

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ КОНУСНИХ ОБИЧАЙОК ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ

О. С. Марков, М. С. Косілов, Ю. О. Іванова, В. В. Коткова

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID: 0000-0001-9377-9866; 0000-0001-6412-3366; 0000-0002-4145-9665

В. В. Панов

ПрАТ «Енергомашспецсталь»

ORCID: 0000-0002-2373-319X

У роботі був експериментально досліджений технологічний процес кування конусних обичайок з виступом. Суть способу полягає у розкочуванні пустотілої ступінчастої заготовки бойком зі східчастим профілем. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень на свинцевих моделях. Розроблена методика дозволила встановлювати залежності змінення форми ступінчастої пустотілої заготовки при деформуванні її ступінчастої бойком. У дослідженні варіювалася відносна висота виступу ступінчастої вихідної заготовки в інтервалі 2,2...2,5. Це дослідження було проведено задля отримання інформації стосовно кількісної оцінки формозмінення, а також встановлення придатності цього способу кування для отримання конусних обичайок з виступом. Для розробки технологічного процесу кування конусних обичайок з виступом технологу треба знати рекомендації з утворення конусності на поковці залежно від вихідних розмірів ступінчастої пустотілої заготовки, а також ступеня її деформування. На основі експериментального моделювання були встановлені закономірності зміни ступеня деформацій у стінки поковки для різних товщин стінок та ступенях обтискання при куванні ступінчастим бойком. Крім цього, була встановлена зміна відносних діаметрів отвору d_n/L_n в залежності від відносного ступеня деформації уступу ϵ_y для заготовок з $D_y/d_{cp} = 2,05$. Це дало змогу встановити конусність обичайок, яка з'являється при куванні даним методом. Проведені дослідження дозволило встановити, що дійсно кування ступінчастим деформуючим інструментом приводить до утворення конусності на обичайці зі збереженням виступу. Це пояснюється обтисканням уступу вихідної заготовки без деформування виступу. В результаті відбувається більш тангенціальний плин металу з боку уступу ніж з боку виступу. За результатами досліджень було визначено, що кування ступінчастих конусних обичайок можливе. Що розширює технологічні можливості виробництва крупногабаритних обичайок з виступами. Це дозволить не накривати напуском ступінчастий перехід та зменшити витрати металу.

Ключові слова: конусна обичайка, ступінчаста обичайка, розкочування, ступінчастий бойок, конусність, ступінчастий профіль.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В останні роки кількість крупногабаритних 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 обичайки, у тому числі конусної форми. Такі поковки відносяться до відповідальних і до них пред'являються високі вимоги по ізотропності механічних властивостей, внутрішньої структури та ін. Більшість обичайок виготовляються з використанням операції розкочування. Однак конусні обичайки на сьогоднішній день виготовляються механічною обробкою циліндричних товстостінних заготовок, 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 технологічного процесу виготовлення крупногабаритних конусних обичайок зі східчастим профілем є використання пустотілих східчастих заготовок (злитків) і одержання поковки, яке повторює контури деталі. Пустотілі злитки дозволяють знизити трудомісткість кування крупногабаритних обичайок 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 ви-

ключити перерізання волокнистої будови металу й зменшити витрата металу при механічній обробці.

Першим напрямком удосконалення процесу виготовлення крупногабаритних обичайок, у тому числі й конусних, є використання злитків нової конфігурації. Низька якість ковальських злитків обумовлюється наявністю в злитках внутрішніх дефектів металургійного походження. При куванні крупногабаритних обичайок ці дефекти повинні бути заварені або вилучені з поковки. На сьогоднішній день відомі різні способи підвищення якості ковальських злитків, але всі вони мають свої обмеження й призначення. Тому на першому етапі потрібно розглянути злитки, які використовуються для кування пустотілих конусних обичайок зі східчастим профілем.

