

© Марков О.Є.¹, Панов В.В.², Іванова Ю.О.³,
Хващинський А.С.⁴, Мусорін А.В.⁵, Косілов М.С.⁶

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ СТУПІНЧАСТИХ КОНУСНИХ КІЛЕЦЬ

У роботі був експериментально досліджений технологічний процес розкочування конусних кілець з буртом. Запропонований спосіб полягає у розкочуванні пустотілої заготовки з буртом бойком зі східчастим профілем. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень на свинцевих та сталевих моделях. Розроблена методика дозволила встановити залежності змінення форми ступінчастої пустотілої заготовки при деформуванні її ступінчастим бойком. У дослідженні вивчалася відносна висота виступу ступінчастої вихідної заготовки в інтервалі 2,2...2,5. А також встановлювався вплив ступеня деформації на конусність та зміну діаметрів пустотілої заготовки. Це дослідження було проведено задля отримання інформації стосовно кількісної оцінки формозмінення. Для розробки технологічного процесу кування конусних обичайок з виступом технологу треба мати рекомендації з утворення конусності на поковці залежно від вихідних розмірів ступінчастої пустотілої заготовки, а також ступеня її деформування. На базі експериментального дослідження були встановлені закономірності зміни конусності та діаметрів отворів від ступеня деформації для різних товщин стінок при куванні ступінчастим бойком. Збільшення діаметра виступу заготовок приводить до збільшення ступеня деформації виступу, що викликає збільшення діаметра виступу при розкочуванні. Це дало змогу встановити конусність обичайок, яка з'являється при куванні даним методом. Аналіз макроструктури конусної кільцевої поковки зі східчастим профілем дозволив установити, що при використанні операції розкочування східчастої заготовки східчастим бойком волокна металу повторюють контур деталі. Це виключає їхнє перерізання при механічній обробці. У результаті досліджень було встановлено, що процес розкочування східчастих конусних заготовок можливий та його впровадження у виробництво розширить технологічні можливості процесу кування крупногабаритних поковок.

Ключові слова: конусне кільце, східчасте кільце, розкочування, східчастий бойок, конусність, формозмінення.

O.E. Markov, V.V. Panov, Y.O. Ivanova, A.S. Khvashchynskiy, A.V. Musorin, M.S. Kosilov. Experimental study of rolling processes of stepped conical rings. The work considers the technological process of rolling conical rings with a shoulder. The proposed method consists of rolling a hollow workpiece with a shoulder by a striker with a stepped profile. A methodology for pursuance an experimental research on lead and steel models has been developed. The developed technique made it possible to establish the dependences of the change in the shape of a stepped hollow workpiece under defor-

¹ д-р техн. наук, проф., Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0001-9377-9866, oleg.markov.omd@gmail.com

² аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0002-2373-319X, v.panov@emss.dn.ua

³ аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0002-4145-9665, yachmen.yuliya@gmail.com

⁴ аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0002-2690-8354, antonio.hvasherman@ukr.net

⁵ аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

⁶ канд. техн. наук, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0001-6412-3366, kosilovmaksims@gmail.com

mation by a stepped striker. In the study, the relative height of the protrusion of the stepped initial workpiece ranged from 2.2 to 2.5. Influence of the deformation degree on the taper and change in the diameters of the hollow workpiece has been established. This study has been carried out to obtain information on the quantitative assessment of the shape change of the workpiece in the process of its deformation. To develop a technological process for forging conical shells with a protrusion, the technologist must have recommendations on the taper formation on the forged piece, depending on the initial dimensions of the stepped hollow workpiece, as well as the degree of its deformation. On the basis of an experimental study, the regularities of the change in the taper and in the diameters of the holes from the degree of deformation have been established for various wall thicknesses when forging with the stepper striker. An increase of workpieces protrusion height results in an increase of the deformation degree, in an increase in the diameter of the workpiece in this part during rolling. This made it possible to define the magnitude of the shell taper, which is formed at forging by this method. Analysis of the macrostructural structure of a conical annular forging with a stepped profile made it possible to establish that when using the operation of rolling of the stepped workpiece with a stepped striker, the metal fibers replicate the contour of the part. This prevents them from being cut at machining. As a result of the research, it has been found out that the process of stepped conical workpieces rolling is possible and its introduction into production will widen the technological capabilities of the forging process of large-sized forged pieces.

