

УДК 621.73.046

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ТА ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СХІДЧАСТИХ ЗАГОТОВОК ПІД ЧАС РОЗКОЧУВАННЯ ПРОФІЛЬОВАНИМ БОЙКОМ****М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, Є. В. Інчаков**

Донбаська державна машинобудівна академія

вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна. E-mail: mto@dgma.donetsk.ua

Підвищення споживання енергії у світі потребує вдосконалення конструкцій АЕС. Основною відповідальною ланкою АЕС є корпус реакторного блоку. Для підвищення строку служби, конструкції реакторних блоків вдосконалюються шляхом зменшення з'єднаних елементів та виготовлення складних профільованих деталей. Аналіз літератури дозволив встановити, що існує достатня кількість розробок та промислової апробації розкочування профільованих поковок. Моделювання процесу розкочування виконувалося за допомогою методу скінчених елементів в програмі DEFORM 3D. Експерименти були проведені в лабораторних умовах на свинцевих моделях з використанням гідравлічного пресу BLELL K-G номінальним зусиллям 100 кН. Одночасне деформування виступу та уступ 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:** обичайка, розкочування, поковки АЕС, метод скінчених елементів, деформований стан.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ВО ВРЕМЯ РАСКАТКИ ПРОФИЛИРОВАННЫМ БОЙКОМ****М. С. Косилов, О. Е. Марков, Герасименко А. В., Е. В. Инчаков**

Донбасская государственная машиностроительная академия

ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84313, Украина. E-mail: mto@dgma.donetsk.ua

Повышение потребления энергии в мире требует совершенствования конструкций АЭС. Основным ответственным участком АЭС является корпус реакторного блока. Для повышения срока службы, конструкции реакторных блоков совершенствуются путем уменьшения соединяемых элементов и изготовления сложных профилированных деталей. Анализ литературы позволил установить, что существует достаточное количество разработок и промышленной апробации раскатки профилированных поковок. Моделирование процесса раскатки выполнялось с помощью метода конечных элементов в программе DEFORM 3D. Эксперименты были проведены в лабораторных условиях на свинцовых моделях с использованием гидравлического пресса BLELL K-G номинальным усилием 100 кН. Одновременное деформирование выступа и уступ 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:** обечайки, раскатка, поковки АЭС, метод конечных элементов, деформированное состояние.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Останнім часом відсоток використання електроенергії здобутої на АЕС в Україні та світі збільшується. Основною відповідальною ланкою АЕС є атомний реактор, а саме корпус реакторного блоку. Тому проблема підвищення строку його експлуатації та збереження герметичності на сьогодні залишається актуальною.

За для підвищення строку роботи реакторного блоку розробники намагаються зменшити кількість з'єднаних елементів корпусу, щоб знизити місця накопичення радіації, внаслідок чого відбувається охрупчування сталюї конструкції [1]. Через це декілька елементів поєднуються в один складний.

Складні елементи корпусів реакторних блоків існуючими технологічними процесами виготовити важко. Для цього такі елементи накривають напуском і виготовляють шляхом механічної обробки, під час чого відбувається перерізання волокон структури, яка утворюється у процесі деформування, що в свою чергу призводить до зниження міцності в цих ділянках, а також збільшення витрат спеціальних сталей у відхід.

З цього приводу у світі активно ведуться розробки технологій кування профільованим інструментом. Завдяки чому отримані заготовки повторюють

форму деталі, що зменшує припуски на механічну обробку і дозволяє значно заощадити на металі та знизити собівартість виробів.

Для усунення зварних швів та підвищення безпеки реакторних блоків сьогодні стрімко розробляються та широко застосовуються нові технології як важливі та необхідні передумови.

Завдяки розробленому у 1984 р. способу кування (рис. 1, а) профільованим інструментом [2], компанією Japan Steel Works, Ltd. (JSW) було відкрито конічну обичайку з циліндричними секціями. Кована обичайка не мала подовжніх зварних швів. Завдяки суцільно кованій структурі виріб мав кращі механічні властивості, а завдяки тому що була використана одна заготовка (злиток) – меншу неоднорідність хімічного складу. Пізніше [3] подібна технологія кування була вдосконалена за допомогою дослідження методом скінчених елементів та застосована для кування іншої обичайки з сталі SA508-3. Розподіл деформації вказує на те, що більші деформації переважно розподіляються на внутрішній поверхні поковки, а сторона з більшим діаметром отримує значно більше деформацій, ніж сторона з меншим діаметром.