Аналіз результатів поздовжнього й поперечного розрізу злитків показує пористість і тріщини в центрі, які повинні бути вилучені в процесі кування [2, 3]. Одним з типових дефектів звичайних злитків є осьова пористість, яка супроводжується включеннями й макрорілками [4]. За отриманим даними роботи [4] було проведено 3D моделювання, яке дозволило встановити оптимальні температуру й швидкість кристалізації для зменшення осьової пористості.

У роботах [5, 6] встановлено, що застосування охолоджуваної прибуткової надставки для злитків зі зворотною конусністю збільшує глибину розташування усадочної раковини й концентрує її уздовж осі, що у свою чергу знижує коефіцієнт використання металу на 7%. Це може привести до потрапляння

внутрішніх дефектів у тіло поковки, що знизить якість крупногабаритних обичайок.

У роботі [7] описані результати кування корпусу реакторного блоку зі звичайного злитка масою 190т. Технологія передбачала осадження й прошивання. Після чого заготовка протягувалась на конічний оправці й розкочена на дорні вузьким бойком. Досліджувана технологія кування злитка передбачала два нагрівання для осадження й для прошивання, що приводить до істотного підвищення витрат енергосіїв при куванні. Більше того, у статті відсутні технологічні рекомендації щодо ступеня обтиснення, яке робиться за один прохід розкочування, як основного параметра при куванні пустотілих заготовок.

На початковій стадії кування звичайного злитка необхідно внутрішні дефекти сконцентрувати в центрі злитка [8]. Після цього злиток осаджується, щоб зменшити висоту й збільшити діаметр заготовки. Це підвищує однорідність розподілу деформацій і збільшує пророблення структури. Щоб вилучити дефекти крупного злитка операцією прошиванням, дефект у процесі кування повинні розташовуватися в центрі злитка, це вимагає розвитку процесів кування, у яких будуть оптимізовані форма й розміри інструмента. На основі вдосконалювання техпроцесу кування компанія JWS виготовила зі злитка масою 350т обичайку із фланцем.

У роботі [9] було встановлено, що поковки, яка виготовлена з пустотілого злитка, спрощує технологічний процес кування обичайок. Застосування пустотілих злитків для виготовлення поковок із отвором, одночасно з підвищенням якості виробів, забезпечує скорочення витрат металу на 25–30 %. Але в цьому випадку в середині стінки пустотілого злитка може локалізуватися рихлість, що приведе до зниження якості.

Sheffield Forgemasters Ltd. (USA) впровадила пустотілі злитки в номенклатуру своєї продукції [10] для кування обичайок. Однак рекомендацій для вибору оптимальних геометричних параметрів пустотілої заготовки в роботі не наведені. Більше того, не зазначено, яким способом вони впливають на механічні властивості виробу, а також відсутні рекомендації з режимів деформування, які забезпечують заявлені властивості поковки.

Для розробки оптимальних рекомендацій при куванні масивних поковок компанією Creusot-loirc-Industrie був установлений вплив внутрішніх дефектів ковальських заготовок на утворення тріщин [11, 12]. Для обичайок ефективним розв'язком є використання пустотілих злитків з контролем розташування зон ліквіації. Однак у статті не приводять результати досліджень і не дають рекомендацій щодо параметрів процесу кування обичайок. 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, які збігалися б з контуром деталі. Це дозволить виключити перерізанню внутрішньої 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 великогабаритні кільця з діаметром до 10 метрів і висотою до 6 метрів обумовлений розвитком атомних електростанцій [13]. Виробництво обичайок такої висоти дозволяє спростити конструкцію реактора. Щоб виготовити обичайки із зазначеними розмірами, необхідно створити спеціальне устаткування для зовнішнього розкочування. Такий розкочувальний пристрій повинний приводитися в дію гідравлічним кувальним пресом. Однак подібне оснащення має обмежені технологічні можливості.

