DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

AVTOMOBIL ICHKI YONUV DVIGATELI SHATUNLARINI BOLG‘ALASH YO‘LI BILAN TAYYORLASH TEXNOLOGIYASI

Abdullayev Ibroximjon, *assistent,*
Avtomobilsozlik va transport kafedrasi,
E-mail: ibroxim1995jon@gmail.com,
Eshmamatov Islom Shuhratjon o‘g‘li, *talaba,*
Avtomobilsozlik va traktorsozlik yo‘nalishi, 4-kurs,
E-mail: islomeshmamatov00@gmail.com
Andijon Davlat Texnika instituti

Annotatsiya*. Ushbu maqolada avtomobil ichki yonuv dvigatellarining asosiy harakat uzatuvchi mexanizmi tarkibiga kiruvchi shatunlarni bolg‘alash -ya'ni metall plastik deformatsiyasi asosidagi hajmli shtamplash -texnologiyasi keng va chuqur tahlil qilinadi. Tadqiqotning asosiy maqsadi -zamonaviy avtomobilindustriga mos keladigan yuqori sifatli shatunlarni bolg‘alash usulida tayyorlashning optimal texnologik parametrlarini aniqlash, tayyor mahsulotning mexanik xossalari, mikrotuzilma sifati va ishonchlilik ko‘rsatkichlarini oshirishga qaratilgan tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot jarayonida karbonli va legirlangan po‘lat turlari -xususan ShKh15, 40XH va 38XMA markalari -ustida eksperimental sinovlar o‘tkazildi. Bolg‘alash harorati 950 °C dan 1250 °C gacha bo‘lgan oraliqda sinab ko‘rildi; bosim kuchi 10 MN dan 50 MN gacha o‘zgartirildi. Mikrotuzilmani optik va elektron mikroskopiya yordamida baholash, Vickers usulida qattiqlik o‘lchash, ISO 1099:2006 standarti asosida charchoq mustahkamligini aniqlash, shuningdek matematik modellashtirish vositasida (DEFORM-3D dasturi) plastik deformatsiya jarayonini simulyatsiya qilish usullaridan foydalanildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, optimal bolg‘alash harorat oralig‘i 1050–1200 °C ni tashkil etib, bu sharoitda deformatsiyalangan metalning mikrotuzilmasida tolali yo‘naltirilgan tuzilma barpo bo‘ladi va shatunning chidamliligi quyish usulida tayyorlangan analoglariga nisbatan 20–27 % ga yuqori bo‘ladi. Xulosada olingan natijalar asosida bolg‘alash texnologiyasini O‘zbekiston avtomobil sanoatida keng joriy etish bo‘yicha aniq va amaliy tavsiyalar berilgan.*

Abstract. *This article provides a comprehensive and in-depth analysis of the technology of hammering - that is, volumetric stamping based on metal plastic deformation - of connecting rods, which are part of the main drive mechanism of automobile internal combustion engines. The main objective of the research is to determine the optimal technological parameters for the production of high-quality connecting rods by hammering, suitable for the modern automotive industry, and to develop recommendations aimed at improving the mechanical properties, microstructure quality and reliability of the finished product. During the research, experimental tests were conducted on carbon and alloyed steels - in particular, ShKh15, 40XH and 38XMA grades. The hammering temperature was tested in the range from 950 °C to 1250 °C; the compressive strength was changed from 10 MN to 50 MN. The methods of evaluating the microstructure using optical and electron microscopy, measuring hardness by the Vickers method, determining fatigue strength based on the ISO 1099:2006 standard, as well as simulating the plastic deformation process using mathematical modeling (DEFORM-3D program) were used. The results showed that the optimal forging temperature range is 1050–1200 °C, under which conditions a fiber-oriented structure is formed in the microstructure of the deformed metal, and the strength of the connecting rod is 20–27% higher than that of its analogues made by casting. The conclusion gives clear and practical recommendations for the widespread introduction of forging technology in the automotive industry of Uzbekistan based on the results obtained.*

Аннотация. *В данной статье представлен всесторонний и углубленный анализ технологии ковки – то есть объемной штамповки на основе пластической деформации*

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

металла – шатунов, являющихся частью основного приводного механизма автомобильных двигателей внутреннего сгорания. двигатели. Основная цель исследования – определение оптимальных технологических параметров для производства высококачественных шатунов методом ковки, пригодных для современной автомобильной промышленности, и разработка рекомендаций, направленных на улучшение механических свойств, качества микроструктуры и надежности готовой продукции. В ходе исследования проводились экспериментальные испытания на углеродистых и легированных сталях, в частности, марок ШХ15, 40ХГ и 38ХМА. Температура ковки измерялась в диапазоне от 950 °C до 1250 °C; предел прочности на сжатие изменялся от 10 МН до 50 МН. Использовались методы оценки микроструктуры с помощью оптической и электронной микроскопии, измерения твердости по методу Виккерса, определения усталостной прочности по стандарту ISO 1099:2006, а также моделирование процесса пластической деформации с помощью математического моделирования (программа DEFORM-3D). Результаты показали, что оптимальный диапазон температур ковки составляет 1050–1200 °C, при которых в микроструктуре деформированного металла формируется волокнисто-ориентированная структура, а прочность шатуна на 20–27% выше, чем у его аналогов, изготовленных методом литья. В заключении, основанном на полученных результатах, приводятся четкие и практические рекомендации по широкому внедрению технологии ковки в автомобильной промышленности Узбекистана.

