

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.73.019

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-2(24)-9-16

Олег Марков, Антон Мусорін, Антон Хващинський,
Володимир Панов, Роман Житніков, Антон Лисенко

СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК

Аналіз наукових публікацій дозволив виявити, що проблема підвищення якості великих кованок відповідального призначення нині не вирішена повністю. Наявні технологічні процеси кування великих заготовок полягають у деформуванні злитків плоскими або комбінованими бойками. Такі способи деформування не завжди гарантують проробку литої структури заготовки. Моделювання дало змогу встановити, що профілювання випуклими радіусними бойками призводить до зміни розподілу деформацій та напружень у тілі заготовки. У результаті підвищується рівномірність розподілу деформацій, а також увігнуті грані підвищують рівень стискаючих напружень у центральних та периферійних шарах заготовки.

Ключові слова: кування; профілювання; великі кованки; розподіл деформацій; гідростатичні напруження; випуклі бойки; проробка структури.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Одним із перспективних напрямків поліпшення властивостей конструкційних матеріалів є виготовлення стабільної дрібнозернистої структури при виробництві металопродукції високої якості. У литому стані промислові сплави складаються із зерен розміром понад 100 мкм. Традиційні методи обробки, такі як холодна деформація з подальшим рекристалізаційним відпалом, термічна обробка, заснована на фазових перетвореннях, і термомеханічна обробка дозволяють подрібнити мікроструктуру до розміру зерен близько 1–10 мкм [1; 2]. Досягнення значних ступенів деформації дає можливість здійснити подрібнення зерен полікристалічного матеріалу на кристали меншого розміру, що своєю чергою уможливило подрібнення зерен металевих матеріалів аж до нанорозмірів. Метод інтенсивної пластичної деформації (ІПД) полягає в обтисненні з більшими ступенями деформації та високих прикладених тисків при температурах, нижче за температуру рекристалізації [3; 4]. Разом зі зміною зеренної структури та зменшенням розмірів зерна в металевих матеріалах відбувається збільшення об'ємної частки їхніх границь. Ці структурні зміни при зменшенні розмірів зерен до 1000 Нм сприяють істотному поліпшенню таких механічних властивостей, як межа текучості, межа міцності, ударна в'язкість, твердість. Актуальним є виготовлення та збереження дрібнозернистої структури в «об'ємних» заготовках, придатних для виробництва металопродукції високої якості.

Постановка проблеми. Актуальною науково-практичною проблемою в процесах деформування великих заготовок є використання операції профілювання заготовки перед подальшою її обробкою тиском. Це дозволить змінити напружено-деформований стан металу заготовки, що, у свою чергу, підвищить рівномірність проробки внутрішньої структури та дасть змогу запобігти появі тріщин. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести дослідження напружено-деформованого стану нового способу профілювання циліндричної заготовки випуклими радіусними бойками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи кування, прокатки й плющення, як найбільш продуктивні методи обробки тиском, є підходящими для виробництва великогабаритних суб-, мікроструктурованих заготовок. Прокатка дає можливість виготовлення великорозмірних заготовок: слябів, блюмів, листів і широких смуг, на існуючих

прокатних станах. Можливість виробництва великорозмірних заготовок із ультрадрібнозернистою структурою на стандартному устаткуванні в промислових обсягах є ключовою перевагою методу кування і прокатки перед іншими методами обробки тиском, використовуваними для створення наноструктурованої металопродукції високої якості [5].

Водночас широкомасштабне впровадження методів деформаційного структурування металів і сплавів, і зокрема вуглецевих металів, стримується певними факторами, серед яких найбільш істотним є несумісність швидкісних і деформаційних режимів технологічних процесів. Зважаючи на це, однією з актуальних проблем, що вирішуються у наш час, є створення таких методів деформаційного структурування металів і сплавів, які за своїми технологічними параметрами і продуктивністю можна було б адаптувати до діючого промислового виробництва [6].

Високі темпи розвитку виробництва металопродукції високої якості вимагають розробки нових і вдосконалення наявних способів виготовлення заготовок за рахунок застосування схем деформування з ІПД. Удосконалення їхнього виробництва на промислових підприємствах з метою підвищення якості, точності й продуктивності кування пов'язане з вирішенням багатьох технологічних і організаційних задач [7; 8]. Велике значення в цьому процесі здобуває створення методик дослідження розподілу деформації, що відіграють основну роль у керованому впливі на суб- і мікроструктуру металу при пластичному деформуванні [9]. Сучасний розвиток ковальського виробництва спрямовано на вдосконалення існуючих технологічних процесів кування й розробку нових, які забезпечують виготовлення не тільки необхідної форми кованок, але й прогнозованих її механічних властивостей [10].

У світовій практиці забезпечення заданого рівня механічних властивостей прийнято оцінювати коефіцієнтом укову, що гарантує пророблення металу за перерізом [11].

Нині розроблено безліч варіантів кування, що відрізняються послідовністю операцій, ступенем деформації, застосуванням різного виду інструменту й різних режимів термічної обробки [12–16].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Зменшити величину застійних зон можна за рахунок застосування додаткових технологічних прийомів: регулювання пластичних потоків, зміна співвідношення і конфігурації площ вільних і контактних поверхонь заготовки, що впливають на опір витисненню металу в зони вільного витікання. Так застосування трипроменевого злитка дозволило виключити брак валків холодної прокатки, збільшити (до 40 %) місцеві деформації в осьовій зоні кування при укові $U = 1,5$. Однак злитки із трипроменевою формою поперечного перерізу з малими уковами ($U \approx 2,0$) можуть призводити до нерівномірного розподілу ступеня деформації за перерізом кованок. Впровадження трипроменевих злитків ускладнено у зв'язку з необхідністю виготовлення виливниць спеціальної форми, що пов'язане з додатковими витратами й трудомісткістю. Ефективним у цьому напрямі є використання операції профілювання заготовок, що можливо забезпечити за рахунок деформування радіусними випуклими бойками. Високу рівномірність розподілу деформацій при наступному деформуванні й виготовленні симетричного поперечного перерізу забезпечує чотирипроменева заготовка. Для більше рівномірного розподілу деформацій і виготовлення чотирипроменевої заготовки правильної форми доцільно протягування здійснювати випуклими бойками.

Метою статті є пошук раціональної геометрії випуклих радіусних бойків для профілювання циліндричних заготовок перед подальшим їх деформуванням на основі моделювання методом скінчених елементів напружено-деформованого стану заготовки. Діапазон варіювання радіусів випуклих бойків $R/R_{заг} = 0,5; 1,0; 1,5$.

Виклад основного матеріалу. Матеріал заготовки – сталь 34ХНМ; щільність при кімнатній температурі – 7840 кг / м^3 ; модуль Юнга – $2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коефіцієнт Пуассона – 0,3. Ступінь деформації варіювалася від 0 до 0,2, швидкість деформації в діапазоні $(2 \dots 10) \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, що охоплює деформаційний і швидкісний режим процесів деформування.

Відомі з літератури теоретичні й експериментальні дослідження дозволили встановити, що при деформуванні виникає висока нерівномірність розподілу деформацій, деформування характеризується високими енергосиловими параметрами деформування. При деформуванні необхідно забезпечити рівномірний розподіл деформацій високого рівня за перерізом заготовки за рахунок удосконалення процесу протягування на основі застосування бойків спеціальної форми та спеціальних режимів деформування.

Аналіз літератури показав, що найбільш ефективним інструментом для підвищеного пророблення структури є застосування випуклих бойків для попереднього профілювання циліндричної заготовки перед остаточним куванням вирізними або плоскими бойками. На першому етапі досліджувався вплив випуклих радіусних бойків на НДС заготовки. Початкова температура заготовки – 1200° С , температура інструменту – 50° С . Тертя між заготовкою й інструментом, за Левановим, приймалося 0,7 (у перерахунку на Зібеля – 0,35). Схема процесу профілювання циліндричної заготовки випуклими радіусними бойками представлена на рис. 1.

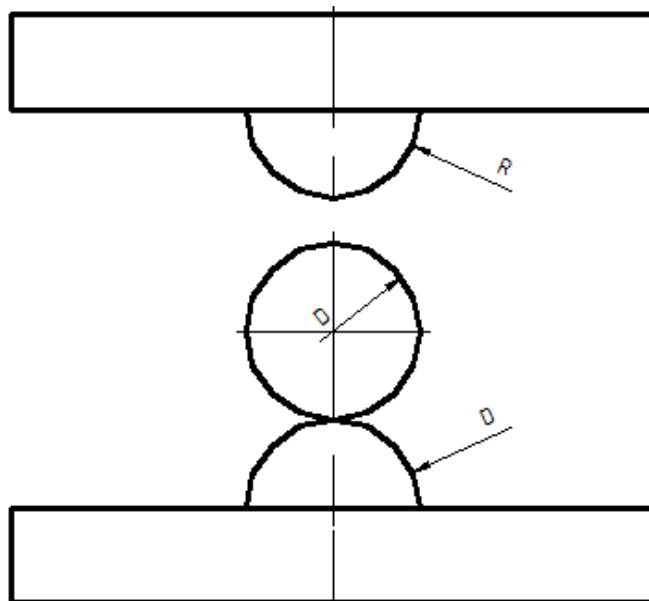
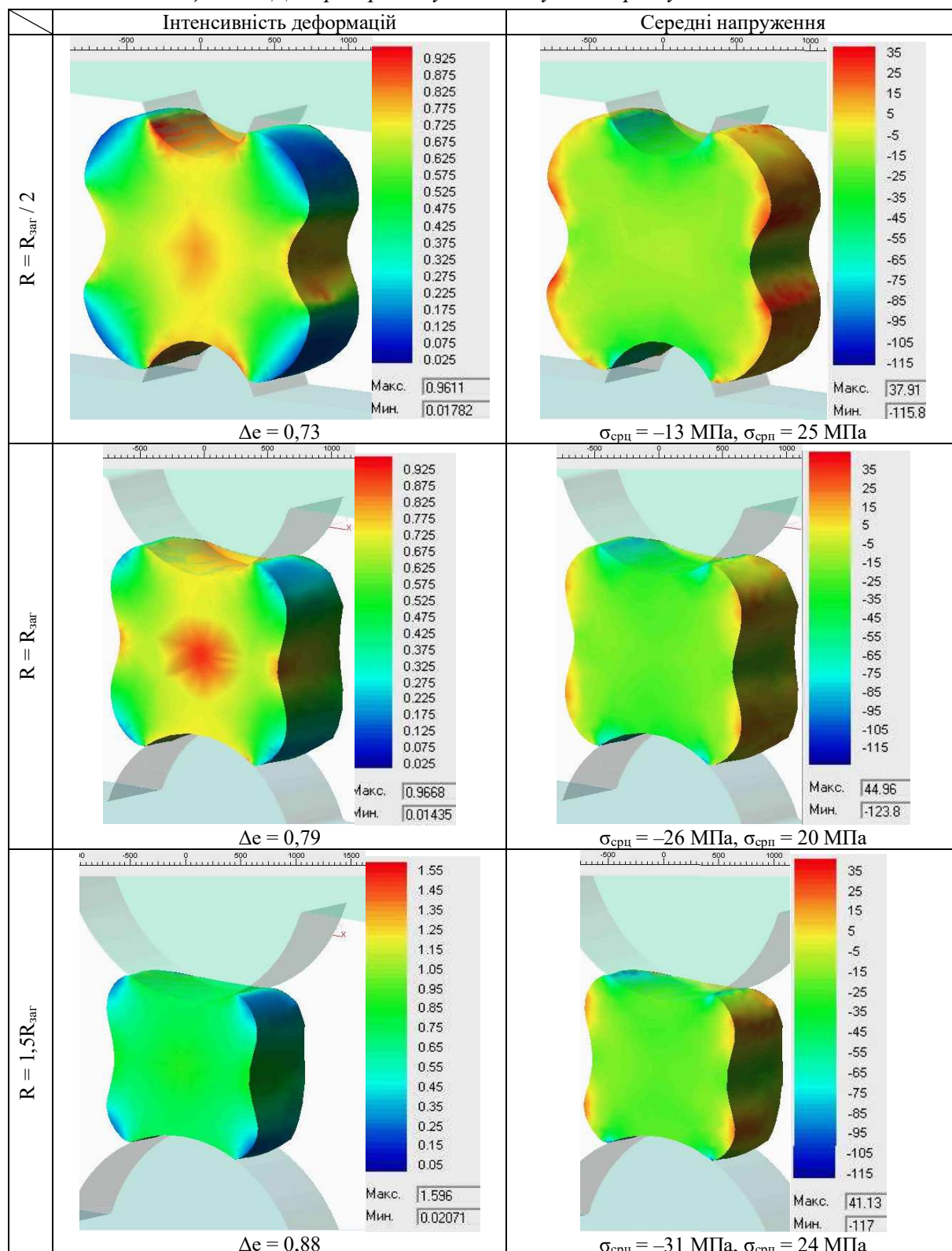


Рис. 1. Схема процесу обтиснення циліндричної заготовки випуклими радіусними бойками

Для дослідження впливу співвідношення розмірів інструмента на НДС металу заготовки прийняті три варіанти випуклих радіусних бойків: 1 – радіус дорівнює половині радіуса заготовки ($R = R_{\text{заг}} / 2 = 500 \text{ мм}$); 2 – радіус дорівнює радіусу заготовки ($R = R_{\text{заг}} = 1000 \text{ мм}$); 3 – радіус більше радіуса заготовки ($R = 1,5R_{\text{заг}} = 1500 \text{ мм}$).

Обтиснення випуклими бойками з радіусом $R = R_{\text{заг}} / 2$. При деформуванні заготовки за такою схемою з кантуванням на 90° відбувається локалізація максимальних деформацій під радіусними крайками випуклих бойків. Це призводить до зменшення зон ускладненої деформації під деформуючим інструментом. При цьому після обтискання з чотирьох сторін деформації виникають і в середній (осьовій) зоні поковки. Застігненими зонами залишаються ділянки, які не деформуються та знаходяться по кутах чотирипроменевої заготовки. Нерівномірність логарифмічних деформацій становила $\Delta \epsilon = 0,73$.

Таблиця 1 – НДС при протягуванні випуклими радіусними бойками



Такий рівень нерівномірності розподілу деформацій вважається прийнятним. Середні напруження в осевій зоні заготовки – стискаючі ($\sigma_{срц} = -13$ МПа), на поверхні середні напруження розтягу ($\sigma_{срп} = 25$ МПа) (табл. 1, перший рядок). Однак рівень цих розтягуючих напружень не призведе до утворення тріщин. Загалом більша частина об'єму

заготовки перебуває у стані нерівномірного всебічного стискання. Це підтверджує гіпотезу про те, що формування увігнутих граней у циліндричній заготовці сприяє появі підпору з боку зовнішній увігнутій поверхні при деформуванні.

Обтиснення випуклими бойками з радіусом $R = R_{\text{заг}}$. При профілюванні заготовки інструментом зі збільшеним радіусом нерівномірність деформації становила $\Delta\epsilon = 0,79$ (табл. 1, другий рядок); напруження в осьовій зоні заготовки – стискаючі ($\sigma_{\text{срп}} = -26$ МПа), на поверхні – розтягу ($\sigma_{\text{срп}} = 20$ МПа). Отримані результати якісно схожі на попередні. Також деформації виникають під випуклими бойками, а непродетформованими залишаються кути чотирипроменевої заготовки. Проте збільшення радіуса випуклості бойків призводить до накопиченні максимальних деформацій у центральній (осьовій) зоні більшої величини (близько 1,0).

Відповідно до отриманих результатів, осьова частина заготовки перебуває в більш жорсткій схемі напруженого стану, ніж при використанні випуклих бойків із радіусом $R = R_{\text{заг}} / 2$ при однаковій нерівномірності розподілу деформації (табл. 1, перший рядок). Крім того, розподіл напружень більш рівномірний та в тілі заготовки виникають переважно середні напруження зі знаком мінус. Це свідчить про появу нерівномірного всебічного стискання при формуванні чотирипроменевої заготовки. Стрімко зменшилась за розмірами зона з розтягуючими напруженнями.

Обтиснення випуклими бойками з радіусом $R = 1,5R_{\text{заг}}$. Для цієї схеми формування чотирипроменевої заготовки (табл. 1, третій рядок) нерівномірність розподілу деформацій становить $\Delta\epsilon = 0,88$; середні напруження в осьовій зоні заготовки стискаючі ($\sigma_{\text{срп}} = -31$ МПа); середні напруження розтягу на поверхні ($\sigma_{\text{срп}} = 24$ МПа). У цьому разі деформації розподіляються рівномірно за перерізом заготовки. Це ж стосується і напруженого стану, а саме, стискаючі напруження рівномірні в тілі заготовки. Напруження розтягу діють тільки у кутах чотирипроменевої заготовки.

Висновки. 1. Профілювання випуклими радіусними бойками змінює напружено-деформований стан заготовки у порівнянні з деформуванням плоскими бойками. У результаті такої схеми деформування зменшуються зони ускладненої деформації. Що підвищує рівномірність їх розподілу за перерізом. При малих радіусах округлення випуклих бойків максимальні деформації виникають у центральній (осьовій) зоні. Збільшені радіуси скруглення бойків призводять до підвищення рівномірності розподілу деформацій за перерізом. Деформації накопичуються високого рівня з рівномірним їх розподілом.

2. Досліджувана схема деформування забезпечує при профілюванні появу стискаючих гідростатичних напружень. Ці напруження також розподіляються рівномірно. Це пояснюється підпором увігнутих граней, які стримують плин металу в поперечному напрямку, а також підвищують гідростатику такої схеми деформування. Частка розтягуючих напружень дуже мала та величина цих напружень занизька для утворення тріщин та розривів.

3. Ефективною геометрією є радіуси випуклих бойків у діапазоні 1,0...1,5 від радіуса циліндричної заготовки.

Список використаних джерел

1. Глезер А. М. Основные направления использования нанотехнологий в металлургии. *Металлург.* 2010. № 1. С. 5-7.
2. Быков Ю. А., Карпухин С. Д. Способы получения конструкционных наноматериалов. Часть 1. *Наноинженерия.* 2012. № 6. С. 11-19.
3. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И., Павлик Д. А., Малышев В. Ф. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск : Наука и техника, 1994. 232 с.
4. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Москва : Логос, 2003. 87 с.

5. Колесников А. Г., Шинкарев А. С. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов. *Наука и Образование*. 2014. № 11. С. 34-44.
6. Полякова М. А., Гулин А. Е., Никитенко О. А. Влияние технологических параметров совмещенного процесса на механические свойства и структуру углеродистой проволоки. *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. № 3(33). С. 20-25.
7. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В. А. Тюрин. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2007. № 11. С. 15–20.
8. Миленин А. А., Афанасьев В. А., Николаенко А. С. Автоматизированная система проектирования технологии свободнойковки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні* : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2008. С. 49–54.
9. Тюрин В. А. Методики Московского института стали и сплавов для разработки и исследования инновационных технологийковки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005. № 10. С. 32–35.
10. Чухлеб В. Л., Ключев Д. Ю., Прокопенко И. С., Ашкелянец А. В. Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА, 2011. № 1 (26). С. 103–106.
11. Дурынин В. А., Солнцев Ю. П. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2006. 272 с.
12. Development of forging process design to close internal voids / H. Kakimoto, T. Arikava, Y. Takahashi, T. Tanaka, Y. Imaida. *J. Mater. Process Technol.* 2010. № 210. С. 415–422.
13. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2006. № 5. С. 27–29.
14. Онищенко А. К., Мишулин А. А. Аналитическое исследованиековки крупных поковок с учетом температурной неоднородности материала. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2006. № 10. С. 14–19.
15. Polozine A., Schaeffer L. Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank. *J. Mater. Process Technol.* 2008. № 195. С. 260–266.
16. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites / Ma Feng-cang, Lu Wei-jie, Qin Ji-ning, Zhang Di, Ji Bo. *Mater. and Des.* 2007. № 28. С. 1339–1342.

References

1. Glezer, A. M. (2010). Osnovnye napravleniia ispolzovaniia nanotekhnologii v metallurgii [The main directions of the use of nanotechnology in metallurgy]. *Metallurg – Metallurgist*, (1), 5-7.
2. Byikov, Yu. A., & Karpuhin, S. D. (2012). Sposoby polucheniia konstruktsionnykh nanomaterialov. Chast 1 [Methods of obtaining structural nanomaterials. Part 1]. *Nanoingeneriia – Nanoengineering*, (6), 11-19.
3. Segal, V. M., Reznikov, V. I., Kopyilov, V. I., Pavlik, D. A., & Malyishev, V. F. (1994). *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniia metallov [Processes of plastic structure formation of metals]*. Nauka i tehnika.
4. Valiev, R. Z., & Aleksandrov, I. V. (2003). *Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei [Nanostructural materials obtained by intense plastic deformation]*. Logos.
5. Kolesnikov, A. G., Shinkarev, A. S. (2014). Analiz sposobov izmelcheniya strukturyi pri poluchenii metallicheskikh konstruktsionnykh materialov [Analysis of methods of grinding the structure in the production of metallic structural materials]. *Nauka i Obrazovanie – Science and education*, (11), 34-44.
6. Polyakova, M. A., Gulin, A. E., & Nikitenko, O. A. (2013). Vliianie tehnologicheskikh parametrov sovmeshchennogo protsesssa na mehanicheskie svoistva i strukturu uglerodistoi provoloki [Influence of technological parameters of the combined process on mechanical properties and structure of carbon wire]. *Metallurgicheskie protsessyi i oborudovanie – Metallurgical processes and equipment*, (3(33)), 20-25.

7. Tiurin, V. A. (2007). Innovatsionnye tehnologii kovki s primeneniem makrosvigov [Innovative technologies of forging with the use of macro-shifts]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (11), 15–20.

8. Milenin, A. A., Afanasev, V. A., & Nikolaenko, A. S. (2008). Avtomatizirovannaia sistema proektirovaniia tehnologii svobodnoi kovki [Automated design system for free forging technology]. In *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobky tyskom v metalurhii ta mashynobuduvanni – Adequate processes and possession of processing in a vice in metallurgy and machinery* (pp. 49–54). DDMA.

9. Tyurin, V. A. (2005). Metodiki Moskovskogo instituta stali i splavov dlia razrabotki i issledovaniia innovatsionnykh tehnologii kovki [Methods of the Moscow Institute of Steel and Alloys for the Development and Research of Innovative Forging Technologies]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiiia – Proceedings of universities. Ferrous metallurgy*, (10), 32–35.

10. Chuhleb, V. L., Klyuev, D. Yu., Prokopenko, I. S., & Ashkelyanets, A. V. (2011). Formirovanie prognoziruemiyh pokazateley kachestva pokovok v usloviyah OAO «ArcelorMittal Krivoy Rog» [Formation of predicted quality indicators of forgings in the conditions of JSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih"]. *Obrabotka materialov davleniem – Material processing by pressure*, (1(26)), 103–106.

11. Duryinin, V. A., & Solntsev, Yu. P. (2006). *Issledovanie i sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva s tselyu povysheniya resursa stalnykh izdeliy iz krupnykh pokovok otvetstvennogo naznacheniya [Research and improvement of production technology with the aim of increasing the resource of steel products from large forgings for responsible purposes]*. HIMIZDAT.

12. Kakimoto, H., Arikava, T., Takahashi, Y., Tanaka, T., & Imaida, Y. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *J. Mater. Process Technol.*, (210), 415–422.

13. Tyurin, V. A. (2006). Innovatsionnye tehnologii kovki [Innovative forging technologies]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (5), 27–29.

14. Onischenko, A. K., & Mishulin A. A. (2006). Analiticheskoe issledovanie kovki krupnykh pokovok s uchetom temperaturnoy neodnorodnosti materiala [Analytical study of large-size forging with regard to temperature inhomogeneity of the material]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (10), 14–19.

15. Polozine, A., & Schaeffer, L. (2008). Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank. *J. Mater. Process Technol.*, (195), 260–266.

16. Ma Feng-cang, Lu Wei-jie, Qin Ji-ning, Zhang Di, & Ji Bo (2007). The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites. *Mater. and Des.* (28), 1339–1342.

UDC 621.73.019

*Oleg Markov, Anton Musorin, Anton Khvashchynskyi,
Volodymyr Panov, Roman Zhytnikov, Anton Lysenko*

FINITE ELEMENT STUDY STRESS-STRAIN STATE DURING PROFILING PROCESS OF CYLINDRICAL WORKPIECES

The priority direction in the development of mechanical engineering is the development of new technological processes for the manufacture of critical products. This is due to the development and implementation of new high-tech technologies that improve product quality due to the use of new methods of deformation.

An actual scientific and practical problem in the forging processes of massive forgings is using of workpiece profiling operation. This will make it possible to obtain of the finer internal structure of the workpiece and to decrease of crack formation.

The analysis of scientific publications has revealed that the problem of quality increasing of the material in the manufacture has not been completely solved today.

A high uniformity of deformation distribution during subsequent deformation is ensured by a four-beam workpiece. For a more even distribution of deformations and the manufacture of a four-beam workpiece of the correct shape, it is advisable to pull it with convex dies.

The research objective is search of a rational geometry of convex radius dies for profiling cylindrical workpieces before their subsequent deformation based on finite element modeling of the stress-strain state of the workpieces.

Computer simulation of the profiling process with using of the convex radius dies made it possible to establish that forging with convex dies leads to an increase in the uniformity of the strain distribution. As a result of such a deformation pattern, hindered deformation zones are reduced. When profiling with dies with a small rounding radius, the maximum deformations are localized in the central part of the workpiece. Increasing the radius of the rounding leads to an even distribution of

deformations. The formation of concave edges increases the level of compressive stresses in the central part and periphery of the workpiece. The investigated deformation scheme ensures the appearance of compressive hydrostatic stresses during profiling.

Modeling made it possible to establish that profiling with convex radius dies leads to a change in the strain distribution and stresses in the body of the workpiece. As a result, the uniformity of the strain distribution is increased, as well as the concave edges increase the level of compressive stresses in the central and peripheral layers of the workpiece. The effective geometry is the radius of the convex dies in the range of 1.0 ... 1.5 of the radius of the cylindrical workpiece.

Keywords: forging; profiling; large forgings; strain distribution; hydrostatic stresses; convex strikers; fine structure.

Fig.: 1. **Table:** 1. **References:** 16.

Марков Олег Євгенійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Markov Oleg – Doctor in Technical Science, Professor, Head of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

SCOPUS Author ID: 55648046800

Мусорін Антон Володимирович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Musorin Anton – Aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: anton.m.95@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0571-8700>

Хвашинський Антон Станіславович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Khvashchynskiy Anton – Aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2690-8354>

Панов Володимир Володимирович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Panov Volodymyr – Aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: v.panov@emss.dn.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2373-319X>

Житніков Роман Юрійович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Zhytnikov Roman – Aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (Akademicheskaya str., 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine).

E-mail: romajitnikov2015@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0540-8465>

Лисенко Антон Андрійович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна)

Lysenko Anton – Aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: antl31@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5454-6357>