Метою роботи є зниження витрати металу й розширення технологічних можливостей при куванні конусних пустотілих заготовок на основі розробки нових технологічних процесів розкочування обичайок зі східчастою поверхнею. Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлені наступні завдання:

- вибрати методи й розробити методіку для досліджень способів розкочування східчастих конусних обичайок;

- провести експериментальні дослідження операції розкочування конусних обичайок зі східчастим профілем і встановити залежності формозміни заготовки від співвідношень розмірів вихідної заготовки й величини обтиснення.

МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Метод скінчених елементів (МСЕ) має високу точність при визначенні параметрів напружено-деформованого стану (НДС), у тому числі й для процесів гарячого пластичного деформування, про що свідчать значна кількість робіт [14–17]. Однак МСЕ є теоретичним методом і вимагає експериментальної верифікації отриманих результатів [18].

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 бойок. Бойок загальною довжиною 130 мм мав сходинок висотою 7 мм, і довжину виступу 40 мм. Дорн 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 зусиллям 100 кН, швидкість деформування 200 мм/хв. Був виготовлений інструмент для розкочування – східчастий бойок і оправка (рис. 1).

Зразки нагрівалися до температури 1100 °С з витримкою 10 хв в електричній печі. Обтиснення становило 1 мм за прохід як при протягуванні, так і при розкочуванні. Для розкочування застосовувалися дорн Ø25 мм (рис. 1, б) і бойки для з відповідним профілем.

При розкочуванні східчастих заготовок відбувається нерівномірне деформування угосту й виступу. У результаті це приводить до виникнення конусності. Експериментальними дослідженнями необхідно встановити залежності формозміни при розкочуванні східчастим бойком.

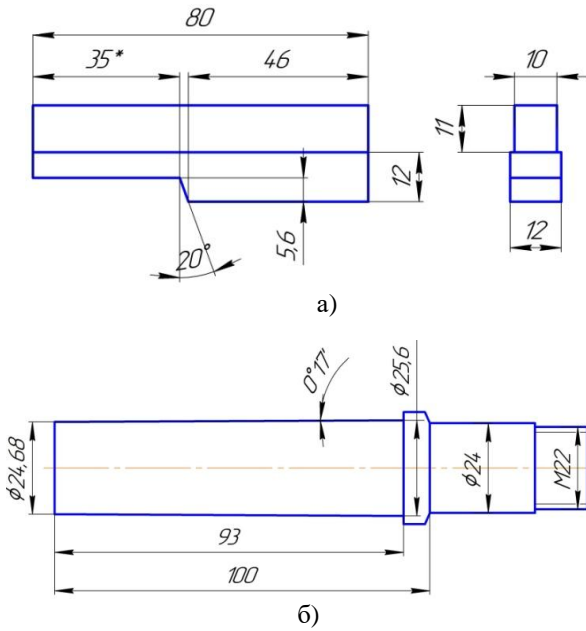


Рисунок 1 – Інструмент для експериментальних досліджень: а) – східчастий бойок; б) – дорн (оправка)

На рис. 2 зображена розкочена східчаста заготовки з відносним діаметром уступу $D_y/d_{cp} = 2,05$. В результаті розкочування зразки мали конусну форму з більшим діаметром уступу ніж виступу.



Рисунок 2 – Результати експерименту – свинцеві заготовки після розкочування

Аналіз результатів відносних ступенів деформації виступу й уступу в процесі розкочування дозволив установити, що з кожним обтисненням заготовки відносний ступінь деформації металу в уступі більше, чим у виступі (рис. 3). Установлено, що зменшення відносного діаметра виступу, відповідно й товщини стінки виступу, приводить до збільшення різниці між відносними ступенями деформації. Це пояснюється тим, що при одночасному обтисненні виступу уступу на однакову абсолютну величину більш інтенсивне збільшення діаметра буде відбуватися в місці тонкої стінки (уступу). Це пояснюється більшою відносною деформацією металу, яка сприяє збільшенню діаметра в уступі поковки.

