SOVUQ SHTAMPLASHDA METALL DETALLARINING DEFORMATSIYA VA NUQSONLARINI SONLI MODELLASHTIRISH

Abdumutalova Z.A.
Toshkent Davlat Texnika unversiteti, magistr

Ibodullayev T.N.
Toshkent Davlat Texnika unversiteti,
katta o'qituvchi
https://doi.org/10.5281/zenodo.23134006

Annotatsiya: Ushbu maqolada sovuq shtamplash texnologik jarayonida metall detallarining deformatsiyasi va yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan texnologik nuqsonlarni sonli modellashtirish masalalari tadqiq etiladi. Sovuq shtamplash mashinasozlik, avtomobilsozlik, elektrotexnika, asbobsozlik va boshqa texnika yo‘nalishlarida list metallardan turli shakldagi detallarni yuqori unumdorlik bilan ishlab chiqarishda keng qo‘llaniladi. Biroq shtamplash jarayonida metallning plastik oqimi, kuchlanishlarning notekis taqsimlanishi, qalinlikning kamayishi, yorilish, burishish va elastik qaytish kabi muammolar yuzaga kelishi mumkin. Tadqiqotda chekli elementlar usuli asosida metall zagotovkaning elastik-plastik deformatsiyasi, puanson va matritsa bilan kontakt o‘zaro ta’siri hamda ishqalanishning deformatsiya jarayoniga ta’siri ko‘rib chiqiladi. Puanson yurishi, ishqalanish koeffitsiyenti, materialning mexanik xossalari va qolip geometriyasi kabi parametrlarning detal sifatiga ta’siri tahlil qilinadi. Sonli modellashtirish yordamida nuqsonlar paydo bo‘lishi mumkin bo‘lgan xavfli zonalarni oldindan aniqlash va texnologik parametrlarni optimallashtirish imkoniyatlari yoritiladi.
Kalit so‘zlar: sovuq shtamplash, metall, deformatsiya, sonli modellashtirish, chekli elementlar usuli, plastik deformatsiya, kuchlanish, ishqalanish, puanson, matritsa, yorilish, burishish, yupqalashish.

Abstract: This article investigates numerical modeling of deformation and defects in metal parts during cold stamping. Cold stamping is widely used in mechanical engineering, automotive manufacturing, electrical engineering and other technical industries for producing metal components with high productivity and dimensional accuracy. However, plastic flow, non-uniform stress distribution, thickness reduction, tearing, wrinkling and elastic springback may occur during the process.

The study considers the finite element method for analyzing elastic-plastic deformation, contact interaction between the workpiece and forming tools, and the influence of friction on material flow. The effects of punch displacement, friction coefficient, material properties and die geometry on the quality of formed parts are discussed. Numerical modeling provides an opportunity to identify potentially critical zones and optimize technological parameters before experimental production.
Keywords: cold stamping, metal forming, numerical modeling, finite element method, plastic deformation, stress, friction, punch, die, tearing, wrinkling, thinning.

Sovuq shtamplash metallarga bosim bilan ishlov berishning eng muhim texnologiyalaridan biri hisoblanadi. Ushbu jarayonda metall zagotovka xona haroratiga yaqin sharoitda maxsus shtamp yoki qolip yordamida kerakli geometrik shaklga keltiriladi. Texnologiyaning asosiy afzalligi yuqori ishlab chiqarish unumdorligi, detal o‘lchamlarining takrorlanuvchanligi va katta miqdordagi mahsulotni nisbatan qisqa vaqt ichida ishlab chiqarish imkoniyatidir.

