlar yoki sonli uslublardan foydalaniladi. Sonli uslublarning tasvirlanishi N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan. Ular quyidagilarni o‘z ichiga oladi: urinma kuchlanishlarning farqi uslubi, Faylon uslubi, kuchlanishlarni izoklinlardan foydalanmasdan ajratish uslubi, qiya yoritish uslubi, deformatsiyalarning uzluksizligi tenglamalaridan foydalanish uslubi, Laplas tenglamalarini sonli integrallash uslubi va boshqalar.

Rasmelastiklik uslubi bilan Ye.P.Unksovning $\frac{\sigma_{SM}}{E_M} \cong \frac{\sigma_{SH}}{E_H}$ shartiga rioya qilish bilan 3-4% xatolik bilan kontakt kuchlanishlari aniqlanadi. Xususan, to‘g‘ri va teskari bosishda konteynerda, Ye.P.Unksov polosasini siqishda rolikda va V.Ya.Gun uslubi bilan yassi chizishda filerda kontakt kuchlanishlari aniqlangan. Elastiklik sohada ishlaydigan uskunaning modeli epoksid smolasi – optik-sezuvchan material (OSM) dan yoki organik shisha – OSM yopishtirilgan optik sezuvchan bo‘lmagan materialdan (OSBM) ishlangan.

Ye.P.Unksovning ishida bosishda uch qatlamli datchikdan foydalanilgan, uning tashqi va ichki qatlamlari konstruktiv jihatdan mustahkam bo‘lishi uchun OSBM dan, o‘rta qatlamli esa OSM dan ishlangan, har ikkala materialning E va μ qayishqoq doimiylari deyarli teng qilib olingan. Datchik polosasining qiymati bitta polosaga $\sigma_0^{1,0} = 3,25$ MPa.

Monoxromatik yorug‘lik bilan ishlaganda izoklinlarning sifat manzarasi ikkita model yordamida olingan: biri izoklinlarni qayd qilish uchun past optik sezuvchanlikka ega bo‘lgan OSM li, ikkinchisi qora-oq polosalar ko‘rinishidagi izoxromalar manzarasini qayd qilish uchun yuqori optik sezuvchanlikka ega bo‘lgan OSM li. Kontakt kuchlanishlari tanlangan kesimlar yoki bosh kuchlanishlarning trayektoriyalari bo‘yicha muvozanat tenglamalarini integrallash bilan birlashtirilgan izoklinlar va izoxromalarning manzaralaridan foydalanish bilan N.A.Chinenevning urinma kuchlanishlarning farqi uslubi bilan aniqlangan: $\tau = m\sigma_0^{1,0} \sin 2\theta/s_M$, bu yerda θ – izoklinning parametri (σ_1 ning yo‘nalishi).

Rasmelastiklik uslubi bilan hajmiy modellarda optik-sezuvchan yopishtirmalarni qo‘llash, “muzlatib qo‘yish” usuli va N.A.Chinenevning boshqa usullarini qo‘llash bilan uch o‘lchovli kuchlangan holat tadqiq qilinadi.

OSM dan ishlangan yopishtirma shaffof OSBM dan ishlangan modelning tadqiq qilinadigan kesimiga joylashtiriladi. Shuningdek, modelning mos keluvchi bo‘shlig‘iga quyilgan kompaundni polimerlashdan ham foydalaniladi. Yopishtirma imkon qadar simmetriya

tekisligiga joylashtiriladi. Yopishtirmaning qalinligi unda kuchlanishlarning taqsimlanishi bir tekis deb hisoblash mumkin bo'lishi uchun kichik bo'lishi lozim. Polosalarning kuzatiladigan manzarasi faqatgina yopishtirmaning kuchlangan holatini tavsiflaydi, chunki modelning asosiy materiali p'ezooptik effektga ega emas.

Agar bo'ylama va ko'ndalang yopishtirmalar bosh tekisliklarda joylashgan bo'lsa, u holda ular uchun $\sigma_1 - \sigma_1 = m\sigma_0^{1,0}/s_M$ nisbat adolatli bo'ladi.

“Muzlatib qo'yish” usuli murakkab modelning ko'plab kesimlarida kuchlangan holatni o'rganish zarur bo'lgan hollarda qo'llaniladi. $t = 20^\circ\text{C}$ da shishasimon bo'lgan va $t = 120\dots 180^\circ\text{C}$ da qayishqoq (yuqori elastik) holatga o'tadigan polimer materialdan ishlangan modellardan foydalaniladi.

Model qiziguncha tashqi kuchlar tizimi bilan yuklanadi va qayishqoq holat haroratida ushlab turiladi. Model sovutilganda shishasimon faza qotish bilan N.A.Chinenev va Ye.P.Unksovning deformatsiyalangan elastiklik fazasini qotiradi (muzlatadi). Model yupqa yassi namunalarga (tepletlar) qirg'iladi va tadqiq qilinadi. Optik effekt yassi bo'lib hisoblanmaydi, biroq τ_{xz} , τ_{yz} , σ_z tarkibiy qismlar Oz o'q bo'ylab yo'naltirilgan nurga ta'sir ko'rsatmaydi.

“Muzlatilgan” modelni qutblagichning maydonida to'lig'icha tadqiq qilishning iloji yo'q, chunki polosalarning manzarasi nurning yo'lidagi yurishning integral farqini aks ettiradi. Kuchlangan holatning tepletning qalinligi bo'ylab notekis ta'sirini istisno qilish uchun bir nechta o'lchashlar o'tkaziladi, uning qalinligi kamaytiriladi va kuchlangan holatning parametrlarini o'lchash natijalari qirqimning nol qalinligida ekstrapolyatsiyalanadi.

Kuchlangan holatning tarkibiy qismlarining alohida-alohida qiymatlarini olish uchun yordamchi tepletlar ishlanadi. “Muzlatilgan” modellarni tadqiq qilishda kuchlanishlarni ajratish uslubiyati N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan.

Rasmplastiklik uslubi. Shaffof materiallardan ishlangan modellarni qo'llash bilan elastiklik chegarasidan tashqarida kuchlanishlar va deformatsiyalarni tadqiq qilishning qutblash-optik uslublariga *rasmplastiklik uslubi* deb ataladi.

Bu uslub uchun foydalanilgan materiallarning tavsiflari N.A.Chinenev ulardan qisman foydalanganini ko'rsatadi. Kumush, talliyning galloidli tuzlari, ularning qotishmalari va polimerlari istiqbolli deb hisoblanadi, chunki ularda Vertgeym qonuni qayishqoq sohada ham, plastik sohada ham bajariladi. Biroq izoxromalarning sifatini belgilaydigan kvaziizotropik uchun nurning yo'lida 40 tadan kam bo'lmagan ma'lum bir o'lchamli donlar bo'lishi zarur, buni bajarish qiyin. Katta deformatsiyalarga ega bo'lgan qaynoq deformatsiyalash jarayonlarini modellashtirish uchun Ye.P.Unksovning deformatsiyani "muzlatish" uslubini ($130...140^{\circ}\text{S}$; $\mu = 0,5 = \text{const}$) qo'llash to'g'ri bo'ladi.

Rasmplastiklik uslubida foydalaniladigan model materiallari katta deformatsiyalarda optik effekt va deformatsiyaning tavsifi o'rtasida bir qiymatli bog'lanishga, optik effektning "muzlatish" va templetlarga qirqishda yuklama berilganda mexanik tavsiflarga bog'liq ravishda barqarorligiga, past oquvchanlik kuchlanishiga, "muzlatish" haroratlarida turlicha qayishqoqlik modullari va hokazolarga ega bo'lishi lozim.

Rasmplastiklik shartlari uchun optik yurish va deformatsiyalar farqlarining optik-mexanik bog'lanish qonuni Ye.P.Unksovning $\Delta = F(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ funktsional bog'lanishi ko'rinishida foydalaniladi. Bog'lanishning turi eksperimentlar seriyasi bilan aniqlanadi, bu seriyalar yassi namunalarni bir o'qli cho'zish, silindrik namunalarni bir o'qli siqish yoki Ye.P.Unksov yassi deformatsiyasi sharoitlarida silindrni radial o'tirg'izishni o'z ichiga oladi. Ye.P.Unksov bo'yicha 30% gacha deformatsiya darajasi bilan yassi va chiziqli deformatsiyalash sharoitlarida m/sm optik effekt va $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ va $e_1 - e_2$ bosh deformatsiyalarning farqlari o'rtasidagi (5.35) chiziqli bog'lanish eksperimental yo'l bilan aniqlangan.

Rasmelastiklik uslubidan farqli o'laroq, rasmplastiklik uslubida izoklinni nima belgilaydi – bosh deformatsiyaning yo'nalishimi (burchakni $\theta\varepsilon$ orqali belgilash) yoki bosh kuchlanishning yo'nalishimi (burchakni $\theta\sigma$ orqali belgilash) degan savolga bir qiymatli javob yo'q. Modelning deformatsiyalangan holati va prototipning kuchlangan holatini tahlil qilishning bir nechta yo'llari tavsiya qilinadi.

Kichik deformatsiyalarda bosh kuchlanishlar, deformatsiyalar va izoklinlarning yo‘nalishlari mos tushadi deb hisoblashga yo‘l qo‘yiladi. Vertgeym qonuni (5.36) ko‘rinishida qo‘llaniladi. Kichik elastik-plastik deformatsiyalar nazariyasining bog‘lanishlari va A.D.Tomlenovning deformatsiyalarni birlashtirish shartidan foydalaniladi.

Yassi kuchlangan holatda deformatsiyalarning tarkibiy qismlari mos ravishda

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= 2m\varepsilon_0^{1,0}/3s_M; \quad \varepsilon_z = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 - 2m\varepsilon_0^{1,0}/3s_M; \quad \varepsilon_x + \varepsilon_y = -\varepsilon_3; \\ \varepsilon_x - \varepsilon_y &= (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta; \quad \gamma_{xy} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (5.40)$$

ga teng bo‘ladi,

bu yerda θ – ε_1 ning yo‘nalishi.

Yassi deformatsiyalangan holatda

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= m\varepsilon_0^{1,0}/2s_M, \quad \varepsilon_2 = -m\varepsilon_0^{1,0}/2s_M; \\ \varepsilon_x &= \varepsilon_1 \cos 2\theta = m\varepsilon_0^{1,0} \cos 2\theta /s_M; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_2 \cos 2\theta \\ &= -m\varepsilon_0^{1,0} \cos 2\theta /s_M; \\ \gamma_{xy} &= 2\varepsilon_1 \sin 2\theta = 2m\varepsilon_0^{1,0} \sin 2\theta /s_M.\end{aligned}\quad (5.41)$$

Umumiy holatda deformatsiyalar modelning qirqimini 90 va 45° burchak ostida yoritish yoki “muzlatilgan” modelning uchta qirqimini N.A.Chinenev va Ye.P.Unksov koordinatalar tekisliklarini parallel yoritish ma’lumotlari bo‘yicha aniqlanadi.

Katta monoton deformatsiyalar holatida bosh kuchlanishlar va logarifmik deformatsiyalarning yo‘nalishlari mos tushadi degan yo‘l qo‘yilish kiritiladi. Bu holda izoklinni nima belgilashi – bosh deformatsiyaning yo‘nalishimi yoki bosh kuchlanishning yo‘nalishi belgilashining farqi qolmaydi. (5.4) ko‘rinishdagi Vertgeym qonunini faqatgina yoritiladigan tekislik doimiy yo‘nalishli bosh kuchlanishlar va deformatsiyalar tekisligi bo‘lib hisoblanadigan yassi yoki o‘q simmetrik nominal deformatsiya kuchlarida qo‘llasa bo‘ladi,

$$e_1 - e_2 = m\varepsilon_0^{1,0}/s_M; \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0; \quad \varepsilon_3 = \Delta \quad (5.42)$$

bunda oxirgi tenglama muzlashdan chiqarilgan qirqimning mahalliy qalinliklarini o'lchash natijasi bo'lib hisoblanadi, yassi deformatsiyada $\Delta = 0$ bo'ladi:

$$e_\alpha = e_1 \cos^2 \alpha + e_2 \sin^2 \alpha, \quad (5.43)$$

bu yerda α – izoklin bilan beriladigan yo'nalish.

Kuchlangan holatni hisoblash uchun yuqorida ko'rsatilgan formulaning bog'lanishlaridan foydalaniladi.

Oqish nazariyasidan foydalanish bilan nominal deformatsiya kuchini tahlil qilish uchun fotoplastiklik uslubi qo'llanilganda izoklin bosh oxirgi deformatsiyalar yoki bosh kuchlanishlarning yo'nalishini beradi deb qabul qilinadi. Birinchi holatda izoklinning yo'nalishiga bosh kuchlanishlar va deformatsiya tezliklarining (deformatsiyaning ortishlarining) yo'nalishlari mos tushmaydi deb, ikkinchi holatda esa izoklinning yo'nalishiga Ye.P.Unksov bosh kuchlanishlarining yo'nalishlari mos tushadi deb hisoblanadi. Vertgeym qonuni, agar nominal deformatsiya kuchini tahlil qilish kichik bosqichma-bosqich deformatsiyalar va kichik deformatsiya farqlarida bosqichma-bosqich olib borilsa – (5.2) bog'lanish ko'rinishida yoki (5.5) ortishlar ko'rinishida yoziladi, bu N.A.Chinenev va Ye.P.Unksovni qo'llash sohalarini chegaralamaslik imkonini beradi.

Obyekt Δt davrda (5.4) ifodaga muvofiq yuklanganda $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ bosh deformatsiyalarning farqlari va izoklinning θ_1 parametrining qiymatlari plastik zonaning qandaydir bir nuqtasida davrning boshida (1 indeks bilan belgilangan) va oxirida (2 indeks bilan belgilangan) aniqlanadi. Shunda:

$$\begin{aligned} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)_1 &= (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1 \cos 2\theta_1; \quad (\gamma_{xy})_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1 \sin 2\theta_1; \\ (\varepsilon_x - \varepsilon_y)_2 &= [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1 + \Delta(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1] \cos 2(\theta_1 + \Delta\theta); \\ (\gamma_{xy})_2 &= [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1 + \Delta(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1] \sin 2(\theta_1 + \Delta\theta). \end{aligned} \quad (5.44)$$

Deformatsiyalarning kichik bosqichma-bosqich farqlarida quyidagi munosabatlar adolatli bo‘ladi:

$$d\varepsilon_x - d\varepsilon_y = (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2) \cos 2\theta; \quad d\gamma_{xy} = (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2) \sin 2\theta \quad (5.45)$$

So‘ngra Ye.P.Unksovning ishlarida keltirilgan formulalar bo‘yicha har bir bosqichda deformatsiyalar ortishining yo‘nalishi ($\theta d\varepsilon$ burchak) aniqlanadi.

Izoklin bilan bosh kuchlanishlarning yo‘nalishlari aniqlanadigan holatda plastik deformatsiya kuchlanishlari va tezliklarining (deformatsiya ortishining) deviatorlari o‘xshash va koaksial bo‘ladi. $\theta d\varepsilon$ ni aniqlashga hojat qolmaydi.

Deformatsiya tezliklarining tarkibiy qismlariga o‘tishda ularni Δt vaqt kesmasida nisbiy deformatsiyalarning ortishi sifatida hisoblaymiz:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y &\approx \frac{[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)_2 - (\varepsilon_x - \varepsilon_y)_1]}{\Delta t} \\ &= \frac{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_2 \cos 2\theta_2 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1 \cos 2\theta_1]}{\Delta t}; \\ \dot{\gamma}_{xy} &\approx \frac{[(\gamma_{xy})_2 - (\gamma_{xy})_1]}{\Delta t} = \frac{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_2 \sin 2\theta_2 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_1 \sin 2\theta_1]}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (5.46)$$

Izoklinning kuchlanishlar bo‘yicha (θ_σ) va deformatsiya tezliklari bo‘yicha (θ_ε) parametrlari

$$tg 2\theta_\varepsilon = \frac{\dot{\gamma}_{xy}}{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y} = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = tg 2\theta_\sigma. \quad (5.47)$$

ifodalarga muvofiq aniqlanadi.