Нерівномірна зміна відносних діаметрів отворів приводить до утворення конусної форми поковки. Ко-

нусність поковки залежить від трьох основних параметрів: діаметра отвору виступу $d_{п.в.}$, діаметра отвору уступу $d_{п.у.}$. У зв'язку із цим, доцільним буде досліджувати взаємодія цих двох складових конусності при розкочуванні.

Аналізуючи зміну відносних діаметрів отвору виступу й уступу в процесі розкочування (рис. 4) було встановлено, що діаметри отвору уступу збільшуються інтенсивніше ніж виступу. Зі зменшенням відносних діаметрів виступів D_* / d_{cp} зменшуються відносні діаметри отворів виступів $d_{н.в.} / L_n$, крива, що відповідає $D_* / d_{cp} = 2,5$, проходить вище, а $D_* / d_{cp} = 2,3$ – нижче. З іншого боку, зі зменшенням відносних діаметрів виступів D_* / d_{cp} збільшуються відносні діаметри отворів уступів $d_{н.у.} / L_n$, крива, що відповідає $D_* / d_{cp} = 2,3$, проходить вище, а $D_* / d_{cp} = 2,5$ – нижче.

У результаті, для досліджуваної схеми розкочування заготовок із $D_y / d_{cp} = 2,05$ зі зменшенням відносного діаметра D_* / d_{cp} різниця між відносними діаметрами отворів виступу $d_{н.в.} / L_n$ й уступу $d_{н.у.} / L_n$ постійно зростає, що приводить до утвору конусності.

Для відносного діаметра виступу заготовки $D_* / d_{cp} = 2,5$, характерна інша закономірність. На початку розкочування відносний діаметр отвору виступу більший, ніж відносний діаметр отвору уступу ($d_{н.в.} / L_n > d_{н.у.} / L_n$), що супроводжується деформуванням виступу (уступ на початку не деформується). Досягаючи відносний ступінь деформації виступу 0,25, діаметри отвору виступу й уступу вирівнюються ($d_{н.в.} / L_n = d_{н.у.} / L_n$), після чого відбувається інтенсивне зростання діаметра отвору уступу ($d_{н.в.} / L_n < d_{н.у.} / L_n$).

Окрема увагу потрібно приділити формозміні зразка із $D_* / d_{cp} = 2,5$. Для нього на початковій стадії розкочування утворювалася конусна форма з більшим діаметром виступу. При $\epsilon_y = 0,25$ форма зразка стала циліндричною, діаметри отвору по обидва боки рівні. На рисунку 4 цій умові відповідає перетинання двох кривих для $D_* / d_{cp} = 2,5$. В міру збільшення обтиснення ступінь деформації уступу збільшується, що сприяє утворенню максимального діаметра уступу. Для інших двох зразків конусність постійно збільшується.

Аналіз отриманих результатів дозволив установити ефективні режими процесу розкочування конусних обичайок і його переваги перед існуючим способом деформування:

- використання східчастої заготовки при розкочуванні дозволило виготовити конусні обичайки, що не було можливе раніше. Це пояснюється тим, що збільшення діаметра уступу відбувається інтенсивніше, що й надає заготовці конусну форму;

- використання східчастого бойка дозволяє виготовити обичайки зі східчастим профілем, що дозволило виключити призначення зайвого напуску й дало можливість підвищити коефіцієнт використання металу на 7%;

– розкочування східчастим бойком дозволило виготовити поковки по контуру деталі, що виключило операцію механічного виготовлення уступу й дозволило знизити верстато-години при механічній обробці, а також підвищити якість металу в зоні переходу виступу в уступ за рахунок виключення перерізання волокон структури металу.

Однак у роботі не представлені результати можливостей запропонованого способу для виготовлення конусних обичайок із розширенням у бік виступу заготовки. Тому подальші дослідження слід направити на встановлення впливу геометрії східчастої заготовки й форми інструмента на можливість збільшення діаметра кування виступу при розкочуванні.