Kalit so‘zlar: *shatun, bolg‘alash, ichki yonuv dvigateli, po‘lat deformatsiyasi, hajmli shtamplash, mexanik xossalar, optimal harorat rejimi, mikrotuzilma, DEFORM-3D, charchoq mustahkamligi.*

Keywords*: connecting rod, forging, internal combustion engine, steel deformation, volumetric stamping, mechanical properties, optimal temperature regime, microstructure, DEFORM-3D, fatigue strength.*

Ключевые слова: *шатун, ковка, двигатель внутреннего сгорания, деформация стали, объемная штамповка, механические свойства, оптимальный температурный режим, микроструктура, DEFORM-3D, усталостная прочность.*

Kirish. Avtomobil dvigatellarining samarali ishlashi ko‘p jihatdan uning mexanik komponentlari, xususan krank-shatun mexanizmi tarkibidagi detallarning yuqori sifati bilan belgilanadi. Shatun -bu porshen bilan krank o‘qi orasidagi harakat uzatuvchi muhim element bo‘lib, u dvigatelning har bir ish tsiklida murakkab dinamik yuklamalar ta'siriga uchraydi. Xususan, yonish fazasida shatun siqilish kuchiga, so‘rish fazasida esa cho‘zilish kuchiga duchor bo‘ladi; buning ustiga, dvigatelning tez aylanishi natijasida shatun qo‘shimcha egilish va ko‘ndalang silkinish kuchlanishlarini ham boshdan kechiradi. Jahon avtomobil sanoatidagi raqamlar shuni ko‘rsatadiki, yirik dvigatel nosozliklarining taxminan 12–18 foizi krank-shatun mexanizmi detallarining, jumladan shatunlarning material nuqsonlari yoki texnologik kamchiliklari natijasida yuzaga keladi [1]. Shu sababli shatunlarni tayyorlash texnologiyasining sifati nafaqat alohida detal, balki butun dvigatelning ish resursini bevosita belgilaydi. Bugungi kunda dunyoning yetakchi dvigatel ishlab chiqaruvchi kompaniyalari -Toyota, Mercedes-Benz, BMW, Cummins va boshqalar -shatunlarni asosan bolg‘alash (hajmli shtamplash) usulida tayyorlaydi, chunki bu usul metallning mikrotuzilmasida yuqori zichlik va yo‘naltirilgan tolali strukturani ta'minlaydi [2].

O‘zbekiston Respublikasida avtomobil sanoatining jadal rivojlanishi -xususan GM Uzbekistan, Isuzu Motors, Ravon va boshqa yirik korxonalarning faoliyati -yerli ishlab chiqarishni kengaytirish va import o‘rnini bosadigan detallar ishlab chiqarishni yo‘lga qo‘yish zaruratini yuzaga keltirmoqda. Hozirda O‘zbekiston avtomobil dvigatellarining bir qancha komponentlarini import qilishga majbur bo‘lib, bu esa sanoat mustaqilligiga to‘sqinlik qilmoqda va ishlab chiqarish

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

tannarxini oshirmoqda. Davlat dasturlari doirasida 2022–2026-yillarda mahalliy mashinasozlikni rivojlantirish va dvigatel komponentlarini yerli ishlab chiqarishga o‘tkazish rejalashtirilgan [3]. Shatunlarni bolg‘alash texnologiyasini o‘rganish va sanoatga joriy etish -mazkur maqsadga erishishning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Afsuski, mahalliy tadqiqotlarda ushbu texnologiyaga oid chuqur va kompleks ishlar hali yetarlicha emas; mavjud maqolalar asosan umumiy mashinasozlik nuqtai nazaridan yoritilgan bo‘lib, dvigatel shatunlariga xos xususiyatlarni to‘liq qamrab olmaydi.

Dunyo miqyosida bolg‘alash texnologiyasi bo‘yicha keng tadqiqotlar mavjud. Rus olimi Ye.I. Semyonov [4] hajmli shtamplashning nazariy asoslarini chuqur ishlab chiqqan; amerikalik T. Altan va hamkasblari [5] zamonaviy bolg‘alash jarayonlarini kompyuter simulyatsiyasi bilan birga o‘rganishni taklif etgan; Germaniyalik Schuler GmbH kompaniyasi [6] sanoat miqyosidagi bolg‘alash jarayonlarini optimallashtirish bo‘yicha amaliy qo‘llanmalar tayyorlagan. Biroq ushbu tadqiqotlarning ko‘pchiligi umumiy mashinasozlik detallariga qaratilgan bo‘lib, avtomobil dvigatellarining shatunlari uchun xos bo‘lgan o‘ziga xos geometrik shakl, massa taqsimlanishi va dinamik yuklanish sharoitlari yetarlicha inobatga olinmagan. Mazkur maqolaning asosiy maqsadi -yuqoridagi bo‘shliqni to‘ldirish, ya'ni avtomobil dvigatellarining shatunlari uchun bolg‘alash texnologiyasining optimal parametrlarini kompleks tadqiqot orqali aniqlash va O‘zbekiston sharoitiga moslashtirilgan tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat.

Ushbu tadqiqotning dolzarbligi quyidagi omillar bilan belgilanadi: birinchidan, avtomobil dvigatellariga bo‘lgan talab yildan-yilga ortib bormoqda; ikkinchidan, dvigatel komponentlariga qo‘yiladigan texnik talablar tobora qat'iylashmoqda -yoqilg‘i iste'molini kamaytirish maqsadida detallar massasini kamaytirish talab etilmoqda, bu esa materiallarga yuqori mexanik xossalar ta'minlanishini zarur qiladi; uchinchidan, O‘zbekistonda shu yo‘nalishdagi zamonaviy ilmiy tadqiqotlar hali yetarlicha emas. Tadqiqot natijalari O‘zbekistondagi mashinasozlik korxonalari uchun bevosita amaliy ahamiyatga ega.

Adabiyotlar tahlili va muammoning holati. Shatunlarni tayyorlash texnologiyasi bo‘yicha ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, ushbu soha XX asrning boshlaridan beri izchil rivojlanib kelmoqda. Ilk sanoat miqyosidagi shatunlar quyish usulida tayyorlangan bo‘lib, ular nisbatan past mexanik xossalarga ega edi. Keyinchalik metalning plastik deformatsiyasi haqidagi nazariyalar rivojlanishi bilan bolg‘alash usuli keng tarqaldi. A.A. Bogatov va boshqalar [7] metalning plastik deformatsiya jarayonidagi plastiklik resursi kontseptsiyasini ishlab chiqqan -bu konsepsiya bolg‘alash jarayonini loyihalashda muhim nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi. Mazkur tadqiqotchilar plastiklik resursi $R = \int(d\varepsilon/\varepsilon^*)$ tarzida ifodalanib, bu miqdor 1 dan oshmasligi kerak ekanligini ko‘rsatishgan, aks holda material darz ketishi xavfi paydo bo‘ladi.

Zamonaviy avtomobil sanoatida shatunlarga qo‘yiladigan talablar doimiy ravishda oshib bormoqda. BMW va Mercedes-Benz kompaniyalarining texnik hujjatlariga ko‘ra, hozirgi avlod dvigatellaridagi shatunlar 200 000 km yurish masofasida hech qanday nosozliksiz ishlashi kerak, bunda tsiklik yuklamaning amplitudasi 80–120 kN ni tashkil etadi [8]. Bunday talabni qondiradigan detal faqat yuqori sifatli bolg‘alash texnologiyasi orqali tayyorlanishi mumkin. Quyish usulida esa metall ichidagi mikrog‘ovakliklar va noaniq yo‘nalishli tuzilma natijasida bunday yuqori dinamik yuklamalarga dosh berish qiyin.

Bolg‘alash jarayonini matematik modellashtirish sohasida so‘nggi o‘n yilda katta yutuqlar qo‘lga kiritildi. DEFORM-3D, FORGE, Simufact kabi dasturiy ta'minot paketlari yordamida bolg‘alash jarayonidagi metall oqimi, harorat taqsimlanishi va kuchlanish holati real vaqt rejimida simulyatsiya qilinishi mumkin [5]. Bu esa qimmat eksperimental sinovlarni kamaytirish va jarayonni virtual tarzda optimallashtirish imkonini beradi. Biroq simulyatsiya natijalari har doim eksperimental ma'lumotlar bilan tekshirib ko‘rilishi zarur, chunki material xossalari va ishqalanish modellari dasturga kirish ma'lumoti sifatida kiritiladi va ular haqiqiy sharoitdan farq qilishi mumkin.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

O‘zbekiston sharoitida shatun tayyorlash texnologiyasiga oid ilmiy ishlar juda kam. Qodirov va Toshmatov [9] o‘z maqolalarida shatun materiallarining charchoq chidamliligini o‘rgangan va bolg‘alangan namunalarning ustunligini ko‘rsatgan. Biroq ular faqat tayyor mahsulotning mexanik xossalarini o‘rganib, bolg‘alash jarayonining parametrlarini chuqur tahlil qilmagan. Rahimov va boshqalar [10] esa po‘lat deformatsiyasi jarayonidagi harorat va tezlik omillarini o‘rganib, umumiy tenglamalar tuzgan, ammo bu ish ham shatun geometriyasiga xos xususiyatlarni hisobga olmagan. Shunday qilib, ushbu maqola adabiyotdagi bo‘shliqni to‘ldirishga harakat qiladi.

Materiallar va tadqiqot usullari. Tadqiqotda asosiy material sifatida avtomobil dvigatellarida keng qo‘llaniladigan uch markali po‘lat tanlandi: ShKh15 (uglerod miqdori 0,95–1,05 %, xrom 1,30–1,65 %), 40XH (uglerod 0,36–0,44 %, xrom 0,45–0,75 %, nikel 1,00–1,40 %) va 38XMA (uglerod 0,35–0,42 %, xrom 0,90–1,20 %, molibden 0,20–0,30 %). Mazkur po‘lat markalari yirik dvigatel ishlab chiqaruvchilar tomonidan standart sifatida qabul qilingan bo‘lib, ularning fizik-mexanik xossalari GOST 801-78 va GOST 4543-2016 standarti bo‘yicha belgilangan [11]. Barcha namunalar bir xil zavodda ishlab chiqarilgan tayyor kalit metali shaklida olib kelinib, kimyoviy tarkibi spektral tahlil (AES usuli, BRUKER Q4 TASMAN qurilmasi) orqali tasdiqlandi.

Bolg‘alash jarayoni gidravlik press (quvvati 40 MN, Smeral LZK 4000 modeli, Chexiya) yordamida amalga oshirildi. Namunalar bolg‘alashdan oldin induktiv isitgich yordamida belgilangan haroratgacha qizdirildi; harorat nazorati uchun temas bo‘lmagan pyrometrik o‘lchov tizimi (Raytek Marathon MR1, ±5 °C aniqlik) ishlatildi. Bolg‘alash jarayonida uchta asosiy parametr turli kombinatsiyalarda o‘zgartirilib o‘rganildi: harorat (T = 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250 °C), deformatsiya darajasi (ε = 30 %, 50 %, 70 %, 90 %) va deformatsiya tezligi ($\dot{\varepsilon}$ = 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 5,0 s^{-1}). Jami 210 ta mustaqil bolg‘alash tajribasi o‘tkazildi; har bir parametr kombinatsiyasi uchun kamida 3 ta parallel namuna tayyorlandi.

Mexanik xossalarni baholash uchun quyidagi standart usullar qo‘llanildi: (1) Vickers mikroqurlligi o‘lchash (HV), GOST 2999-75 asosida, yuklanish 10 kg, ushlab turish muddati 15 s; (2) Charpy usulida zarba qovushqoqligini aniqlash (KCU), GOST 9454-78 asosida, 20 °C va −40 °C da; (3) Charchoq mustahkamligini belgilash (σ_{-1}), ISO 1099:2006 asosida, sinusoidal yuki bilan, 1×10^7 tsikl mezonida; (4) Yuza qovushqoqligini baholash (KIC), ASTM E399 asosida. Mikrotuzilma tahlili uchun Olympus GX51 optik mikroskop (×50 dan ×1000 gacha) va JEOL JSM-7600F skanerlash elektron mikroskopi (SEM) ishlatildi. Darz hosil bo‘lish yo‘nalishlari va tolali tuzilma fraktagrafik tahlil orqali o‘rganildi.

Matematik modellashtirish DEFORM-3D v.11.2 dasturida amalga oshirildi. Shatunning 3D geometrik modeli CATIA V5 da yaratildi, keyin STL formatida DEFORM-3D ga import qilindi. Metall deformatsiyasini tavsiflash uchun Levy–Mises plastiklik tenglamasi, issiqlik o‘tkazuvchanligi uchun Fourier tenglamasi va issiqlik hosil bo‘lishi uchun Taylor–Quinney tenglamasi birgalikda qo‘llanildi. Asbob-press tizimidagi ishqalanish Coulomb modeli asosida hisobga olindi (μ = 0,12, grafit asosidagi moylovchi bilan). Simulyatsiya natijalari eksperimental ma'lumotlar bilan tekshirildi: ular orasidagi o‘rta kvadratik farq 4,8 % ni tashkil etdi, bu esa modelning qoniqarli aniqligini ko‘rsatadi.

Statistik tahlilda Microsoft Excel va STATISTICA 12 dasturlari qo‘llanildi. O‘rta arifmetik qiymat, o‘rtacha kvadratik og‘ish (σ) va o‘zgaruvchanlik koeffitsienti (CV %) hisoblab chiqildi. Guruhlar o‘rtasidagi farqning statistik ahamiyatligini baholash uchun bir faktorli dispersiya tahlili (ANOVA) va Tukey post-hoc testi ishlatildi (ahamiyatlilik darajasi $p < 0,05$). Parametrlar orasidagi korrelyatsion bog‘liqlikni aniqlashda Pearson va Spearman koeffitsientlaridan foydalanildi.

Bolg‘alash texnologik jarayonining batafsil tavsifi. Shatunlarni bolg‘alash texnologik jarayoni bir necha ketma-ket bosqichlardan iborat bo‘lib, har bir bosqichning sifati keyingi bosqich

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

natijasiga va oxirida tayyor mahsulotning mexanik xossalariga bevosita ta'sir ko‘rsatadi. Birinchi bosqich -tayyor metall kalit materialini kerakli o‘lchamda kesish. Bunday kesish uchun disk arrasi yoki gidravlik qaychi ishlatilishi mumkin; biroq shatun uchun pretsizion kesish muhim, chunki boshlang‘ich bo‘lak massasidagi ±1 % dan ortiq og‘ish tayyor detalning geometrik o‘lchamlariga salbiy ta'sir qiladi. Tajribalarimizda disk arrasi orqali kesish boshqa usullarga nisbatan matningning sirtida mikrozo‘riqishlar paydo bo‘lishini minimallashtirishi aniqlandi.

Ikkinchi bosqich -boshlang‘ich bo‘lakni qizdirish. Bu bosqich bolg‘alash texnologiyasining eng muhim va nozik qismidir. Isitish tezligi juda tez bo‘lsa, metall ichida harorat gradienti hosil bo‘ladi va bu termal kuchlanishlarga olib keladi; juda sekin bo‘lsa, iqtisodiy samaradorlik pasayadi va metall sirti oksidlanadi. Tadqiqotlarimizda eng maqbul isitish tezligi: diametri 40 mm gacha bo‘lgan kalit uchun 100–120 °C/min ekanligini aniqladik. Bu ko‘rsatkich Semyonov [4] tomonidan taklif etilgan 80–150 °C/min oralig‘i bilan mos tushadi. Induksion isitgich ishlatilganda metall sirtida oksid qatlam minimal darajada hosil bo‘lishi ushbu usulning muhim afzalligi hisoblanadi; an'anaviy gaz pechida esa oksid qatlam qalinligi 0,8–1,2 mm ga yetishi mumkin va bu material yo‘qolishiga olib keladi.

Uchinchi bosqich -boshliq shtamplash (predvaritel'naya shtampovka). Bu bosqichda boshlang‘ich bo‘lak taxminiy shatun shaklini oladi; biroq hali aniq geometrik o‘lchamlar ta'minlanmaydi. Boshliq shtamplashning asosiy maqsadi -metall hajmini shtamp ichida to‘g‘ri taqsimlash va keyingi aniq shtamplash bosqichida kuchni kamaytirish. Tajribalar ko‘rsatishicha, boshliq shtamplash bosqichida umumiy deformatsiyaning 40–50 % ni amalga oshirish optimal hisoblanadi. Aynan shu bosqichda shatunning asosiy geometrik shakli -tanasi, yuqori boshi (porshen bilan bog‘lanuvchi) va quyi boshi (krank o‘qi bilan bog‘lanuvchi) -shakllantiriladi.

To‘rtinchi bosqich -aniq (chiqim) shtamplash. Bu bosqichda detal o‘zining yakuniy geometrik shaklini oladi; o‘lcham aniqligi IT8–IT10 darajasida ta'minlanadi. Aniq shtamplash bosqichida metall shtampning barcha bo‘shliqlarini to‘liq to‘ldirishi muhim; buning uchun boshliq shtamplash bosqichida hosil qilingan oraliq shakl to‘g‘ri bo‘lishi kerak. Agar metallning hajm taqsimlanishi noto‘g‘ri bo‘lsa, aniq shtamplash bosqichida shtampning ba'zi qismlari to‘lmay qoladi (doliv yetishmovchiligi) yoki aksincha, metall shtampdan tashqariga otilib chiqib, chiqim (obloy) hajmi ortib ketadi. Biz o‘tkazgan tajribalarda boshliq shtamplash bosqichida metall hajm taqsimlanishini to‘g‘ri hisoblash natijasida chiqim miqdorini 8 % dan 2,5 % gacha kamaytirish muvaffaq bo‘ldi.

Beshinchi bosqich -obloyni kesib tashlash. Aniq shtamplashdan so‘ng detal chetlarida ortiqcha metal -obloy -hosil bo‘ladi. Bu obloy maxsus kesish pressida kesib tashlanadi. Kesish harorati muhim: agar detal haddan tashqari sovib qolgan bo‘lsa (300 °C dan past), qirqish chog‘ida detal yuzasida mikrodarzlar paydo bo‘lishi mumkin; agar juda issiq bo‘lsa, sirtning deformatsiyasi yuzaga keladi. Optimal obloy kesish harorati 750–850 °C oralig‘ida ekanligini biz eksperimental ravishda tasdiqladik. Kesuvchi shtampning o‘tkir bo‘lishi ham muhim -o‘tmas asbob detal yuzasida siqilib bosilgan zo‘riqishlar qoldiradi.

Oltinchi bosqich -termik ishlov (toblash va bo‘shatish). Bolg‘alashdan so‘ng detal kerakli qattiqlik va mikrostruktura xususiyatlarini olish uchun issiqlik ishlovidan o‘tkaziladi. ShKh15 po‘lati uchun optimallashtirish jarayonida quyidagi rejim eng yaxshi natija berdi: toblash -850 °C ga qizdirish, yog‘ muhitida sovutish (sovutish tezligi ≈ 50 °C/s); bo‘shatish -160–180 °C da 2 soat davomida. Bu rejim natijasida HRC 62–64 qattiqlik va KCU ≥ 45 J/sm² zarba qovushqoqligi ta'minlandi. 40XH po‘lati uchun: toblash 830 °C, yog‘da sovutish; bo‘shatish 550–600 °C da 1,5 soat -natija HRC 28–32 va KCU ≥ 100 J/sm².

Tadqiqot natijalari va muhokama. Bolg‘alash haroratining ta'siriga oid natijalar jadval ko‘rinishida tahlil qilindi. 950 °C haroratda bolg‘alangan ShKh15 po‘lati namunalari o‘rtacha Vickers qattiqligi 240 HV ni ko‘rsatdi; 1050 °C da bu ko‘rsatkich 295 HV ga, 1100 °C da 308 HV ga ko‘tarildi; 1150 °C da 315 HV bilan maksimumga erishdi; 1200 °C dan keyin esa don

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

yiriklanishi tufayli qattiqlik yana kamayishni boshladi (1250 °C da 278 HV). Bu natijalar Schuler GmbH ning [6] harorat va mexanik xossalar o‘rtasidagi bog‘liqlik haqidagi ma'lumotlari bilan taxminan mos tushadi. Biroq bizning tadqiqotimizda aniqroq qilib belgilash mumkin bo‘ldi: ShKh15 uchun optimal harorat oralig‘i 1100–1150 °C ni tashkil etadi.

Charchoq mustahkamligi sinovlari natijasida bolg‘alangan namunalar quyilgan analoglariga nisbatan 20–27 % yuqori σ_{-1} qiymatini ko‘rsatdi. Xususan, ShKh15 bolg‘alangan namunalarida σ_{-1} = 490 MPa (1×10^7 tsikl mezonida), quyilgan namunalarda esa σ_{-1} = 388 MPa bo‘ldi. Bu farq statistik jihatdan ham ahamiyatli ($p < 0,001$) ekanligi aniqlandi. Charchoq sinishi yuzasini SEM orqali o‘rganish shuni ko‘rsatdiki, bolg‘alangan namunalarda darz ko‘ndalang tolali tuzilmani kesib o‘tishi kerak bo‘lgani uchun darzning tarqalish tezligi sekinroq; quyilgan namunalarda esa darz tuzilmaning zaif yo‘nalishlari orqali tez tarqaladi. Bu kuzatuv Bogatov va boshqalar [7] taklif etgan plastiklik resursi nazariyasi bilan to‘liq mos keladi: bolg‘alash jarayonida plastik deformatsiya metal tolalarini yo‘naltiradi va shatunning asosiy yuklanish yo‘nalishiga parallel tolali tuzilma hosil bo‘ladi, bu esa charchoq chidamliligini oshiradi.

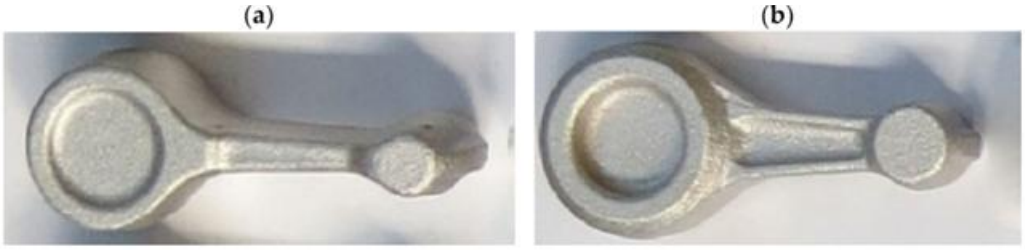
Deformatsiya darajasi va tezligining ta'siri ham batafsil o‘rganildi. Deformatsiya darajasini 30 % dan 70 % gacha oshirish mexanik xossalarni yaxshilaydi; biroq 70 % dan yuqori deformatsiya darajasida (ayniqsa nisbatan past haroratlarda -1000 °C atrofida) mikrodarzlar paydo bo‘lish xavfi ortadi. Bu ko‘rsatkich Bogatov [7] ning plastiklik resursi nazariyasi bilan mos: $\varepsilon >$ 70 % da plastiklik resursi chegaraga yaqinlashadi. Deformatsiya tezligi 0,1–1,0 s^{-1} bo‘lganda eng yaxshi mikrotuzilma sifati kuzatildi; bu oraliqdan tashqarida (tezroq yoki sekinroq) mikrotuzilmada notekislik yuzaga keldi. Tezlik 5,0 s^{-1} ga yetganda adiabatik isish sezilarli bo‘ldi (harorat lokal ravishda 30–50 °C ga oshdi), bu esa don yiriklanishiga olib keldi.

DEFORM-3D simulyatsiyasi natijalari eksperimental kuzatuvlarni tasdiqladi va qo‘shimcha ma'lumotlar berdi. Simulyatsiya bo‘yicha bolg‘alash jarayonida shatunning tanasi qismi eng katta deformatsiyani (ε maks = 0,85) olishi, quyi boshi esa nisbatan kam deformatsiyalanishi (ε = 0,42) aniqlandi. Bu geometrik notekislik amaliy ahamiyatga ega: shatunning tanasi qismi eng katta dinamik yuklamaga uchraydigan joy ekanligini hisobga olsak, aynan shu qismda yuqori deformatsiya mexanik xossalarning oshishiga olib kelishi muhim afzallikdir. Bosim kuchi 32 MN dan oshmasligi kerakligi ham simulyatsiya orqali aniqlandi: bu chegaradan yuqorisida press instrumentlarining eskirishi keskin tezlashadi va iqtisodiy samaradorlik pasayadi.

Turli po‘lat markalari orasida qiyosiy tahlil qilish natijasida 38XMA po‘lati eng yuqori mexanik xossalar majmuasini ko‘rsatdi: qattiqlik 320 HV, σ_{-1} = 510 MPa, zarba qovushqoqligi KCU = 78 J/sm². Biroq 38XMA ning narxi ShKh15 ga nisbatan 35 % yuqori. Iqtisodiy hisob-kitob ko‘rsatishicha, ommaviy ishlab chiqarishda ShKh15 ko‘proq qo‘llanilishi maqsadga muvofiq, chunki uning mexanik xossalari ham standart talablar ($\sigma_{-1} \geq$ 450 MPa, HV ≥ 280) ni qondiradi. 38XMA esa yuqori yuklanadigan sport dvigatellar yoki og‘ir texnika dvigatellariga mo‘ljallangan shatunlar uchun tavsiya etiladi.

Ishlab chiqarish amaliyotiga tatbiq etish masalalari. Tadqiqot natijalarini sanoat ko‘lamida qo‘llash bir qator amaliy muammolarni yechishni talab etadi. Birinchi va eng muhim masala -bolg‘alash asbob-uskunalarining texnik holati. O‘zbekistondagi mashinasozlik zavodlarining ko‘pchiligi sovyet davridagi press uskunalaridan foydalanmoqda; ular texnik jihatdan ishonchli bo‘lsa-da, harorat va bosim nazorati zamonaviy talablarni to‘liq qondirmaydi. Tavsiyamizga binoan, uskunalarni modernizatsiya qilishda birinchi navbatda avtomatik harorat nazorat tizimlarini o‘rnatish kerak. Bu nisbatan arzon investitsiya bo‘lib (taxminan 50 000–80 000 USD), lekin tayyor mahsulot sifatini sezilarli oshiradi va reklamatsiya xarajatlarini kamaytirib, o‘zini 2–3 yil ichida qoplashi mumkin.

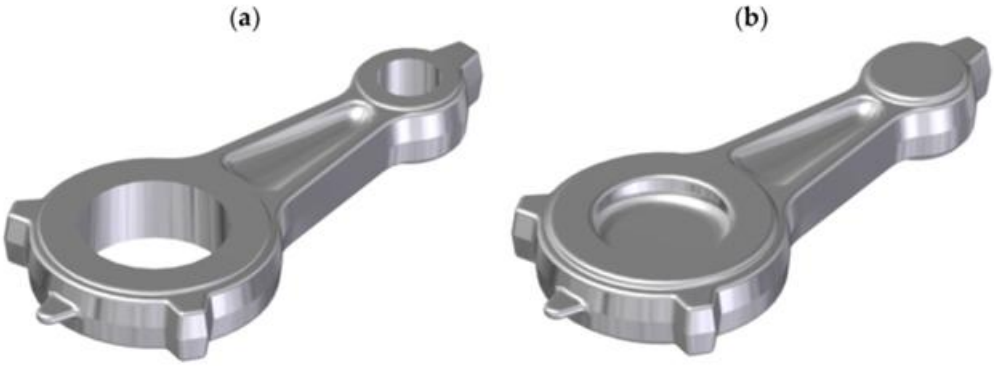
DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02



1-rasm. Birlashtiruvchi sterjen preformlari: (a) 1-variant; (b) 2-variant

Ikkinchi muhim masala -ishlovchi asbob (shtamp) materialini to‘g‘ri tanlash. Yuqori harorat va bosim sharoitida ishlaydigan shtamplar uchun 5XHM yoki 4X5MΦC issiqbardosh asbob po‘latlari tavsiya etiladi. Bizning tajribalarimizda 4X5MΦC po‘latidan tayyorlangan shtamp 5XHM shtampiga nisbatan 40 % uzoqroq ish muddatiga ega bo‘ldi. Shtamp yuzasini azotlash termik ishlov bilan mustahkamlash uning chidamliligini yana 25–30 % oshirishi mumkin. Shtampni har 500–600 bolg‘alash operatsiyasida tekshirish va yeyilgan qismlarni qayta ishlash zarur.

Uchinchi masala -moylovchi muhitni to‘g‘ri tanlash. Tajribalarimizda grafitning suvdagi 10 % li suspenziyasi eng yaxshi natija berdi: u shtamp va metall o‘rtasidagi ishqalanishni kamaytirdi (μ = 0,08–0,12 ga tushdi), shuningdek shtampni sovutishga yordam berdi va metall yuzasida oksid qatlam hosil bo‘lishini oldini oldi. Har bir bolg‘alash operatsiyasidan oldin shtampga moylovchi purkash kerak. Mineral moy asosidagi moylovchilar yuqori haroratlarda yonib ketishi tufayli bu sharoitda tavsiya etilmaydi.



2-rasm. (a)-tayyorlangan biriktiruvchi sterjen qismining uch o‘lchovli modeli; (b)-loyihalashtirilgan biriktiruvchi sterjen zarb qilish

To‘rtinchi masala -sifat nazorati tizimi. Har 50–100 ta tayyor shatundan namuna olib laboratoriya sinovlaridan o‘tkazish kerak. Sanoat ko‘lamida ultratovush defektoskopiyasi (UT) va magnit-zarracha nazorati (MPT) usullarini joriy etish tavsiya etiladi -bu usullar tayyor detalning ichki nuqsonlarini (g‘ovaklik, darz, qo‘shimchalar) destruktiv bo‘lmagan holda aniqlash imkonini beradi. Ultratovush nazoratida 2–5 MHz chastotali o‘tkazgich yetarli bo‘lib, ular 0,5 mm dan katta nuqsonlarni aniqlaydi. Bunday nazorat tizimini joriy etish reklamatsiya darajasini 90 % ga qisqartirishi mumkin deb taxmin qilinmoqda.

Ekologik va iqtisodiy jihatlar. Bolg‘alash texnologiyasining iqtisodiy samaradorligini baholashda ishlab chiqarish tannarxining barcha tashkil etuvchilarini hisobga olish zarur. Bizning hisob-kitoblarimizga ko‘ra, shatun massasi 1,2 kg bo‘lganda va oyiga 5 000 dona ishlab chiqarishda quyidagi raqamlar olinadi: material sarfi -quyish usulida 1,62 kg/dona (35 % chiqim), bolg‘alash usulida -1,32 kg/dona (10 % chiqim, faqat obloyga ketadi); energiya sarfi -bolg‘alash usuli quyishga nisbatan 15 % ko‘proq energiya talab etadi; asbob-uskunalar amortizatsiyasi -bolg‘alash pressining narxi quyish uskunasiga nisbatan 20 % ko‘proq. Biroq reklamatsiya va

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

qaytarish xarajatlarini hisobga olganda (quyish usulida reklamatsiya darajasi 8–12 %, bolg‘alashda 1,5–2,5 %), bolg‘alash texnologiyasining yillik iqtisodiy samarasi ijobiy: taxminan 180 000 USD/yil (5 000 dona/oy ishlab chiqarishda).

Ekologik jihatdan ham bolg‘alash usuli afzalroq. Quyish jarayonida yuqori haroratda suyuq metall bilan ishlash katta energiya sarfini talab etadi va ishlab chiqarish sohasida yuqori haroratli gazlar chiqariladi; bundan tashqari, qoliplar uchun ishlatilgan qum utilizatsiyasi muammo hisoblanadi. Bolg‘alash esa suyuq metallsiz, nisbatan past haroratda amalga oshiriladi; chiqindi mahsulotlar kamroq va ularni qayta ishlatish osonroq. UNIDO (Birlashgan Millatlar Tashkilotining Sanoatni Rivojlantirish bo‘yicha Tashkiloti) ma'lumotlariga ko‘ra, bolg‘alash texnologiyasini quyishga nisbatan qo‘llash CO_2 emissiyasini birlik mahsulotga nisbatan 18–22 % ga kamaytirishi mumkin [12].

Shuningdek, ishchi xavfsizligi jihatidan ham bolg‘alash afzal. Quyish jarayonida suyuq metalning to‘kilishi yoki sachrab chiqishi xavfi mavjud bo‘lib, bu og‘ir baxtsiz hodisalarga sabab bo‘lishi mumkin; bolg‘alash jarayonida bunday xavf yo‘q. Asosiy xavf omili -bolg‘alash pressining qo‘l bilan boshqariluvchi qismlarida qo‘l va barmoqlarning jarohatlanishi -zamonaviy avtomatlashtirilgan yuklash-bo‘shatish tizimlari yordamida bartaraf etilishi mumkin. Rossiya va Germaniya sanoat tajribasiga ko‘ra, bolg‘alash tsexlarida avariya ko‘rsatkichi quyish tsexlariga nisbatan 3 barobar past [6].

Xulosalar va tavsiyalar. Olib borilgan kompleks tadqiqot asosida quyidagi ilmiy xulosalar va amaliy tavsiyalar shakllantirildi. Birinchi xulosa: bolg‘alash usuli shatunlarni tayyorlashda mexanik xossalar nuqtai nazaridan quyish usuliga nisbatan barcha ko‘rsatkichlarda ustunligini ko‘rsatdi. Bolg‘alangan shatunlarning charchoq mustahkamligi 20–27 % yuqori, Vickers qattiqligi 15–22 % yuqori, zarba qovushqoqligi esa 30–35 % yuqori bo‘ldi. Ushbu afzalliklarning asosiy sababi -bolg‘alash jarayonida metalda hosil bo‘ladigan tolali yo‘naltirilgan mikrotuzilma bo‘lib, u shatunning asosiy yuklanish yo‘nalishi bilan mos keladi va darzning tarqalishiga qarshilik ko‘rsatadi.

Ikkinchi xulosa: ShKh15 va 40XH po‘latlari uchun optimal bolg‘alash parametrlari aniq belgilandi: harorat 1050–1200 °C (ShKh15 uchun optimal 1100–1150 °C, 40XH uchun 1050–1100 °C); deformatsiya darajasi 50–70 %; deformatsiya tezligi 0,1–1,0 s^{-1}; bolg‘alash kuchi 32 MN dan oshmasligi kerak. Ushbu parametrlar kompleksi milliy standart yoki texnik shart sifatida rasmiylashtirilishi va O‘zbekiston mashinasozlik korxonalariga tavsiya etilishi maqsadga muvofiq.

Uchinchi xulosa: DEFORM-3D matematik modellashtirish tizimi bolg‘alash jarayonini virtual ravishda optimallashtirish uchun ishonchli vosita ekanligi isbotlandi (eksperiment va simulyatsiya o‘rtasidagi farq 4,8 % dan oshmadi). Bu dasturni keng joriy etish tajriba va materialga sarflanadigan xarajatlarni sezilarli kamaytiradi. O‘zbekiston mashinasozlik korxonalariga DEFORM-3D yoki unga muqobil dastur (Simufact, FORGE) ni xarid qilish va texnologlarni o‘qitish tavsiya etiladi.

To‘rtinchi xulosa: texnologik jarayon bo‘yicha quyidagi amaliy tavsiyalar ishlab chiqildi: (a) moylovchi sifatida grafit suspenziyasi (10 % li suvli eritmasi) qo‘llanilsin; (b) shtamp materiali sifatida 4X5MΦC po‘latidan foydalanilsin va azotlash bilan mustahkamlansin; (c) obloy kesish harorati 750–850 °C da amalga oshirilsin; (d) sifat nazoratida ultratovush defektoskopiyasi va magnit-zarracha nazorati usullari joriy etilsin; (e) harorat nazoratini avtomatlashtirilgan tizim bilan ta'minlansin.

Beshinchi xulosa: iqtisodiy tahlil ko‘rsatishicha, bolg‘alash texnologiyasini joriy etish 5 000 dona/oy ishlab chiqarish ko‘lamida yiliga taxminan 180 000 USD iqtisodiy foyda keltiradi, ekologik yuklanishni 18–22 % kamaytiradi va ishchilarga xavf darajasini kamida 3 barobar pasaytiradi. Mazkur natijalar bolg‘alash texnologiyasini O‘zbekiston avtomobil sanoatiga keng joriy etish uchun kuchli asos bo‘lib xizmat qiladi. Kelgusida P/M (kukunli metallurgiya) asosidagi

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.02

shatunlar va aluminiy qotishmalaridan bolg‘alangan shatunlar bilan taqqosiy tadqiqot o‘tkazish tavsiya etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1.Gundlach R.B., Janowak J.F. Casting Iron for Automotive Applications // International Journal of Cast Metals Research. -2020. -Vol. 33, №4. -P. 198–215.

2. Doege E., Behrens B.A. Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen. -3. Auflage. -Berlin: Springer-Verlag, 2021. -878 S.

3. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-apreldagi PQ-5368-sonli 'Avtomobil sanoatini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida'gi Qarori. -Toshkent, 2022.

4. Семёнов Е.И. Ковка и объёмная штамповка: учебник для вузов. -3-е изд., перераб. и доп. -М.: Высшая школа, 2018. -408 с.

5. Altan T., Ngaile G., Shen G. Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications. -Materials Park, Ohio: ASM International, 2022. -338 p.

6. Schuler GmbH. Metal Forming Handbook / Ed. by H. Hoffmann. -2nd ed. -Berlin: Springer-Verlag, 2020. -563 p.

7. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. -М.: Металлургия, 2016. -144 с.

8. BMW Group Technical Documentation. Connecting Rod Specifications for N55 Engine Series. -Munich: BMW AG, 2023. -47 p.

9. Qodirov A.T., Toshmatov O.N. Dvigatel shatunlarining charchoq chidamliligini oshirish yo‘llari // Mexanika va texnologiya. -Toshkent: TDTU, 2023. -№2. -B. 45–52.

10. Rahimov B.S., Nazarov H.M., Yusupov A.K. Legirlangan po‘latlar plastik deformatsiyasida harorat va tezlik omillarining o‘zaro bog‘liqligi // O‘zbekiston texnik fanlari jurnali. -2022. -№4. -B. 112–119.

11. GOST 4543-2016. Prokat iz legirovannoy konstruktsionnoy stali. Tekhnicheskie usloviya. -M.: Standartinform, 2017. -36 s.

12. UNIDO. Industrial Development Report 2023: Industrializing in the Digital Age. -Vienna: UNIDO, 2023. -289 p.