Kuchlanishlar har qanday plastiklik nazariyasidan foydalanish bilan topiladi. Xususan, o‘q simmetriyali tayyorlanmalarni yassi deformatsiyalash holatlari uchun kuchlanishlarni Sen-Venan – Levi – Mizes oqish nazariyasining

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \cos 2\theta + p; \quad \sigma_y = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \cos 2\theta + p; \\ \sigma_z &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) = p; \quad \tau_{xy} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sin 2\theta,\end{aligned}\quad (5.48)$$

ko‘rinishdagi bog‘lanishlari bo‘yicha hisoblash mumkin,
Bu yerda θ – bosh maydonchalarning Ox o‘qqa nisbatan egilish burchagini bildiradi.

Gidrostatik bosim muvozanat differentsial tenglamalarini oxirgi farqlar uslubi bilan yechish bilan topiladi:

$$p = \sigma_{x_0} - \int \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx - \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \cos 2\theta, \quad (5.49)$$

bu yerda σ_{x_0} – erkin konturda yotadigan simmetriya o‘qida integrallash boshlanadigan nuqtadagi σ_x kuchlanish.

Kichik va katta deformatsiyalar uchun deformatsiya nazariyasi va oqish nazariyasidan foydalanish bilan nominal deformatsiya kuchining tarkibiy qismlarini hisoblash ko‘proq batafsil Ye.P.Unksovning ishlarida ko‘rib chiqilgan.

5.8. Optik-sezuvchan qoplamalar va strukturaviy-nasllilik materiallar uslublari

Elastikplastik masalalarni tadqiq qilish uchun optik-sezuvchan qoplamalar (OSQ) uslubini A.Ya.Aleksandrov taklif qilgan. Naiuna-ning yuzasiga yaxshi adgeziya, kichik qattqlik, N.A.Chinenev va Ye.P.Unksov namunasining deformatsiyasidan oshiq bo‘lgan elastik deformatsiya chegaralariga ega bo‘lgan epoksid smola yoki poliuretan rezina qoplamasi surkaladi. Qoplama amalda deformatsiyalar datchigi bo‘lib hisoblanadi va butun maydon bo‘ylab deformatsiyalar farqini va ularning yo‘nalishini aniqlash imkonini beradi. Agar OSQ ning naiunaning yuzasi bilan adgeziyasi yetarli bo‘lsa, u holda yuzaning tashqi yuklamaning ta’siri natijasida vujudga keladigan deformatsiyasi to‘lig‘icha qoplamaga uzatiladi, bu - qoplamada qo‘shaloq nur sinishi vujudga kelishini shartlaydi.

Bunday OSQ lar yordamida ularda o‘rtacha deformatsiya 20% dan oshmaydigan, maksimal mahalliy deformatsiya esa 30-50% ni tashkil qiladigan plastik shakl hosil qilish jarayonlari tadqiq qilinadi. Qoplamaning qalinligi 0,5...1,0 mm va $\varepsilon = 1...3\%$ bo‘lganda 2,5...3,5 ta izoxromatik polosalarni olish mumkin, bu ishlov berish uchun N.A.Chinenevning kompensatsiya uslublaridan foydalanmaslik imkonini beradi. Ba'zi bir kompaundlarning tarkibi va polimerlash rejimlari N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan. Kompaundlar optik effekt va deformatsiyalar o‘rtasidagi chiziqli bog‘lanishni 15...20% gacha saqlaydi.

OSQ va mo‘rt qoplamalarning ishlash tamoyillari bir xil ($\sigma_z = \sigma_3 = 0$; $\varepsilon_1^K = \varepsilon_1^M$; $\varepsilon_2^K = \varepsilon_2^M$, bu yerda «q» va «m» indekslarga ega bo‘lgan kattaliklar mos ravishda qoplama va modelga tegishli). Qoplama va namunaning yuzasida bosh kuchlanishlarning farqlari to‘g‘ri proporsional bo‘lishi aniqlangan. Proporsionallik koeffitsiyenti modelning materiali va qoplamaning elastik doimiylariga bog‘liq bo‘ladi. Masalan, «po‘lat – epoksid smola» juftligi uchun u 0,04 ga teng.

Vertgeym va Guk qonunlarini hisobga olish bilan

$$\sigma_1^M - \sigma_2^M = \frac{E^M(1+\mu_K)\sigma_0^{1.0}m}{E^K(1+\mu_K)2s_K}; \quad \varepsilon_1^M - \varepsilon_2^M = \frac{\varepsilon_0^{1.0}m}{2s_K} = \frac{\sigma_0^{1.0}}{2s_K} \left(\frac{1+\mu_K}{E^K} \right) m. \quad (5.50)$$

ga ega bo‘lamiz.

Izoxromalar va izoklinlarning manzaralari qaytaruvchi qutblagichlar yordamida kuzatiladi. Qutblash-optik uslublar bilan olinadigan manzaralardan farqli o‘laroq, izoxromalar va izoklinlar oilalari bosh kuchlanishlarning faqatgina Ye.P.Unksov elastik deformatsiyalari sohasida bosh kuchlanishlarning yo‘nalishi bilan mos tushadigan farqi va yo‘nalishini tavsiflaydi. Sq qoplamaning qalinligi qaytarilgan yorug‘likdan foydalanilgani uchun ikkilangan qilib hisobga olinadi. U deformatsiyalarni o‘lchash aniqligi bilan belgilanadi. Deformatsiya uchastkasining l uzunligi va $l/sp > 20...5$ nisbatda o‘lchashlarning xatoligi N.A.Chinenev bo‘yicha 1-10% ni tashkil qiladi.

Bir o‘qli cho‘zishga sinovlarda ε_i dan σ_i kalibrlash grafigi yoki namunaning materiali uchun y_{ei} yoki qoplamaning materiali uchun $\Delta = F(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ yoki $\Delta = F(e_1 - e_2)$ olinadi. Ob'ekt izoxromalar va izoklinlar manzarasini qayd qilish bilan (har bir nuqtada Δ ni) bosqichli yuklanadi. Aksariyat qo‘llaniladigan materiallar uchun kalibrlash grafigi chiziqli xarakterga ega bo‘ladi, va shundan kelib chiqqan holda, bo‘limning boshida keltirilgan asosiy bog‘lanishlar kichik va oxirgi deformatsiyalar uchun adolatli bo‘ladi. Asosiy bog‘lanishlar quyidagi ko‘rinishga ega:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0^{1.0} m}{2s_{II}}; \quad e_1 - e_2 = \frac{e_0^{1.0} m}{2s_{II}}; \quad de_1 - de_2 = \frac{dme_0^{1.0}}{2s_{II}}, \quad (5.51)$$

Bu yerda $dm = mn + 1 - tp$; $mn + 1$ va $mn -$ mos ravishda yuklashning keyingi va oldingi bosqichlarida interferentsion polosaning tartibi.

Qoplama polosalar manzarasi bo‘yicha yoritilganda interferentsiyalar bosh deformatsiyalar yoki ularning ortishining farqlarini belgilaydi, izoklinlar manzarasi bo‘yicha esa qoplamaning har qanday nuqtasida ularning yo‘nalishi aniqlanadi. Quyidagi munosabatlarga egamiz:

$$\begin{aligned} e_x - e_y &= (e_1 - e_2) \cos 2\theta; \quad \gamma_{xy} = (e_1 - e_2) \sin 2\theta; \\ de_x - de_y &= (de_1 - de_2) \cos 2\theta; \quad d\gamma_{xy} = (de_1 - de_2) \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (5.52)$$

Bu yerda θ – birinchi bosh kuchlanishning OX o‘qqa nisbatan yo‘nalishi, u bilan bosh deformatsiyalarning va bosh deformatsiyaning ortishining yo‘nalishlari mos tushadi deb taxmin qilinadi.

Elastiklik sohada bosh deformatsiyalarni (kuchlanishlarni) ajratish usullari yuqorida ko‘rsatilgan materialdagi bilan bir xil. Biroq muvozanat tenglamalaridan faqatgina elementning o‘zidagi kuchlanishlarni aniqlash uchun foydalaniladi, chunki qoplamaning element bilan tishlashish kuchlari qoplamadagi kuchlanishlar bilan

teng bo‘ladi va tadqiq qilinadigan Ye.P.Unksov jismidagi kuchlanishlarga qaraganda kichik bo‘ladi.

Qoplamadagi $e_1 - e_2$ farq aniqlangandan keyin metalldagi bosh kuchlanishlarning farqiga o‘tiladi:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = E(e_1 - e_2)(1 + \mu_K). \quad (5.53)$$

So‘ngra rasmelastiklik uslubi bilan kuchlanishlarning ajratilgan qiymatlari aniqlanadi va zarurat bo‘lgan hollarda deformatsiyalarga o‘tiladi.

Elastiklik chegaralaridan tashqarida hisoblashlarda deformatsiyalarni ajratish protsedurasi murakkablashadi, chunki umumiy ko‘rinishda $e_1 - e_2$ ba $\sigma_1 - \sigma_2$ o‘rtasidagi bog‘lanish noma‘lum bo‘ladi va bu o‘zgarishlarga qoplamaning qalinligining ta’siri kuchayadi.

Qoplamaning qalinligini N.A.Chinenev bo‘yicha $\varepsilon \geq 10\%$ da hisobga olish tavsiya qilinadi.

Yassi plastik deformatsiyada kuchlanishlar namuna va qoplamaning ye_3 yig‘indi ko‘ndalang deformatsiyasini o‘lchash va

$$e_1 - e_2 = -e_3 / [\mu_K s_K (1 - \mu_K) + \mu_M s_M / (1 - \mu_M)] \quad (5.54)$$

formula bo‘yicha hisoblash bilan ajratiladi.

Katta plastik deformatsiyalarda ($\mu = 0,5$) plastik zona uchun bog‘lanish formulalaridan foydalanish mumkin.

Qoplamalar uslubi bilan odatda yassi masalalar tadqiq qilinishi sababli, muvozanat tenglamalaridan foydalanishda quyidagilar aniqlanadi:

$$\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{\sin 2\theta}{2}; \quad \sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta;$$

$$\sigma_x = \sigma_{x,0} - \sum \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x; \quad \sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}. \quad (5.55)$$

Birinchi formula deformatsiyalar qoplamaning qalinligi bo‘ylab bir tekis taqsimlangan va ob'ektning yuza deformatsiyalariga proporsional deb taxmin qilish bilan olingan. Deformatsion gradiyentlar bor bo‘lganda qoplamaning deformatsiyalangan holati qalinlik bo‘ylab o‘zgaradi. Shu sababli yuza deformatsiyalarining hisobiy kattalıkları xatolıklarga ega bo‘lishi mumkin. Nazariy va eksperimental tarzda shu aniqlanganki, model va qoplama materilalarining Puasson koeffitsiyentlaridagi farqlar o‘lchashlarning natijalariga sezilarli ta’sir ko‘rsatmaydi.

$\varepsilon \geq 10\%$ da ishlash uchun OSQ li namunalarni kalibrlashda

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^K; \varepsilon_1^K = -\mu\varepsilon_1; \varepsilon_{111}^K = \frac{\mu_K}{1-\mu_K}(1 - \mu_M)\varepsilon_1, \quad (5.56)$$

deb qabul qilinadi.

Bu yerda ε_{111}^K – qoplamaning qalinlik bo‘ylab deformatsiyasi.

OSQ ning qalinligining o‘zgarishini hisobga olish bilan izoxromaning tartibi yaqinlashuvchi tarzda $2m = 2s_K\varepsilon_1(1 + \mu_M)\varepsilon_0^{1,0}$ sifatida aniqlanadi.

1 mm dan oshiq bo‘lmagan qalinlikka ega bo‘lgan qoplamalar kompaundni bevosita o‘rganiladigan yuzaga quyish va so‘ngra sovuq qotirish yoki issiq polimerlash bilan olinadi. Murakkab shaklga ega bo‘lgan qoplamalar yopishtirishdan oldin to‘liq bo‘lmagan polimerlashga tortiladi, so‘ngra qisiladi va yakuniy polimerlashga tortiladi.

Qoplamaning sezuvchanligi materialning xususiyatlariga bog‘liq bo‘ladi va uning qalinligiga to‘g‘ri proporsional bo‘ladi. Epoksid smolalar uchun u o‘rtacha 2000 birlikni, poliuretan rezinalar uchun – 130 birlikni tashkil qiladi.

Namunani yuklashda yuklamaning bir qismini o‘ziga qabul qiladigan OSQ ning mustahkamlovchi ta’sirini qoplama va metall qalinligining nisbati N.A.Chinenev bo‘yicha birdan kam bo‘lganda hisobga olmaslik mumkin.

OSQ uslubi, rasmelastiklik uslubidan farqli o‘laroq, o‘xshashlik nazariyasi doirasida modellashtirish shartlariga rioya qilishni talab qilmaydi. Yassi kuchlangan holatni tadqiq qilishda shu narsa aniqlanganki, masalan, modelning yon qirrasida qatlamlanmagan

qoplama kamroq yuklamaga bardosh beradi. Yassi deformatsiya shartlarini amalga oshirish uchun model ikkita zalvorli cho‘zilgan oboymalar orasiga joylashtiriladi. Qoplama tadqiq qilinadigan yuzaning $2/3$ qismini egallaydi. Model namunaning simmetriyasining vertikal-bo‘ylama tekisligiga joylashtirilganda uning balandligining kengligiga nisbati N.A.Chinenev bo‘yicha $1:5\dots 1:7$ ni tashkil qiladi.

Strukturaviy - nasllilik uslublari. Strukturaviy-nasllilik uslublariga quyidagi uslublar kiradi: mikrostrukturaviy, qattqlikni o‘lchash, mo‘rt qoplamalar, sirpanish chiziqlari, interferometriya va rentgen uslublari hamda boshqalar. Mana endi ularning ba‘zilari bilan tanishib chiqamiz.

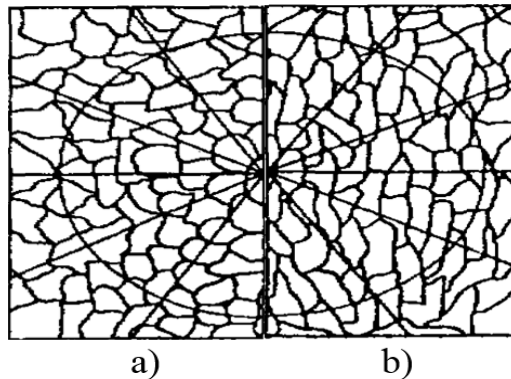
Mikrostrukturaviy uslub

Bu uslub G.A.Smirnov-Alyaev tomonidan taklif qilingan. U metallning alohida donlarining bosh deformatsiyalarining tarkibiy qismlarining kattaligi va yo‘nalishi bo‘yicha deformatsiyalangan holatning turi va darajasini miqdoriy baholash imkonini beradi. Uslubdan detallarning tor zonalari va chegara shartlarining uzluksizligi buzilgan joylarni tadqiq qilish, masalan, “zagotovka-tayyorlanma – o‘tkir tig‘li uskuna” kontakt yuzasining konturini tadqiq qilish uchun foydalanish maqsadga muvofiq bo‘ladi. Bundan tashqari, bu uslubdan yaxlit muhitning struktura, donlarning o‘zaro harakatlari va kuchlanishlarning konsentratsiyalarini tadqiq qilishda aniqlanadigan bir qator hodisalarining mexanika tamoyillaridan chetlashishlarining sabablarini tahlil qilish uchun foydalaniladi.

Uslub zagotovkaning teng o‘qli va bir jinsli mikrostrukturasi oldindan aniqlangan deb taxmin qilishga asoslangan. Shu sababli deformatsiyalangan zagotovkani o‘rganishda qaysi zonani tanlashning farqi bo‘lmaydi. Deformatsiyalanmagan metallning mikrostrukturasi to‘g‘risidagi ma’lumotlar bo‘yicha ρ_0 to‘g‘ri chizikli kesmaning uzunligi aniqlanadi, so‘ngra unga oldindan belgilangan N_0 donlar soni joylashtiriladi, A.A.Ilyushinning qaratilish parametriga muvofiq G.A.Smirnov-Alyaev bo‘yicha 8,5-10 ta donlar joylashtiriladi. So‘ngra deformatsiyalangan tayyorlanmaning mikroshlifiga

kiritilgan aylananing markazidan $\theta = 10..30^\circ$ doimiy burchak qadamiga ega bo'lgan ρ_0 uzunlikdagi kesmalar o'tkaziladi (5.15-rasm). 0..1800 aylananing diametriga mos keladigan yo'nalish u detalning qandaydir bir geometrik o'qining yo'nalishi bilan, yoki, masalan, detalning gabarit chizig'i kesmasining yo'nalishi bilan mos keladigan qilib tanlanadi. Nolinchi yo'nalish bilan ma'lum bir burchak hosil qiladigan yo'nalishda kesma tanlangandan keyin bu kesma deformatsiyadan keyin uzaygan yoki qisqargan N ta belgilangan donlar soni bilan kesishganda uning r uzunligi topiladi.