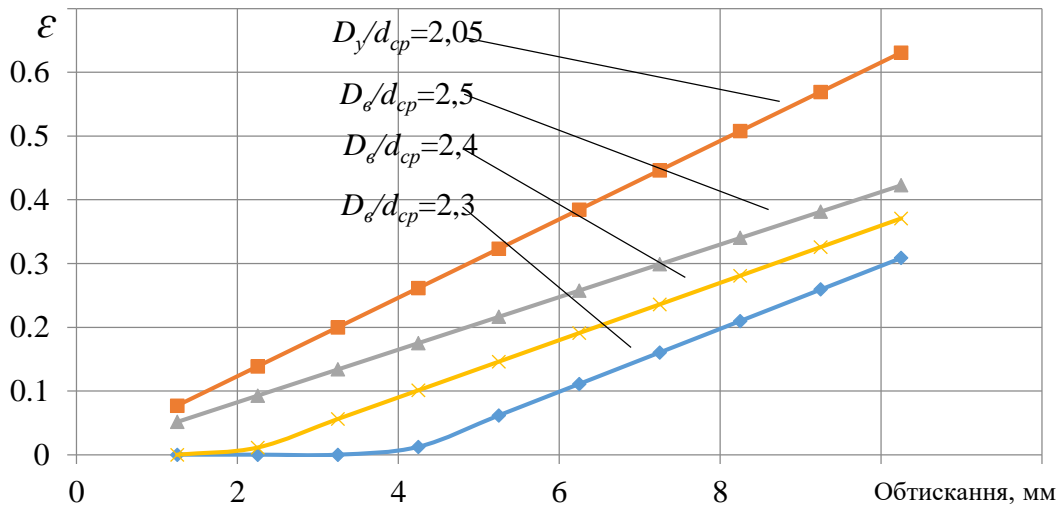


Рисунок 3 – Зміна відносних ступенів деформації (ϵ) від обтиснення для заготовок з різними D_v/d_{cp}