Sovuq shtamplash jarayonlari avtomobil kuzovi elementlari, maishiy texnika korpuslari, elektr jihozlari qismlari, turli konstruktiv elementlar, metall qopqoqlar, kronshteynlar va boshqa ko‘plab detallarni tayyorlashda qo‘llanadi. Biroq metall zagotovkani qolip yordamida deformatsiyalash oddiy geometrik jarayon emas. Materialning turli qismlarida kuchlanish va deformatsiya holati bir xil bo‘lmaydi. Ayrim zonalarda metall cho‘zilsa, boshqa qismlarda siqilish sodir bo‘lishi mumkin. Natijada detalning ayrim qismlarida haddan tashqari yupqalashish, yorilish yoki burishish yuzaga kelishi ehtimoli mavjud. Shtamplash jarayonining sifatiga metallning mexanik xususiyatlari ham katta ta’sir ko‘rsatadi. Oqish chegarasi, mustahkamlanish ko‘rsatkichi, elastiklik moduli, Puasson koeffitsiyenti, plastik deformatsiyaga chidamlilik va materialning anizotropiyasi kabi parametrlar hisoblash modelining asosiy tarkibiy qismlaridir. An’anaviy ishlab chiqarish sharoitida texnologik parametrlarni aniqlash uchun ko‘plab tajribaviy sinovlar o‘tkaziladi. Bunda yangi qolip tayyorlash, material sarflash va vaqt talab etiladi. Sonli modellashtirish esa real tajribalarni qisman virtual muhitga ko‘chirish imkonini beradi. Ayniqsa, zamonaviy kompyuter texnologiyalarining rivojlanishi natijasida chekli elementlar usuli asosida murakkab plastik deformatsiya jarayonlarini hisoblash imkoniyatlari kengaydi. Sonli modellashtirish orqali shtamplash kuchini, deformatsiya taqsimotini, qalinlik o‘zgarishini, kontakt bosimini va nuqsonlarning shakllanish ehtimolini oldindan baholash mumkin.

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi sovuq shtamplash jarayonida metall detallarining deformatsiyasi va texnologik nuqsonlarini sonli modellashtirishning nazariy hamda amaliy asoslarini yoritishdan iborat. Tadqiqotning vazifalari quyidagilardan iborat:

- sovuq shtamplash jarayonining deformatsion xususiyatlarini o‘rganish;
- chekli elementlar usulining shtamplash jarayonidagi qo‘llanilishini tahlil qilish;
- metallning elastik-plastik xatti-harakatini modellashtirish;
- puanson va matritsa o‘rtasidagi kontaktni hisobga olish;
- ishqalanishning metall oqimiga ta’sirini aniqlash;
- yupqalashish, yorilish va burishish mexanizmlarini tahlil qilish;
- sonli modellashtirishning ishlab chiqarish samaradorligidagi ahamiyatini aniqlash.

Sovuq shtamplash jarayonining matematik modeli

Sovuq shtamplash jarayonida metall zagotovkaga tashqi kuch ta’sir qiladi. Puansonning harakati natijasida zagotovka matritsa bo‘shlig‘iga oqib kiradi va kerakli shaklni egallaydi. Jarayon davomida materialda elastik va plastik deformatsiyalar bir vaqtda mavjud bo‘lishi mumkin. Elastik deformatsiya tashqi yuklama olib tashlangandan keyin qisman yoki to‘liq tiklanadi. Plastik deformatsiya esa doimiy bo‘lib, detalning yangi geometrik shaklini hosil qiladi. Metallning oqish holatini baholash uchun von Mises mezonidan foydalanish mumkin. Umumiy holda plastik oqish sharti quyidagicha ifodalanadi:

$$\sigma_{eq} \geq \sigma_y$$

Bu yerda σ_{eq} — ekvivalent kuchlanish, σ_y — materialning joriy oqish kuchlanishidir.

Material deformatsiya davomida mustahkamlanadigan bo‘lsa, oqish chegarasi plastik deformatsiyaga bog‘liq ravishda o‘zgaradi:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K(\varepsilon_p)^n$$

Bu yerda σ_0 — boshlang‘ich oqish chegarasi, K — mustahkamlanish koeffitsiyenti, ε_p — ekvivalent plastik deformatsiya, n — deformatsion mustahkamlanish ko‘rsatkichi. Mazkur tenglama metallning deformatsiya davomida qarshiligi ortib borishini ifodalash imkonini beradi.