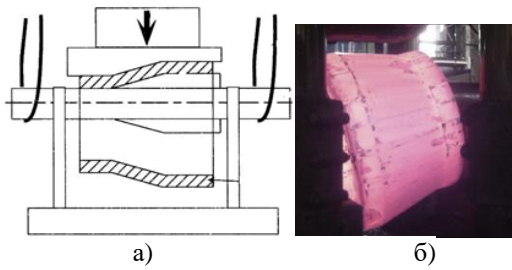


Рисунок 1 – Спосіб кування (а) та промислове виробництво (б) обичайки з циліндричними секціями

В роботі [4], досліджено процес формування конусної обичайки з однією циліндричною ділянкою для парогенератора AP1000 (рис. 2). Для того щоб отримати подібну обичайку на кувальному гідравлічному пресі, яка подібна за формою і розміром виробу, вона повинна бути викувана з заготовки, яка відповідає певним критеріям, що сприяє формуванню конусного отвору. Через особливості поковки конусного циліндра, процес кування виглядає наступним чином: протягування злитка, вирубка блоку, осаджування, прошивання, протягування на оправці і формування східчастої заготовки, потім за допомогою основного валка, дорна і плоского бойка кується конусоподібний отвір, на останній стадії, використовуючи спеціальний пристрій, кується циліндрична ділянка.

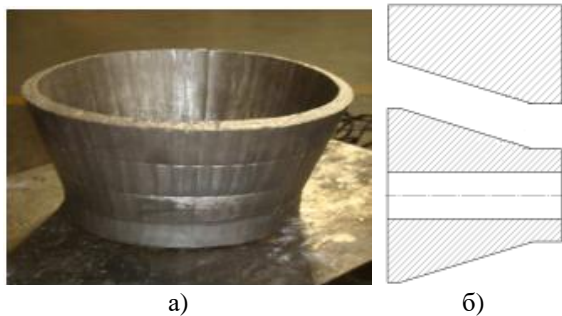


Рисунок 2 – Експериментальний зразок (а) та інструмент (б) для розкочування конічної обичайки з однією циліндричною ділянкою

Розширити технологічні можливості отримання поковок, близьких за формою і розмірами до готових деталей та зменшити витрати металу і трудомісткість механічної обробки пропонується використовувати спеціальні сферичні бойки і дорн. Спосіб отримання сферичних бойків з зовнішньої сферичної поверхнею (рис. 3, а, б) передбачає використання бойків сферичної форми як для отримання заготовки перед розкочуванням, так і для остаточного розкочування. Даний спосіб був застосований на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» [5] і ПАТ «Енергомашспецсталь». Для кування поковок з внутрішньої і зовнішньої сферичними поверхнями (рис. 3, в) запропоновано використовувати бойок зі сферичним вирізом і бочкоподібну оправку. Для забезпечення заданої форми внутрішньої сферичної порожнини поковки пропонується змінювати оправку з меншою бочкою на велику, яка відповідає діаметру отвору сферичної заготовки.

Перспективною є технологія виготовлення обичайок з фланцем або виступом. Така технологія була

застосована для виготовлення обичайки з фланцем та патрубками. Послідовність кувальних операцій для отримання обичайок з виступом, наведена на рис. 4, застосовувалася для виготовлення поковки зони патрубків, з'єднаної з фланцем, для атомного реактора, розробленого компанією AREVA [6]. Злиток масою 500 т використовувався для виготовлення цієї поковки. Це була перша крупногабаритна поковка виготовлена на новому 14000 т пресі, встановленому на компанією JSW в 2003 році.

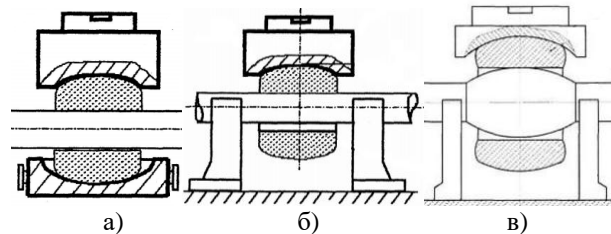


Рисунок 3 – Способи отримання сферичних поковок: а – отримання сферичної заготовки; б – отримання поковки із зовнішньою сферичною поверхнею; в – отримання поковки із зовнішньою і внутрішньою сферичними поверхнями

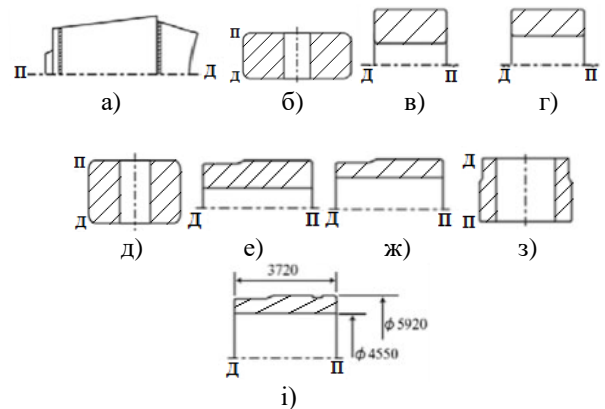


Рисунок 4 – Послідовність кування інтегрованої обичайки зони патрубків, суміщеної з фланцем

З аналізу літературних джерел було встановлено, що найбільш затребувані деталі для атомної продукції – конусної, сферичної і ступінчастої форми, які отримуються профільованим інструментом [5].

