

# Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування

О.Є. Марков • М.С. Косілов • О.В. Герасіменко • С.О. Шевцов

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

Received: 14 October 2017 / Accepted: 27 November 2017

**Анотація.** Підвищення безпеки, пришвидшення термінів будівництва та збільшення строку експлуатації атомних електростанцій є одним з головних напрямків розвитку енергетичної промисловості. З цієї точки зору, велика увага сьогодні приділяється виготовленню поковок, які поєднують у собі декілька деталей. Це вимагає застосування нових технологій з застосуванням не стандартного інструменту. Мета роботи – аналіз формозміни та деформованого стану конусної ступінчастої поковки при розкочуванні ступінчастої заготовки з одночасним деформуванням виступу та уступу. Моделювання виконувалося за допомогою методу скінченних елементів, який узгоджується з експериментальними даними. Експериментальні дослідження виконувалися на свинцевих моделях. Розкочування ступінчастої заготовки при одночасному деформуванні виступу та уступу призводить до виникнення конусної поковки. Конусність з боку уступу виникає на початковій стадії розкочування і під час всього процесу збільшується. Виникнення конусної форми пояснюється тим, що під час розкочування, при однаковій абсолютній деформації (хід бойка), уступ отримує більше накопиченої деформації через більш тонку стінку.

**Ключові слова:** Розкочування, деформований стан, обичайка, ступінчастий бойок, сумарна деформація, поковка

## Вступ

Вимоги, що до надійності і безпеки атомних електростанцій, стають жорсткішими через необхідність швидкого обслуговування і ремонту. Зменшенню кількості деталей при виготовленні реакторного блоку приділяється особлива увага і, як наслідок, виникає питання створення більших і суміщених елементів [1, 2].

Раніше більшість вузлів реакторного блоку зі змінюваним поперечним перерізом, виготовлялися за допомогою зварювання окремих деталей. Це ускладнювало виробництво, збільшувало час виготовлення, обмежувало термін експлуатації вузла і, як наслідок, усього реактора. Цей недолік був виправлений за допомогою кування поковок, які поєднували в собі декілька деталей. Однак при подальшій обробці відбувалися значні втрати металу, великий обсяг якого віддається механічно, а це означає, що значна його кількість потрапляє у відходи. Через значний об'єм металу, який потрібно видалити, відбувається швидкий знос ріжучого інструменту. Також мають місце значні нормо-години, які йдуть на механічну обробку. Це призводить до збільшення собівартості [3] виготовлення елементів реакторного блоку, які мають складний профіль.

У літературі наведено мало прикладів кування поковок зі змінюваним поперечним перерізом. Виготовлення подібних поковок часто відбувається на кольцерозкочувальних машинах або автоматах, що обмежує їх розміри. Отримання куванням зі змінюваним поперечним перерізом, найбільш близьких за формою до необхідної деталі, є актуальною проблемою для сучасної промисловості.

Відомий спосіб виготовлення поковок в формі усіченого конуса з постійною товщиною стінки, який передбачає розкочування ступінчастої заготовки у вигляді концентричних, які послідовно зменшуються в діаметрі від одного торця до іншого циліндричних уступів (рис. 1, а) [4, 5]. Однак в роботі не наведені параметри заготовок та параметри поковок, які з них отримуються, не вказані причини, які спричиняють виникненню конусності, та не вказані властивості отриманої поковки. Цей спосіб застосовувався японською компанією Japan Steel Works Ltd, при отриманні конусної частини корпусів ядерного реактора і парогенератора [1]. Даний спосіб застосовувався на заводах Siemens AG (KWU) та Thyssen Henrichshütte, Schmiedewerke Krupp-Klfsckner [6]. Однак в даних прикладах відсутні рекомендації стосовно параметрів заготовок та одержаних поковках.

