

## Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем

О.Є. Марков • М.С. Косилов • О.В. Герасименко • С.О. Шевцов

Донбаська державна машинобудівна академія

Received: 01 September 2017 / Accepted: 22 September 2017

***Анотація.** В роботі проведено теоретичний аналіз формоутворення обичайки східчастої форми. Для отримання поковки використовується східчаста заготовка. В результаті проведеної роботи отримана закономірність зміни конусності від відносного зовнішнього діаметра бурта заготовки. Встановлено, що зі збільшенням діаметра бурта зміна конусності готової поковки приймає параболічний вид, за рахунок того, що спочатку зменшується, потім збільшується. Виявлено, що змінюючи діаметр бурта можна регулювати форму готової поковки. Також в результаті проведеної роботи проаналізовано деформований стан поковки під час кування. Встановлено, що зі сторони бурта виникають більші деформації, що можна пояснити куванням бурта на початковій стадії розкочування, через що борт має більшу ступінь продеформованості. Наведена орієнтовна послідовність кування обичайки з фланцем з пустотілого злитка.*

***Ключові слова:** обичайка, поковка, деформований стан, кування, деформація, злиток.*

Атомні станції розглядаються, як один з головних видів видобутку енергії. Деталі атомних станцій повинні бути надійні та міцні як структурно так і конструктивно. Тому вони повинні бути суцільними [1]. З цієї точки зору, все більше уваги приділяється виготовленню деталей зі складною формою поверхні, які раніше виготовлялися з декількох простих шляхом зварювання. Вони можуть мати сферичну, конічну, східчасту або комбіновану форми [2 – 5]. Виготовлення таких деталей як правило супроводжується великими витратами металу. Тому, що більша їх частина іде у відходи у вигляді стружки. Матеріальні та енергетичні витрати є невід'ємною складовою собівартості виготовлення продукції [6]. Від їхнього скорочення напряму залежить зниження собівартості продукції. Термомеханічна та подальша механічна обробка також потребують багато часу [7]. А як відомо, заготовчі та обробляючі операції відносяться до основних операцій у виробничому циклі виготовлення деталей. Зменшення тривалості цих операцій суттєво підвищує виробничу потужність цеху і підприємства в цілому. На сьогодні вже розроблено достатньо конструкцій ректорів, при будівництві яких використовують елементи зі складною формою поверхні [8]. Таким чином доцільним буде виготовлення деталі з найбільш близькою за формою до неї поковки. В цьому випадку забезпечується необхідна щільність та міцність, а подальша обробка значно зменшує об'єм металу, який іде у відходи. Тому швидке та якісне виробництво таких елементів є пріоритетом для кожного підприємства.

Japan Steel Works, Ltd (JSW) вже мала можливість розробити технологічні процеси виготовлення деталей зі складною формою поверхні [1]. Де які з них були впроваджені у виробництво. Компанія AREVA розробила технологію кування зі звичайного злитка обичайки зі ступінчастою формою зовнішньої поверхні. Різниця у діаметрах складала 685 мм [9]. Однак наведені приклади мало описані у літературі. Кування зі звичайного злитка таких поковок більш затратне ніж з пустотілих [10] тому, що присутня енергоємна операція осадження, яка потребує тривалого нагрівання. З цих причин останнім часом ведеться розробка пустотілих злитків, а саме для підвищення якості розробляються нові умови кристалізації [11, 12].

Світова промисловість вже має досвід виготовлення обичайок східчастої форми. Дві крупногабаритні обичайки були відковані для реактора CAP1400. Одна з зовнішнім фланцем (рис. 1, а), інша з зовнішнім

✉ О.Є. Марков  
oleg.markov.ond@gmail.com

фланцем та боковими патрубками (рис. 1, б), які були отримані штампуванням. Особливістю способу є те, що обичайки з фланцем кувалися з застосуванням східчастого верхнього бойка [13].

Мета роботи – проаналізувати формоутворення обичайки з фланцем при зміні довжини та діаметра бурта поковки та запропонувати процес кування такої поковки.