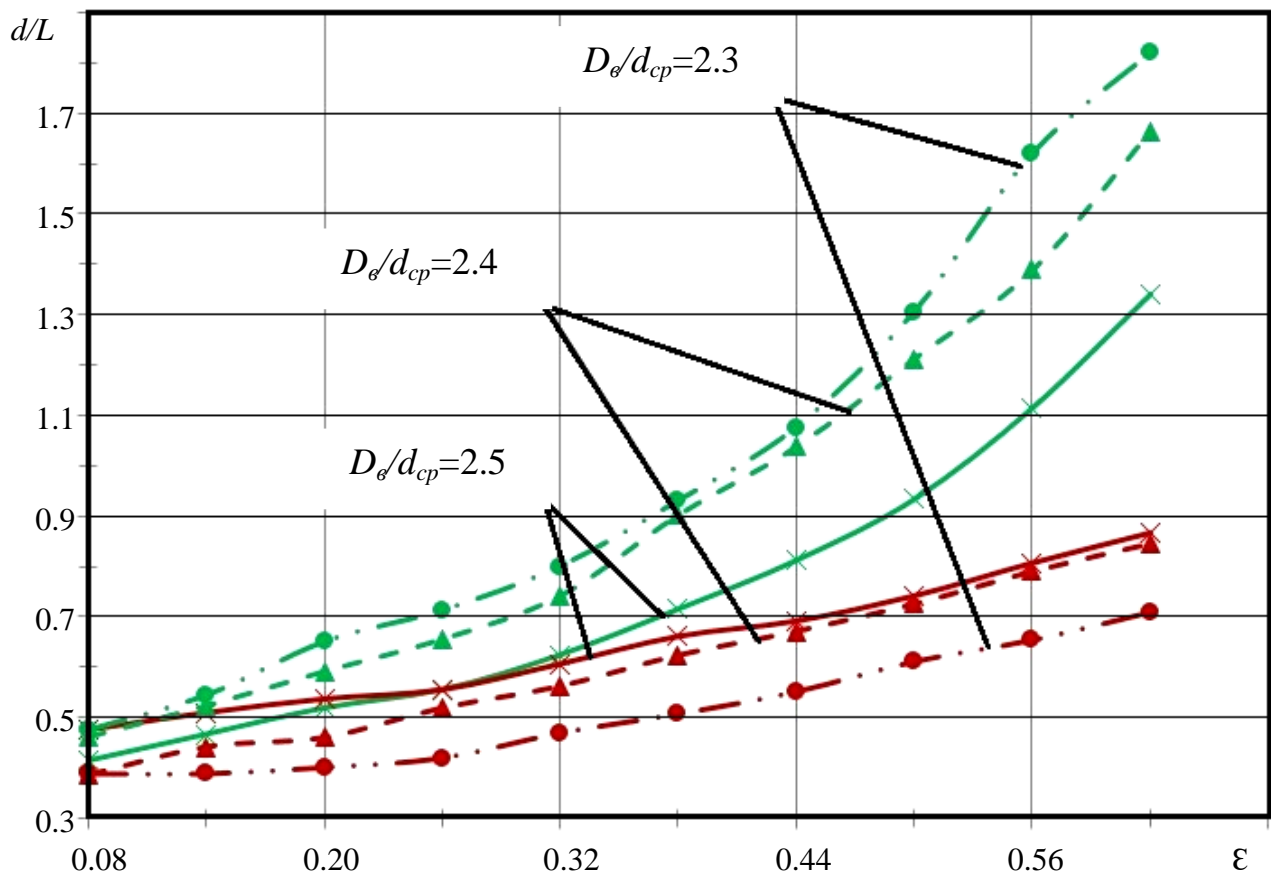


Рисунок 4 – Зміна відносних діаметрів отвору d_n/L_n від відносного ступеня деформації уступу ϵ_y

ВИСНОВКИ. Розроблена спеціальна методика для досліджень способів розкочування східчастих конусних обичайок. Установлено, що при розкочу-

ванні східчастої заготовки уступ інтенсивніше збільшується в діаметрі, ніж виступ, через що поковка здобуває конусну форму. Це пояснюється різними

ступенями деформації, які виникають у виступі й уступі. Причому ступінь деформації в уступі збільшується інтенсивніше, ніж у виступі. На основі експериментальних досліджень операції розкочування конусних обичайок було встановлено, що збільшення відносного діаметра уступу D_y/d_p приводить до збільшення ступеня деформації уступу, а відповідно до збільшення діаметра одержуваного уступу. У результаті різниці виступу й уступу впливає на зміну конусності під час розкочування.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>.
2. Xu B., Sun M., Li D. The void close behavior of large ingots during hot forging. *19th International forgemasters meeting*, 29.09–3.10.2014. Makuhari. 2014, pp. 141–145.
3. 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.
4. Wang. J., Fu P., Liu H. et al. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot. *Materials and design*. 2012, 35, pp. 446–456.
5. Kolodkin M. V., Zhul'ev S. I., Dub V. S. et al. Choice of a rational scheme for casting of a forging ingot for producing hollow. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, 6, pp. 544–547.
6. Shamrei V. A., Zhul'ev S. I. New shape of forging ingot for making hollow forged products. *Metallurgist*. 2007, 11, pp. 617–623.
7. Shinozaki T., Komura T., Fujitsuna N. et al. Fabrication and properties of the heavy-wall ring forgings with modified 9Cr-1Mo steel for high-temperature and high-pressure reactor. *Proceedings of the 19th International forgemasters meeting*, 29.09 – 3.10.2014. Makuhari. 2014, pp. 397–400.
8. Tanaka Y. Reactor pressure vessel components: processing and properties. Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants. *Woodhead Publishing. Energy*; 26. Sawston, 2015, 1, pp. 26–43.
9. Jaouen O., Costes F., Lasne P., Barbelet M. From Hollow Ingot to Shell with a Powerful Numerical Simulation Software Tool. *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings*. Pittsburgh, USA. 12-15 September, 2011, pp. 513-518.
10. Tomlinson M., Talamantes-Silva J., Davies P. The development of hollow ingot technology at Sheffield Forgemasters International Ltd. *18th International forgemasters meeting*, 12-15 September 2011. Pittsburgh. 2011, pp. 175-178.
11. 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. *In 18th International Forgemasters Meeting*. 2011. P. 170–174.
12. 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*. 2018. Vol. 7, Issue 4. P. 92-99. DOI: [10.14419/ijet.v7i4.3.19558](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19558).
13. Raz K., Vaclav K. Using of a Hydraulic Press in Production and Manufacturing of Large Rings. *Procedia Engineering*. 2014. P. 1064–1069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.091>.
14. 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. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
15. Kukhar V., Burko V., Prysiashnyi A., Balalayeva E., Nahnibeda 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. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063>.
16. Markov O.E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42, No. 12. P. 808 – 810. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>
17. Zhtpsov 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
18. 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*. 2017. P. 801–818. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>

EXPERIMENTAL STUDY OF FORGING PROCESS OF CONICAL RINGS WITH A COMPLEX PROFILE

O. Markov, M. Kosilov, U. Ivanova, V. Kotkova

Donbas State Engineering Academy

ORCID: 0000-0001-9377-9866; 0000-0001-6412-3366; 0000-0002-4145-9665

V. Panov

Private Joint Stock Company «EMSS»

ORCID: 0000-0002-2373-319X

Purpose. Reduction of metal consumption and expansion of technological possibilities at forging of conical hollow workpieces on the basis a development of new technological processes of shells rolling with a stepped surface. **Methodology.** Researches have been based on the laws of physical and geometric similarity of the forging process of large forgings. A technique for realization of experimental studies on lead models has been developed. The developed technique allowed to establish the dependences of the shape changing of the stepped hollow workpiece during process deformation by stepped dies. The relative height of stepped protrusion for initial workpiece has been varied in the range of

2.2 ... 2.5 in the study. **Results.** Based on experimental modeling the regularities of deformations degree in forging wall for various wall thicknesses and degrees of reduction during forging by tapered die have been established. In addition, a change in the relative diameters of the hole depending on the relative degree of deformation of the ledge of the workpieces has been found. This made it possible to establish the conicity of the shells, which appears during forging by this method. **Originality.** The technological process of forging conical shells with a protrusion has been experimentally investigated in the work. Essence of the method is to rolling of the hollow stepped workpiece with a stepped profile. **Practical value.** To develop the technological process of forging conical shells with the protrusion of the technologist, it is necessary to know the recommendations for the formation of taper on the forging depending on the initial dimensions of the stepped hollow workpiece, as well as the degree of its deformation. According to the results of research have been determined that the forging of stepped conical shells is possible. It expands technological possibilities of production of large-sized shells with ledges. This will allow not covering the stepped transition with overhang and reducing metal consumption. **Conclusions.** It has been established that rolling a stepped workpiece, the ledge increases more intensively in diameter than the protrusion, due to which the forging acquires a conical shape. This is due to the different deformation degree that occur in the ledge and protrusion. Moreover, the degree of deformation in the ledge increases more intensively than in the protrusion. It has been found that increasing the relative diameter of the ledge leads to an increase in the degree of deformation of the ledge, and accordingly to increase the diameter of the resulting ledge. As a result, the difference between the protrusion and the ledge affects on the change of the taper during rolling.

Key words: conical shell, step shell, rolling, step die, conicity, step profile.