Odatda mikroshlifning fotosuratiga to'r – trafaret qo'yiladi, unga har 15° dan keyin o'tkazilgan diametrlarga ega bo'lgan o'nta donning o'lchamiga teng bo'lgan ρ_0 radiusli aylana va jami bo'lib 13 ta raqamlangan kesmalar kiritiladi. Demak, eksperimentdan ρ_0 yoki N_0 ning qiymati va ρ yoki N ning qiymatlari massivi θ burchakning funksiyasi sifatida olinadi.



5.15-rasm. 30° qadam bilan chiziqlar to'ri kiritilgan mikroshlifning deformatsiyadan oldingi (a) va keyingi (b) sxemasi.

Oxirgi deformatsiyalar nazariyasining qoidalariga muvofiq, ellipsga aylanadigan aylana uchun θ ning funksiyasi sifatidagi ρ_0^2/ρ^2 bog'lanish sinusoidal qonunga bo'ysunadi va

$$\rho_0^2/\rho^2 = k_i + A_i \cos 2\theta = (N/N_0)^2 \quad (5.57)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.

k_i va A_i koeffitsiyentlarni hisoblash uchun bog‘lanishlar eksperimental ma’lumotlardan tuzilgan turli yig‘indilarning kombinatsiyasi bo‘lib hisoblanadi.

Deformatsiyalarning bosh tarkibiy qismlari

$$\varepsilon_1 = -0,5\ln(\rho_0^2/\rho^2)_{min}; \varepsilon_2 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_3); \varepsilon_3 = -0,5\ln(\rho_0^2/\rho^2)_{max} \quad (5.58)$$

bog‘lanishlarga muvofiq aniqlanadi.

Deformatsiyalangan holatning turi va uning shiddati yuqorida keltirilgan formulaning bog‘lanishlari bo‘yicha aniqlanadi. Uslubni amalga oshirishda operatsiyalar 0,2...0,5 mm o‘lchamli boshlang‘ich to‘r bazasi bilan bajariladi, to‘r bazasining o‘lchamlari donlarning o‘lchamlari bilan belgilanadi, donlarning o‘lchamlari esa tayyorlanmaga boshlang‘ich termik ishlov berishga bog‘liq bo‘ladi. Uslubning imkoniyatlari uni muar va koordinatalar to‘ri uslublari orasidagi oraliq uslub deb hisoblash imkonini beradi.

Qattqlikni o‘lchash uslubi

Uslub plastik deformatsiyalangan metallning H_i qattqligi va yuklash turidan qat’iy nazar butun jarayon davomidagi σ_i maksimal kuchlanishlarning shiddati o‘rtasidagi funksional bog‘lanishga asoslangan.

Uslubning rivojlanishiga G.D.Del ulkan hissa qo‘shgan. G.D.Delning fikriga ko‘ra, agar turli kuchlangan holatlar uchun «qattqlik – kuchlanishlarning shiddati» oqish egri chiziqlari qizdirish haroratidan qat’i nazar mos tushadi deb hisoblansa, u holda «qattqlik – solishtirma shakl o‘zgartirish ishi» egri chiziqlari amalda mos tushadi. Shunday qilib, tasvirlangan uslubdan shakl o‘zgartirish ishini baholash uchun asoslar bor.

Makroqattqlikni tadqiq qilish uchun quyidagi uslublar qo‘llaniladi: Brinell uslubi – po‘lat sharikni bosish (HB), Rokvell uslubi – olmos konusni bosish (C,A shkala, HRC) va Vickers uslubi (HV) – olmos piramidani bosish. Bu usullar tez-tez qo‘llanib turiladi.

Ayniqsa, Vickers uslubi ko‘proq qo‘llaniladi, chunki u izning atro-fida minimal plastik zonani ta’minlaydi, bu unchalik katta bo‘lmagan maydonda yetarlicha o‘lchashlar sonini bajarish imkonini beradi.

Iz diagonalining o‘lchami alohida strukturaviy tarkib toptiruv-chilarning o‘lchamidan anchagina katta bo‘lishi lozim. Tadqiq qilinadigan yuza yaltiratilgan bo‘lishi lozim. Vickers uslubidan foydalanilganda namunaning minimal qalinligi po‘lat uchun izning diagonalidan 1,2 marta va rangli metallar uchun 1,5 marta katta bo‘lishi lozim. Izlarning markazlari o‘rtasidagi masofa uning diago-nalining uzunligidan 2,5 marta katta bo‘lishi lozim.

Rokvell uslubi natijalarning kichik barqarorligi bilan, Brinell uslubi esa izning atrofida katta plastik zona hosil bo‘lishi bilan ajralib turadi, bunda namunaning qalinligi d diametrli izning chuqurligidan kamida n marta katta bo‘lishi lozim. Izlar o‘rtasidagi va izning markazidan namunaning chekkasigacha bo‘lgan masofa mos ravishda $4d$ ga katta va $2,5d$ ga teng bo‘lishi lozim. Shu bilan birgalikda Brinell uslubi bilan izning katta o‘lchamlari olinishi hisobiga eng katta aniqlikka erishiladi, shu sababli deformatsiya o‘chog‘ining o‘lchamlari katta bo‘lgan jarayonlarni tadqiq qilishda uning o‘rnini bosadigani yo‘q.

HV (σ_i, e_i) kalibrlash grafigi ular uchun materiallarning qattiq-ligining nominal deformatsiya kuchini aniqlash mumkin bo‘ladigan bir o‘qli cho‘zish-siqishga o‘tkaziladigan sinovlarning ma’lumotlari asosida quriladi.

Uslublarning har biri o‘zining ko‘proq qo‘llanilish sohasiga ega va boshqasining natijalarini to‘ldiradi. e_i va σ_i ning qiymatlari quyidagi formulalar bo‘yicha aniqlanadi:

$$e_i = \ln(l/l_0); \quad \sigma_i = Q/F, \quad (5.59)$$

Bu yerda l/l_0 , F – mos ravishda namunaning ko‘ndalang kesi-mining boshlang‘ich va oxirgi uzunligi va maydoni; Q – defor-matsiyalovchi kuch.

Burash bilan kalibrlash kuchlanishlarni ishonchli tarzda aniq-lash uchun bir juft namunani sinovdan o‘tkazish zarurligi,

shuningdek silindrik yuzada qattqlikni o'lchash xatoligi bilan qiyinlashadi.

Kalibrlanadigan namunalar bosqichli yuklanadi, har bir bosqichda uch-beshta nuqtada qattqlik o'lchanadi va y_e va σ_i hisoblanadi. Katta deformatsiyalarda qattqlikni o'lchash natijalarini tekshirish uchun yoki $y_e > 0,2$ da kalibrlash bog'lanishi sifatida $\sigma_i = (0,33...0,37)$ HV nisbatdan foydalaniladi.

Shunday qilib, « $\sigma_i - H$ » kalibrlash grafigiga ega bo'lish bilan plastik zonada σ_i ning taqsimlanishini olish mumkin. Qattqlik bo'yicha σ_i ni aniqlash aniqligining y_{e_i} ga bog'lanishi katta emas.

Deformatsion anizotropiya va qoldiq kuchlanishlar qattqlikka kam ta'sir ko'rsatadi. Bir o'qli kuchlangan holatga sinovlarda olingan « $\sigma_i - H_V$ » bog'lanishning analitik ifodasi

$$\frac{\sigma_i - \sigma_y}{\sigma_T - \sigma_y} = \frac{H_i - H_y}{H_T - H_y} \frac{A_1/A_3 + (H_i - H_y)^2}{A_1/A_3 + (H_T - H_y)^2}, \quad (5.60)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.

Bu yerda σ_t , σ_u va $N_j N_u$ – mos ravishda boshlang'ich va eng chekka barqaror deformatsiya holatida oquvchanlik chegarasi va qattqlikning qiymatlari; A_1 va A_3 – metallning boshlang'ich qattqligiga va eksperimentning natijalariga bog'liq bo'lgan koeffitsiyentlar. Uglerodli po'latlar uchun ($\sigma_t = 350...410$ MPa; $N_t = 230...290$) $A_i/A_3 = H_t$.

Qattqlik bo'yicha e_i ni aniqlash σ_i ni aniqlashga qaraganda kamroq aniq bo'lib hisoblanadi. U model va kalibrlanadigan namunalarning boshlang'ich qattqligi teng bo'lganda va katta yuklamada qattqlikni o'lchash aniqligi yuqori bo'lganda yetarlicha ishonchli bo'ladi. Bu xulosa monoton deformatsiyalashga tegishli.

Monoton bo'lmagan jarayonda yuklamaning olinishi va deformatsiyalash yo'nalishining o'zgarishi σ_i , o'zining yuklamani olishdan oldingi darajasiga erishmaguncha qattqlikning o'zgarishiga olib kelmaydi. Deformatsiyalash davom ettirilganda « $\sigma_i - H_V$ » egri chiziq monoton jarayonda olingan egri chiziq bilan mos tushadi.

Qattqlik go'yo σ_i ning oquvchanlik chegarasidan yuqori bo'lgan monoton ortishiga ergashadi. Shu sababli yuklashning oxirgi bosqichida plastik deformatsiyaga qattqlikning o'zgarishi hamrohlik qiladi. Agar jismning qandaydir bir sohasi faqatgina qayishqoq tarzda emas, balki plastik tarzda ham yuklamadan xalos qilinsa, masalan, qattqlikni o'lchashlarda, u holda qattqlik bo'yicha aniqlangan σ oshirilgan bo'lib chiqadi. Bu ayniqsa yaxlit o'zaklarni burashga tegishli bo'ladi, ularda qoldiq deformatsiya foyizning ulushlarini tashkil qiladi, qattqlikning o'zgarishi esa 2% atrofidagi teskari kuchlanishni deformatsiyalashda boshlanadi.

Bunday vaziyatlarda « $\sigma_i - N_U$ » egri chiziqlar monoton jarayon sharoitlarida qurilgan kalibrlash egri chiziqlari bilan mos tushmaydi.

Deformatsiyalashning turli bosqichlarida e_i ni qattqlik bo'yicha faqatgina tadqiq qilinayotgan jarayonda va kalibrlash sinovlarida oqish egri chiziqlari mos tushgan hollarda aniqlash mumkin. e_i ni aniqlash aniqligi ayniqsa kichik va katta deformatsiyalarda yuqori bo'lmaydi. Bularning barchasi Baushinger effekti bilan bog'lanadi, u monoton bo'lmagan deformatsiyalash jarayonida namoyon bo'ladi.

Uslub faqatgina kuchlanishlar va deformatsiyalar tenzorlarining sifat tavsiflari bo'lib hisoblanadigan kvadratik invariantlarning qiymatlarini aniqlash imkonini beradi.

Uslub sof ko'rinishda deformatsiya o'chog'i bo'yicha teng darajali chiziqlarni (e_i va σ_i) aniqlash va deformatsiya o'chog'ining chegaralarini aniqlash uchun qo'llaniladi.

Ba'zi bir xususiy hollarda e_i va σ_i ni oldindan aniqlash va qattqlikni o'lchash bilan nominal deformatsiya kuchini detalli tahlil qilishda deformatsiyalar va kuchlanishlar tenzorlarining tarkibiy qismlarini hisoblashga misollar G.Ya.Gunning ishlarida keltirilgan.

Yassi va o'q simmetrik deformatsiyalashda deformatsiyalangan holatning parametrlari e_i uchun (2) bog'lanish va deformatsiyani birlashtirishning yaqinlashuvchi tenglamasidan foydalanish bilan aniqlanadi: $\partial\sigma_\varphi/\partial\varphi = (e_\rho - e_\varphi)/\rho$, bunda $e_{o'rt} = 0$ deb hisoblanadi.

Yassi deformatsiyalashda kuchlangan holat Treska-Sen-Venan plastiklik sharti bilan muvozanat tenglamalari tizimini yechish bilan aniqlanadi. Tizim materialning mustahkamlanishini hisobga olish

bilan tavsiflar uslubi bilan yechiladi. O‘q simmetrik masala muvozanat tenglamalarini sirg‘alish chiziqlari va $\sigma_\varphi = \sigma_1$ yoki $\sigma_\varphi = \sigma_1$ shart bilan hosil qilingan koordinatalar tizimida integrallash bilan yechiladi. O‘q simmetriyali yassi kuchlangan holatda σ_φ va $\sigma_\rho - \sigma_i$ ni hisoblash uchun bog‘lanishni va muvozanat tenglamasini o‘z ichiga oladigan tenglamalar tizimidan aniqlanadi. Boshlang‘ich shartlar sifatida simmetriya o‘qidagi qiymatlar ($\rho = 0$) tanlanadi:

$$e_\rho = e_\varphi = -\frac{e_z}{2} = \frac{\pm e_i}{2}; \quad \sigma_\rho = \sigma_\varphi = \sigma_i. \quad (5.61)$$

Mikroqattqlik uslubini, unda Vickers bo‘yicha o‘lchashlardan foydalaniladi, kuchlanishlar gradiyenti katta bo‘lganda qattqlikni sifatli baholash uchun qo‘llash maqsadga muvofiq bo‘ladi. Bir fazali qotishmalar uchun mikroqattqlik va makroqattqlik o‘rtasida chiziqli bog‘lanish mavjud, u o‘xshashlik qonuniga bo‘ysunadi va izning diagonali 30 mkm dan kichik bo‘lganda buziladi.

Uslubni qo‘llash materialning tadqiq qilinadigan yuzasini obdon tayyorlashni talab qiladi, o‘lchashlarning natijalari esa materialning strukturasi bog‘liq bo‘ladi.

Mo‘rt qoplamalar uslubi

Bu uslubning mohiyati shundan iboratki, oltingugurt-uglerod eritmasida eritilgan bariy yoki rux rezinati asosidagi lak qoplama tadqiq qilinadigan obyektning yuzasiga surkalganda ob'ektning deformatsiyasining uzatilishini ta'minlaydi va yemirilganda N.A.Chinenev va A.N.Patrashevning eng katta bosh kuchlanishiga perpendikulyar bo‘lgan yoriqlar to‘ri bilan qoplanadi. Qoplamaning qalinligi 50...250 mkm ga, ishchi haroratlar diapazoni 15...35°C ga teng. Yoriqlar uzluksiz V-simon bo‘lib, ularning kengligi 50 mkm ga teng. Qoplamada deformatsiyalar qalinlik bo‘ylab teng taqsimlangan va ob'ektning mos keluvchi yuza deformatsiyalariga teng deb taxmin qilinadi:

$$\varepsilon_x^K = \varepsilon_x^o; \quad \varepsilon_y^K = \varepsilon_y^o; \quad \sigma_z^K = \sigma_z^o = 0, \quad (5.62)$$

Bu yerda «q» indeks qoplamaga, «o» indeks esa – obyektga tegishli.

Kuchlanishlar va deformatsiyalar o‘rtasidagi bog‘lanish qayish-qoqlik nazariyasining tenglamalari bo‘yicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} \sigma_x^K &= \frac{E^K}{E^o(1-\mu_K^2)} [(1-\mu_o\mu_K)\sigma_x^o + (\mu_K-\mu_o)\sigma_y^o]; \\ \sigma_y^K &= \frac{E^K}{E^o(1-\mu_K^2)} [(1-\mu_o\mu_K)\sigma_y^o + (\mu_K-\mu_o)\sigma_x^o]. \end{aligned} \quad (5.63)$$

Yoriqlarning manzarasini ko‘rib chiqishdan qoplamadagi kuchlanishlarni aniqlashga o‘tish mo‘rt yemirilish nazariyasi bazasida bajariladi. Ikki o‘lchamli deformatsiya maydonini tahlil qilish umumiy holatda qiyin bo‘lganligi sababli aksariyat hollarda amaliy masalalarni yechishda kuchlanishning ikkinchi tarkibiy qismining qoplamaning yemirilishiga ta’siri hisobga olinmaydi. Ob'ektdagi qoplamadagi yoriqlarga perpendikulyar bo‘lgan bosh kuchlanishlar

$$\sigma_1^o = E^o \varepsilon_{suyuq}^q \quad (5.64)$$

bog‘lanishga muvofiq aniqlanadi.