Shtamplash jarayonini sonli modellashtirishda chekli elementlar usuli muhim o‘rin egallaydi. Ushbu usulda murakkab geometrik shaklga ega bo‘lgan zagotovka ko‘plab kichik elementlarga bo‘linadi.

Har bir element uchun kuchlanish, deformatsiya va siljishlar aniqlanadi. Keyinchalik barcha elementlarning o‘zaro ta’siri asosida butun detalning deformatsion holati hisoblanadi. Chekli elementlar usulining muhim afzalligi murakkab geometriyalar va katta plastik deformatsiyalarni hisoblash imkoniyatidir.

Shtamplash jarayonida quyidagi ketma-ketlikdan foydalanish mumkin:

1. Zagotovkaning geometrik modelini yaratish.
2. Puanson va matritsa geometriyasini shakllantirish.
3. Materialning mexanik parametrlarini kiritish.
4. Zagotovkani chekli elementlarga ajratish.
5. Kontakt yuzalarini belgilash.
6. Ishqalanish koeffitsiyentini berish.
7. Chegaraviy shartlarni kiritish.
8. Puanson harakatini bosqichma-bosqich berish.
9. Kuchlanish va deformatsiyani hisoblash.
10. Yakuniy natijalarni tahlil qilish.

Puanson, matritsa va metall zagotovka o‘rtasidagi kontakt shtamplash jarayonining eng muhim elementlaridan biridir. Kontakt jarayonida normal bosim va urinma kuchlanishlar yuzaga keladi. Ishqalanish metallning qolip yuzasi bo‘ylab harakatlanishiga qarshilik qiladi. Soddalashtirilgan Kulon ishqalanish modeli quyidagicha ifodalanadi:

$$\tau = \mu p$$

Bu yerda τ — urinma kontakt kuchlanishi, μ — ishqalanish koeffitsiyenti, p — normal kontakt bosimidir. Ishqalanish koeffitsiyentining ortishi material oqimining qiyinlashishiga olib kelishi mumkin. Natijada shtamplash kuchi oshadi va ayrim zonalarda deformatsiya konsentratsiyasi yuzaga keladi. Shu sababli ishlab chiqarishda moylash materiallarini to‘g‘ri tanlash muhim ahamiyatga ega. Sonli modellashtirishda hisoblash aniqligiga chekli elementlar to‘rining sifati katta ta’sir ko‘rsatadi. Deformatsiya kam bo‘lgan tekis zonalarda nisbatan yirik elementlardan foydalanish mumkin. Biroq qolip radiuslari, kontakt zonalari va deformatsiya keskin o‘zgaradigan joylarda maydaroq elementlardan foydalanish talab qilinadi. Juda yirik to‘r deformatsiyaning lokal xususiyatlarini yetarlicha aniq ko‘rsatmasligi mumkin. Juda mayda to‘r esa hisoblash vaqtini keskin oshiradi.

Shuning uchun muhandislik hisoblarida aniqlik va hisoblash resurslari o‘rtasida maqbul nisbatni tanlash zarur.

Sonli modellashtirish natijalari sovuq shtamplash jarayonida deformatsiyaning zagotovka bo‘ylab bir xil taqsimlanmasligini ko‘rsatadi. Deformatsiyaning yuqori qiymatlari, odatda, puanson va matritsaning radiusli qismlarida hamda material oqimi yo‘nalishi keskin o‘zgaradigan zonalarda yuzaga keladi. Puansonning harakati davomida metallning ayrim qismlari tortilish deformatsiyasiga, boshqa qismlari esa siqilish deformatsiyasiga uchraydi. Bu holat shtamplash jarayonining murakkab kuchlanish-deformatsiya holatida kechishini ko‘rsatadi. Puanson yurishi ortgan sari metallning plastik deformatsiyasi ham ortadi. Biroq deformatsiyaning haddan tashqari oshishi materialning deformatsion imkoniyatlarini kamaytirib, yorilish xavfini kuchaytirishi mumkin. Puanson yurishi shtamplash jarayonining asosiy texnologik parametrlaridan biridir. Puansonning kichik yurishida metall zagotovka nisbatan kam deformatsiyalanadi. Yurish miqdori oshgani sari metall matritsa bo‘shlig‘iga chuqurroq kirib boradi va deformatsiya darajasi ortadi. Shu bilan birga, puanson yurishining ortishi quyidagi holatlarga olib kelishi mumkin:

- shtamplash kuchining ortishi;
- plastik deformatsiyaning kuchayishi;

- ayrim zonalarda metallning yupqalashishi;
- kuchlanish konsentratsiyasining ortishi;
- yorilish xavfining kuchayishi;
- qolipga tushadigan yuklamaning ortishi.

Shuning uchun puanson yurishini faqat kerakli geometrik shaklni olish nuqtayi nazaridan emas, balki metallning deformatsion imkoniyatlari nuqtayi nazaridan ham tanlash kerak.

Ishqalanish sovuq shtamplash jarayonining muhim omillaridan biridir. Ishqalanish koeffitsiyenti yuqori bo‘lganda zagotovkaning qolip sirtlari bo‘ylab siljishi qiyinlashadi. Bu holatda metallning ayrim qismlarida deformatsiya to‘planishi mumkin.

Ishqalanishning ortishi:

- shtamplash kuchini oshirishi;
- material oqimini cheklashi;
- lokal deformatsiyani kuchaytirishi;
- qolipning yeyilishini tezlashtirishi;
- metall yuzasida texnologik izlar paydo bo‘lishiga sabab bo‘lishi mumkin.

Aksincha, tegishli moylash ishqalanishni kamaytirib, metall oqimini yaxshilashi va shtamplash kuchini pasaytirishi mumkin. Biroq ishqalanishning optimal qiymati konkret material va texnologik jarayonga bog‘liq bo‘ladi. Shtamplashda detalning ayrim qismlarida metall qalinligi kamayishi mumkin.

Yupqalashish darajasini quyidagi formula orqali aniqlash mumkin:

$$\eta = (t0 - t) / t0 \times 100\%$$

Bu yerda t0 — zagotovkaning boshlang‘ich qalinligi, t — deformatsiyadan keyingi qalinlik. Masalan, boshlang‘ich qalinlik 1 mm, deformatsiyadan keyingi qalinlik 0,8 mm bo‘lsa, yupqalashish darajasi:

$$\eta = (1 - 0{,}8) / 1 \times 100\% = 20\%$$

ni tashkil qiladi.

Yupqalashishning lokal darajada ortishi detalning mexanik mustahkamligini pasaytirishi va yorilish ehtimolini oshirishi mumkin.

Shuning uchun sonli modelda qalinlik xaritasini olish muhim hisoblanadi. Yorilish sovuq shtamplashda eng xavfli nuqsonlardan biridir. Yoriq ko‘pincha yuqori cho‘zuvchi kuchlanishlar mavjud bo‘lgan va metallning plastik deformatsiya qobiliyati chegaralangan zonalarda shakllanadi.

Yorilish ehtimolini baholashda quyidagi omillar hisobga olinadi:

- materialning plastikligi;
- maksimal plastik deformatsiya;
- asosiy cho‘zuvchi kuchlanish;
- metall qalinligi;
- qolip radiusi;
- ishqalanish;
- puanson yurishi;
- zagotovka geometriyasi.

Sonli modellashtirish yordamida ushbu parametrlarning o‘zgarishi natijasida yorilish xavfi yuqori bo‘lgan zonalarni oldindan aniqlash mumkin. Biroq real yorilish modelini yaratish uchun materialning tajribaviy sinov ma’lumotlari talab qilinadi. Burishish, asosan, metallning siquvchi kuchlanishlar ta’sirida barqarorligini yo‘qotishi natijasida yuzaga keladi. Ayniqsa yupqa list metallarda burishish xavfi yuqori bo‘ladi. Burishishga quyidagi parametrlar ta’sir ko‘rsatadi:

- list qalinligi;

- materialning elastiklik va mustahkamlik xususiyatlari;
- zagotovka o‘lchami;
- siquvchi moslama bosimi;
- ishqalanish;
- qolip geometriyasi;
- puanson harakatining tezligi.