Ступінчасту заготовку також запропоновано використовувати для отримання конічної поковки з циліндричним ділянкою (рис. 2, б) [7, 8]. Однак в даному випадку необхідно використовувати спеціальний інструмент для отримання циліндричної ділянки. Процес кування включає в себе наступні операції: протягування злитка, вирубка блоку, осадження, прошивання, протягування на оправці і формування ступінчастої заготовки. Далі за допомогою дорна і плоского бойка кується конусоподібна поковка. На останньому переході, використовується спеціальний пристрій, за допомогою якого кується пряма циліндрична ділянка. В роботі, досліджено процес формування конічної обичайки з циліндричною ділянкою для парогенератора АР1000. Авторами наведені результати експериментів, надано рекомендації що до параметрів заготовок для отримання поковок, але відсутня інформація про деформований стан, про ймовірні відхилення від потрібної форми.

Спосіб виготовлення конічної обичайки з двома циліндричними прямими ділянками (рис. 2) передбачає застосування заготовки з конусною зовнішньою поверхнею [9]. При розкочуванні такої заготовки (рис. 2, а) утворюється конічна поковка, за рахунок змінюваної товщини стінки. На останньому етапі (рис. 2, б) для отримання необхідної поковки використовувався боек і оправка сідлоподібної форми. В роботі проаналізований деформований стан, надані параметри заготовок для отримання поковок, наведені приклади промислового використання отриманих результатів та проаналізована мікроструктура поковок отриманих у виробничих умовах.

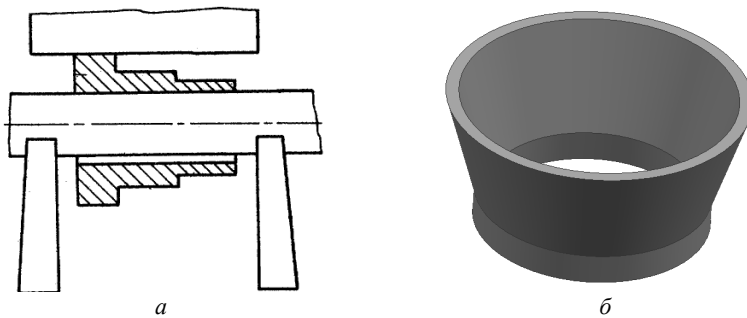


Рис. 1. Приклад використання ступінчастою заготовкою (а) для отримання конусної поковки (б)

### Мета

Мета роботи – аналіз формозміни та деформованого стану конусної ступінчастої поковки при розкочуванні ступінчастої заготовки з одночасним деформуванням виступу та уступу.

Для моделювання процесу розкочування, використовувалася програма DEFORM 3D (тимчасова ліцензія ДГМА). В основі програми закладено метод скінчених елементів, який є високоточним [10] та найбільше узгоджується з експериментальними даними [11, 12]. Заготовка та інструменти для моделювання процесу розкочування створювалася в системі тривимірного проектування КОМПАС-3D. Для моделювання використовувався дорн з діаметром 1240 мм. Боек для розкочування проектувався виходячи з форми та розмірів заготовки (рис.3). Ширина бойка складала 600 мм.