σ_2 bosh kuchlanishning yo‘nalishi yoriqlarning yo‘nalishi bilan mos tushadi. $\varepsilon_{\text{с}y\text{ю}k}^k$ ning qiymati qoplama bilan qoplangan konsol to‘sinni bukishga 10-15 ta kalibrlash sinovlari seriyasidan aniqlanadi, bu sinovlarda eng chekka yoriqdan namunaning chekkasigacha bo‘lgan s masofa aniqlanadi. Namunaning yuzasidagi deformatsiya

$$\varepsilon_{\text{ж}}^{\text{п}} = \varepsilon_{\text{ж}}^o = \frac{\sigma_o}{E^o} = \frac{3bf}{2l^3} (l-s) \quad (5.65)$$

bog‘lanish bo‘yicha hisoblanadi,

bu yerda l, b, f – to‘sinning uzunligi, balandligi va bukilishi.

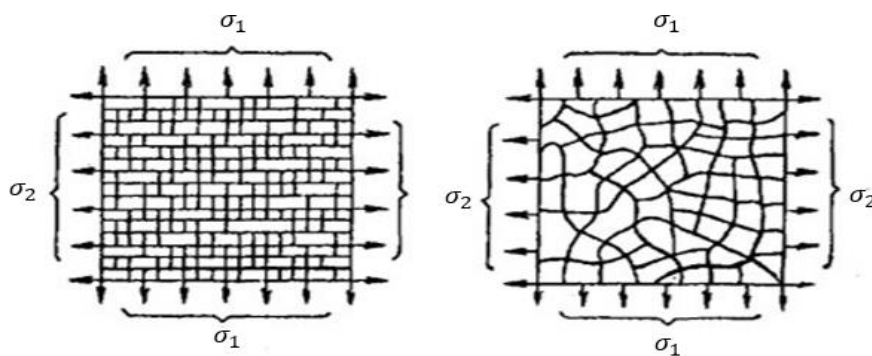
Obyektga qoplama surkalgandan keyin bosh kuchlanishlarning manzarasini olish uchun obyekt bosqichli yuklashga tortiladi. Har bir yuklashdan keyin yoriqlarning uchlari silliq chiziq bilan tutashtiriladi, bu chiziq taxminan doimiy σ_1 kuchlanishga ega bo'lgan nuqtalarning geometrik joyi bo'lib hisoblanadi, kuchlanish yuqoridagi formuladagi bog'lanish bo'yicha aniqlanadi.

Yoriqlarning manzarasining uchta varianti bo'lishi mumkin (5.16-rasm):

1. $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$. Yoriqlarning bitta oilasi σ_1 ga perpendikular va σ_2 ga parallel yo'nalishda joylashgan. Bu cho'zish va bukish uchun xarakterli bo'ladi;

2. $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$. Yoriqlarning ikkita oilasi mavjud: biri xuddi 1-variantdagi kabi, ikkinchisi – birinchi oilaga ortogonal yo'nalishda joylashgan. Bu $\sigma_{\text{chekka}} = 2 \sigma_{\text{o'q}}$ da silindrni sinovdan o'tkazishda uchraydi;

3. $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$. Izotrop sohalar; barcha yo'nalishlar bosh yo'nalish, yemirilish esa – tasodifiy bo'lib hisoblanadi. Bu ichki bosim ostidagi sferik jismlar uchun xarakterli bo'ladi.



5.16-rasm. Bosh kuchlanishlar bir xil belgiga ega bo'lgan holatlar uchun yoriqlarning manzaralari.

Olingan manzaralar – bu σ_1 ga perpendikular va σ_2 ga parallel yo'nalishda joylashgan yoriqlar oilasidir, yoriqlar oilasi ikkita bo'lganda ulardan biri xuddi 1-variantdagi kabi, ikkinchisi – birinchi oilaga ortogonal yo'nalishda joylashadi, izotrop sohalarda barcha yo'nalishlar bosh yo'nalish, yemirilish esa – tasodifiy bo'lib hisoblanadi. bu ichki bosim ostidagi sferik jismlar uchun xarakterli bo'ladi.

Interferometrik uslub

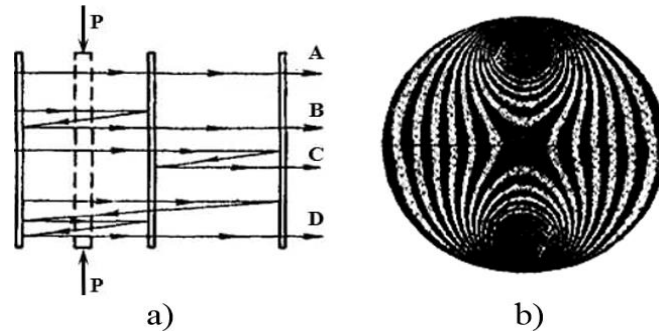
Mazkur uslub OSM dan ishlangan modelni N.A.Chinenev va A.N. Patrashevning optik interferometrda yuklash bilan interferentsion polosalar (izopaxiklar) bo'yicha ko'ndalang deformatsiyalarni o'lchash yo'li bilan bosh kuchlanishlarning summalarini eksperimental tarzda aniqlash uchun mo'ljallangan. Yorug'lik oqimining bir qismi (5.17-rasm) uchta yarim shaffof parallel oynalar orqali o'tadi (A oqim), katta qismi esa ikki marta (B va C oqimlar) va ko'p marta (D oqim) qaytarishdan keyin o'tadi. Model yorug'likning yo'li bo'yicha birinchi va ikkinchi oynalar orasiga o'rnatiladi va siqish bilan uning qalinligi Δs ga o'zgartiriladi. Modelning qalinligini o'zgarishi optik yo'llarning uzunligini o'zgarishiga va Δs ga proporsional tartibli interferentsion polosalarning paydo bo'lishiga olib keladi. Noaniq bo'lgan modellarning og'ishishlarini kompensatsiyalash uchun oldindan oynalardan birini egish bilan zich joylashgan, doimiy qadamga va egilish burchagiga ega bo'lgan polosalarning boshlang'ich manzarasi hosil qilinadi. Bu manzaraga siqilgan modelning interferentsion polosalarining manzarasi qo'yiladi. Ikkita manzara qo'shilganda muar polosalari hosil bo'ladi, ular izopaxiklar deb ataladi.

Elastiklik sohada yassi kuchlangan holat uchun $e_2 = \Delta s/s$ deformatsiyalar va kuchlanishlarning bog'lanishi

$$\sigma_1 + \sigma_2 = E\Delta s/\mu s - mk_\sigma, \quad (5.66)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.

Bu yerda $t - \sigma_1 + \sigma_2$ doimiy qiymatga ega bo'lgan interferentsion polosalarning raqami; k_σ – polosaning qiymati; yorug'lik manbaining to'lqin uzunligi, model materialining qalinligi va qayishqoqlik xususiyatlariga bog'liq bo'ladi va N.A.Chinenev bo'yicha kalibr-lash sinovlarida aniqlanadi.



5.17-rasm. Ketma-ket tipdagi uch plastinkali interferometrning ishlash tamoyili (a) va diametral siqilgan disk uchun izopaxiklarning manzarasi (b).

Teng koʻndalang deformatsiya chiziqlarini olishning ikkita usuli maʼlum. Ulardan biri avval tasvirlangan boʻlib, unda model orqali oʻtadigan yorugʻlikdan foydalaniladi, boshqasida modeldan qaytgan yorugʻlikdan foydalaniladi. Ikkinchi usulda modelning qalinligi oʻzgarishi bilan u bilan oyna oʻrtasidagi oraliq oʻzgaradi. Izopaxiklar model yuklanguncha va undan keyin polosalarning interferentsion manzaralarini ustma-ust qoʻyish bilan olinadi. Usulning yutugʻi – shaffof boʻlmagan ob'ektlarni tadqiq qilish imkoniyati, kamchiligi – polosaning tartibi va qiymatini aniqlash uchun polosalarning manzaralarini ajratishning qiyinligi boʻlib hisoblanadi.

Usulni amalga oshirishda ular interferometr ($\Delta = 40$ mkm) alohida ishlash imkoniyati bilan aylana qutblagichning ichiga kiritilgan priborlardan, yoki qaytaruvchi interferometrdan ($\Delta = 15$ mkm) foydalaniladi, bu interferometr qutblagich va chorakta toʻlqin plastinkasidan tashkil topadigan nasadka bilan jihozlangan. Ular bitta model uchun birinchi holatda izoxromalar, izoklinlar va izopaxiklar maydonlarini, ikkinchi holatda izoxromalar va izopaxiklar maydonlarini olish imkonini beradi. Soʻngra ular yordamida $\sigma_1 - \sigma_2$, $\sigma_1 + \sigma_2$ kattaliklarning maydonlari olinadi, σ_1 va σ_2 aniqlanadi, shu tariqa N.A.Chinenev izoxromalari va izoklinlari maydonlari tomonidan berilgan kuchlanishlarni ajratishdagi qiyinchiliklar bartaraf qilinadi.

Rentgen tahlili uslubi

Rentgen tahlili uslubida kuchlanishlar uzayishni o'lchash bilan aniqlanadi. Uslub birinchi turdagi, ba'zan ikkinchi turdagi qoldiq kuchlanishlarni yuzaga putur yetkazmasdan va kichik uchastkalarda (1-3 mm) o'lchash uchun qo'l keladigan birdan-bir uslub bo'lib hisoblanadi. Uslub shuningdek, yuzadagi va 0,002...0,02 mm chuqurlikdagi yuza osti kuchlanishlarini o'lchash uchun ham qo'llaniladi, keyingi holatda oldindan A.N.Patrashev va M.Kobayasi material qatlami olib tashlanadi. Undan shuningdek yuqori haroratlarda plastik oqishni, masalan, alyuminiy qatlamida joylashgan 68...100 mkm diametrli po'lat shariklarga ega bo'lgan alyuminiy tayyorlanmalarni prokatlashda plastik oqishni tadqiq qilish uchun ham foydalaniladi. Shu narsa qayd qilinganki, rentgenogrammaning kontrastligi shariklarning o'lchami va zichlikning N.A.Chinenev materiallari zaiflashishining massa koeffitsiyentlariga ko'paytmalaridagi farqlar ortishi bilan ortadi.

Rentgen uslubining kuchlanishlar bo'yicha yechish qobiliyati 20...35 MPa ni tashkil qiladi. Bu metall materiallarning deformatsiyasini M.Kobayasi va A.N.Patrashev tenzodatchiklari yordamida o'lchashda taxminan 2 MPa yechish qobiliyatiga mos keladi.

Kuchlanishlarni (deformatsiyalarni) tahlil qilish U.L.Bregg va G.V.Vulf difraktsion shartidan foydalanishga asoslangan, u quyidagi ko'rinishga ega:

$$n\lambda = 2d\sin\theta, \quad (5.67)$$

bu yerda n – butun son (difraktsiyaning tartibi); λ – rentgen nurining to'lqin uzunligi; d – polikristallning atom tekisliklari o'rtasidagi masofa; θ – nurning tushish burchagi va difraktsiya burchagi (5.18-rasm,a).

Asosan ye daraja bilan panjarani deformatsiyalashda atom tekisliklari o'rtasidagi d_0 boshlang'ich masofaning Δd kattalikka o'zgarishi θ burchakning $\Delta\theta$ kattalikka o'zgarishiga olib keladi. Bu

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -(ctg\theta) \cdot \Delta\theta = -ctg\theta[\Delta(2\theta)/2] \quad (5.68)$$

bog'lanish bilan ifodalanadi.

Tadqiq qilinadigan P nuqtadagi kuchlanishlar va deformatsiyalar kuchlanishlar va deformatsiyalar ellipsoidlari yordamida aniqlanadi, bunda kristall panjaraning $\varphi\psi$ ixtiyoriy yoʻnalishda $\varepsilon_{\varphi\psi}$ uzayishlari qayishqoqlik nazariyasi bilan tasvirlanadigan uzayishlarga tenglashtiriladi (5.18-rasm,b). ε_1 va ε_2 bosh deformatsiyalar ob'ektning tadqiq qilinadigan tekisligida yotadi, ε_3 esa unga normal boʻylab yoʻnalgan deb taxmin qilinadi. O'z tekislikda $\varepsilon_{\varphi\psi}$ normal deformatsiya rentgen difraksiyasining

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \varphi - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2). \quad (5.69)$$

koʻrinishdagi asosiy mexanik tenglamasi boʻyicha topiladi.

Atom tekisliklari, ular oʻlchash bazasini belgilaydi, tushayotgan va difraktsiyalangan nurlar oʻrtasidagi burchakning bissektrisasiga perpendikulyar boʻladi, P nuqtada oʻlchanadigan normal deformatsiya esa bissektrisa boʻylab yoʻnaladi (5.18-rasmga qarang).

Agar ob'ektning deformatsiyalangan holatida yuzaga parallel boʻlgan atom tekisliklari oʻrtasidagi d_{\perp} masofa oʻlchangan boʻlsa, u holda yuzaga normal ($\psi = 0$) boʻlgan ε_{φ_0} deformatsiyani asosiy mexanik tenglama boʻyicha ham, quyida keltirilgan formula boʻyicha ham aniqlash mumkin:

$$\varepsilon_{\varphi_0} = -\frac{\mu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} \quad (5.70)$$

Deformatsiyalarning panjaraning parametrlari orqali ifodalangan farqi

$$\varepsilon_{\varphi\psi} - \varepsilon_{\varphi_0} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} - \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} \approx \frac{d_{\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} \quad (5.71)$$

P nuqtadagi kuchlanishlar (σ_x – tekislikda σ_1 kuchlanishga φ burchak ostida va σ_2 – ortogonal yoʻnalishda, 5.18-rasm,b ga qarang) quyidagi formulalar boʻyicha aniqlanadi:

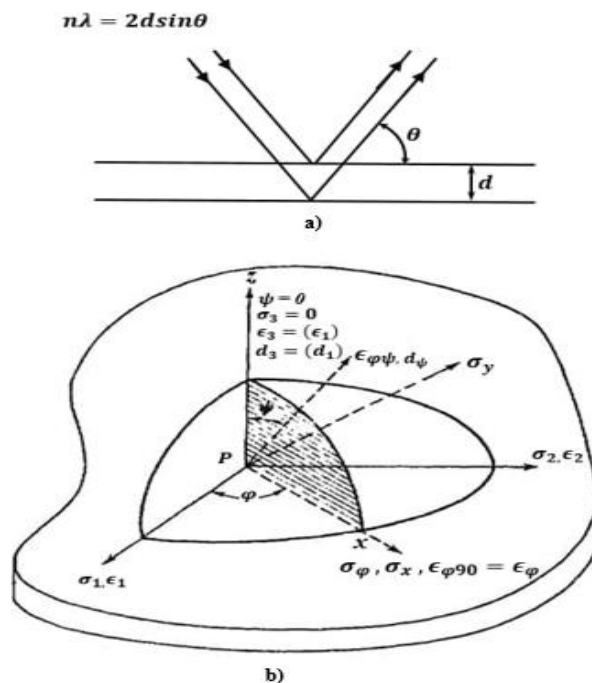
$$\sigma_x = \sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1 + \mu) \sin^2 \psi} \frac{d_{\psi x} - d_{\perp}}{d_{\perp}} = K^* \frac{d_{\psi x} - d_{\perp}}{d_{\perp}},$$

$$\sigma_y = \sigma_{\varphi+90} = K^* \frac{d\psi y - d_{\perp}}{d_{\perp}}. \quad (5.72)$$

Shunday qilib, O_{zx} tekislikda σ_{φ} kuchlanishning tarkibiy qismlarini aniqlash uchun ikkita difraktsion parametрни o‘lchash talab qilinadi: $\psi = 0$ da yuzaga normal d_{\perp} ni va $\psi \neq 0$ da ($45^{\circ} \leq \psi \leq 50^{\circ}$ deb qabul qilinadi) d_{ψ} ni. Keltirilgan bog‘lanishlar qayta shakllantiriladi va σ_{φ} ni aniqlash uchun quyidagi formuladan foydalaniladi:

$$\sigma_{\varphi} = (2\theta_{\perp} - 2\theta_{\psi}) \frac{ctg\theta}{2} K^* \frac{\pi}{180} \quad (5.73)$$

θ burchak graduslarda ifodalanadi va $ctg\theta = \text{const}$ da kuchlanish $\sigma_{\varphi} = (2\theta_{\perp} - 2\theta_{\psi})$ bo‘ladi, bu yerda θ_{\perp} va θ_{ψ} – mos ravishda $\psi = 0$ va $\psi \neq 0$ da o‘lchanadigan difraktsiya burchaklari. ct aniqroq qilib ψ ning bir nechta qiymatlari uchun $\sigma_{\varphi} = \sigma_x$ uchun tenglama bo‘yicha d_{ψ} ning $\sin^2\psi$ ga bog‘lanishini qurish va eng kichik kvadratlar uslubi bo‘yicha $\partial(d_{\psi})/\partial(\sin^2\psi) = \sigma d_{\perp}(1+\mu)/E$ to‘g‘ri chiziqning egilishini hisoblash bilan aniqlanadi.