Keywords: conical ring, stepped ring, rolling, stepped striker, taper, deformation.

Постановка проблеми. В останні роки кількість крупних поковок зростає, що пов'язане зі збільшенням потужностей і кількості енергетичних установок і важких машин [1]. Серед виробів заводів важкого й енергетичного машинобудування значну кількість становлять кільця, у тому числі конусної форми. Такі поковки відносяться до відповідальних і до них пред'являються високі вимоги з ізотропності механічних властивостей, внутрішньої структури й ін. Більшість кілець виготовляються з використанням операції розкочування. Однак конусні кільця на сьогоднішній день виготовляються механічною обробкою циліндричних товстостінних кілець, що приводить до підвищених витрат металу через значні напуски, а також зниженню механічних властивостей деталей через перерізання волокнистої будови металу поковки.

Одними з напрямків удосконалення техпроцесу виготовлення крупногабаритних конусних кілець зі східчастим профілем є використання пустотілих східчастих заготовок (злитків) і одержання поковки, яка повторює форму деталі. Пустотілі злитки дозволяють знизити трудомісткість кування крупногабаритних кілець і знизити витрати металу за рахунок відсутності операцій прошивання отвору. Виготовлення східчастих конічних поковок вимагає застосування спеціальних операцій кування пустотілої заготовки (злитка). Актуальним науково-технічним завданням є одержання конусних східчастих поковок, що збігаються з контуром деталі. Це дозволить виключити перерізання волокнистої будови металу й зменшити витрати металу при механічній обробці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розробки оптимальних рекомендацій при куванні крупних поковок компанією Creusot-loirc-Industrie був установлений вплив внутрішніх дефектів ковальських заготовок на утворення тріщин [1, 2]. Для кілець ефективним способом є використання пустотілих злитків з контролем розташування зон ліквації. Однак у статті не наведено результати досліджень і не представлені рекомендацій щодо параметрів процесу кування кілець. Особливо корисною була б інформація щодо співвідношень розмірів злитка, яка зменшить неоднорідність хімічного складу й розміри осьової пористості.

Другим етапом удосконалювання процесів виготовлення крупногабаритних конусних східчастих поковок є розробка таких способів кування, які дозволять виготовляти поковки з контуром деталі. Це дозволить виключити перерізання волокнистої будови металу й зменшити витрати металу при механічній обробці. Ці способи полягають у використанні спеціальних ковальських операцій або деформуючого інструмента. У зв'язку із цим необхідно встановити вплив застосовуваних операцій і інструмента на формозміну пустотілих поковок.

Попит на крупногабаритні кільця з діаметром до 10 метрів і висотою до 6 метрів обумов-

лений розвитком атомних електростанцій [3]. Виробництво кілець такої висоти дозволяє спростити конструкцію корпусу реактора. Щоб виготовляти кільця із зазначеними розмірами, необхідно створити спеціальне устаткування для зовнішнього розкочування. Такий розкочувальний пристрій потребує встановлення його під гідравлічним кувальним пресом. Однак подібне оснащення має обмежені технологічні можливості.

Суть способу, описаного в роботі [4], полягає в установці спеціальної поперечини, яка виконує роль бойка. Сила преса передається між рухливою поперечкою й цією поперечиною. Між нижнім інструментом і поперечиною формується кільце із заданою товщиною стінки, яке тримається й повертається за допомогою оправки [5]. Однак у роботі не зазначено, які розміри заготовки були отримані перед розкочуванням і з яким ступенем деформації за прохід по колу воно виконувалося.

Авторами роботи [6] запропонований спосіб кування кілець, який полягає в установці додаткового гідравлічного механізму. У цьому варіанті немає обмежень по максимальних розмірах кілець. Однак у даному способі не зазначено, як одержувати конічні кільця зі східчастою поверхнею.

Аналіз робіт [3-6], у яких основною ідеєю є застосування спеціальних пристосувань і встаткування для розкочування крупногабаритних кілець, дозволив установити, що відсутній ретельний опис конструкції оснащення для розкочування. Також немає рекомендацій щодо параметрів заготовки й параметрів процесу деформування, таких як ступінь деформації й товщина стінки, до якої можливо проводити кування.