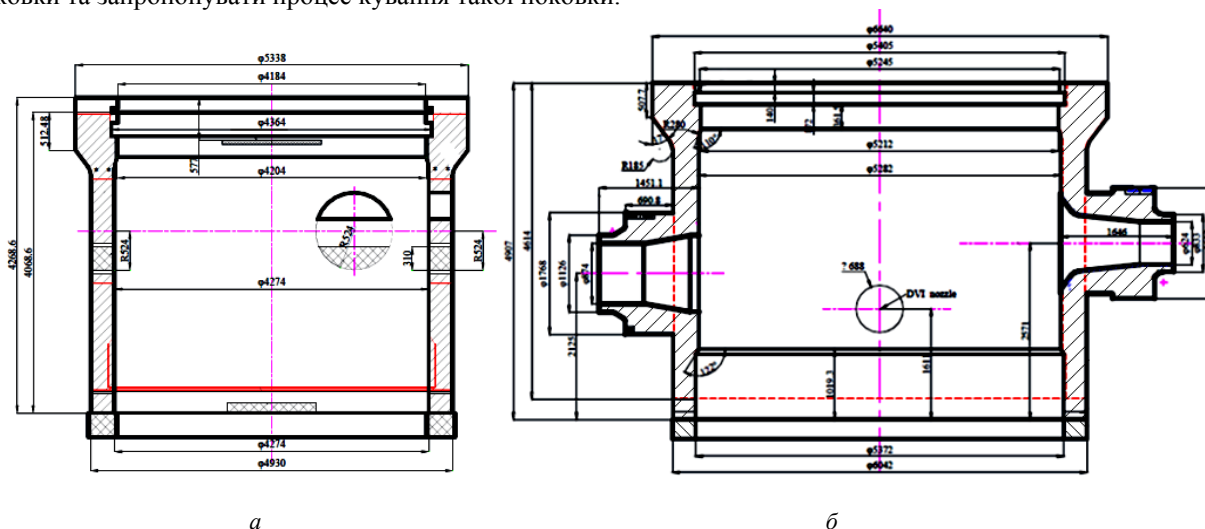


Рис. 1. Ескізи обичайок для реактора САР1400: а – з фланцем; б – з фланцем та патрубками

Для моделювання процесу кування, використовувалася програма DEFORM 3D (тимчасова ліцензія ДГМА). В основі програми закладено метод скінчених елементів, який є високоточним [14] та найбільше узгоджується з експериментальними даними [16–19]. Заготовка та інструменти для моделювання процесу розкочування створювалася в системі тривимірного проектування КОМПАС–3D. Для моделювання використовувався дорн з діаметром 1240 мм. Бойок для розкочування проектувався виходячи з форми та розмірів поковки. Ширина бойка складала 600 мм.

У табл. 1 наведені параметри для отримання поковки. Вказані розміри деталі, величини допусків округлені до нуля для легкості розрахунку та розміри поковки у наступній послідовності: мінімальний, номінальний, максимальний розміри.

Таблиця 1

Параметри для отримання поковки

Розміри	D1		D2		Dотв			Нзг			Кмакс	
	3376		2820		2334			1405+1890				
Деталь	3376		2820		2334			1405+1890			0,024	
Допуск	-40	+40	-40	+40	-40	+40	-40	+40	-40	+40		
Поковка	3430	3470	3510	2880	2920	2960	2195	2235	2275	3215		3295

На рис. 2 зображено заготовку та поковку, отриману в результаті моделювання. Дослідження полягало у зміні довжини виступу заготовки та збільшенні його діаметра  $D_1$  до отримання поковки з мінімальною конусністю.

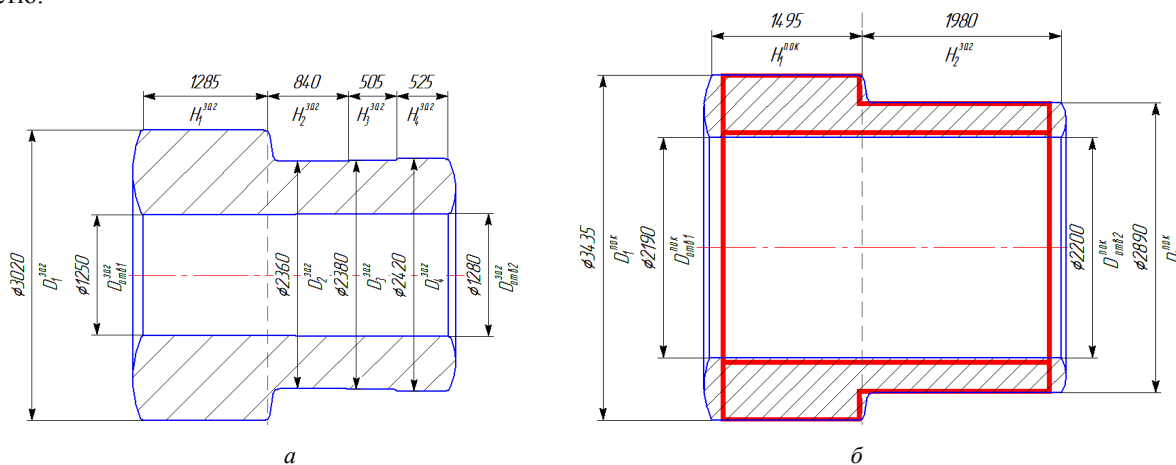


Рис. 2. Заготовка (а) та поковка (б) отримана після розкочування

В останньому стовпчику вказана максимальна конусність поковки, яка розраховувалась за формулою:

$$K_{max} = \frac{D_{ом\epsilon 1} - D_{ом\epsilon 2}}{H_{заг}}, \quad (1)$$

де  $D_{ом\epsilon 1}$  – діаметр отвору частини 1, з більшим зовнішнім діаметром;

$D_{ом\epsilon 2}$  – діаметр отвору частини 2, з меншим зовнішнім діаметром;

$H_{заг}$  – загальна довжина поковки.

На рис. 3 зображені поковки базової (а) та нової (б) форми, яка має довжину бурта 660 мм. Для її отримання спочатку було зменшено довжину бурта заготовки. Процес розкочування отриманої поковки моделювався в програмі DEFORM 3D. Граничні умови мали наступні параметри: початкова температура заготовки – 1200°C, кількість елементів сітки – 80000 шт., переміщення головного інструменту – 40 мм/с, температура бойка та дорна – 100°C, фактор тертя – 0,7. У табл. 1 наведені результати розкочування поковок зі зміненою довжиною бурта та зі змінними діаметрами буртів.

В табл. 2 наведено параметри заготовок та поковок, отриманих розкочуванням. У заготовок змінюються зовнішній діаметр частини 1. Діаметри збільшуються на 60 мм. За результатами моделювання встановлено, що збільшення діаметра виступу заготовки до 3140 мм недостатньо, тому що діаметр отвору поковки з боку виступу набагато менший ніж потрібно (табл. 1). Подальше збільшення зовнішнього діаметра до 3200 мм призводить також до збільшення внутрішнього діаметра. Але максимальний діаметр дорівнює, в цьому випадку, 2280 мм, що більше ніж потрібно. Тому було прийняте рішення зменшити зовнішній діаметр на 20 мм до 3180 мм (табл. 3, стр. 4). В даному випадку було отримано поковку з діаметром отвору 2200-2270 мм, що входить у розрахований допуск (табл. 1). Також встановлено, що зі збільшенням діаметра виступу поковки довжина виступу поступово збільшується, а уступу зменшується.