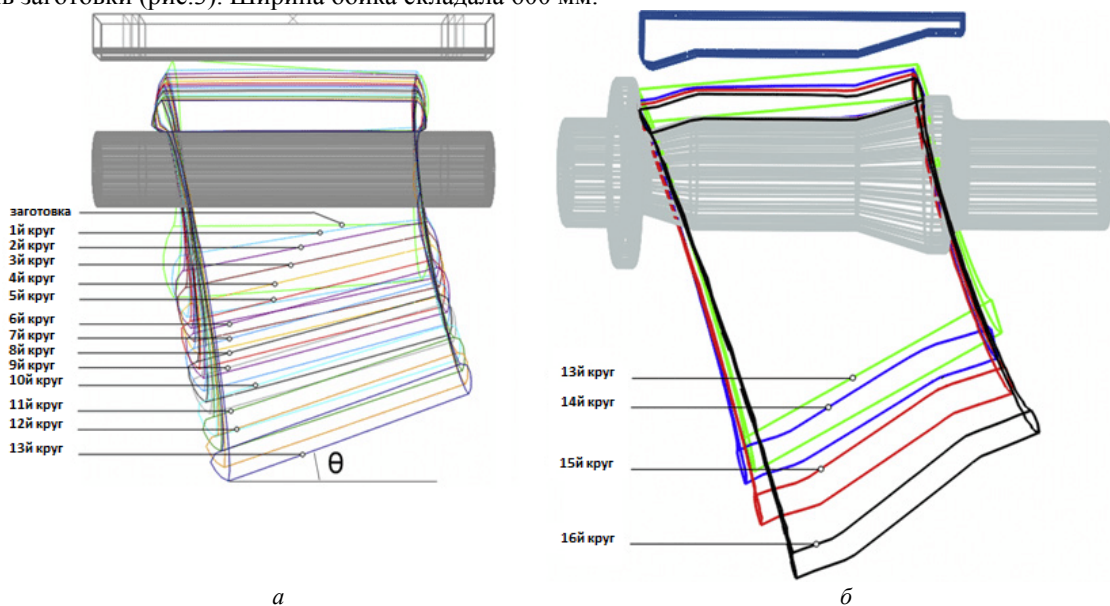


Рис. 2. Попереднє (а) та остаточне розкочування (б) при виготовленні конічної обичайки з двома циліндричними прямими ділянками

Для експериментального моделювання процесів розкочування використовувалися свинцеві моделі, у яких температура рекристалізації  $\approx 25^\circ\text{C}$ . Моделі отримувалися шляхом лиття свинцю у форму зі стрижнем з подальшою механічною обробкою. Для розкочування був виготовлений ступінчастий боек та підібраний дорн. З метою отримання більш точних розмірів використовувалися кільця шириною 19, 17, 16, 15 та 14 мм, з одного боку, та набір пластин, з іншого, які обмежували рух бойка.

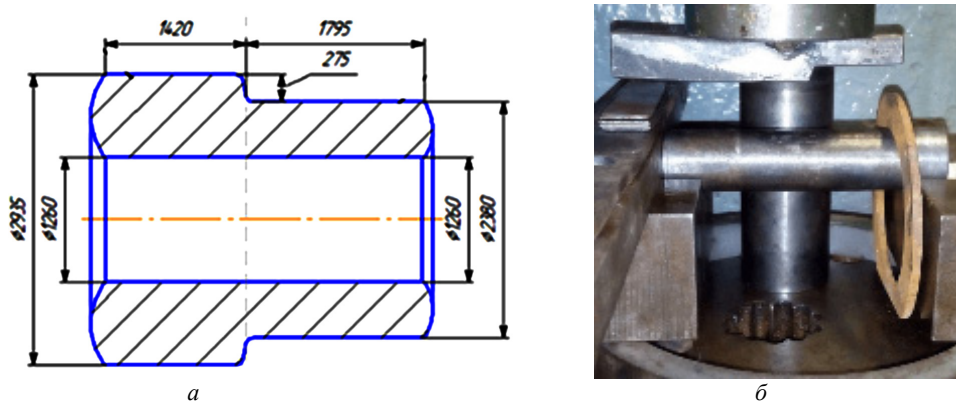


Рис. 3. Заготовка для моделювання (а) та оснастка для експерименту (б)

Аналіз результатів розкочування (рис. 4) дозволив виявити, що з боку уступу утворюється значно більший внутрішній діаметр ніж з боку виступу. Конусність складає 0,16 при ступені деформації уступу 0,4. Виступ і уступ деформувалися впродовж всього процесу одночасно. На кінцевій стадії розкочування уступ має більш високий ступінь накопиченої деформації ніж виступ (рис. 4, б), що впливає на формування поковки в процесі розкочування.

Аналіз результатів отриманих даних накопиченої деформації для вступу та для уступу в процесі розкочування (рис. 5) дозволив встановити, що з кожним натисканням бойка деформації у виділених точках зростають. При цьому уступ (крива 2) отримує більшу ступінь деформації ніж виступ (крива 1). Це також підтверджується розрахунками ступеня деформації за перше коло розкочування.