5.18 rasm. Rentgen nurlarining Bregg – Vulf sharti bo‘yicha difraktsiyalanish sxemasi (a) va P nuqtada kuchlanishlar va deformatsiyalarning ellipsoidlari (b).

Namunaning yuzasiga parallel bo'lgan tekislikdan difraktsiyalanadigan nurning intensivligi (shiddati) sochilish burchagiga bog'liq ravishda namunaga nisbatan siljiydigan detektor bilan qayd qilinadi (5.19-rasm,a). Difraksion intensivlikning maksimumi ularda atom tekisliklari bilan qaytarilgan barcha rentgen nurlari bitta fazada joylashadigan, ya'ni ular uchun Bregg-Vulf sharti bajariladigan tushuvchi nurlarning yo'nalishiga (5.19-rasm,a) 2θ burchak ostida joylashadigan yo'nalishlarda vujudga keladi. Namuna ψ burchakka egilgandan keyin (5.19-rasm,b) difraktsiya xuddi o'sha atom tekisliklaridan, biroq boshqa donlarda sodir bo'ladi. Difraktsiyalanadigan nurning maksimal intensivligi namunaning boshqa burchakka egilishida ($2\theta_\psi$) vujudga keladi.

O'lchamlarning ob'ektning qalinligi bo'yicha katta sochilishi o'lchanadigan joyga ularning rentgen nurlarini zaiflashtirish koeffitsiyenti obyekt materialning koeffitsiyentiga yaqin bo'lgan pastalar yoki kukunlarni, masalan, kumush yoki folfram pastalari yoki kukunlarini surkash bilan tekislanadi.

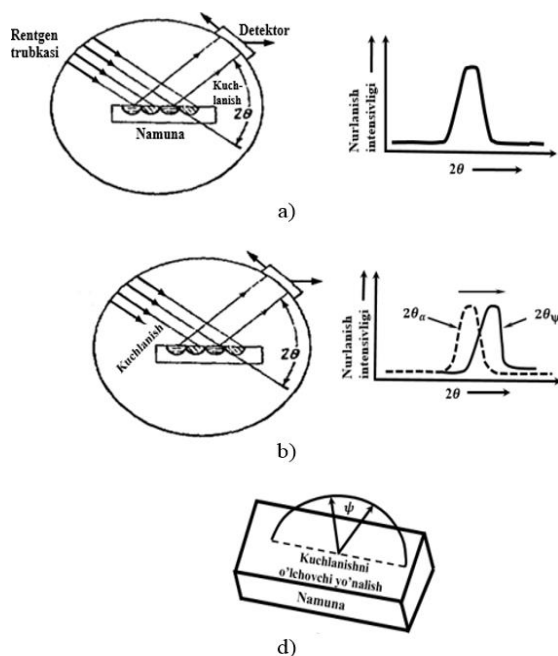
Uslubning kamchiliklari nurlanishdan himoyalaniş zarurligi, kontrastlikni ta'minlaydigan materiallarni tanlashdagi qiyinchiliklar, obyekt yuzasining g'adir-budurligining ta'siri va uning strukturasining bir jinsli emasligi bilan bog'lanadi. Bundan tashqari, hajmiy kuchlangan holatda amalda yassi masala yechiladi.

Shunday qilib, namunaning yuzasiga parallel bo'lgan tekislikdan difraktsiyalanadigan rentgen nurining asosiy intensivligi (shiddati) sochilish burchagiga bog'liq ravishda namunaga nisbatan siljiydigan detektor bilan qayd qilinadi.

Difraksion intensivlikning maksimumi ularda atom tekisliklari bilan qaytarilgan barcha rentgen nurlari bitta fazada joylashadigan, ya'ni ular uchun Bregg-Vulf sharti bajariladigan tushuvchi nurlarning yo'nalishiga (5.19-rasm,a) 2θ burchak ostida joylashadigan yo'nalishlarda vujudga keladi. Namuna ψ burchakka egilgandan keyin (5.19-rasm,b) difraktsiya xuddi o'sha atom tekisliklaridan, biroq boshqa donlarda sodir bo'ladi. Difraktsiyalanadigan nurning maksimal intensivligi namunaning boshqa burchakka egilishida ($2\theta_\psi$) vujudga keladi.

O'tkazilgan tadqiqotlarning ko'rsatishicha, namunaning yuzasiga parallel bo'lgan tekislikdan difraktsiyalanadigan nurning intensivligi sochilish burchagiga bog'liq ravishda namunaga nisbatan siljiydigan detektor bilan qayd qilinadi. Difraktsion intensivlikning minimumi va maksimumi ularda atom tekisliklari bilan qaytarilgan barcha rentgen nurlari bitta fazada joylashadigan, ya'ni ular uchun Bregg-Vulf sharti bajariladigan tushuvchi nurlarning yo'nalishiga (5.19-rasm,a) 2θ burchak ostida joylashadigan yo'nalishlarda vujudga keladi. Namuna ψ burchakka egilgandan keyin (5.19-rasm,b) difraktsiya xuddi o'sha atom tekisliklaridan, biroq boshqa donalarda sodir bo'ladi. Kuchlanishlarni o'lchovchi yo'nalishlari esa (5.19-rasm,d). Difraktsiyalanadigan nurning maksimal intensivligi namunaning boshqa burchakka egilishida ($2\theta_\psi$) vujudga keladi. Bu metall namunaning rentgen nurining intensivligini aniqlash bo'yicha tadqiqot to'g'ri bajarilganligini tasdiqlaydi.

Bu uslublardan tashqari plastik deformatsiyalar bo'yicha ma'lumotlar beradigan boshqa uslublar ham bor: tenzometrlash, mesdoz konstruktsiyasi, kombinatsiyalangan uslublar va boshqalar.



5.19-rasm. Difraktometr apparati bilan rentgen nurlanishining intensivligi, $\psi = 0$ (a) va $\psi \neq 0$ (b) burchaklarda difraktsiyalangan nurning siljishini o'lchash sxemalari va namuna normalga nisbatan ψ burchakka burilganda kuchlanishlarni o'lchashlarning yo'nalishlari (d).

Difraktometr rentgen apparatining nurlanish intensivligi asosan burchaklarda difraktsiyalangan nurning siljishi, nurni o'lchashi va normal namunaga nisbatan burchakka burilganda kuchlanishlarni o'lchash yo'nalishlarini ko'rsatib beradi.

Tenzometrlash

Tenzometrlashda plastik oqish mexanik, optik, oynali, torli, pnevmatik va simli-elektr tenzometrlar yordamida tadqiq qilinadigan obyektlarning yuzasidagi deformatsiyalarni bevosita o'lchab o'rganiladi.

Elektr o'lchash uslublaridan foydalanilganda sig'im, induktivlik, omik qarshilik qayd qilinadi.

Qarshilik elektr tenzometrlari – tenzorezistorlarni qo'llash tenzometrlashning universal uslubi bo'lib hisoblanadi, ular tavsiflarning "narx – samaradorlik" kriteriysini eng yaxshi tarzda qanoatlantiradigan optimal birikuviga ega.

Graudiovkalash konstantasining harorat va vaqtda barqarorligi, $\pm 5\%$ ($\pm 50\ 000$ mkm/m) deformatsiyalar diapazonida deformatsiyalarni o'lchash xatoligining 1 mkm/m dan oshmasligi, datchikning kichik inertsiyaligi va kichik o'lchamlari, shuningdek javob qaytarishning chiziqliligi ana shunday tavsiflar bo'lib hisoblanadi.

Tenzorezistor 1856 yilda Lord Kelvin tomonidan ifodalangan tamoyillar asosida qurilgan, bu tamoyillarga ko'ra, yuklashga tortilgan simlarning deformatsiyasi kichik bo'ladi, bu deformatsiya ularning elektr qarshiligining o'zgarishiga olib keladi deb hisoblanadi, bu qarshilikni Uistston ko'prigi yordamida aniq o'lchash mumkin, simlarning deformatsiyani sezuvchanligi esa ularning materialiga bog'liq bo'ladi. Tenzorezistorlar datchiklarning sezuvchan elementlari sifatida keng tarqalishga ega bo'lgan, ular ko'pincha kuchlar, momentlar va bosimlarni o'lchash uchun tadqiq qilinadigan ob'ektga yelim bilan yopishtiriladi.

Simli tenzorezistorlar $R = 100...300$ Om elektr qarshiligiga ega. Ularning $\Delta R/R$ nisbiy qarshiligining o'zgarishi deformatsiyaga proporsional bo'ladi:

$$\Delta R/R = k\varepsilon, \quad (5.74)$$

bu yerda k – datchikning tenzosezuvchanlik koeffitsiyenti.

Folgali metall tenzodatchiklar birinchi bo‘lib 1952-yilda Angliyada Sanders va Rou tomonidan ishlab chiqilgan bo‘lib, panjara-ning konfiguratsiyasini kichiklashtirish va turli-tuman qilish imkoniyatini ta'minlagan, tadqiq qilinadigan yuza bilan bevosita kontakt yuzasini oshirish esa – bu issiqlik energiyasining ko‘proq sochilishiga ko‘maklashadi – tenzorezistorda tok kuchini oshirish va signalni kuchaytirish imkonini bergan. Shuningdek N.A.Chinenev va A.N.Patrashev folgali datchiklarini ishlash xarajatlari nisbatan katta emasligi va ularni tayyorlashning yuqori aniqligini qayd qilib o‘tish lozim bo‘ladi.

Datchiklar uchun 10...30 mkm diametrlil N.A.Chinenev simlari yoki 0,0025 mm dan kam bo‘lmagan qalinlikdagi A.N.Patrashev folgalaridan foydalaniladi, folga yassi sirtmoq yoki panjara ko‘rinishida bo‘lib, polimer yoki qog‘oz ko‘rinishidagi izolyatorga yopishtiriladi. Simli datchiklarning bazasi (to‘g‘ri chiziqli qismning uzunligi) 1...100 mm ni, folgali datchiklarning bazasi esa – 0,4...25 N.A.Chinenev mm ni yoki 0,2...150 A.N. Patrashev mm ni tashkil qiladi.

Konstantan (60 Su + 40 Ni), nixrom (80 Ni + 20 Sr) va manganindan (84 Su + 12 Mn + 4 Ni) ishlangan datchiklar uchun k koeffitsiyent va eng chekka ishchi harorat mos ravishda N.A.Chinenev bo‘yicha 2,0 va 400°S; 2,2 va 1000°S; 0,5 va 200°S ga teng.

Tenzoristorlar uchun shuningdek N.A.Chinenev va A.N.Patrashevning karma (74Ni + 20Sr + 3Al + 3Fe) $k = 2,0$; izoelastik (36Ni + 8Sr + 0,5Mo + 55,5Fe) $k = 3,6$; platinovolfram (92 Pt + 8 W) $k = 4,0$; armyur (70Fe + 20Sr + 10Al) $k = 2,0$ va boshqa qotishmalari qo‘llaniladi.

Tenzodatchiklarni (xususan, folgali tenzodatchiklarni) tayyorlash uchun foydalaniladigan qotishmalar A.N.Patrashev bo‘yicha $\pm 5\%$ atrofida eng chekka deformatsiya bilan tavsiflanadi. Bu chegaralar konstruktsiyalarning metall va keramik elementlarini qayishqoq deformatsiyalash diapazoniga mos keladi.

Plastik deformatsiyalarni tadqiq qilish uchun poliamid asosga ega bo'lgan ikki marta bo'shatilgan konstantan folgali panjarali datchiklar qo'llaniladi, ular deformatsiyalarni o'lchashda A.N.Patrashev bo'yicha 20% gacha uzayish qobiliyatiga ega.

Aksariyat tenzodatchiklarda konstantandan foydalaniladi, u 0...8% deformatsiyalar diapazonida doimiy tenzosezuvchanlikka, harorat barqarorligiga ega, unda elastik deformatsiyadan plastik deformatsiyaga o'tishda katta o'zgarishlar kuzatilmaydi. Konstantanning raqobatchisi karma qotishmasi bo'lib hisoblanadi, chunki u toliqish, vaqtda barqarorlik va harorat barqarorligining yanada yuqoriroq tavsiflariga ega, shuningdek haroratlarning yanada kengroq diapazoniga ega.

Qotishmaning kamchiligi – chiquvchi simlarni datchikning kontakt maydonchalariga kavsharlashning qiyinligi, o'lchanadigan eng chekka deformatsiya qiymatining kichikligi bo'lib hisoblanadi.

Izoelastik qotishma yuqori tenzosezuvchanlik va ko'proq yuqori toliqish tavsiflariga ega, biroq haroratga nisbatan o'ta sezuvchan.

Nixrom, platinovolfram va armyur qotishmalari yuqori haroratlar bilan bog'lanadigan o'lchashlarda qo'llaniladi, bunda A.N.Patrashevning oksidlanish jarayonlariga nisbatan barqarorlik muhim bo'lib hisoblanadi.

Folgali va simli datchiklarning asosiy kamchiligi – yelim bor bo'lganligi uchun ko'rsatishlarning yetarlicha barqaror bo'lmasligi bo'lib hisoblanadi.

100% gacha cho'zilishlar bilan deformatsiyalarni o'lchash uchun suyuq metalli tenzodatchiklar ishlab chiqilgan, ular sirtmoq ko'rinishida egilgan va tadqiq qilinadigan ob'ektga mahkamlanadigan rezina naychadan tashkil topgan, naycha simob yoki galliy-indiy-qalay qotishmasi bilan to'ldirilgan. Deformatsiyada naycha bo'shlig'ining hajmi doimiy bo'lib qolaveradi, chunki rezinaning Puasson koeffitsiyenti $\mu \approx 0,5$ ga teng. Biroq cho'zuvchi deformatsiyalarda suyuqmetalli datchikning qarshiligi ortadi, chunki uning uzunligi ortadi va diametri kamayadi. Tenzodatchiklarning bu turi naycha diametrining nisbatan kattaligi tufayli juda kichik elektr qarshiligiga

(1 Om dan kichik) va A.N.Patrashevning ortib boruvchi deformatsiyalariga chiziqli bo'lmagan javob qaytarishga ega.

1960-yillarda paydo bo'lgan pьezorezistiv tenzodatchiklarda asosiy yarim o'tkazgich element o'zida kremniy monokristallidan ishlangan, taglikka mahkamlangan o'ta yupqa to'g'ri to'rtburchak plenkani taqdim qiladi.

Kremniyning elektr qarshiligi konstantaning elektr qarshiligidan 103 marta katta bo'lganligi sababli yarim o'tkazgichli tenzodatchiklarda 102...103 Om diapazonda boshlang'ich qarshilikni hosil qilish uchun panjara konfiguratsiyasi qo'llanilmaydi.

Yassi tekisliklarda bu datchiklar A.N Patrashev bo'yicha 3000 mkm/m gacha eng chekka deformatsiyalarga tortilishi mumkin.

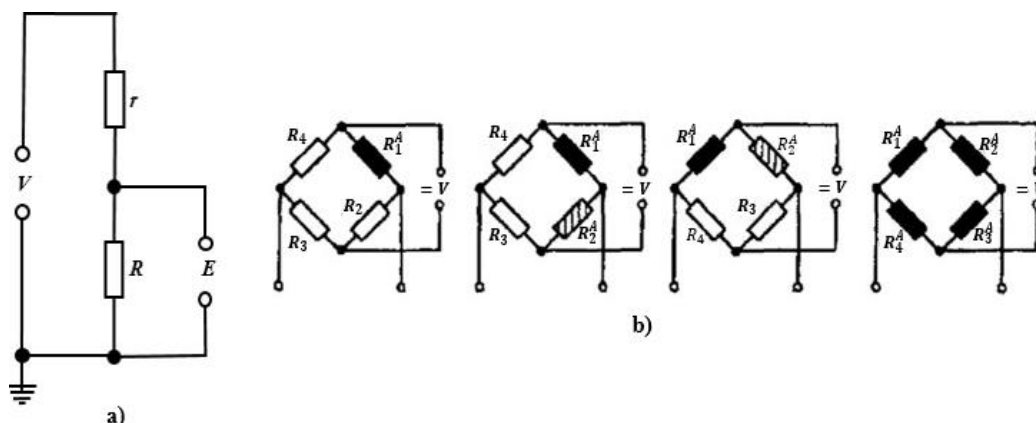
$\Delta R/R$ ning qiymati asosan potentsiometrik (5.20-rasm,a) va ko'prik (5.20-rasm,b) sxemalardan foydalanib aniqlanadi. Potentsiometrik sxema bo'yicha V kuchlanishli tok manbai r ballast qarshilik orqali R datchikka ulanadi. Datchikdagi Y_e kuchlanish quyidagi bog'lanish bilan aniqlanadi:

$$E = \frac{R}{R+r} V \quad (5.75)$$

$\Delta R/R$ qarshilik o'zgarishi kuchlanishning o'zgarishiga aylantiriladi, bu прибор bilan qayd qilinadi. Priborning qarshiligi tenzorezistorning qarshiligidan 100 marta oshiq bo'lganligi sababli datchikning qarshiligi $\Delta R/R$ ga o'zgarganda priborda kuchlanishning o'zgarishi quyidagini tashkil qiladi:

$$\Delta E = \frac{r}{r+R+\Delta R} \frac{\Delta R}{R} E \quad (5.76)$$

0,01 dan kichik deformatsiyalarni o'lchashda va ΔR kattalik maxrajdagi $R + r$ kattalikka nisbatan hisobga olinmaganda ΔE kattalikning bog'lanishi datchikning qarshiligining o'zgarishiga to'g'ri proporsional bo'ladi. O'lchash xatoligi N.A.Chineneva va A.N.Patrashev bo'yicha 2% dan oshmaydi.



5.20-rasm. Tenzorezistorlarni ulashning potentsiometrik (a) va ko‘prik (b) sxemalari: R_i^A – ishchi datchiklar; R_i^k – kompensatsion datchiklar.

Shunday qilib, deformatsiya 2...10% intervalda aniqlanadi. Bunday texnik yechim muvozanatlashni talab qilmaydi, u asosan ΔE signal kichikligi tufayli o‘zgaruvchan tokli kuchaytirgichlardan foydalanish bilan dinamik deformatsiyalarni o‘lchash uchun qo‘llaniladi. Statik deformatsiyani o‘lchashda sxema barqaror oziqlantirish manbaini talab qiladi, chunki ΔE kattalik V ga va haroratni kompensatsiyalashga to‘g‘ri proporsional.

Potentsiometrik sxemaning sezuvchanligi quyidagi formula bo‘yicha aniqlanadi:

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta E}{\varepsilon} = \frac{r}{r+R} kIR \quad (5.77)$$

bu yerda I – zanjirdagi tok kuchi.

Dinamik deformatsiyalarni o‘lchashda ε kichik bo‘ladi.

Maksimal k_p ni olish uchun katta r da kuchlanishning ortishidan qochish uchun $r \leq 9R$ qilib o‘rnatiladi. Shunda $r/(R + r) = 0,9$ bo‘ladi, kIR ko‘paytma esa, u datchikning tipi va zanjirdagi tok bilan belgilanadi, N.A.Chinenev bo‘yicha 3...700 oraliqda o‘zgarishi mumkin. Chunki $\Delta \varepsilon$ odatda kichik va $k_p = 5...10 V$ bo‘ladi.

Ko‘prik sxema bo‘yicha ΔE ni hisoblash va ko‘prikni muvozanatlash bilan statik va dinamik deformatsiyalar qayd qilinadi. Ko‘prik to‘rtta rezistordan tashkil topadi. Rezistorlardan biri A.N.Patrashev bo‘yicha 120...1000 Om diapazonda boshlang‘ich

qarshilikka ega bo'lgan aktiv dattik bo'lib hisoblanadi, uchtasi esa – doimiy qarshilikka ega. Ko'priknining diagonallaridan biriga V oziqlantirish manbai ulanadi, boshqasiga esa N.A.Chinenev o'lchash pribori o'rnatiladi.

Chiquvchi kuchlanish

$$E = \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{(R_1 - R_2)(R_3 + R_4)} V \quad (5.78)$$

formula bo'yicha aniqlanadi.

$R_1 R_3 = R_2 R_4$ da ko'prik muvozanatlangan bo'ladi ($E = 0$). A.N.Patrashev ko'prik orqali oqib o'tadigan tok cheksiz katta qarshilikka ega bo'lgan yuklamaga shoxchalanmaydi deb hisoblaydi. Yuklama qo'yilgandan keyin ΔE muvozanat buzilishi paydo bo'ladi, bu R_1 datchik qarshiligining o'zgarishi bilan bog'lanadi. Muvozanatning buzilishi quyidagi formula bo'yicha baholanadi:

$$\Delta E = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5.79)$$

Ko'prik sxemaning sezuvchanlik koeffitsiyenti

$$k_M = \Delta E / \varepsilon \quad (5.80)$$

ga teng.

Bu formulalarga bog'lanishlar o'rniga qo'yilgandan keyin ravshan bo'ladi, ko'prik sxemaning sezuvchanligi V kiruvchi kuchlanish, aktiv tenzodatchikning $k = \Delta R_1 / R_1 \varepsilon$ sezuvchanlik koeffitsiyenti va $R_1 R_2 / (R_1 + R_2)^2$ ko'prik sxemaning samaradorligiga bog'liq bo'ladi. N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan ma'lumotlarga ko'ra, boshqa shart-sharoitlar teng bo'lganda ko'prik sxemaning samaradorligi $R_1 = R_2$ da maksimal bo'ladi.

Birinchi ko'prik sxemada R_1 bittayu-bitta aktiv datchik bo'lib hisoblanadi. Sezuvchanlik koeffitsiyenti quyidagi bog'lanish bo'yicha aniqlanadi:

$$k_M = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I R_1 k \quad (5.81)$$

Sxema qo'llanilish sohasi bo'yicha potentsiometrik sxemaga o'xshaydi. Uning sezuvchanligi ham $R_2/(R_1 + R_2)$ zanjirning samaradorligiga - $R_2 - 9R_1$ da bu samaradorlik 90% ga teng - va u datchikning sezuvchanligiga bog'liq bo'ladi.

Ikkinchi ko'prik sxemada boshqa shoxchaga $R_2 = R_1$ teriokompensatsiyalaydigan datchik qo'shilgan, u tadqiq qilinadigan ob'ektga R_1 datchikning harorat sharoitlarida o'rnatiladi. $R_2 = R_1$ bo'lganligi sababli bu sxemada zanjirning samaradorligi doimiy bo'ladi va 50% ga teng. Sxemaning sezuvchanligi

$$k_M = 0,5IR_1k \quad (5.82)$$

formula bo'yicha aniqlanadi.

Haroratga bog'liqlikning kamayishidan tashqari bu sxemaning yutug'i shu bilan bog'lanadiki, bu ikkita datchikning deformatsiyalari teng va belgisi bo'yicha qarama-qarshi bo'lgan holatda (masalan, simmetrik kesimli to'sinni bukishda) formuladagi bog'lanishlarga muvofiq chiquvchi kuchlanish ikki martaga oshadi. Bu sxemaning sezuvchanligini oshirish va signalning nohiziqliligini kamaytirish imkonini beradi.

Uchinchi ko'prik sxemada haroratning avtokompensatsiyalanishi ko'prikning bitta shoxchasiga R_1 aktiv va R_2 kompensatsion datchiklarni o'rnatish bilan amalga oshiriladi. Sezuvchanlik koeffitsiyenti formula bo'yicha aniqlanadi va u $R_2 = R_1$ da 50% ni, $R_2 = (4...9)R_1$ da 80-90% ni tashkil qiladi, chunki boshlang'ich muvozanatlash uchun $R_2 = R_1$ shartning bajarilishi talab qilinmaydi.

To'rtinchi ko'prik sxemada $R_2 = R_1$ da to'rtta aktiv datchikdan foydalaniladi. Undan $\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_2 = -\Delta R_4$ bo'lganda foydalanish maqsadga muvofiq bo'ladi. Barcha datchiklar bitta ob'ektning yuzasiga o'rnatilgan va bir xil muvozanatlangan harorat sharoitlarida joylashgan degan shartda sxemada to'liq harorat kompensatsiyasi va to'liq chiziqlilikka erishiladi. Sxemaning sezuvchanlik koeffitsiyenti $k_M = 2Irk$ ga teng bo'ladi.

Mesdoz konstruksiyasi

Birinchi ko‘prik sxemani qo‘llash afzal ekanligi tez-tez e‘tirof etiladi, chunki u N.A.Chinenevning boshqa sxemalariga qaraganda kamroq sezuvchanlikka ega. Umumiy holatda o‘lchash sxemalarining sezuvchanligini oshirish uchun yuqori kuchaytirish koeffitsiyentiga ega bo‘lgan differentsial kuchaytirgichlardan foydalanish A.N.Patrashevning bir nechta datchiklaridan foydalanishga qaraganda tejamli bo‘ladi deb hisoblanadi.

Ko‘prikni muvozanatlash asosida qurilgan ko‘prik o‘lchash sxemalarining tasvirlanishi N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan.

ε_1 va ε_2 aniqlash uchun ikki o‘lchovli nominal deformatsiya kuchini o‘rganishda uchta yoki to‘rtta datchiklarga ega bo‘lgan to‘g‘ri to‘rtburchak yoki teng burchakli rozetkalardan foydalaniladi. Rozetkalarining birinchi tipida datchiklar mos ravishda Oxu hisoblash tizimining Ox o‘qiga nisbatan 0, 45, 90° va 0, 45, 90, 135° burchak ostida o‘rnatiladi. Rozetkalarining ikkinchi tipida – mos ravishda 0, 120, 240° va 0, 90, 120, 240° burchak ostida o‘rnatiladi.

γ_{xu} kattalik ikkita qo‘shni datchiklarning ko‘rsatishi bo‘yicha aniqlanadi, yo‘nalishi esa – ular o‘rtasidagi burchakning bissektrisasi bo‘yicha aniqlanadi. Datchiklarning ko‘rsatishlari bo‘yicha deformatsiyalarni hisoblash uchun bog‘lanishlar N.A.Chinenev va A.N.Patrashevning ishlarida keltirilgan. Kuchlanishlar qayishqoqlik nazariyasi formulalari bo‘yicha hisoblanadi.

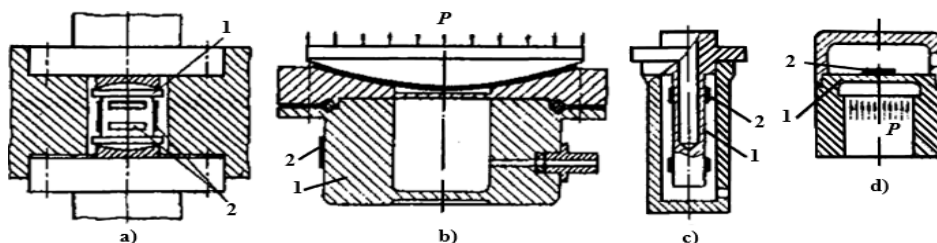
Uning qayishqoq elementining deformatsiyasi orqali deformatsiyalovchi kuchni aniqlash uchun mo‘ljallangan qurilma mesdoz deb ataladi. U bevosita o‘lchanadigan kuch ta‘sir ko‘rsatadigan zonaga, masalan, shtampning xvostovigining ostiga joylashtiriladi. Mesdozga qo‘yiladigan umumiy talablar chiquvchi signalning o‘lchanadigan yuklamaga chiziqli bog‘lanishining bo‘lishi, ko‘rsatishlarning noaniq o‘rnatishga bog‘liq bo‘lmasligi va hokazolar bo‘lib hisoblanadi.

Mesdozlar elastik elementning shakli (tsilindr, halqa, shar), qo‘llaniladigan datchiklarning tipi (sig‘imli, magnitikqayishqoq,

induktiv va boshqalar), mahkamlaydigan elementlarning konstruksiyasi va hokazolar bilan farq qiladi.

5.21-rasm,a,b da elastik elementning yaxlit va halqa ko‘rinishidagi shakliga ega bo‘lgan, kuchni o‘lchash uchun mo‘ljallangan mesdozlarning sxemalari ko‘rsatilgan, elastik elementlarning yon yuzalariga tenzodatchiklar yopishtiriladi. Ko‘pincha ko‘prik sxema qo‘llaniladi (5.21-rasm,a ga qarang), bunda ikkita aktiv datchik o‘lchanadigan kuchning yo‘nalishi bo‘yicha, ikkita kompensatsion datchik esa – ko‘rsatilgan yo‘nalishga ko‘ndalang qilib yopishtiriladi. Mesdozning elastik yaxlit yoki halqa elementini diametr va balandlikning 0,4...0,5 nisbat bilan ishlash tavsiya qilinadi.

Metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonini gidroyuritma bilan jihozlash uchun gidrotizim bilan bog‘langan naychali yoki membranali mesdozlar qo‘llaniladi (5.21-rasm,c,d). Bu hollarda kuch parametrlari ishchi suyuqlikning bosimini o‘lchash yo‘li bilan aniqlanadi. Ikki o‘qli cho‘zish sharoitlarida datchiklar naychanning yuzasiga o‘qqa perpendikulyar qilib, membrana holatida esa – uning markaziga o‘rnatiladi. Bu mesdozlarning o‘lchamlarini tanlash bo‘yicha tavsiyalar N.A.Chinenevning ishlarida keltirilgan.



5.21-rasm. Elastik elementli mesdozlarning konstruksiyalari: yaxlit (a); halqa (b); naychali (c) va membranali (d); 1-element, 2-tenzodatchiklar.

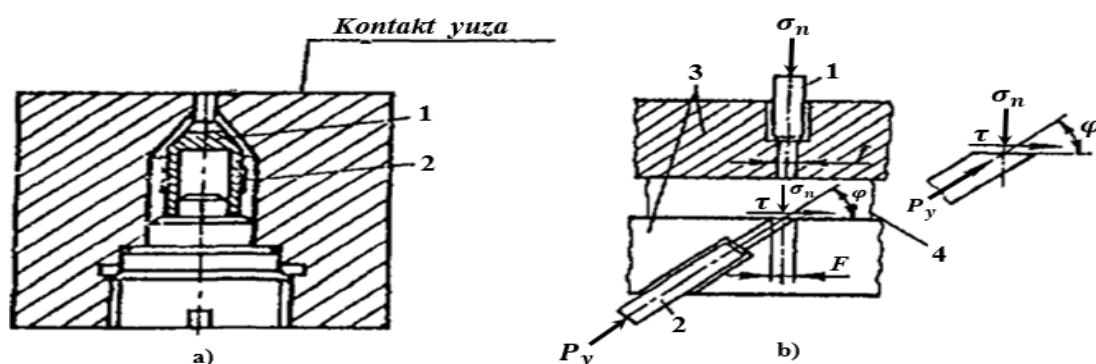
Cho‘zish (siqish) va bukishdan vujudga keladigan deformatsiyalar alohida-alohida qayd qilinadi. Faqatgina R_1 va R_2 ni cho‘zishdan (siqishdan) vujudga keladigan deformatsiyalarni qayd qilish uchun mesdozlar ob‘ekt yuzasining qarama-qarshi tomonlariga joylashtiriladi, datchiklar esa butun sxemalar bo‘ylab o‘rnatiladi.

Pribor faqatgina R_1 va R_2 yig‘indi qarshilikka reaksiya ko‘rsatadi. Faqatgina R_1 va R_2 ni bukishdan vujudga keladigan

deformatsiyalarni qayd qilish uchun pribor ko‘prik shoxchalarining tutash yelkalariga yoki potentsiometrik sxemaning ballasti va datchigining joyiga joylashtiriladi. Bunda chiquvchi signal R_1 va R_2 qarshiliklarning o‘zgarishlar farqiga proporsional bo‘ladi.

Burash deformatsiyasini o‘lchashda tenzorezistorlar to‘sinning o‘qiga nisbatan 45° burchak ostida yopishtiriladi, chunki bosh maydonchalar shu yo‘nalishlarda joylashadi. O‘lchashlar N.A.Chinenev tomonidan ko‘rsatilgan sxemalar bo‘yicha o‘tkaziladi.