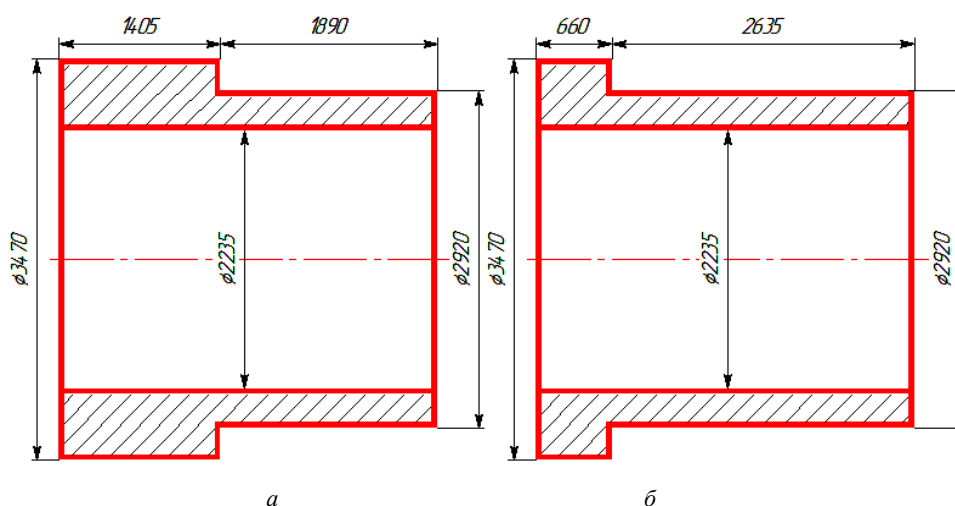


Рис. 3. Поковки базової (а) та нової (б) форми

Таблиця 2

Розміри заготовок та отримані з них поковки

Заготовка										Поковка					
D1	H1	Дотв1	Дотв2	D2	H2	D3	H3	D4	H4	D1	H1	Дотв1	Дотв2	D2	H2
3020	500	1250	1280	2360	1640	2380	505	2420	525	3355	710	2110	2310	3005	2835
3080	485	1250	1280	2360	1645	2380	505	2420	525	3375	760	2140	2270	2955	2865
3140	485	1250	1280	2360	1645	2380	505	2420	525	3425	660	2185	2245	2935	2870
3180	485	1250	1280	2360	1645	2380	505	2420	525	3430	670	2205	2275	2950	2855
3200	485	1250	1280	2360	1645	2380	505	2420	525	3450	675	2210	2280	2965	2855

Спираючись на дані табл. 2 була побудована графічна закономірність відхилення внутрішнього діаметра поковки ( $\Delta D_{отв}^{пок}$ , %) від відносного зовнішнього діаметра заготовки ( $\frac{D_{заг1}}{D_{отв}^{заг}}$ ) (рис. 4). Відхилення внутрішнього діаметра поковки розраховувалося за формулою:

$$\Delta D_{отв}^{пок} = \frac{|D_{отв}^{пок} - D_{отв.ном}^{пок}|}{D_{отв.ном}^{пок}} \times 100\%, \quad (2)$$

де  $D_{отв}^{пок}$  – діаметр отвору поковки отриманий в результаті моделювання,

$D_{отв.ном}^{пок}$  – номінальний, необхідний діаметр отвору поковки (табл. 1).

Встановлено, що зі збільшенням зовнішнього діаметра заготовки відхилення внутрішнього діаметра поковки поступово зменшується. Найменше відхилення, з обох сторін, виникає при відношенні  $\frac{D_{заг1}}{D_{отв}^{заг}}$  рівному 2,51, що відповідає рядку 3 табл. 1. При подальшому збільшенні зовнішнього діаметра заготовки  $D_1$  відбувається зростання внутрішнього діаметра поковки  $D_{отв2}$ . Аналіз графічних закономірностей дозволив встановити, що при досягненні значення відносного діаметра заготовки 2,54 відбувається перетин двох кривих, при цьому форма поковки відповідає параметрам наведеним у табл. 1. Це свідчить про те, що змінюючи діаметр виступу можна регулювати форму поковки.