Sonli modellashtirish orqali burishish boshlanadigan bosqich va uning geometrik shakli aniqlanishi mumkin. Shtamplash jarayoni yakunlangandan keyin tashqi yuklama olib tashlanadi. Metall tarkibidagi elastik deformatsiya qismining tiklanishi natijasida detalning geometrik shakli biroz o‘zgarishi mumkin. Bu hodisa elastik qaytish yoki springback deb ataladi. Elastik qaytish ayniqsa yuqori aniqlik talab qilinadigan mashinasozlik va avtomobilsozlik detallarida muhim ahamiyatga ega. Sonli modellashtirish yordamida shtamplashdan keyingi elastik qaytish oldindan baholanishi va qolip geometriyasiga tegishli tuzatishlar kiritilishi mumkin.

Sovuq shtamplash jarayonini sonli modellashtirish natijalari texnologik parametrlar o‘rtasida kuchli o‘zaro bog‘liqlik mavjudligini ko‘rsatadi. Puanson yurishi ortishi bilan metallning plastik deformatsiyasi oshadi. Bu detalning talab qilinadigan shaklini hosil qilish uchun zarur bo‘lsa-da, ortiqcha deformatsiya materialning yorilish chegarasiga yaqinlashishiga olib kelishi mumkin. Ishqalanish koeffitsiyenti ham jarayonning kuch va deformatsiya holatiga sezilarli ta’sir qiladi. Ishqalanishning ortishi materialning erkin oqimini cheklaydi. Natijada deformatsiya notekis taqsimlanishi va ayrim zonalarda kuchlanish konsentratsiyasi yuzaga kelishi mumkin. Qolip radiuslari ham alohida ahamiyatga ega. Juda kichik radius materialning keskin bukilishiga va lokal deformatsiyaning ortishiga sabab bo‘lishi mumkin. Yetarlicha asoslangan radius esa metall oqimini yumshatib, deformatsiyani nisbatan tekis taqsimlashga yordam beradi.

Sonli modellashtirishning asosiy afzalliklaridan biri — ishlab chiqarishdan oldin turli texnologik variantlarni virtual ravishda tekshirish imkoniyatidir. Masalan, muhandis quyidagi variantlarni real qolip tayyorlashdan oldin kompyuter modelida tekshirishi mumkin:

- turli qolip radiuslari;
- turli puanson yurishlari;
- turli ishqalanish koeffitsiyentlari;
- turli zagotovka qalinliklari;
- turli siquvchi kuchlar;
- turli materiallar.

Natijada ishlab chiqarishdagi tajriba sinovlari sonini kamaytirish mumkin. Shu bilan birga, sonli modellashtirish natijalarini mutlaq haqiqat sifatida qabul qilish mumkin emas. Modelning aniqligi kiritilgan material parametrlariga, kontakt modeliga, ishqalanish shartlariga, chekli elementlar to‘riga va chegaraviy shartlarga bog‘liq. Shuning uchun sanoat ishlab chiqarishida sonli hisoblashlarni tajriba natijalari bilan verifikatsiya qilish maqsadga muvofiq. Sovuq shtamplash jarayonini takomillashtirish uchun quyidagi tavsiyalarni berish mumkin.

Birinchidan, qolip radiuslarini materialning mexanik xususiyatlari va detal geometriyasiga mos ravishda tanlash kerak.

Ikkinchidan, puanson yurishini optimal qiymatda belgilash lozim. Haddan tashqari katta yurish deformatsiya va nuqsonlar xavfini oshirishi mumkin.

Uchinchidan, ishqalanishni kamaytirish uchun tegishli moylash texnologiyasidan foydalanish maqsadga muvofiq.

To‘rtinchidan, chekli elementlar to‘rini deformatsiya konsentratsiyasi yuqori bo‘lgan zonalarda zichlashtirish kerak.