Solishtirma kontakt kuchlari bosqichli shtiftga ega bo‘lgan nuqtali mesdozlar bilan aniqlanadi. Kichik bosqichli 1,5...2,5 mm diametrli shtift mesdozning korpusidagi bo‘ylama teshikka har bir tomonga 30 mkm oraliq bilan kiritiladi (5.22-rasm,a). Shtiftning eng katta ichi bo‘sh bosqichining yon yuzasiga tenzorezistorlar yopishtiriladi. Shtift bir paytning o‘zida siquvchi kuch va bukuvchi moment bilan yuklanadi. O‘lchashlarning aniqligini ta‘minlash uchun yuklanmaning ta‘siri ostida mesdozning korpusi va shtift deformatsiyasining bir xilligi korpus gumbazining konussimon shakli bilan ta‘minlanadi. Urinma kuchlanishlarni o‘lchash uchun shtiftli mesdozlarni joylashtirish to‘g‘risida yakdil fikrlar yo‘q. Ye.P.Unksovning ishlarida mesdozning shtiftini shtamp gravyrasining yuzasiga nisbatan burchak ostida joylashtirish (5.22-rasm,b) jarayonlari tasvirlangan.



5.22-rasm. Shtiftli mesdozning umumiy ko‘rinishi (a): 1-shtift; 2-tenzodatchik; va ishqalanish koeffitsiyentining urinma kuchlanishini aniqlash sxemasi (b); 1-kontakt yuzasiga normal yo‘nalgan mesdoz; 2-kontakt yuzasiga egilgan mesdoz; 3-shtamplash plitalari; 4-deformatsiyalanadigan material.

Urinma kuchlanish va ishqalanish quyidagi bogʻlanishlar boʻyicha aniqlanadi:

$$\tau = tg\varphi(\sigma_n - p_\varphi); \mu_{ishq} = \tau/\sigma_n \quad (5.83)$$

Bu yerda σ_n va p_φ mos ravishda perpendikulyar va egilgan sezuvchan elementlardan olingan koʻrsatishlar asosida aniqlanadi.

Eng katta ogʻishishlar kontakt zonasining chekkalarida va oʻlchashlarning nuqtali emasligi sababli kontakt kuchlanishlarining katta gradiyentiga ega boʻlgan uchastkalarda vujudga keladi.

Kontakt kuchlanishlarini tadqiq qilish uchun moʻljallangan nuqtali mesdozlar uslubining turlari folgadagi izlar, oʻlchash teshiklari va sezuvchan plenklar uslublari boʻlib hisoblanadi.

Birinchi uslub shtampning devoridagi teshiklarni oldindan kalibrlangan folga bilan yopish bilan bogʻlanadi. Izlarning oʻlchamlari boʻyicha bosimlar epyuralari quriladi. Ikkinchi uslubda qn mahalliy bosim quyidagi bogʻlanishga muvofiq aniqlanadi:

$$q_n = kh + q_3 \quad (5.84)$$

Bu yerda h va q_3 – shtampning devoridagi teshikka metallning oqish chuqurligi va oqishning boshlangʻich bosimi; k – proporsionallik koeffitsiyenti.

Koeffitsiyentlar q_n maʼlum boʻlganda ikkita kalibrlash sinovlarining maʼlumotlari boʻyicha tenglamalar tizimini yechish bilan aniqlanadi.

Har ikkala uslub ham kontakt zonasida metallning oqish kinematikasini buzadi va katta xatolikka ega. Keyingi uslubda tayyorlanma bilan shtampning boʻshligʻi orasiga boʻshliqlari boʻyoq bilan toʻldirilgan plenka joylashtiriladi. Bosim paydo boʻlganda boʻshliqlar oʻzaro qoʻshiladi, bunda boʻyoq hisobiga plenkaning rangi oʻzgaradi. Kontakt bosimining taqsimlanishi kalibrlash jadvalari va plenkada rangli zonalarining taqsimlanishi boʻyicha aniqlanadi.

Kombinatsiyalangan uslublar

Konkret masalalarni yechish uchun ko‘rib chiqilgan uslublar-ning imkoniyatlaridan kelib chiqish bilan ularni kombinatsiyada qo‘llash maqsadga muvofiq bo‘ladi. Bu ko‘proq to‘liq va ko‘proq ishonchli ma‘lumotlarni olish va eksperimental ma‘lumotlarga ishlov berishni soddalashtirish imkonini beradi. Yassi masalalarni yechishda uslublarni birlashtirishga misollarni ko‘rib chiqamiz.

1. Qattqlik uslubi bilan σ_i aniqlanadi, so‘ngra:

a) mo‘rt qoplamalar uslubi bilan σ_1 va σ_2 ning trayektoriyalari aniqlanadi, kuchlanishlarning o‘zlarini esa $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_s = \sigma_i$ da muvozanat tenglamalarini N.A.Chinenevning bosh kuchlanishlarining trayektoriyalari bo‘ylab integrallash bilan ajratish maqsadga muvofiq bo‘ladi;

b) OSQ, interferometriya, eritish, mo‘rt qoplamalar yoki muar uslublaridan biri bilan sirg‘alish chiziqlarining manzarasi aniqlanadi. Muvozanat tenglamalarini sirg‘alish chiziqlariga urinmalar bilan hosil qilingan koordinatalar to‘rida integrallash bilan so‘rt aniqlanadi, so‘ngra N.A.Chinenev bo‘yicha σ_x , σ_y , σ_{xu} hisoblanadi;

d) koordinatalar to‘ri, muar, mikrostruktura va OSQ uslublari bilan bosh normal va maksimal urinma kuchlanishlarning trayektoriyasini o‘z ichiga olgan holda deformatsiyalangan holat aniqlanadi, kuchlanishlarning o‘zlari esa – avval aytib o‘tilganidek, yoki $\tau_{xu} = (\sigma_i/2) \sin 2\theta$ ni aniqlash, yoki N.A.Chinenevning muvozanat tenglamalarini yechish bilan aniqlanadi;

2. Deformatsiyalanadigan tayyorlanmaning harorat maydoni turli haroratlarda kalibrlash grafigi bo‘yicha aniqlanadi, u koordinatalar to‘ri uslubi bilan olingan mustahkamlanish parametri va G.D.Del, R.K.Mozberg sovugan metallining qattqligida cho‘zishga sinovlarda kuchlanishlarning intensivligini bog‘laydi;

3. Qutblash-optik uslublar bilan olingan bosh deformatsiyalar va kuchlanishlarni ajratish uchun optik interferometriya uslubi bilan ko‘ndalang deformatsiyalar o‘lchanadi, so‘ngra natijalarga N.A.Chinenev bo‘yicha matematik ishlov beriladi;

4. Optik qutblash va koordinatalar to‘ri uslublarini birlashtirish bilan moddiy zarrachalarning trayektoriyalari va deformatsiyalar aniqlanadi. Kuchlanishlar oqish nazariyasining nisbatlari va G.A.Smirnov-Alyaev muvozanat tenglamalari orqali aniqlanadi;

5. OSQ va muar uslublari bilan mos ravishda tenglamalarning bosh deformatsiyalarning farqini siljishlar bilan bog‘laydigan qismlari aniqlanadi. Ma‘lumotlarning bir paytda qayd qilinishi N.A.Chinenev kalibrlashini talab qilmaydi.

Kitobda plastik oqishda materialning nominal deformatsiya kuchini tadqiq qilishda qo‘llaniladigan uslublarning bir qismigina tasvirlangan. Boshqa uslublar, masalan, dinamik yuklamalar yoki oshirilgan harorat rejimlari sharoitlarida qo‘llaniladigan uslublar N.A.Chinenev, A.N.Patrashev va G.A.Smirnov-Alyaevning ishlarida keltirilgan.

Tadqiq qilishlarning u yoki bu uslubini texnik amalga oshirish bo‘yicha hisoblashlar, kuch, dinamik va konstruktiv sxemalar, sinovdan o‘tkazish vositalarining texnik tavsiflari, o‘ziga xos xususiyatlari va ularning optimal ish rejimlarini tanlash, shuningdek sanoatda konkret masalalarni yechish uchun sinovdan o‘tkazish texnikasidan foydalanish uslubiyati to‘g‘risida tizimlashtirilgan ma‘lumotlarni o‘z ichiga oladigan materiallar xususan, N.A.Chinenev, A.N.Patrashev, G.A.Smirnov-Alyaeva, Ye.P.Unksov, A.G.Ovchinnikov, P.I.Poluxin, L.V.Prozorov, A.I.Kolpashnikov, A.D.Tomlenov, M.V.Storojev va boshqalarning ishlarida yoritilgan.

Yuqorida aytilganlar munosabati bilan mazkur predmetning asosiy vazifasi metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlari va tayyorlanmalarni olish, prokatlash, turli metall va nometall materiallardan talab qilinadigan shakl va o‘lchamdagi yuqori sifatli tayyor buyumlar yoki mahsulotlarni olish texnologiyalarini ratsional qurish va ularni tahlil qilishning umumiy printsiplial asoslarini ishlab chiqish bo‘lib hisoblanadi.

Plastik deformatsiyalar nazariyasi shu yo‘nalishdagi fan va ilmiy baza bo‘lib hisoblanadi. U turli operatsiyalar bilan metallning shaklini eng katta o‘zgartirish mumkin bo‘ladigan shart-sharoitlar, metallarga bosim bilan ishlov berishning metallarning fizikaviy-

kimyoviy, texnologik va mexanik xususiyatlariga ta'siri, turli operatsiyalarda tayyorlanmalarning shakl o'zgarishining xarakteri, turli operatsiyalar bilan ishlov berishda va metallni plastik deformatsiyalashda metallning plastik deformatsiyalarga qarshiligini ko'rib chiqadi va o'rganadi.

Nazorat savollari

1. Metallarni deformatsiyalash jarayoniga deformatsiya harorati va tezligining ta'siri qanday bo'ladi?
2. Metallarni yoqori oshirilgan haroratlarda deformatsiyalash deganda nimani tushunasiz?
3. Metallarning qaytishi (dam olishi) va rekristallanishi qanday hollarda sodir bo'ladi?
4. Metallarga bosim bilan ishlov berishda deformatsiyaning qanday turlarini bilasiz?
5. Metallarning plastikligiga va deformatsiyalanish qarshiligiga haroratning ta'siri qanday bo'ladi?
6. Issiq deformatsiyani metallarning mexanik xossalari ta'siri bormi?
7. Deformatsiya tezligining deformatsiyaga qarshiligi va plastikligiga ta'siri qanday kechadi?
8. Plastik deformatsiyaning asosiy qonunlari va usullariga nimalar kiradi?
9. Muar uslubi va yorug'lik kvaziinterferentsiyasi hosil bo'lish sabablari.
10. Optik-sezuvchan qoplamalar va strukturaviy-nasllilik materiallar uslublarini tushuntirib bering.

XULOSA

Mazkur darslikda asosan plastik deformatsiyasiga tegishli bo'lgan materiallar, metallar va ular qotishmalarining nazariy va amaliy jihatlari yoritilgan.

Texnika davri va mashinasozlik sanoatining shiddat bilan rivojlanishi plastik deformatsiya nazariyasining oldiga ko'plab yangi vazifalarni qo'yimoqda, uning qiyofasi esa uzluksiz o'zgarimoqda, shuningdek u ko'p marta qayta ishlanmoqda.

Bir paytning o'zida amaliy plastiklik nazariyasi ham rivojlanmoqda. U metallning bir jinsli uzluksiz izotrop qattiqplastik muhit sifatidagi modeliga tayanadi. Bunda bosh vazifa hisoblash yo'li bilan metalldagi kuchlanishlar va deformatsiyalarni aniqlash hamda bosim bilan ishlash, shtamplash, presslash va prokatlash jarayonlarining kuch parametrlarini aniqlash bo'lib hisoblanadi.

Shuningdek, plastik deformatsiyaning asosiy tabiati, yassi plastik oqish nazariyasining asoslari, metall materiallarni presslash va shtamplash uslublari, yuqorigi va pastki baholash to'g'risidagi teoremlar, deformatsiya harorati va tezligining metallarni deformatsiyalash jarayoniga ta'siri ko'rib chiqilgan va metallar va qotishmalarni plastik deformatsiyalashga ta'siri o'rganilgan. Ishda shuningdek O'zbekiston Respublikasi oliy va o'rta-maxsus ta'lim vazirligi tomonidan tasdiqlangan namunaviy dasturlarga to'liq mos keladigan turli materiallari ham keltirilgan. Bu materiallar muallifning shaxsiy izlanishlarini tavsiflaydigan turli-tuman qiziqishlari, keng bilimlari va chuqur tushunchalari bilan chambarchas bog'lanadi va kitobxonga zaruriy bilimlarni beradi. Mavzu bo'yicha nazorat savollari, xulosalar, glossariy (izohli lug'at) va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati keltirilgan.

Darslikda metallarning plastik deformatsiyasini tabiati, ularning tarkibi va tuzilishi, turli metall materiallarga ishlov berishning konstruktor va texnolog, shuningdek, metallarga bosim bilan ishlov berish, quymakorlik sanoati va prokatlashga ixtisoslashgan muhandis-mexanik bilishi zarur bo'lgan xususiyatlari va uslublari tahlil qilingan.

Tahlillarning natijalari shuni ko'rsatdiki, turli operatsiyalar bilan zagotovkaning shaklini o'zgartirishning texnologik xarakteri bosim bilan ishlov berishdan keyin olinadigan boshlang'ich zagotovkalar va detallarning o'lchamlari va shakli o'rtasidagi ko'proq xoxlanadigan nisbatlarga olib kelishi, xususan, shu buyumlarning sifati yaxshilanadigan, metall va elektroenergiya sarfi keskin qisqaradigan nisbatlarga olib kelishi lozim.

Yuqorida aytib o'tilgan ma'lumotlar bo'yicha mazkur kitob barcha texnika oliy o'quv yurtlarida professor-o'qituvchilar tarkibi va talabalar, shuningdek, oliy o'quv yurtlarining izlanuvchilari va mashinasozlik korxonalarining muhandis-texnik xodimlari uchun darslik sifatida ham uzoq muddat xizmat qiladi. Unda tavsiya etilayotgan boblar, paragraflar, turli xil zamonaviy va yangi innovatsion materiallar, ayniqsa, plastik deformatsiya, metallarga bosim bilan ishlov berish va prokat maxsulotlari va buyumlarini olish talabalarni nazariy yoki amaliy bilim va ilm olishlarida, shu bilimlarni yaxshi o'zlashtirishlarida katta yordam beradi.