Куті кілець можуть бути виготовлені як зі звичайних злитків із застосуванням технологічної операції прошивання, так і з пустотілих [7-9]. Необхідність осадження й прошивання звичайного злитка вимагає крупної кількості матеріальних і енергетичних ресурсів. Для зниження витрат металу й ваги злитків, які йдуть на виготовлення кільцевих поковок, розроблені пустотілі злитки, що значно спрощує послідовність кування й зменшує кількість нагрівань [10].

Аналіз літературних даних [4-11] дозволив установити, що проблема, яка пов'язана зі зниженням витрати металу й підвищенням механічних властивостей при виробництві конусних східчастих кілець, на сьогоднішній день не вирішена. Це викликано тим, що на конусні східчасті деталі призначається крупний припуск на механічну обробку. У результаті виготовляється не конічне кільце, а циліндричне, що й приводить до підвищених витрат металу й перерізанню волокна внаслідок механічної обробки. У зв'язку із цим необхідно розробити й досліджувати новий спосіб одержання поковок крупногабаритних конусних кілець.

Мета статті – зниження витрат металу й розширення технологічних можливостей при куванні конусних пустотілих заготовок на основі розробки нових технологічних процесів розкочування кілець зі східчастою поверхнею. Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання: вибрати методи й розробити методики для досліджень способів розкочування східчастих конусних кілець; провести макроструктурні дослідження поковок, які отримані за новою технологією.

Виклад основного матеріалу. МСЕ має високу точність при визначенні параметрів НДС, у тому числі й для процесів гарячого пластичного деформування, про що свідчить ряд робіт [12-15]. Однак МСЕ є теоретичним методом і вимагає експериментальної верифікації отриманих результатів [16, 17].

Для проведення експериментів виготовлялися свинцеві зразки в масштабі 1:40 до натурної поковки. Зразки виготовлялися литтям свинцю у форму зі стрижнем. Для розкочування був виготовлений східчастий боек. Боек загальною довжиною 130 мм мав сходинку висотою 7 мм і довжину виступу 40 мм. Дорн (оправка для розкочування) мав діаметр 30 мм. З метою одержання точних розмірів і забезпечення необхідного ступеня деформації використовувався набір пластин товщиною по 1 мм. Деформування було проведено на гідравлічному пресі силою 100 кН, швидкість деформування 200 мм/хв.

Для макроструктурних досліджень були проведені експерименти на сталевих зразках. Матеріалом була обрана сталь ХВГ, тому що вона має широке застосування при виробництві крупних поковок. Також був виготовлений інструмент для розкочування: східчастий боек і оправки (рис. 1).

Зразки нагрівалися до температури 1100°C з витримкою 10 хв в електричній печі. Обтис-

нення становило 1 мм за прохід як при протягуванні, так і при розкочуванні. Для розкочування застосовувався дорн Ø25 мм (рис. 1, б) і бойки для з відповідним профілем.

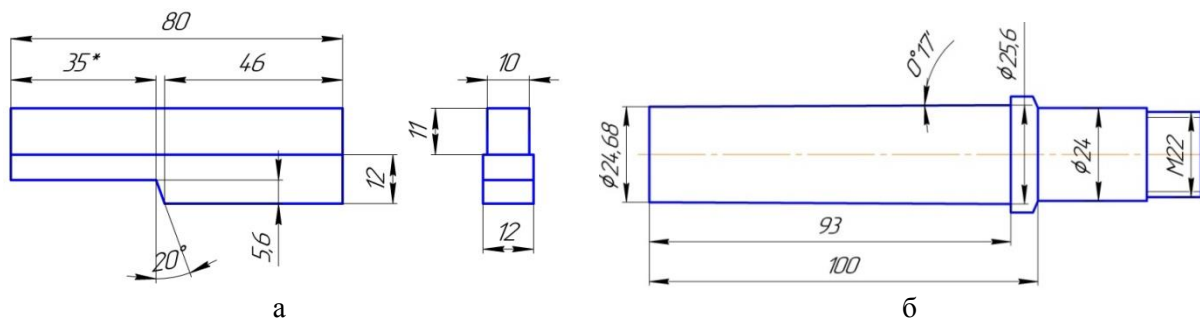


Рис. 1 – Інструмент для експериментальних досліджень: а – східчастий бойок; б – дорн (оправка)

Аналіз експериментальних даних утворення конусності поковки від відносного ступеня деформації уступу дозволив установити (рис. 2), що для відносного діаметра заготовки $D_y/d_{cp} = 2,05$ збільшення відносного ступеня деформації з боку уступу приводить до збільшення конусності. Збільшення конусності пов'язане з інтенсивним збільшенням отвору уступу $d_{п.у}$ під час розкочування. Зниження конусності для заготовки з відносними діаметрами виступів 2,5 при ступені обтиснення $\varepsilon < 0,26$ пов'язане з куванням на першому проході в процесі розкочування виступу кільця, у цьому випадку уступ не деформується. Отже, діаметр виступу починає збільшуватися, а діаметр уступу не міняється. Утворюється конічне кільце з діаметром виступу ($D_b/d_{cp} = 2,5, \varepsilon = 0,08$). Подальше деформування уступу й виступу знижує конусність до нуля після обтиснення $\varepsilon = 0,26$, що вказує на рівність діаметрів уступу й виступу ($d_{п.в} = d_{п.у}$). Зростання конусності для заготовки з відносним діаметром виступу 2,0 пов'язане з інтенсивним збільшенням діаметра отвору уступу, що пояснюється більшим плином металу в тангенціальному напрямку при обтисненні тонкої стінки.

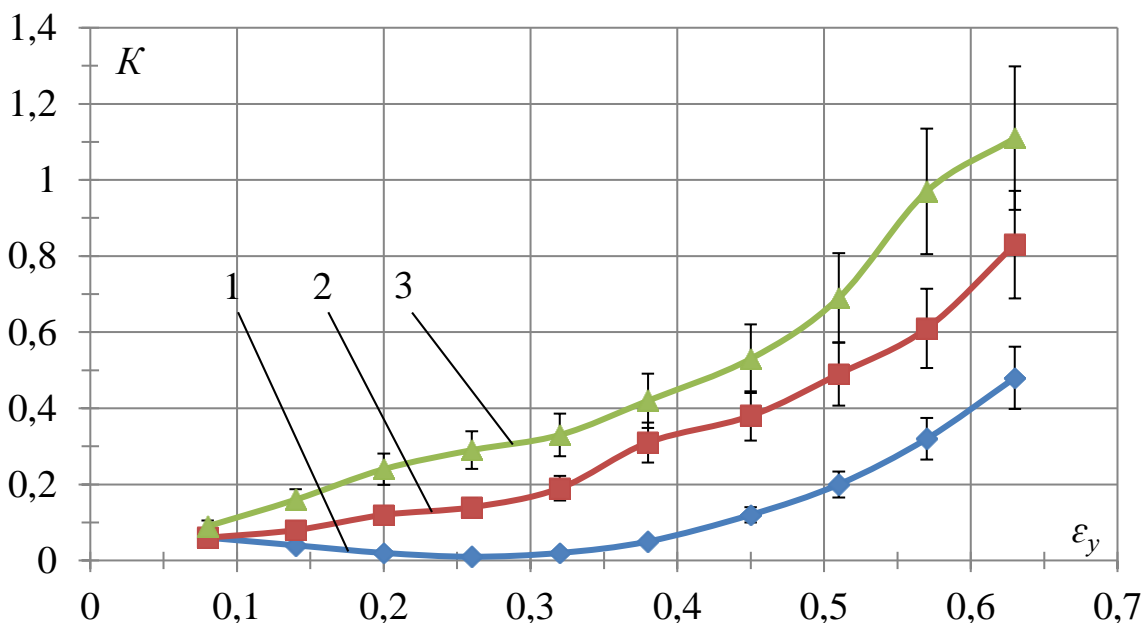


Рис. 2 – Зміна конусності (K) від відносного ступеня деформації уступу (ε_y) для заготовок з $D_y/d_{cp} = 2,05$: 1 – $D_b/d_{cp} = 2,50$; 2 – $D_b/d_{cp} = 2,40$; 3 – $D_b/d_{cp} = 2,30$

Важливий результат має зміна співвідношення діаметрів отвору виступу й уступу в процесі розкочування, яке дозволяє встановити якісну та кількісну зміну діаметрів на торцях заготовки при постійній довжині заготовки. Аналізуючи зміну співвідношень діаметрів отвору поковки виступу й уступу $d_{п.в}/d_{п.у}$ від ступеня деформації ϵ_y (рис. 3) для відносного діаметра уступу $D_y/d_{cp} = 2,05$, можна відзначити, що зі збільшенням ступеня деформування ϵ_y співвідношення діаметрів отвору поковки зменшується. Крапка, відзначена окружністю на кривій 1, відповідає відсутності конусності. У відзначеній крапці зазначені діаметри збігаються ($d_{п.в} = d_{п.у}$) і при подальшому деформуванні діаметр отвору уступу збільшується інтенсивніше, чим виступу, і співвідношення торцевих діаметрів отвору поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ стає менше 1,0 ($d_{п.в} < d_{п.у}$).

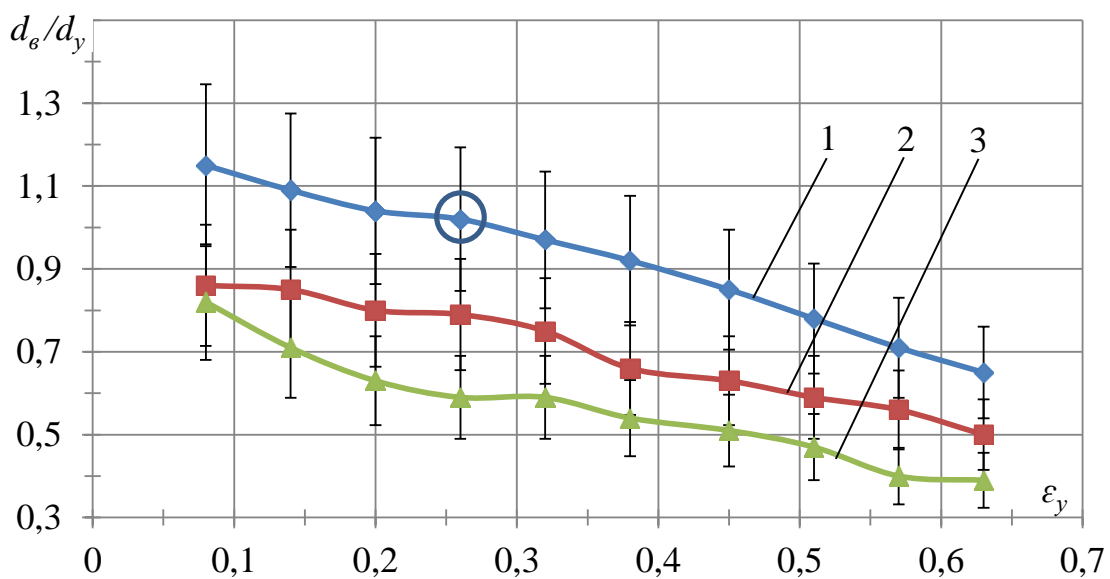


Рис. 3 – Зміна співвідношення діаметрів отвору $d_{п.в}/d_{п.у}$ від відносного ступеня деформації виступу ϵ_B для заготовок з $D_y/d_{cp} = 2,05$: 1 – $D_B/d_{cp} = 2,5$; 2 – $D_B/d_{cp} = 2,4$; 3 – $D_B/d_{cp} = 2,3$

Криві 2 і 3 не проходять вище значення 1,0, що відповідає деформуванню уступу на початку розкочування. Їхнє поступове зниження відбувається через те, що інтенсивніше збільшується діаметр уступу внаслідок більшого накопичення деформацій. Причому отримані закономірності мають практично лінійну залежність.

Нова технологія кування східчастого конусного кільця (рис. 4, а) припускала нагрівання заготовки й протягування її на оправці до поковочних розмірів. Уздовж осі кільцевої поковки були вирізані зразки для металографічних досліджень (рис. 4, б).

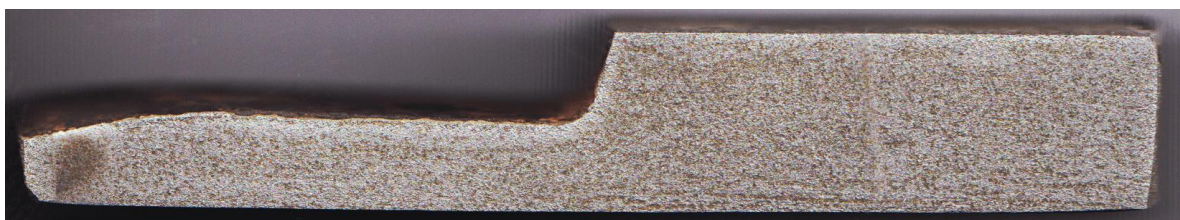
Аналіз отриманих результатів дозволив установити, що нова технологія кування приводить до того, що волокна металу стискаються, в уступі їх щільність більше, чим у виступі (рис. 4, б). Напрямок волокна повторює східчастий профіль поковки, що буде виключати перерізання структури металу, як це відбувається при механічній обробці згідно з базовою технологією.