Beshinchidan, detalning qalinlik taqsimoti alohida nazorat qilinishi lozim. Qalinlikning keskin kamayishi yorilishning dastlabki belgisi sifatida qaralishi mumkin.

Oltinchidan, burishish xavfini kamaytirish uchun siquvchi moslama bosimini va zagotovka o‘lchamini sonli parametrik tahlil orqali tanlash maqsadga muvofiq.

Yettinchidan, yuqori aniqlikdagi detallar uchun elastik qaytish jarayonini ham hisoblash modeliga kiritish kerak.

Sovuq shtamplashda metall detallarining deformatsiyasi va nuqsonlarini sonli modellashtirish zamonaviy mashinasozlik va texnologik jarayonlarni loyihalashning muhim vositalaridan biridir. Chekli elementlar usuli yordamida metall zagotovkaning elastik-plastik deformatsiyasi, kuchlanish-deformatsiya holati, kontakt bosimi, ishqalanish, qalinlik o‘zgarishi va texnologik nuqsonlarini tahlil qilish mumkin. Tadqiqot davomida puanson yurishi, ishqalanish koeffitsiyenti, qolip geometriyasi va material xususiyatlari shtamplash jarayonining asosiy determinantlari ekanligi ko‘rsatildi. Puanson yurishining ortishi odatda plastik deformatsiya va shtamplash kuchining oshishiga olib keladi. Ishqalanishning ortishi esa material oqimini cheklab, lokal deformatsiyalar va kuchlanish konsentratsiyasini kuchaytirishi mumkin. Yupqalashish, yorilish va burishish kabi nuqsonlarni sonli modellashtirish ishlab chiqarishdan oldin xavfli zonalarni aniqlash imkonini beradi. Bu esa qolip konstruksiyasini takomillashtirish, material sarfini kamaytirish va ishlab chiqarish sifatini oshirish uchun muhimdir. Sonli modellashtirishning yana bir muhim afzalligi turli texnologik parametrlarni virtual ravishda solishtirish imkoniyatidir. Natijada real tajribalar sonini kamaytirish va ishlab chiqarishga yangi texnologiyani joriy etish vaqtini qisqartirish mumkin. Shu bilan birga, sonli modelning ishonchliligi real material parametrlarining to‘g‘ri berilishiga bog‘liq. Shu sababli kelgusidagi tadqiqotlarda aniq metall markalari uchun tajribaviy kuchlanish-deformatsiya diagrammalaridan foydalanish, material anizotropiyasini hisobga olish, yorilish mezonlarini kalibrlash va olingan natijalarni tajriba bilan taqqoslash maqsadga muvofiq. Umuman olganda, sovuq shtamplash jarayonini sonli modellashtirish texnologik parametrlarni ilmiy asosda tanlash, nuqsonlarni kamaytirish va yuqori sifatli metall detallar ishlab chiqarish uchun samarali muhandislik vositasi hisoblanadi.

Tadqiqotning ilmiy-amaliy jihati sovuq shtamplash jarayonidagi deformatsiya va nuqsonlarni yagona sonli tahlil yondashuvi asosida ko‘rib chiqishdan iborat. Puanson yurishi, ishqalanish va qolip geometriyasining deformatsiyaga ta’sirini kompleks baholash orqali detalning xavfli zonalarini oldindan aniqlash imkoniyati asoslanadi. Tadqiqot natijalaridan mashinasozlik, avtomobilsozlik, elektrotexnika, asbobsozlik va list metallardan mahsulot ishlab chiqaruvchi boshqa texnik tarmoqlarda foydalanish mumkin. Sonli modellashtirish natijalarini real ishlab chiqarish tajribalari bilan birlashtirish orqali texnologik jarayonning aniqligi va iqtisodiy samaradorligini oshirish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Hosford W.F., Caddell R.M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press.
2. Altan T., Oh S., Gegel H. Metal Forming: Fundamentals and Applications. ASM International.
3. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth-Heinemann.
4. Wagoner R.H., Chenot J.L. Metal Forming Analysis. Cambridge University Press.
5. Banabic D. Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical