

АХМЕДОВ А. О., ЧУХЛІБ В. Л., ГУБСЬКИЙ С. О., БІБА М. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ КУВАННЯ ПРИ РОЗКОЧУВАННІ НА ОПРАВЦІ НА ЯКІСТЬ ПОКОВОК

У роботі розглянуто вплив технологічних параметрів процесу розкочування на оправці на формування якості поковок. Проаналізовано основні фактори, що визначають рівномірність пластичної деформації, напружено-деформований стан та температурний розподіл у заготовці. Використано метод прогнозування нерівномірності та результати комп'ютерного моделювання в програмному комплексі QForm. Встановлено оптимальні режими процесу, що забезпечують однорідність структури та підвищення механічних властивостей виробів. Показано, що оптимізація параметрів дозволяє зменшити кількість дефектів, підвищити точність геометрії та знизити рівень виробничого браку.

Ключові слова: розкочування на оправці, пластична деформація, поковки, QForm, нерівномірність, кут кантування, ступінь деформації.

AKHMEDOV A., CHUKHLIB V., HUBSKYI S., BIBA M.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FORGING REGIME DURING ROLLING ON A MANDREL ON THE QUALITY OF FORGINGS

The paper considers the influence of technological parameters of the rolling process on a mandrel on the quality of forgings. The main factors determining the uniformity of plastic deformation, stress-strain state, and temperature distribution in the blank are analyzed. The method of predicting unevenness and the results of computer modeling in the QForm software package are used. The optimal process modes that ensure the uniformity of the structure and improve the mechanical properties of the products are established. It is shown that optimization of parameters allows reducing the number of defects, improving the accuracy of geometry, and reducing the level of production waste.

Keywords: mandrel rolling, plastic deformation, forgings, QForm, unevenness, rolling angle, degree of deformation.

Вступ. Розкочування на оправці широко застосовується у виробництві великогабаритних поковок, що використовуються в енергетичному, машинобудівному та нафтогазовому секторах. Процес дозволяє формувати точну внутрішню геометрію виробів і забезпечує рівномірний розвиток деформації за рахунок наявності жорсткої оправки. Якість отриманої поковки значною мірою визначається температурними режимами, швидкістю деформації, геометрією інструменту та схемою навантаження, а їх порушення може спричинити нерівномірність товщини стінки, залишкові напруження, перегріву або тріщини.

У сучасних умовах підвищеної відповідальності виробів виникає необхідність оптимізації параметрів процесу, що забезпечують стабільність формоутворення та мінімізацію дефектності. Чисельне моделювання стало невід'ємною частиною такого аналізу, дозволяючи оцінити напружено-деформований стан заготовки, прогнозувати поведінку металу під навантаженням і визначати раціональні технологічні режими без надмірних виробничих експериментів. Саме тому актуальною є розробка та дослідження оптимальних режимів розкочування на основі аналітичних методів і комп'ютерного моделювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес розкочування на оправці є однією з найважливіших та найбільш ефективних технологічних операцій гарячої обробки тиском, що застосовується для виготовлення порожнистих, ступінчастих та конічних поковок високої точності. На відміну від традиційних методів кування, взаємодія в системі «бойок - заготовка - оправка» дозволяє одночасно контролювати формування зовнішнього та внутрішнього профілю виробу (рис.1), забезпечуючи однорідне протікання металу та високу точність розмірів [1-8]. Заготовка встановлюється на жорстку оправку, де під дією обтиснень бойка, що чергуються з обертанням, метал витісняється вздовж поверхні оправки, формуючи рівномірну товщину стінки та точну внутрішню геометрію [1-2].

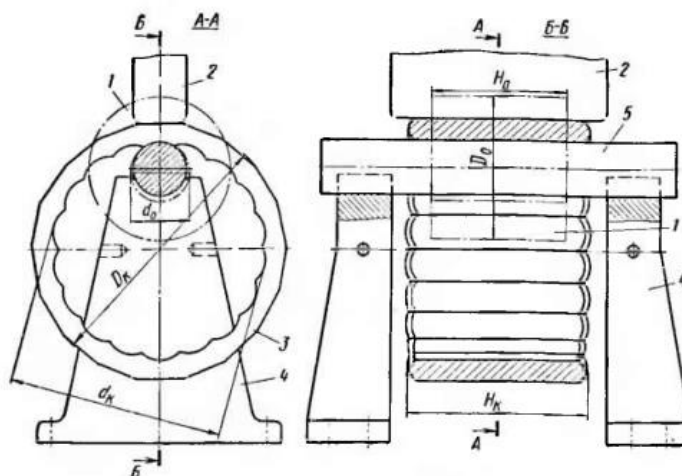


Рис. 1 - Схема процесу розкочування: 1 - прошита заготовка, 2 – вузький плоский бойок, 3 – кільце при розкочуванні, 4 – стійки, 5 – оправка

Технологічний цикл процесу складається з кількох послідовних етапів: осаджування та прошивання вихідного злитка, формування отвору, натягування заготовки на оправку, здійснення попереднього обтиснення, виконання основного розкочування та фінального калібрування профілю. У роботі [23] зазначено, що етап попереднього формування (рис. 2) відіграє ключову роль у забезпеченні рівномірності початкової товщини стінки, усуненні литих дефектів та досягненні правильного позиціонування металу відносно оправки.

Одним із визначальних факторів технології є геометрія вихідної заготовки. Зміна товщини, різкі переходи та наявність уступів суттєво впливають на характер течії металу під час деформації. Згідно з даними літературних джерел [14–19], у зонах переходу між різними товщинами виникають максимальні локальні деформації та напруження. Саме ці зони є найбільш схильними до виникнення дефектів, таких як конусність, порожнини, внутрішні розриви або викривлення осі. Оптимальний профіль бойка та коректно вибрана траєкторія інструмента дозволяють спрямовувати метал у необхідному напрямку та уникати небезпечних локальних перевантажень.

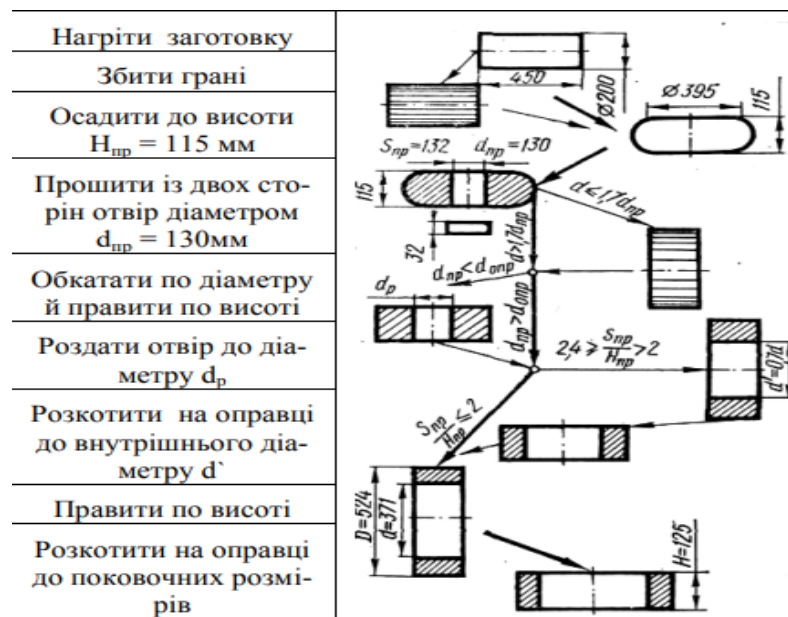


Рис. 2 - Логічна схема переходів кування

Важливим напрямом досліджень стала проблема локальних дефектів, пов'язаних з геометрією заготовки та інструменту. Зокрема, у роботах [10–13] зазначається, що занадто малий кут нахилу уступу (менше 10°) призводить до концентрованих деформацій, утворення порожнин, «заломів» та зриву течії металу в перехідних зонах, що також створює надмірне навантаження на оправку [8–12]. Значну увагу приділяють чисельному моделюванню процесу. Програмні комплекси, такі як DEFORM-3D та QForm, використовуються для аналізу пластичної деформації, напружено-деформованого стану та температурних полів, що дозволяє визначити зони потенційних дефектів і вибрати оптимальні режими розкочування [20].

Мета дослідження. Визначити раціональні технологічні режими розкочування на оправці, що забезпечують високу якість поковок, шляхом аналізу впливу кута кантування, ступеня деформації, температури деформації та параметрів інструменту на рівномірність напружено-деформованого стану та формування структури металу.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження впливу параметрів розкочування у роботі було проведено моделювання в програмному комплексі QForm [20]. Попередньо геометрію заготовки, бойка та оправки було змодельовано у Fusion 360, після чого дані експортовано до QForm.

Початкові параметри симуляції відповідали реальним умовам: матеріал - сталь 10, температура початку деформації - 1200°C , діаметр оправки - 95 % від внутрішнього діаметра заготовки, інструмент - сталь 38ХМ.

Було досліджено два варіанти кута кантування (15° і 30°) та два можливих ступені деформації (10 % і 20 %). Моделювання показало, що при куті кантування 15° виникає значне локальне підвищення деформацій у перехідних зонах, що відповідає нерівномірності з коефіцієнтом $N > 1.25$. При куті 30° значення нерівномірності знижувалися до $N \approx 1.05-1.10$, що свідчить про майже рівномірний розподіл пластичної деформації.

Подібні залежності виявлено й у температурному полі. При 10 % деформації зберігаються холодні зони, які не встигають набрати необхідний рівень деформації. При збільшенні ступеня до 20 % температура розподіляється рівномірно, що створює сприятливі умови для однорідної течії металу.

У роботі виконано всебічний аналіз впливу кута кантування та ступеня деформації на рівномірність напружено-деформованого стану поковок. Показано, (рис.3) що при куті кантування 15° формуються виражені зони нерівномірних деформацій: периферійні області зазнають значно більших обтиснень, тоді як центральні ділянки залишаються недостатньо деформованими [14–16]. Наслідком такого процесу можуть бути мікротріщини, зони недостатнього ущільнення або нерівномірність товщини стінки.

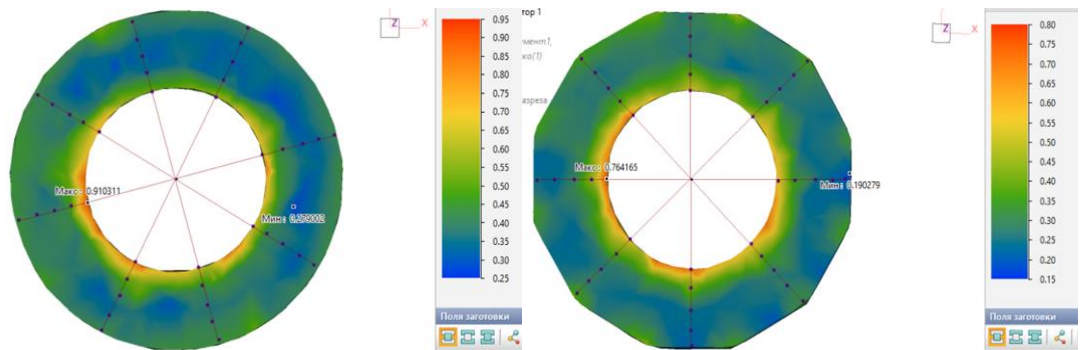


Рис.3 - Заготовки при куті кантування 15° та 30°

При збільшенні кута до 30° (рис.3) характер деформації суттєво покращується: пластична течія охоплює увесь об'єм металу, зменшується градієнт напружень і фактично зникають зони недеформованого матеріалу.

Аналогічна залежність виявлена й щодо сумарного ступеня деформації (рис. 4). При 10 % деформації процес відбувається переважно у поверхневих шарах, що може спричинити залишкові дефекти структури та неоднорідність механічних властивостей. Зі збільшенням ступеня до 20 % деформація рівномірно проникає в центральні шари заготовки, забезпечуючи повноцінне руйнування литої структури та формування рівномірної, щільної металеві основи.

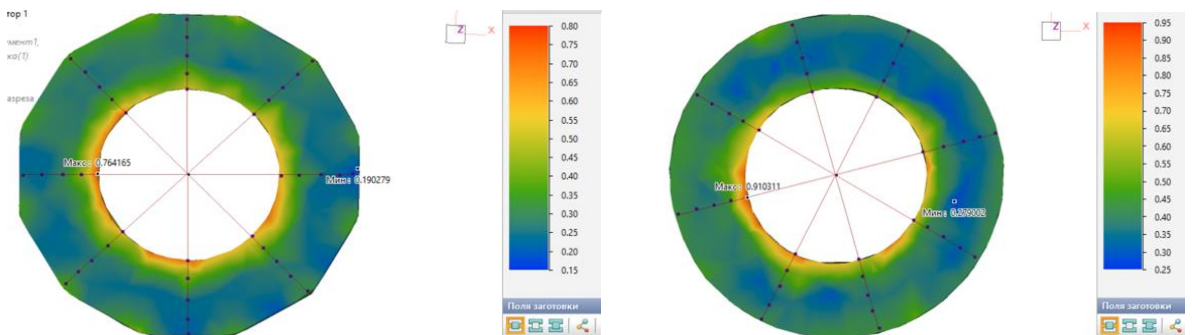


Рис.4 - Заготовки з сумарними ступенями деформації 20% та 10%

Графік інтенсивності напружень (рис.5), підтверджує, що максимальні пікові навантаження припадають на перехідні ділянки, а оптимальний режим (30° , 20 %) мінімізує цю різницю між піковими та середніми значеннями.

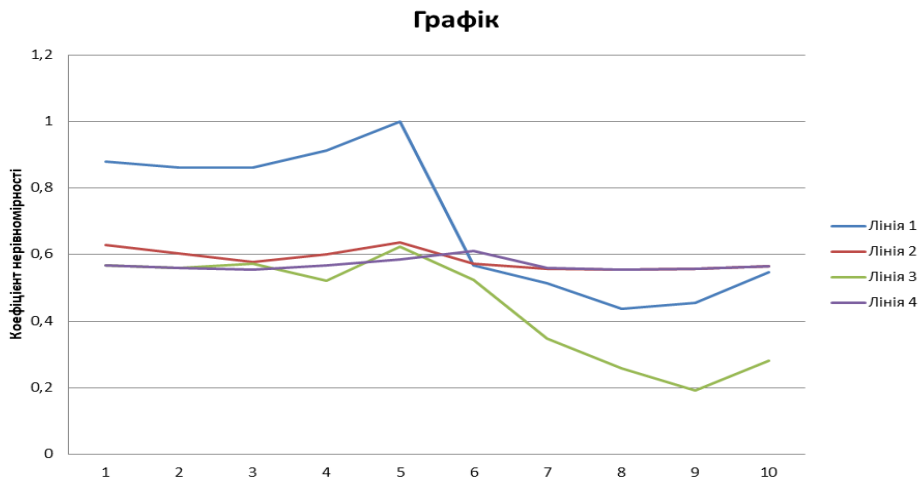


Рис.5 - Графік інтенсивності напружень

Метод прогнозування нерівномірності, застосований у роботі [21], показав свою ефективність: для аналізу схеми з кутом 15° і коефіцієнт нерівномірності місцями становив лише 0.55–0.65, що свідчить про критичні концентрації напружень, тоді як при 30° його значення піднімалися до 0.85–0.95, демонструючи більш стабільний та рівномірний процес деформування.

Висновки. В роботі зроблений узагальнюючий огляд підходів до дослідження та оптимізації процесу розкочування на оправці, що дозволило оцінити вплив основних технологічних параметрів на формування порожнистих поковок. На основі аналізу літературних даних та результатів моделювання встановлено, що на рівномірність напружено-деформованого стану найбільше впливають кут кантування, ступінь деформації, геометрія заготовки та конфігурація інструменту. Показано, що при малих кутах кантування та недостатньому обтисненні виникає нерівномірність деформацій і локальні зони концентрації напружень, що підвищує ймовірність утворення дефектів. Моделювання в QForm підтвердило наявність суттєвих градієнтів деформацій у перехідних зонах за нерациональних режимів. Рациональним є поєднання кута кантування 30° та сумарного ступеня деформації 20 %, яке забезпечує рівномірну пластичну течію металу, зменшення пікових навантажень і стабільне формоутворення, що сприяє отриманню поковок з однорідною структурою та точною геометрією. Отримані результати підтверджують доцільність застосування чисельного моделювання для вибору рациональних режимів розкочування та можуть бути використані для підвищення якості й надійності порожнистих поковок у виробничій практиці.

Список літератури

1. Протягування: формозмінення при протягування; основні правила протягування; способи протягування. *Всеосвіта юа*. URL:<https://vseosvita.ua/lesson/lektsiia-8-tema-21-protiazhka-formozminennia-pry-protiazhtsi-osnovni-pravyla-protiazhky-sposoby-protiazhky-58088.html>
2. ISO 7805-2:2017 "Rolling of metals. Part 2: Mandrel rolling process"
3. The Japan Steel works, LTD. URL:<https://www.jsw.co.jp/en/>
4. Japan Steel Works M&E, Inc. URL:<https://www.jsw-me.com/en/products/01-02-01.html>
5. Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець // Марков О.Є. Панов, В.В. Іванова Ю.О., Хващинський А.С, Мусорін А.В., Косілов М.С. / Вісник Приазовського державного технічного університету, 2021р. Серія: Технічні науки Вип. 42, с 92-99.
6. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada, H. Moritani, K. Suzuki, I. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 1985. – Vol. 84, iss. 2. – Pp. 261-272.
7. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling / M. Balcar, R. Zelezný, L. Sochor, P. Fila // Materials and technology. – 2008. – Vol. 42, iss. 4. – Pp. 183-188.
8. Lee S. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / S. Lee, Y. Lee, Y. Moon // Materials Research Innovations. – 2011. – Vol. 15, iss. sup 1. – Pp. s458-s462.
9. Експериментальне дослідження процесу розкочування конусних обичайок зі складним профілем // О. Є. Марков, М. С. Косілов, Ю. О. Іванова, В. В. Коткова / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 2/2021 (127). С 100 – 105
10. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S./ Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2018.- Vol. 95.- No. 5.- P. 16-24.
11. Rutskiĭ D. V., Zyuban N. A., Chubukov M. Y./ Features of structure and solidification of extended double ingots for hollow forgings.// Part 1 Metallurgist.- 2016, 1.- pp. 156–163.
12. Zhbankov I. G., Markov O. E., Perig A. V./ Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2014.- P. 865–872.
13. Markov O. E., Perig A. V., Markova M. A., Zlygoriev V. N./ Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2016.- Vol. 4, -No. 83.- P. 2159–2174.
14. Аналіз формозміни та деформованого стану пустотлої ступінчастої поковки в процесі розкочування // О.Є. Марков М.С. Косілов О.В. Герасименко, С.О. Шевцов / Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна. – 2017- Mechanics and Advanced Technologies. С 47-53.
15. Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process / I. G. Zhbankov, O. E. Markov, A. V. Perig // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(5–8), 865 – 872.
16. State of the art in the manufacture of heavy forgings for reactor components in the Federal Republic of Germany / M. Erve, F. Papouschek, K. Fischer, C. Maidorn. // Nuclear Engineering and Design. – 1988. – №3. – P. 485–495.
17. Дефектоутворення на обичайках з одностороннім уступом під час розкочування профільованим східчастим інструментом // М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. Є. Марков / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 2/2018 (109). Частина 1,серія: сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві, с 41-47
18. Дослідження формозміни та деформованого стану східчастих заготовок під час розкочування профільованим бойком // М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, Є. В. Інчаков / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 5/2017 (106), серія: сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві, с 75-81.
19. Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми // Марков О.Є., Косілов М.С., Станков В.Ю., Різак П.І. / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ. № 40, 2017. С. 114-120.
20. QForm 3D. URL:<https://qform3d.com/>
21. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок / В. Л. Чухліб [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1. – Стор. 95-103.
22. Сучасні технологічні процеси виготовлення заготовок крупних деталей відповідального призначення: посібник для студентів галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання / О.Є. Марков, В.В. Коткова, Н.Г. Шевченко – Краматорськ : ДДМА, 2019. – 103 стор.

23. Технологічні процеси за фахом. Кування і штампування : навчальний посібник / В. В. Кухар, Б. С. Каргін, О. С. Аніщенко, С. Б. Каргін, А. Г. Присяжний. – Маріуполь : ПДТУ, 2017. – 144 стор.

References (transliterated)

1. Broaching: shape change during broaching; basic rules of broaching; broaching methods. Vseosvita ua. URL:<https://vseosvita.ua/lesson/leksiia-8-tema-21-protiazhka-formozminennia-pry-protiazhtsi-osnovni-pravyly-protiazhky-sposoby-protiazhky-58088.html>
2. - ISO 7805-2:2017 "Rolling of metals. Part 2: Mandrel rolling process
3. The Japan Steel Works, LTD. URL:<https://www.jsw.co.jp/en/>
4. Japan Steel Works M&E, Inc. URL:<https://www.jsw-me.com/en/products/01-02-01.html>
5. Experimental study of the rolling process of stepped conical rings // Markov O.E. Panov, V.V., Ivanova Yu.O., Khvashchinsky A.S., Musorin A.V., Kosilov M.S. / Bulletin of the Priazovskiy State Technical University, 2021. Series: Technical Sciences Issue 42, pp. 92-99.
6. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada, H. Moritani, K. Suzuki, I. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 1985. – Vol. 84, iss. 2. – Pp. 261-272.
7. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling / M. Balcar, R. Zelezný, L. Sochor, P. Fila // Materials and technology. – 2008. – Vol. 42, iss. 4. – Pp. 183-188.
8. Lee S. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / S. Lee, Y. Lee, Y. Moon // Materials Research Innovations. – 2011. – Vol. 15, iss. sup 1. – Pp. s458-s462.
9. Experimental study of the process of rolling conical shells with a complex profile // O. E. Markov, M. S. Kosilov, Yu. O. Ivanova, V. V. Kotkova / Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskiy Kirovohrad National University. Issue 2/2021 (127). Pp. 100–105
10. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S./ Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2018.- Vol. 95.- No. 5.- P. 16-24.
11. Rutskii D. V., Zyuban N. A., Chubukov M. Y./ Features of structure and solidification of extended double ingots for hollow forgings.// Part 1 Metallurgist.- 2016, 1.- pp. 156–163.
12. Zhbakov I. G., Markov O. E., Perig A. V./ Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2014.- P. 865–872.
13. Markov O. E., Perig A. V., Markova M. A., Zlygoriev V. N./ Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation.// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.- 2016.- Vol. 4, -No. 83.- P. 2159–2174.
14. Analysis of shape change and deformed state of hollow stepped forgings during rolling // O.E. Markov, M.S. Kosilov, O.V. Gerasimenko, S.O. Shevtsov / Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, Ukraine. – 2017- Mechanics and Advanced Technologies. C 47-53.
15. Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process / I. G. Zhbakov, O. E. Markov, A. V. Perig // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(5–8), 865 – 872.
16. State of the art in the manufacture of heavy forgings for reactor components in the Federal Republic of Germany / M. Erve, F. Papouschek, K. Fischer, C. Maidorn. // Nuclear Engineering and Design. – 1988. – №3. – P. 485–495.
17. Defect formation on flanges with a one-sided shoulder during rolling with a profiled step tool // M. S. Kosilov, O. V. Gerasymenko, O. E. Markov / Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskiy Kirovohrad National University. Issue 2/2018 (109). Part 1, series: modern technologies in mechanical engineering, transport, and mining, pp. 41–47
18. Study of the shape change and deformed state of stepped blanks during rolling with a profiled punch // M. S. Kosilov, O. E. Markov, O. V. Gerasymenko, E. V. Inchakov / Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskiy Kirovohrad National University. Issue 5/2017 (106), series: modern technologies in mechanical engineering, transport and mining, pp. 75-81.
19. Study of shape change in forgings during rolling with a step-shaped tool // Markov O.E., Kosilov M.S., Stankov V.Yu., Rizak P.I. / Tool reliability and optimization of technological systems. Collection of scientific works. Kramatorsk. No. 40, 2017. Pp. 114-120.
20. QForm 3D. URL:<https://qform3d.com/>
21. Development of a technological concept for the design of forging processes taking into account the influence of the deformation regime on the quality of forgings / V. L. Chukhlib [et al.] // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units : collection of scientific works. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – No. 1. – P. 95-103.
22. Modern technological processes for manufacturing large-scale critical components: a manual for students in the field of knowledge 13 "Mechanical Engineering" in full-time and part-time forms of study / O.E. Markov, V.V. Kotkova, N.G. Shevchenko — Kramatorsk: DDMA, 2019. — 103 p.
23. Technological processes by specialty. Forging and stamping: textbook / V. V. Kukhar, B. S. Kargin, O. S. Anishchenko, S. B. Kargin, A. G. Prisyazhny. – Mariupol: PDTU, 2017. – 144 p.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Ахмедов Артем Олександрович (Akhmedov Artem) – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; e-mail: ahmedov02@gmail.com, ORCID: 0009-0002-6166-9835.

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitalij) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; e-mail: profdnepro@gmail.com

Губський Сергій Олександрович (Hubskiy Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Біба Микола Вікторович (Biba Mykola) – кандидат технічних наук, директор MICAS Simulations Ltd; м. Оксфорд, Велика Британія; e-mail: nick@qform.com