До обмежень розробленого способу розкочування конусних східчастих заготовок потрібно віднести:

- запропонований спосіб розкочування може застосовуватися для виготовлення конусних кілець тільки зі східчастим профілем;
- при значних величинах конусності кільця ускладнюється процес кантування пустотілої заготовки на оправці.



а



б

Рис. 4 – Експериментальне дослідження: а – процес розкочування сталевих заготовок у гарячому стані; б – макробудова поковки по перетину

Установлені в роботі рекомендації з геометричних параметрів заготовки, інструмента й режимів розкочування є важливими науково-технічними результатами, які можна використовувати в теорії й технології процесів кування крупногабаритних пустотілих поковок.

Практичним аспектом використання результатів дослідження є вдосконалювання технологічного процесу розкочування конусних поковок зі східчастим профілем.

Висновки:

1. Встановлено, що розкочування заготовок з відносним діаметром $D_y/d_{cp} = 2,05$ з ростом ступеня деформації (ϵ) призводить до збільшення відносного діаметра уступу d_{ny}/L_n , а також до зменшення співвідношення діаметрів уступу й виступу поковки d_{nv}/d_{ny} . Більше того, підвищення конусності відбувається при зменшенні відносного діаметра виступу заготовки D_b/d_{cp} .

2. У результаті проведених макроструктурних досліджень поковок, які отримано за новою технологією, було встановлено, що при розкочуванні східчастої заготовки східчастим бойком волокна металу повторюють контур деталі, що виключає їхнє перерізання при механічній обробці.

Перелік використаних джерел:

1. Hollow Ingot: Thirty Years of Use to Control Segregation and Quality for Nuclear and Petrochemical Large Shells / G. Girardin, D. Jobard, F. Perdriset, P. Tollini, I. Poitault, A. Gingell // Proceedings of 18th International Forgemasters Meeting. – 2011. – Pp. 170-174.
2. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles / V. Dragobetskii, M. Zagirnyak, O. Naumova, S. Shlyk, A. Shapoval // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, iss. 4. – Pp. 92-99. – Mode of access: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19558>.
3. Raz K. Using of a Hydraulic Press in Production and Manufacturing of Large Rings / K. Raz, K. Vaclav // Procedia Engineering. – 2014. – Pp. 1064-1069. – Mode of access: <https://doi.org/>

- [10.1016/j.proeng.2014.03.091](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.091).
4. A criterion for void closure in large ingots during hot forging / X-X. Zhang, Z-S. Cui, W. Chen, Y. Li // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209 (4). – Pp. 1950-1959. – Mode of access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>.
 5. Cechura M. Development and innovations of existing design solutions of forming machines: Research report, CK-SVT-WP11, CVTS / M. Cechura, J. Smolik. – Pilsen, 2012.
 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. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(85\)90196-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(85)90196-7).
 7. Current forging technology for integrated type steel forgings for nuclear steam supply system components / S. Kawaguchi, H. Moritani, H. Tsukada, K. Suzuki, E. Murai, I. Sato // *Nuclear Engineering and Design*. – 1984. – Vol. 81, iss. 2. – Pp. 219-229. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(84\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0029-5493(84)90009-8).
 8. Suzuki K. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV / K. Suzuki, I. Sato, H. Tsukada // *Nuclear Engineering and Design*. – 1994. – Vol. 151, iss. 2-3. – Pp. 513-522. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90192-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90192-9).
 9. 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.
 10. 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. – Mode of access: <https://doi.org/10.1179/143307511x12858957675750>.
 11. Forging of heavy products for nuclear fuel containers / A. Pastore, E. Guyot, J. Dairon, M. Lemoine // 19th International forgemasters meeting. – Makuhari, 2014. – Pp. 244-247.
 12. Markov O.E. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting / O.E. Markov, M.V. Oleshko, V.I. Mishina // *Metallurgical and Mining Industry* [Online]. – 2011. – Vol. 3 (7). – Pp. 87-90. – Mode of access: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>.
 13. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / O.E. Markov, A.V. Perig, M.A. Markova, V.N. Zlygoriev // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 4, № 83. – Pp. 2159-2174. – Mode of access: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.
 14. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling / V. Kukhar, V. Burko, A. Prysiashnyi, E. Balalayeva, M. Nahnibeda // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 81, № 3. – Pp. 53-61. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063>.
 15. Markov O.E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces / O.E. Markov // *Steel in Translation*. – 2012. – Vol. 42, no. 12. – Pp. 808-810. – Mode of access: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.
 16. Zhbakov I.G. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process / I.G. Zhbakov, O.E. Markov, A.V. Perig // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 72, iss. 5-8. – Pp. 865-872. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>.
 17. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state / O.E. Markov, A.V. Perig, V.N. Zlygoriev, M.A. Markova, A.G. Grin // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 90, iss. 1-4. – Pp. 801-818. – Mode of access: <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.