Мета роботи – встановлення формозміни та деформованого стану східчастих пустотілих поковок під час розкочування.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для моделювання процесу розкочування, використовувалася програма DEFORM 3D (тимчасова ліцензія ДГМА). В основі програми закладено метод скінчених елементів, який є високоточним [7] та найбільше узгоджується з експериментальними даними [8, 9]. Заготовка та інструменти для моделювання процесу розкочування створювалися в системі тривимірного проектування КОМПАС-3D. Для моделювання використовувалася дорн з діаметром 1240 мм. Бойок для розкочування проектувався виходячи з форми та розмірів заготовки. Ширина бойка складала 600 мм.

Для проведення дослідження виготовлялися свинцеві заготовки з відносним діаметром з боку

уступу  $D_y^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 1,85$  та відносними діаметрами з боку виступу  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,5; 2,4; 2,3$  (рис. 5, а-в).

Для розкочування використовувався східчастий бойок (рис. 5, г) та дорн Ø30 мм.

Дослідження були проведені в лабораторних умовах на гідравлічному пресі BLELL K-G номінальним зусиллям 100 кН (швидкість робочого ходу 200 мм/хв).

За результатами моделювання (рис. 6) було встановлено, 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. 6, б), що впливає на формування поковки в процесі розкочування

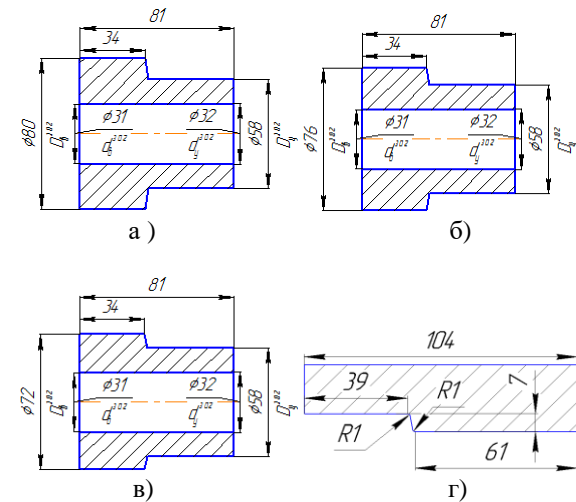


Рисунок 5 – Розміри заготовок (а-в) та ескіз бойка (г) для проведення дослідження

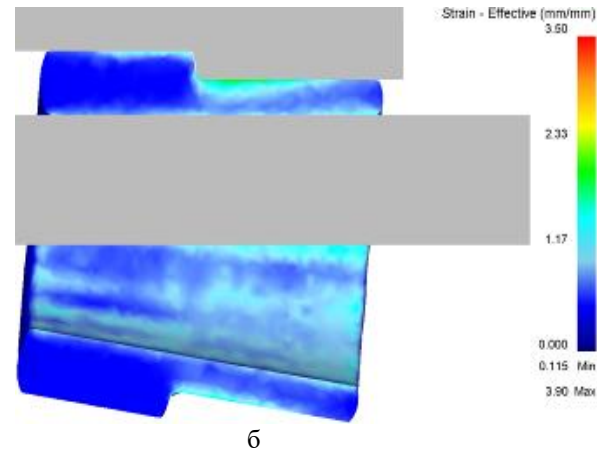
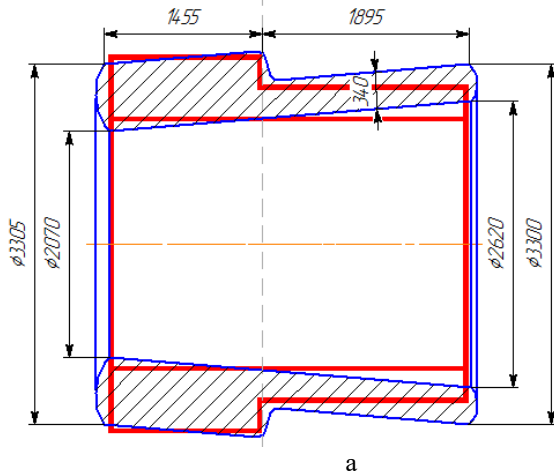


Рисунок 6 – Ескіз (а) та деформований стан поковки (б) при ступені деформації 0,35

Аналіз результатів моделювання накопиченої деформації для вступу та для уступу в процесі розкочування (рис. 7) 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.