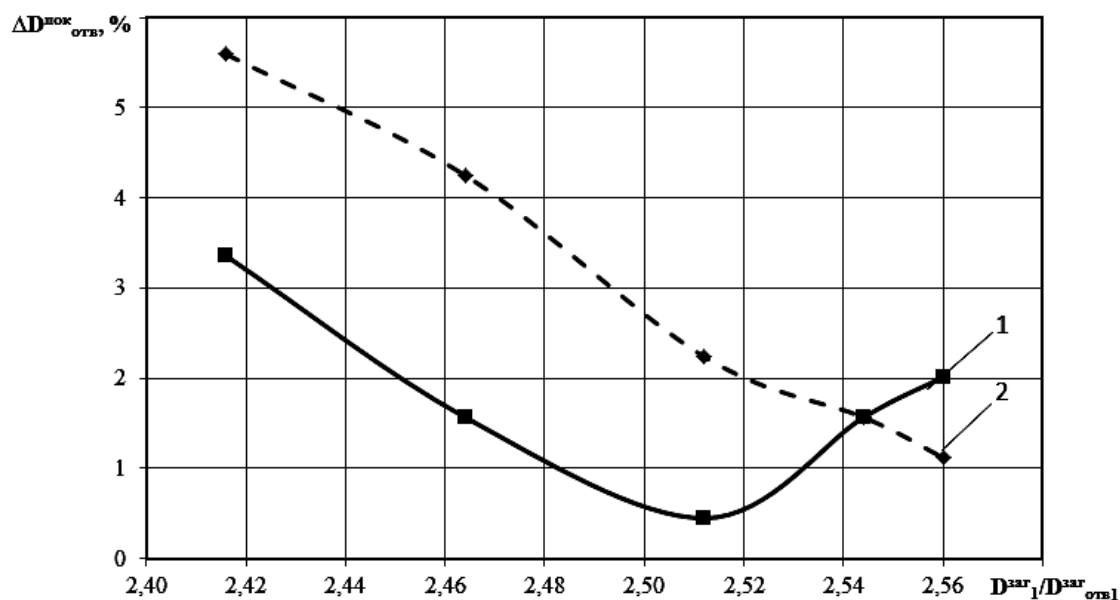


Рис. 4. Графічна закономірність відхилення внутрішнього діаметра поковки  $\Delta D_{отв}$  від відносного діаметра заготовки з боку виступу  $\frac{D_1}{D_{отв1}}$ : 1 – відхилення діаметра отвору поковки з боку виступу  $\Delta D_{отв1}^{пок}$ , %; 2 – відхилення діаметра отвору поковки з боку уступу  $\Delta D_{отв2}^{пок}$ , %

На основі табл. 2 була побудована графічна закономірність конусності поковки  $K^{пок}$  від відносного діаметра заготовки частини 1  $\frac{D_1^{заг}}{D_{отв1}^{заг}}$  (рис. 5). Аналіз результатів конусності поковки дозволив встановити, що зі збільшенням відносного діаметра зменшується конічність поковки. Зростання конусності свідчить про те, що вона збільшується у зворотному напрямку. Тому судячи з табл. 3 та рис. 4 можна зробити висновок, що конусність поковки можна регулювати за рахунок зміни зовнішнього діаметра бурта.

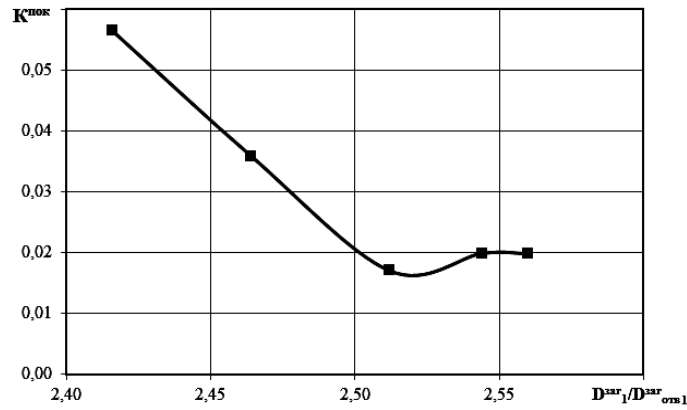


Рис. 5. Графічна закономірність конусності поковки  $K^{пок}$  від відносного діаметра заготовки з боку виступу  $\frac{D_1}{D_{ом1}}$

На рис. 6 зображена заготовка на проміжній стадії розкочування, при якій закувалися напуски, поковка з розмірами отвору та розподіл деформованого стану. Зображення наведені з експерименту, що відповідає перетину двох кривих на рис. 4. Можна зробити висновок, що найбільші деформації зосереджені на зовнішній стороні бурта. Як і очікувалося зі сторони бурта виникають більші деформації (рис. 6, б). Це пояснюється тим, що на початковій стадії розкочування деформується бурт. Також було встановлено, що на початковій стадії кування (а) та на кінцевій (б) поковка має різнонаправлену конусність отвору. На початку кування більший діаметр біля виступу, в кінці – з іншого боку.

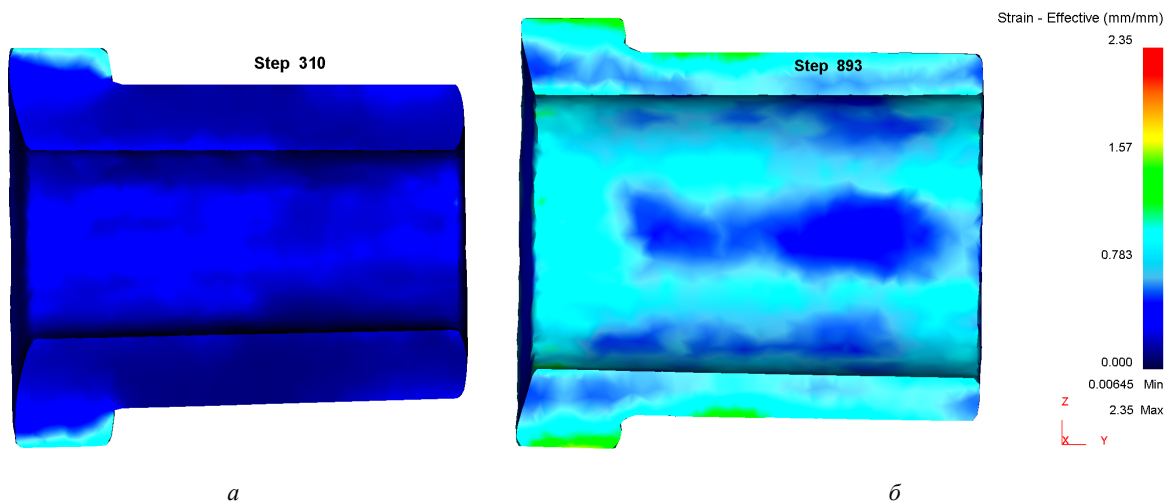


Рис. 6. Розподіл деформації проміжної стадії (а) та на кінцевій стадії розкочування (б)

Технологічний процес кування подібних поволок може бути реалізований в послідовності наведеній на рис. 7.

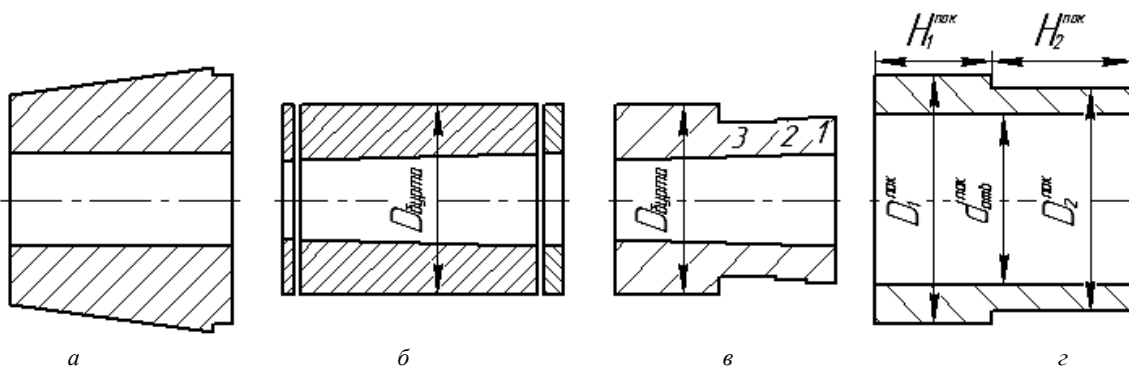


Рис. 7. Основні переходи технологічного процесу кування обичайки з буртом або фланцем

Пустотілий злиток протягується на оправці до зовнішнього діаметра рівного діаметру бурта. Потім відрубуються донна та прибірна частини злитка, а отримана заготовка відправляється у піч для нагрівання. Після цього циліндрична заготовка розміщається на оправці і кується заготовка для розкочування. Послідовність кування уступів показана цифрами. Отримана заготовка відправляється у піч. Далі виконується розкочування до заданих розмірів.

#### Висновок

В результаті дослідження була розроблена заготовка для поковки з меншою довжиною виступу та отримана закономірність зміни конусності від відносного зовнішнього діаметра бурта заготовки. Встановлено, що зі збільшенням діаметра бурта зміна конусності готової поковки приймає параболічний вид, тобто спочатку зменшується потім збільшується. Виявлено, що змінюючи діаметр бурта можна регулювати форму готової поковки. Проаналізований деформований стан поковки під час кування. Встановлено, що зі сторони бурта виникає більший рівень деформації, що можна пояснити куванням бурта на початковій стадії розкочування. Наведені основні переходи технологічного процесу кування обичайки з буртом або фланцем з пустотілого злитка.

## Особенности процесса изготовления пустотелых поковок с буртом и фланцем

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

*Аннотация.* В работе проведен теоретический анализ формообразования обечайки ступенчатой формы. Для получения поковки используется ступенчатая заготовка. В результате проведенной работы получена зависимость изменения конусности от относительного внешнего диаметра бурта заготовки. Установлено, что с увеличением диаметра бурта изменение конусности готовой поковки принимает параболический вид, за счет того, что сначала уменьшается, затем увеличивается. Выявлено что, изменение диаметра бурта позволяет регулировать форму готовой поковки. Также в результате проведенной работы проанализировано деформированное состояние поковки при ковке. Установлено, что с стороны бурта возникают большие деформации, можно объяснить ковкой бурта на начальной стадии раскатки, из-за чего бурт имеет большую степень продеформированности. Приведенная последовательностьковки обечайки с фланцем из пустотелого слитка.

*Ключевые слова:* обечайка, поковка, деформированное состояние, ковка, деформация, слиток

## Features of the process of manufacturing hollow forgings with a rolling and flange

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

*Abstract.* In work, the theoretical analysis of a shell with forming stepped shape has been carried out. An overview of literary sources for obtaining similar details has been performed. A stepped workpiece to get a forging is used. As a result, the dependence of the change of taper on the relative external diameter of the workpiece bore was obtained. It was established that the increase of a flange diameter, the change in the taper of the finished forging takes a parabolic form, first decreases and then increases. It was found that changing of the flange diameter can regulate the shape of the finished forging. In addition, as a result of the work, the deformed state of forging was analyzed during forging. It has been established that on the side of the bout there are large deformations. It can be explained by forging the flange in the initial stage of rolling, due to which the flange has a greater degree of strain. The approximate sequence of forging of a shell with a flange from a hollow ingot is resulted.

*Keywords:* a shell, a forging, a deformed state, a forging, a deformation, a ingot

#### References

- 1 Suzuki, K., Sato, I., Kusuhashi, M. and Tsukada, H. (2000), Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant, *Nuclear Engineering and Design*, 8 (198), pp. 15-23.
- 2 Suzuki, K., Sato, I. and Tsukada, H. (2000), Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV, *Nuclear Engineering and Design*, 151 (201), pp. 513-522.