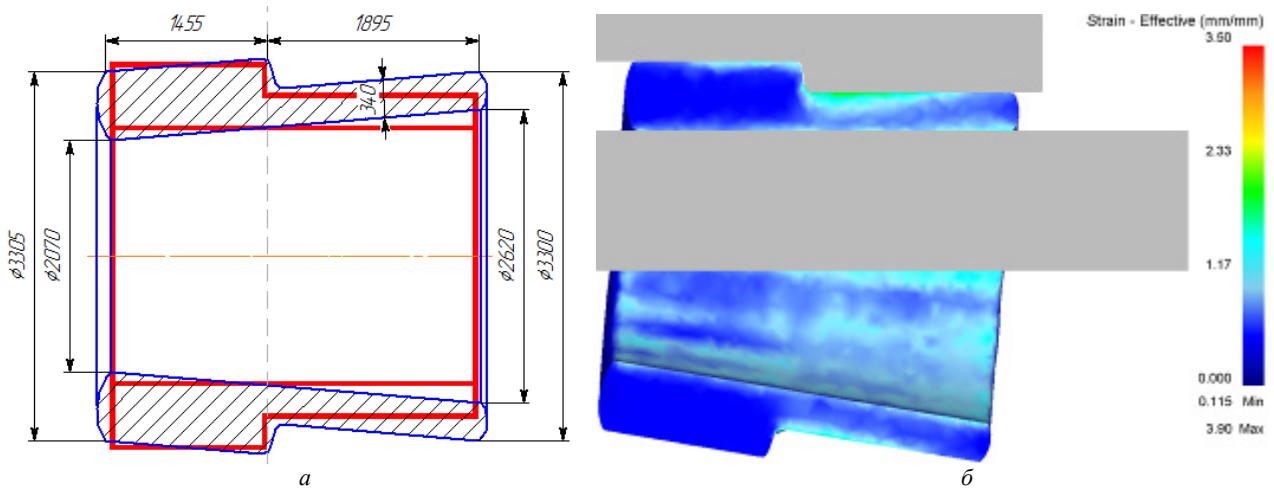


Рис. 4. Ескіз (а) та деформований стан поковки (б) при ступені деформації 0,35

Ступінь деформації при зменшенні товщини стінки виступу на 60 мм (хід бойка за одне натискання)

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{S} = \frac{60}{(2935 - 1260)/2} * 100\% = 7,1\%$$

Ступінь деформації при зменшенні товщини стінки уступу на 60 мм

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{S} = \frac{60}{(2380 - 1260)/2} * 100\% = 10,7\%$$

де S – товщина стінки.

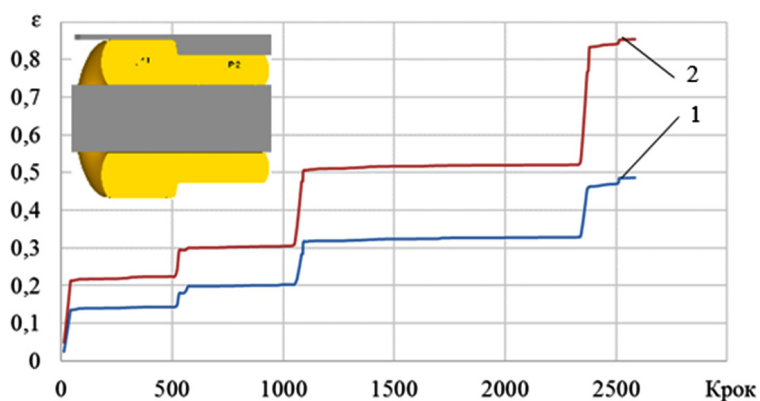


Рис. 5. Графічна закономірність накопичення деформації в процесі розкочування для вступу (1) та для вступу (2)

З самого початку процесу розкочування, при однаковій абсолютній деформації, хід бойка 60 мм, уступ отримує більшу ступінь деформації ніж виступ, що підтверджується результатами моделювання та наведеними розрахунками. Не зважаючи на те, що хід бойка на кожному колі розкочування однаковий, ступінь деформації для кожного кола розкочування буде більшою ніж для попереднього, що пов'язано зі зменшенням товщини стінки. На графіку це відображено тим, що кожна ступінь відповідної кривої більша за попередню. Ступінчастий вид кривих пов'язаний моментом натискання бойка у відмічених точках. Тобто, проводилося натискання, далі поворот, наступне натискання і так по колу до потрібної відстані між інструментами. Після кожного кола відмічені точки потрапляли під бойок. Таким чином кожні різкі збільшення кривих відповідають початку нового кола розкочування.