GLOSSARIY

«Plastik deformatsiya» fanidan tayanch soʻzlar va iboralarning izohli lugʻati

Metallarning – Harorat pasaygan sari elektr oʻtkazuvchanligu ortadigan, elektron

taʼrifi – oʻtkazuvchanlikka ega boʻlgan, bolgʻalanuvchan, issiq oʻtkazuvchan va ayliroq moddalar

Metallarning tuzilishi – Hamma metallar va qotishmalar kristall tuzilishga ega ekanligi

Atom-kristall – Kristall panjaralarda atomlar va ionlarni muayyan tartibda

Panjaralar – joylashishi

Kristallografik - Metallardagi kristall panjaraning atomlar zichligi eng koʻp

tekisliklar – boʻlgan tekisligi

Metallarning agregat holati – Qattiq, suyuq va gaz holatlari

Qattiq jismlardagi bogʻlanish turlari – Ion, atom, molekulyar va metall bogʻlanishlar

Birlamchi kristallanish – Metallarni suyuq holatdan qattiq holatga oʻtish jarayoni

Ikkilamchi kristallanish – Qattiq holatdagi metallar kristall panjaralarining oʻzgarishi

Mexanik xossalari taʼrifi – Metallar va qotishmalarning tashqi kuchlar taʼsiriga qarshilik koʻrsatish xususiyati

Tashqi taʼsir etuvchi kuchlar – Bir tekisda taʼsir etuvchi kuchga *statik kuch*, zarb bilan taʼsir etuvchi kuchga *dinamik kuch* va taʼsir etish kuchi oʻzgarib turadigan kuchga esa *oʻzgaruvchan kuch* deb yuritilishi

Metallarning texnologik xossalari – Metallarning kirishuvchanligi, suyuq holatda oquvchanligi, bolgʻalanuvchanligi, payvandlanuvchanligi va ularning kesib ishlanuvchanligi

Deformatsiya – Metallarga qandaydir biror kuch taʼsir ettirilganda shu metallargeometrik shakli va oʻlchamlarining oʻzgarishi

Metallarning elastic deformatsiyasi – Metallarga ta'sir ettirilgan kuch olingandan keyin shu metall asli holiga yoki shakliga qaytishi

Metallarning plastic deformatsiyasi – Metallarga ta'sir ettirilgan kuch olingandan keyin shu metall asli holiga yoki shakliga qaytmasligi

Metallarning emirilishi – Metallarga ta'sir ettirilgan kuch ma'lum chegarara etganda yoki oshgandan keyin shu po'lat namunasining emirilishi

Metallarning sinish turlari – Metallar qovushqoq, mo'rt va toliqish oqibatlarini

Nagartovka – Plastik deformatsiya ta'sirida shu metallning pux-talanishi

Metallarning o'ta yuqori plastikligi – Metallarga ta'sir ettirilgan kuch belgilangan kuchdan oshishi va ularda o'ta yuqori plastiklik hosil bo'lishi va u avvalgi shakliga qaytmasligi

Metallardagi naklyop – Metallarda naklyop juda ko'p siljish yuzalari hosil bo'lishiga va mozaika bloklarining maydalanishiga olib kelishi

Metallardagi ichki kuchlanishlar – Ular birinchi, ikkinchi va uchinchi tur kuchlanishlari

Qotishmalar ta'rifi – Metallar bilan metallarni, metallar bilan metallmaslarni yoki metallmaslar bilan metallmaslarni birgalikda suyuqlantirish orqali hosil bo'lgan jismi

Metall qotishmalar – Ko'p qismi metallardan va qolgan qismi metallmaslardan iboran bo'lgan metall xossalariga ega qotishmalari

Psevdo qotishmalar – Metallarni suyuqlantirmasdan elektroliz qilish, qovushtirish va qattiq holatdan bug' holatiga o'tkazish jarayoni

Plastik deformatsiya jarayonining tahlil usullari – Sirpanish chiziqlarini tahlil qilish, metallardagi kuchlanishlarni sinab tahlil qilish, asosiy deformatsiyalar, masalalar va tenglamalarni tahlil qilish va boshqa usullari

Muvozanat va virtual ish differentsial tenglamalari – Bu tenglamalar alohida-alohida yozilib, ularda asosan kuchlanishlar, hajm

birligidagi kuchlar va chegara elementlarining muvozanat shartlarining ko'rsatilishi

Plastik deformatsiya kuchining pastki va yuqorigi baholarini aniqlash tamoyillari – Pastki va yuqorigi baholarni aniqlash uchun Xillning ikkita ekstremal tamoyillaridan foydalanishi

Yassi plastik oqish holati – Barcha zarrachalar berilgan tekislik bo'yicha parallel harakatlanishi

Sirpanish chiziqlarini matritsa – operator usulida qurish - bu chiziqlar to'rini to'g'ri bo'lgan va to'g'ri bo'lmagan usul bilan qurishi

Oquvchanlik kuchlanishi – Bu σ_s haqiqiy kuchlanish bo'yicha deformatsiyada mustahkamlanish oladigan materialning oquvchanlik chegarasi

Metallardagi sirpanish holatining kechishi – Metall kristall panjarasida sirpanish atomlar ko'proq zich o'ralgan va siljishga qarshilik eng kichik bo'lgan tekisliklar va yo'nalishlar bo'yicha kechishi

Metallardagi egizaklanish – K12 va G12 zich o'ralgan panjarali metallning pl-deformatsiyalanishi sirpanishdan tashqari, egizaklanish bilan ham sodir bo'lishi

Metallarning yassi deformatsiyasi o'zgarishlari – Bu uzun silindrik yoki prizmatik jismda yassi deformatsiyani qizdirish harorati ko'ndalang kesimi bo'ylab o'zgarganda yoki silindr va prizmaning o'qiga parallel chiziqlar bo'yicha o'zgarmaganda vujudga kelishi

Materiallarni presslash jarayonining borishi – Press havol silindriga kiritilgan materiallarni matritsa deb ataluvchi asbobi bilan asbobni ezib siqib chiqarish bilan bog'liq bo'lgan texnologik jarayoni

Materiallarni hajmiy shtamplash jarayonining borishi – Metall zagotovkalarini shtamp deb ataluvchi asbobning pastki palla oyig'iga qo'yib, ustki pallasi bilan zarblab ishlov berish texnologik jarayoni

Godograf tezliklari rejasining ketma-ketligi – Sirpanish chiziqlari to'riga mos keladigan asosiy tezliklar rejasi godograf tomonidan taqdim qilinishi

Deformatsiyalanadigan metallarda qaytish va rekristallanish sodir bo‘lishi – Bunday metallarning harorati oshirilganda ularda mustahkamlanishga qarama-qarshilikka bo‘lgan yangi jarayonlar sodir bo‘lib, natijada qaytish (dam olishi) va rekristallanish jarayonlari

Metallarga bosim bilan ishlov berish jarayonlari – biror bir metall materiallarini ma’lum hajm va bosim bilan ezib-siqib buyum olinishi

Prokat mahsulotlari – biror bir markali metallni qizdirib – suyultirib, avval blyum olish va keyin esa slyab va kerakli zaruriy prokat mahsulotlarini olinishi

Materialning vizioplastiklik uslublarining qo‘llanilishi – bu uslub E.Tomsen tomonidan taklif qilingan bo‘lib, u plastic deformatsiyaning kichik ortish yo‘nalishlari va tezliklar yo‘nalishlariga mos keluvchi koordinata to‘rining og‘ishishlari bo‘yicha oqish tezliklarini aniqlash imkonini beruvchi usuli

Muar uslubining qo‘llanilishi - Muar hodisasi 1874-yilda Rele tomonidan yozilgan bo‘lib, u XX asrning 40-yillarida, mayda va aniq to‘rlarni sanoat miqyosida tayyorlash uchun o‘zlashtirilgandan keyin qo‘llanila borilishi

Qutblanish-optik uslublari - Polyarizatsiyalash, rasmelastiklik, rasmpplastiklik, optik-sezuvchan qoplamalar, golografiya va boshqa uslublari

Namunalar turlari – Bunda ko‘proq metall po‘lat namunalardan va kamroq metallmas namunalardan foydalanilishi

Optik-sezuvchan qoplamalar - bu uslub A.Ya.Aleksandrov tomonidan taklif qilingan bo‘lib, u namuna yuzasiga yaxshi qoplama adgeziya va kichik qattqlik hosil qilishi

Strukturaviy- nasllilik uslublarini turlari - mikrostrukturaviy, qattqlikni o‘lchash, mo‘rt qoplamalar, sirpanish chiziqlari, interferometriya va rentgen uslublari

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Abdullaev F.S., Maxkamov Q.X. Metallarga bosim bilan ishlov berish asoslari. O‘quv qo‘llanma. – T.: TDTU, 2000. - 400 b.

2. Мирбобоев В.А. Металларни босим билан ишлов бериш усуллари ва махсулотлар ишлаб чиқаришнинг технологик жараёнлари. Ўқув қўлланма. – Т.: ТошДТУ, 2001. - 189 б.

3. Лосов М.Г. Теория пластической деформация металлов. Учебное пособие. – Самара.: Изд-во СГАЕУ, 2010. - 175 с.

4. Norxudjaev F.R. Metallshunoslik asoslari. O‘quv qo‘llanma. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi, 2008. - 165 b.

5. Nurmurodov S.D. Materialshunoslik va konstruksion materiallar texnologiyasi. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi, 2014. - 287 b.

6. Umarov E.O. Materialshunoslik. – T.: Cho‘lpon nomidagi nashriyot-matbaa uyi, 2014. - 382 b.

7. William F., Robert M. Metall forning: Mechanice and country cambride. – United kingdom: Metallurgy cambride university press, 2011. - 345 p.

8. Васильев Д.И., Тилкин М.А., Тетерин Г.Р. Основы проектирования деформирующего инструмента. Учебное пособие для металлургических и машиностроительных вузов. – М.: Высшая школа, 2005. - 428 с.

9. Jasob Lubliner. Plasticity theory. Little book. – Californiya.: Pearson education, 2015. - 540 p.

10. Эвстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков.: Высшая школа, 2006. - 248 с.

11. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 2006. - 688 с.

12. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 2007. - 423 с.

13. Огородников В.А. Оценка деформируемости при обработке металлов давлением. – Киев.: Высшая школа, 2008. - 124 с.

14. Степаненский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 2009. - 215 с.
15. Корнеев Н.И. Комка и штамповка цветных металлов. Справочник. – М.: Машиностроение, 2007. - 507 с.
16. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 2007. - 247 с.
17. Jones R.M. Deformation theory of plasticity. Buee metall ridje corporation, 2009. - 622 p.
18. Бреханов А.Н. Ковка и объемная штамповка. – М.: Машгиз, 2010. - 177 с.
19. William D., Callister Jr., David G. Rethwisch. Materials science and engineering / wiley and sons. UK, 2014. - 896 p.
20. Ковалов В.Г. Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости. Учебное пособие для вузов. – М.: Кнорус, 2010. - 224 с.
21. Эвстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. Сборник задач и упражнения. – Харьков.: Высшая школа, 2008. - 124 с.
22. Plyoshin A.A. Sheet metall forming processes and die design industrial press. Inc. U.S.: 2nd Revised edition New York, United states, 2014.
23. Рудский А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. Учебное пособие. – СПб.: Наука, 2010. - 527 с.
24. Donald R. Askeland. Pradeep P. Fulay. Essentials of materials science and enjineering. Sekond edition CEN GAGE Learning, 2009. - 604 p.
25. Григорьев Л.Л. Холодная штамповка. – СП. Политехника, 2009. - 187 с.
26. Константинов И.Л. Технологияковки и горячей объемной штамповки. – М.: ИНФРА-М, 2014. - 239 с.
27. Xaliqberdiev T.U. Mashinasozlik texnologiyasi asoslari. – Т.: O‘qituvchi, 2012. - 490 b.
28. Лавриенко Е.А. Объемная штамповка на автоматах. – М.: Изд-ва МГТУ имени Н.Е.Баумана, 2014. - 277 с.

29. Tilabov B.Q. Materialshunoslik fani bo'yicha laboratoriya ishlari va amaliy mashg'ulotlarni mustaqil bajarish uchun uslubiy qo'llanma. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi, 2021. - 255 b.

30. Tilabov B.Q. Materialshunoslik va konstruksion materiallar texnologiyasi. Uslubiy qo'llanma. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi, 2022. - 301 b.

31. Tilabov B.Q. Materialshunoslik fanidan ma'ruzalar matni. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi, 2022. - 463 b.

32. www.ziyonet.uz

33. www.ziyo.uz.com

34. www.youtube.com

35. www.twirpx.com

36. www.natlib.uz

37. www.lib.tnu.ru/materialovedenie.doc.898KB.10.02.2022

38. www.journals.elsevier.com/journal-of-materials-science-and-technology

MUNDARIJA

Kirish	3
1-bob. Plastik deformatsiyaning asosiy tabiati	8
1.1. Metallar va ularning tuzilishi	8
1.2. Plastik deformatsiyalar to‘g‘risida umumiy tushincha	16
1.3. Deformatsion kuchlarni aniqlash usullari	24
1.3.1. Deformatsiyalovchi kuchlarni aniqlash	27
1.3.2. Metallarning elastik va plastik deformatsiyalanishi	38
1.4. Metallar va ular qotishmalarining o‘ta yuqori plastikligi	51
1.4.1. Plastik deformatsiya jarayonlarini tahlil qilish usullari	54
1.4.2. Muvozanat va virtual ish differensial tenglamalari	61
1.4.3. Maksimal ishlar tamoyili	64
1.5. Plastik deformatsiya kuchining pastki va yuqorigi baholarini aniqlash uchun asosiy ekstremal tamoyillar	66
2-bob. Yassi plastik oqish nazariyasining asoslari	70
2.1. Plastik oqish holati, kuchlanganlik holati va Genki tenglamasining hosil bo‘lishi	70
2.2. Sirpanish chiziqlarini qurishning matriksa-operator usuli...	79
2.2.1. Sirpanish chiziqlarining umumiy tavsif tenglamalari ...	81
2.3. Metallarning plastik oqishini chaqiruvchi kuchlarni aniqlashning yaqinlashuvchi energetik uslubi	84
2.4. Plastik deformatsiyaning haqiqiy kuchlanish va mustahkamlanish egri chiziqlari	90
2.5. Sirpanish va egizaklanish bilan plastik deformatsiyalanish	97
2.6. Metallarning yassi deformatsiyasi, yassi kuchlanganlik holati va deformatsiyalarni bartaraf qilish usullari	100
3-bob. Metall materiallarini shtampovkalash va presslash usullari	107
3.1. Materiallarni shtampovkalash va presslash haqida umumiy tushirichalar.....	107
3.2. Materiallarni presslash uchun foydalaniladigan asboblari va uskunalari.....	114
3.3. Materiallarni shtamplash, sovuq va issiq holda shtamplash uchun shtamplar va ularning konstruksiyalari	116

3.3.1. Listli materiallarni shtampovkalash usullari	133
3.4. Metall materiallarni erkin kovkalash (bolg‘alash)	141
3.5. Metallarni presslash va shtamplash kuchlarini aniqlash usullari	151
3.5.1. Kuchlarni baholash uslubi	156
3.5.2. Yoqorigi va pastki baholash uslublarining mohiyati...	159
3.5.3. Godografning tekisliklar rejasini ketma-ket qurish ...	169
3.5.4. Yoqorigi va pastki baholash uslublarini rivojlanishi va ularni qo‘llanilishi	171
3.6. Oxirgi elementar uslubi	177
4-bob. Yoqorigi va pastki baholashlar to‘g‘risidagi teoremlar.....	185
4.1. Yopishqoq bo‘lmagan qattiqplastik jismni kvazistatik deformatsiyalash	185
4.2. Tugunlardagi va elementning ichidagi o‘zgaruvchilar...	187
4.2.1. Elementlarni tanlash va konkret shaklni qabul qilish..	191
4.3. Oxirgi elementar usulining differensial va variatsion shakllari	204
4.4. Plastiklikning energetik shartini geometrik ma‘nosi	211
4.5. Asosiy geometrik tadqiqot qilish usublari	214
5-bob. Metallarning deformatsiyalash jarayoniga deformatsiya harorati va tezligining ta’siri	228
5.1. Yoqori haroratlarda deformatsiyalash, metallarning qaytishi va rekristallanishi	228
5.2. Metallarga bosim bilan ishlov berishda deformatsiyaning asosiy turlari	235
5.2.1. Metallarning plastikligiga va deformatsiyalanish qarshiligiga haroratning ta’siri	237
5.2.2. Issiq deformatsiyani metallarning mexanik xossalariga ta’siri	240
5.2.3. Deformatsiya tezligining deformatsiyaga qarshiligi va plastikligiga ta’siri	244
5.3. Materiallarning plastik deformatsiyalarga qarshiligi usuli ...	248
5.4. Plastik deformatsiyaning asosiy qonunlari va usullari ...	252
5.5. Materiallarning vizioplastiklik usullari	265

5.6. Muar usuli va yorug‘lik kvaziinterferensiyasi hosil bo‘lishi-ning natijalari	274
5.7. Elektrogidrodinamik analogiya uslubi	280
5.7.1. Qutblanish-polyarizatsiya – optik usullari	284
5.7.2. Namunalarning rasmelastiklik va rasmplastiklik usullari ..	289
5.8. Optik-seziluvchan qoplamalar va strukturaviy-nasllilik materiallar usullari	300
Xulosa	335
Glossariy.....	337
Foydalanilgan adabiyotlar	341

Tilabov Baxodir Qurbanovich

PLASTIK DEFORMATSIYA

Darslik

B. Q. Tilabov

Plastik Deformatsiya

Toshkent – «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi» – 2023

Muharrir:	Sh.Kusherbayeva
Tex. muharrir:	Sh.Mirqosimova
Rassom:	U.Ortiqov
Kompyuterda sahifalovchi:	D. Bakirova



E-mail: tipografiyacent@mail.ru Tel: 97-450-11-14, 93-381-22-07.

Bosishga ruxsat etildi . .2023.

Bichimi 60x84 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturasida.

Ofset bosma usulida bosildi.

Shartli bosma tabog‘i . Nashriyot bosma tabog‘i .

Tiraji . Buyurtma № .

«Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi»

bosmaxonasida chop etildi.

Toshkent sh., Foziltepa ko‘chasi, 22 b uy.