- 3 Kal'chenko, P., Markov, O. and Rudenko, N. (2016), Sposib vigotovlennja porozhnistih sferichnih pokovok [Method of manufacturing hollow spherical forgings], zaiavnyk ta vlasnyk patentu Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia Ukraine, Pat. 106717.
- 4 Talamantes-Silva, J., Kearney, M. and Bates, P. (2011), Developed of forgings in Sa508-4N for the nuclear industry, In: 18th International Forgemasters Meeting, *Pittsburgh: Market and Technical Proceedings*, pp. 234 – 237.
- 5 Bao-zhong, W., Kai-quan, L., Ying, L., Wen-hui, Z. and De-li, Z. (2014), Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel, In. *19th International Forgemasters Meeting, Makuhari*, pp. 391 – 396.
- 6 Rizhikov, V.S., Pankov, V.A., Rovens'ka, V.V. and Pidgora, E.O. (2004), *Ekonomika pidpriemstva: Navchal'nij posibnik* [Business Economics: A Manual], Vidavnychij dim "Slovo", Kyiv, Ukraine.
- 7 Markov, O.E. Oleshko, M.V. and Mishina, V.I. (2011), Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighing More Than 100 Tons without Ingot Upsetting, *Metallurgical and Mining Industry*, 3 (7), pp. 87-90.
- 8 Carelli, M.D. and Ingersoll, D.T. (2015), Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments, *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, Elsevier Ltd, USA*.
- 9 Berger, T., Murai, E., Kurihara, I., Nakamura, T., Sasaki, T., Yoshida, T. and Koyama, Y. (2007), High intensity forging for nuclear applications: Manufacturing and properties of nozzle shell with integral flange for EPR reactor pressure vessel. *Ironmaking & Steelmaking*, 34 (254), pp. 205-210.
- 10 Tomlinson, M., Talamantes-Silva, J. and Davies, P. (2011), The development of hollow ingot technology at Sheffield Forgemasters International Ltd, In. *18th International Forgemasters Meeting - Pittsburgh, Market and Technical Proceedings*.
- 11 Berezhko, B.I., Orlova, V.N., Romanov, O.N. and Hohlov, A.A. (2001), Proizvodstvo krupnogabaritnyh pokovok iz polyh slitkov dlja izdelij otvetstvennogo naznachenija [Production of large-sized forgings from hollow ingots for products of responsible designation]. *Balt. met.* 2 (79), pp. 6-7.
- 12 Machovčák, P., Opler, A., Carbol, Z., Korbáš, M., Kováč, M. and Krutiš, V. (2013), The development of hollow ingot casting technology at Vítkovice heavy machinery A.S. In: *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Tanager Ltd*.
- 13 Bao-zhong, W., Kai-quan, L., Ying, L., Wen-hui, Z. and De-li, Z. (2014), Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel, In. *19th International Forgemasters Meeting, Makuhari*, pp. 391 – 396.
- 14 Ivanov, K.M. (2002), Ocenka tochnosti uprugoplasticheskogo analiza metoda konechnyh jelementov [Estimation of accuracy of elastic-plastic analysis of the finite element method], *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom u metalurgii i mashinobuduvanni, zb. nauk. prac.* 5 (135), pp. 57–62.
- 15 Orlov, G.A. and Fedorov, V.P. (1988), Konechno-jelementnoe predstavlenie naprjazhenij v processah osesimmetrichnoj plasticheskoj deformacii [Finite-elemental representation of stresses in processes of axially symmetric plastic deformation]. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*, 3 (67), pp. 49–52.
- 16 Tjurin, V.A. and Ovechkin, V.V. (2002), Mirovaja vuzovskaja nauka – innovacionnym tehnologijam kovki [World University Science - Innovative Forging Technologies], *Izvestija vuzov, Chernaja metallurgija*, 3 (57), pp. 45–48.
- 17 Markov, O.E. (2012), Forging of Large Pieces by Tapered Faces, *Steel in Translation*. 42. (12), pp. 808 – 810, <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091212120054>.
- 18 Zhbankov, I.G., Markov, O.E. and Perig A.V. (2014), Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (5–8), pp. 865 – 872, DOI: 10.1007/s00170-014-5727-5.
- 19 Barabash, A.V., Gavril'chenko, E.Yu., Gribkov, E.P. and Markov O.E., (2014), Straightening of Sheet with Correction of Waviness, *Steel in Translation*. 44 (1), pp. 916–920, <http://dx.doi.org/10.3103/s096709121412002x>.
- 20 Markov, O.E., Perig, A.V., Markova, M.A. and 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), pp. 2159–2174, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.
- 21 Markov, O.E., Perig, A.V., Zlygoriev, V.N., Markova, M.A. and 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, pp. 801 – 818, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.