На рисунку 6 зображені заготовка (а) та поковка (б) отримана після розкочування з відносним діаметром уступу заготовки  $\frac{D_y^{заг}}{d_{сп}^{заг}} = 1,85$ . Розкочування відбувалося до відстані між інструментами (абсолютна деформація) 6 мм, що відповідало ступені деформації 0,55. Результати експерименту підтверджують результати моделювання – утворилася конусність з більшим діаметром отвору з боку уступу.



Рис. 6. Заготовка (а) та поковка (б) отримана після розкочування при ступені деформації 0,3

Аналіз отриманих результатів формозмінення відносних діаметрів отвору з боку виступу та уступу від ступеня деформування при  $\frac{D_y^{заг}}{d_{сп}^{заг}} = 1,85$  (рис. 7) дозволив встановити, що зі збільшенням ступеня деформації відносний діаметр отвору з боку уступу збільшується інтенсивніше ніж з боку виступу.

Результати експериментів дозволили встановити, що на початковому етапі розкочування відносний діаметр з боку уступу  $d_y^{нок} / L_{заг}^{нок}$  зростає інтенсивніше ніж відносний діаметр з боку виступу  $d_e^{нок} / L_{заг}^{нок}$ . Інтенсивніше зростання відносного діаметру з боку уступу можна пояснити тим, що з кожним обтисканням сумарна ступінь деформації уступу зростає швидше ніж сумарна ступінь деформації виступу.

Введення показника сумарного ступеня деформації  $\epsilon^\Sigma$  дозволяє кількісно оцінити різницю між збільшенням діаметрів поковки з боку виступу та уступу при розкочуванні східчастим бойком. У цьому зв'язку були побудовані графічні закономірності  $\epsilon^\Sigma$  від ступеня обтискання.

Аналіз отриманих результатів накопиченої (сумарної) деформації виступу та уступу, в залежності від обтискань (рис. 8), дозволяє виявити, що зі збільшенням обтискання заготовки виникає збільшення сумарної деформації металу виступу та уступу за параболічною закономірністю.

Сумарна деформація металу уступу більша за величиною ніж деформація виступу. Сумарна деформація уступу зростає одразу, тому, що виступ і уступ деформуються одночасно з першого ж натискання. Це призводить до збільшення відносного діаметра з боку уступу (див. рис. 7). При одночасному обтисканні виступу та уступу на однакову абсолютну величину більш інтенсивніше збільшується діаметр з боку уступу. Це пояснюється різною ступеню деформації металу виступу та уступу через різну товщину стінки. Як результат уступ деформується більше, так як тангенціальна деформація металу в уступі більша. Це і призводить до збільшення різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу та, як наслідок до збільшення конусності поковки.

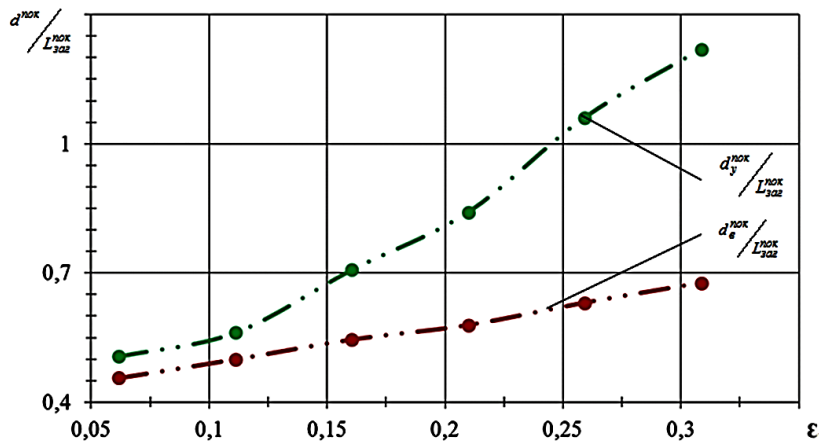


Рис. 7. Графічна закономірність зміни відносного діаметру отвору виступу  $d_e^{нок} / L_{заг}^{нок}$  та відносного діаметру отвору

уступу  $d_y^{нок} / L_{заг}^{нок}$  заготовки в процесі розкочування від ступеня деформування

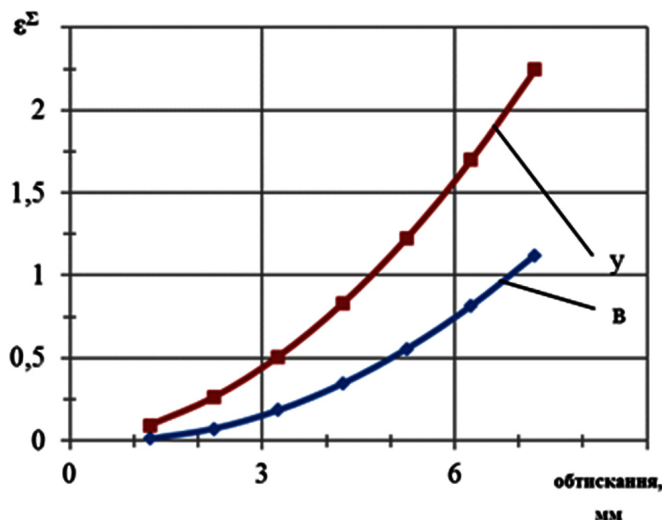


Рис. 8. Графічні закономірності накопиченої деформації від обтискання

Встановлені у роботі закономірності дозволили розробити рекомендації, які мають важливий практичний інтерес. Розроблена технологія дозволяє виготовляти східчасті поковки (наприклад, обичайки зони патрубків атомного реактору) без конусності. Це стає можливим за рахунок того, що більша деформація уступу поковки призводить до збільшення конусності при відносному діаметрі виступу рівному 2,3 починаючи з початкової стадії розкочування. В результаті при одночасному деформуванні виступу і уступу утворюється конусна поковка, тому необхідно створити умови які б дозволили знизити конусність. На практиці це можна зробити збільшивши різницю між діаметрами виступу та уступу. Завдяки чому конусність заготовки буде зменшуватися під час процесу розкочування. На початковій стадії буде деформуватися лише виступ і буде утворена конусна форма з більшим діаметром з боку виступу. При подальшому обтисканні, коли почне деформуватися уступ конусність буде поступово вирівнюватися, через різницю у товщині стінки виступу та уступу. Це є важливими практичними рекомендаціями для розробки промислових технологій кування східчастих обичайок.

### Висновки

Розкочування ступінчастої заготовки при одночасному деформуванні виступу та уступу призводить до виникнення конусної поковки. Конусність з боку уступу виникає на початковій стадії розкочування і під час всього процесу збільшується. Виникнення конусної форми пояснюється тим, що під час розкочування, при однаковій абсолютній деформації (хід бойка), уступ отримує більше накопиченої деформації через більш тонку стінку. Тому необхідно створити умови при яких конусність буде зменшена, що можливо за рахунок збільшення різниці між діаметрами виступу та уступу.

## Анализ формоизменения и деформированного состояния пустотелой ступенчатой поковки в процессе раскатки

О.Е. Марков, М.С. Косилов, А.В. Герасименко, С.А. Шевцов

*Аннотация.* Повышение безопасности, ускорения сроков строительства и увеличение срока эксплуатации атомных электростанций является одним из главных направлений развития энергетической промышленности. С этой точки зрения, большое внимание сегодня уделяется изготовлению поволоков, которые сочетают в себе несколько деталей. Это требует применения новых технологий с применением не стандартного инструмента. Цель работы – анализ формоизменения и деформированного состояния конусной ступенчатой поковки при раскатке ступенчатой заготовки с одновременным деформированием выступа и уступа. Моделирование выполнялось с помощью метода конечных элементов, который согласуется с экспериментальными данными. Экспериментальные исследования выполнялись на свинцовых моделях. Раскатка ступенчатой заготовки при одновременном деформировании выступа и уступа приводит к возникновению конусной поковки. Конусность со стороны уступа возникает на начальной стадии раскатки и во время всего процесса увеличивается. Возникновение конусной формы объясняется тем, что во время раскатки, при одинаковой абсолютной деформации (ход бойка), уступ получает больше накопленной деформации из-за более тонкой стенки.

*Ключевые слова:* Раскатка, деформированное состояние, обечайка, ступенчатый боек, суммарная деформация, поковка.

## The analysis of forming and strain state of the hollow step forgings during the enlarging process

O. Markov, M. Kosilov, O. Gerasimenko, S. Shevtsov

*Abstract.* Improving safety, accelerating construction and extending the life of nuclear power plants is one of the main directions of the development of the energy industry. From this point of view, much attention is being paid to the production of forgings, which combine a few details today. This requires the use of new technologies with the use of non-standard tools. The purpose of the work is analyze the shape and the deformation state of the conical stepped forging when rolling the stepped workpiece with the simultaneous deformation of the protuberance and the ledge. The simulation was performed using finite element method, which is consistent with experimental data. Experimental studies were carried out on lead models. Rolling of stepped workpiece with simultaneous deformation of the protrusion and ledge leads to the appearance of conical forging. Taper on the side of the ledge occurs at the initial stage of rolling and during the whole process increases. The emergence of a conical shape is explained by the fact that during slipping, with the same absolute deformation (stroke), the ledge gets more accumulated deformation through a more precise wall.

*Keywords:* An enlarging, the deformation state, a shell, the step die, the total deformation, a forging.

## References

1. Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant / Suzuki K., Sato I., Kusuhashi M., Tsukada H. // Nuclear engineering and design – 2000 – №198 – с. 15-23 – [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00273-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00273-3)
2. Ingersoll D. T. Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments / D. Ingersoll // Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. – 2015. – №1. – С. 27–60. – <https://doi.org/10.1533/9780857098535.1.27>
3. Zhbakov I. G. (2014). 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. – <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
4. А. с. 958026 СССР, МПК В 21 J 1/04. Способ изготовления конических обечаек / Арефьев В. Д., Пакало А. В., Зубков А. И., Соболев В. Д., Петунин А. Ю. (СССР). – № 3244552/25-27; заявл. 11.02.81; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34. – 3 с.
5. Markov O. E. (2012). Forging of Large Pieces by Tapered Faces / O. E. Markov // Steel in Translation. 42.(12), 808 – 810. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091212120054>
6. 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. – [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(88\)90238-5](https://doi.org/10.1016/0029-5493(88)90238-5)
7. Markov O.E. (2016). Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / O. E. Markov, A. V. Perig, M. A. Markova, V. N. Zlygoriev // International journal of advanced manufacturing technology. 83 (9-12). 2159–2174. – <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
8. Research on key processing technology of nuclear power tapered cylinder forging / [S. Nie, Z. Yu, D. Meng et al.]. // Advanced materials research – 2013 – с. 2387 – 2394 – 10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.2387
9. Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels / [M. Sun, L. Hao, S. Li et al.]. // Journal of nuclear materials – 2011 – №1-3 – P. 269–280 – <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.07.011>
10. Иванов К. М. Оценка точности упругопластического анализа метода конечных элементов / К. М. Иванов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 57–62.
11. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state (2017). / Oleg E. Markov , Alexander V. Perig, Vitalii N. Zlygoriev, Marina A. Markova, Alexander G. Grin // International journal of advanced manufacturing technology. 90, 801 – 818. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.
12. Barabash A.V. (2014). Straightening of sheet with correction of waviness /A.V. Barabash Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov // Steel in translation. 44 (1), 916–920. <http://dx.doi.org/10.3103/s096709121412002x>.