REFERENCES

1. Markov, O., Zlygoriev, V., Gerasimenko, O., Hrudkina, N., Shevtsov, S. (2018). Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1-95), 16-24. doi:10.15587/1729-4061.2018.142674
2. Xu, B., Sun, M., & Li, D. (2012). The void close behavior of large ingots during hot forging. *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*, 48(10), 1194-1200. doi:10.3724/SP.J.1037.2012.00339
3. Rutsikii, D. V., Zyuban, N. A., & Chubukov, M. Y. (2016). Features of structure and solidification of extended double ingots for hollow forgings. part 1. *Metallurgist*, 60(1-2), 156-163. doi:10.1007/s11015-016-0267-x
4. Wang, J., Fu, P., Liu, H., Li, D., & Li, Y. (2012). Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot. *Materials and Design*, 35, 446-456. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.056
5. Kolodkin, M. V., Zhul'ev, S. I., Dub, V. S., Romashkin, A. N., & Mal'ginov, A. N. (2010). Choice of a rational scheme for casting of a forging ingot for producing hollow forgings. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010(6), 544-547. doi:10.1134/S0036029510060169
6. Shamrei, V. A., & Zhul'ev, S. I. (2007). New shape of forging ingot for making hollow forged products. *Metallurgist*, 51(11-12), 617-623. doi:10.1007/s11015-007-0112-3
7. Shinozaki, T., Komura, T., Fujitsuna, N. et. al. (2014). Fabrication and properties of the heavy-wall ring forgings with modified 9Cr-1Mo steel for high-temperature and high-pressure reactor. 19th International forgemasters meeting. Makuhari, 397-400.
8. Tanaka, Y. (2015). Reactor pressure vessel (RPV) components: Processing and properties. *Irradiation embrittlement of reactor pressure vessels (RPVs) in nuclear power plants* (pp. 26-43) doi:10.1533/9780857096470.1.26
9. Jaouen, O., Costes, F., Lasne, P., Barbelet, M. (2014). From hollow ingot to shell with a powerful numerical simulation software tool. 19th International forgemasters meeting. Makuhari, 513-518.
10. Tomlinson, M., Talamantes-Silva, J., Davies, P. (2011). The development of hollow ingot technology at Sheffield Forgemasters International Ltd. 18th International forgemasters meeting. Pittsburgh, 175-178.
11. Girardin, G., Jobard, D., Perdriset, F., Tollini, P., Poitrault, I., Gingell, A. (2011). Hollow Ingot: Thirty Years of Use to Control Segregation and Quality for Nuclear and Petrochemical Large Shells. In 18th International Forgemasters Meeting, Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, 170-174.
12. Dragobetskii, V., Zagirnyak, M., Naumova, O., Shlyk, S., & Shapoval, A. (2018). Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4), 92-99. doi:10.14419/ijet.v7i4.3.19558
13. Raz, K., & Vaclav, K. (2014). Using of a hydraulic press in production and manufacturing of large rings. Paper presented at the *Procedia Engineering*, 69 1064-1069. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.091
14. Markov, O. E., Perig, A. V., Markova, M. A., & Zlygoriev, V. N. (2016). Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9-12), 2159-2174. doi:10.1007/s00170-015-8217-5
15. Kukhar, V., Burko, V., Prysiaznyi, A., Balalayeva, E., & Nyhnbida, M. (2016). Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(81)), 53-61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063>
16. Markov, O. E. (2012). Forging of large pieces by tapered faces. *Steel in Translation*, 42(12), 808-810. doi:10.3103/S0967091212120054
17. Zhbakov, I. G., Markov, O. E., & Perig, A. V. (2014). Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5-8), 865-872. doi:10.1007/s00170-014-5727-5
18. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., & Grin, A. G. (2017). A new process for forging shafts with convex dies. research into the stressed state. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 801-818. doi:10.1007/s00170-016-9378-6

Стаття надійшла 31.03.2021.