References:

1. Girardin G., Jobard D., Perdriset F., Tollini P., Poitault I., Gingell A. Hollow Ingot: Thirty Years of Use to Control Segregation and Quality for Nuclear and Petrochemical Large Shells. *Proceedings of 18th International Forgemasters Meeting, Market and Technical Proceedings*, Pittsburgh, 2011, pp. 170-174.

2. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O., Shlyk S., Shapoval A. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 2018, vol. 7 (4), pp. 92-99. doi: **10.14419/ijet.v7i4.3.19558**.
3. Raz K., Vaclav K. Using of a hydraulic press in production and manufacturing of large rings. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 1064-1069. doi: **10.1016/j.proeng.2014.03.091**.
4. Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209 (4), pp. 1950-1959. doi: **10.1016/j.jmatprotec. 2008.04.051**.
5. Cechura M., Smolik J. Research report, CK-SVT-WP11, CVTS. *Development and innovations of existing design solutions of forming machines*. Pilsen, 2012.
6. Onodera S., Kawaguchi S., Tsukada H., Moritani H., Suzuki K., Sato I. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties. *Nuclear Engineering and Design*, 1985, vol. 84, iss. 2, pp. 261-272. doi: **10.1016/0029-5493(85)90196-7**.
7. Kawaguchi S., Moritani H., Tsukada H., Suzuki K., Murai E., Sato I. Current forging technology for integrated type steel forgings for nuclear steam supply system components. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, vol. 81, iss. 2, pp. 219-229. doi: **10.1016/0029-5493(84)90009-8**.
8. Suzuki K., Sato I., Tsukada H. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV. *Nuclear Engineering and Design*, 1994, vol. 151, iss. 2-3, pp. 513-522. doi: **10.1016/0029-5493(94)90192-9**.
9. Balcar M., Zelezný R., Sochor L., Fila P. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling. *Materials and technology*, 2008, vol. 42, iss. 4, pp. 183-188.
10. Lee S., Lee Y., Moon Y. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot. *Materials Research Innovations*, 2011, vol. 15, iss. sup 1, pp. s458-s462. doi: **10.1179/143307511x12858957675750**.
11. Pastore A., Guyot E., Dairon J., Lemoine M. Forging of heavy products for nuclear fuel contain-ers. *19th International forgemasters meeting*. Makuhari, 2014, pp. 244-247.
12. Markov O. E., Oleshko M. V., Mishina V. I. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. *Metalurgical and Mining Industry*, 2011, vol. 3 (7), pp. 87-90 Available at: www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments (accessed 10 December 2020).
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*, 2015, vol. 83, no. 9-12, pp. 2159-2174. doi: **10.1007/s00170-015-8217-5**.
14. Kukhar V., Burko V., Prysiashnyi A., Balalayeva E., Nyhnibeda M. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 81, no. 3, pp. 53-61. doi: **10.15587/1729-4061.2016.72063**.
15. Markov O.E. Forging of large pieces by tapered faces. *Steel in Translation*, 2012, vol. 42, no. 12, pp. 808-810. doi: **10.3103/s0967091212120054**.
16. 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, vol. 72, iss. 5-8, pp. 865-872. doi: **10.1007/s00170-014-5727-5**.
17. Markov O.E., Perig A.V., Zlygoriev V.N., Markova M.A., Grin A.G. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 90, iss. 1-4, pp. 801-818. doi: **10.1007/s00170-016-9378-6**.

Рецензент: П.Б. Абхарі
д-р техн. наук, проф., ДДМА

Стаття надійшла 30.03.2021