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

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

Ступінь деформації при зменшенні товщини стінки уступу на 60 мм

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

де S – товщина стінки.

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 більшим ніж для попереднього, що пов'язано зі зменшенням товщини стінки. 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 рис. 8 зображені поковки отримані після розкочування східчастих пустотілих заготовок з відносним діаметром уступу заготовки

$$D_y^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 1,85.$$

В результаті розкочування найменшу конусність мала поковка, яка була отримана із заготовки з відносним діаметром виступу

$$D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} \text{ рівним } 2,5, \text{ а найбільшу з } D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,3.$$

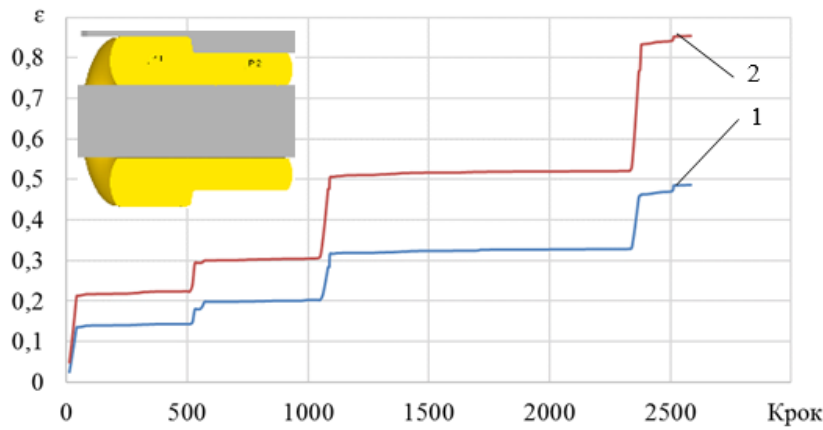
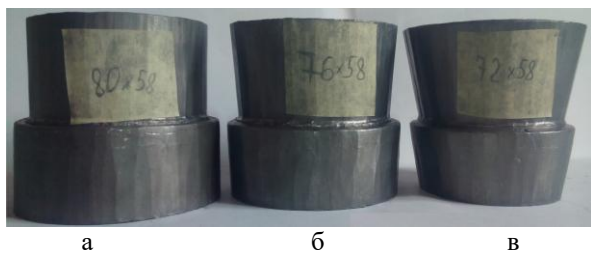


Рисунок 7 – Графічна закономірність накопичення деформації в процесі розкочування для вступу (1) та для уступу (2)



Рисунку 8 – Зразки отримані після розкочування заготовок для відносного діаметру заготовки

$$D_y^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 1,85; \text{ а} - D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,5; \text{ б} - D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,4;$$

$$\text{ в} - D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,3$$

Аналіз отриманих результатів накопиченої деформації виступу та уступу в залежності від обтискань (рис. 9), дозволяє виявити, що зі збільшенням обтискання заготовки виникає збільшення сумарної деформації металу виступу та уступу по параболічній закономірності. Однак у випадку  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,5$

(рис. 9, а) сумарна деформація металу виступу більша за величиною ніж деформація уступу, але при цьому інтенсивніше збільшується сумарна деформація уступу. Різниця між сумарними деформаціями для уступу та виступу зменшується і, як наслідок, стає найменшою для всіх зразків. Що в свою чергу призводить до найменшої різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу.

У випадку  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,4$  (рис. 9, б) сумарна деформація металу уступу більша за величиною ніж виступу. Розходження між сумарними деформаціями для уступу та виступу зменшується коли починається обтискання уступу. Інтенсивніше накопичення деформацій уступу призводить до того, що сумарна деформація уступу починає перевищувати сумарну деформацію виступу і як наслідок відносний діаметр отвору з боку уступу стає більшим ніж з боку виступу.

У випадку  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,3$  (рис. 9, в) сумарна деформація металу уступу більша за величиною ніж деформація виступу, так як і в попередньому випадку. Однак сумарна деформація уступу зростає одразу, тому що виступ і уступ деформуються одночасно з першого натискання.

Зростання сумарної деформації уступу призводить до збільшення відносного діаметра з боку уступу. Для усіх трьох випадків 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. Більша тангенціальна деформація металу уступу призводить до зменшення різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу та, як наслідок, до зменшення конусності поковки – при  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,5$ .

При  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,4$  через більшу тангенціальну деформацію металу збільшується різниця між діаметрами отвору на початковій стадії розкочування за рахунок деформування виступу, в подальшому ця різниця зменшується, потім знову збільшується за рахунок деформування уступу, як наслідок змінюється напрям конусності.

При  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,3$  більша тангенціальна деформація металу призводить до збільшення різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу та, як наслідок, до збільшення конусності поковки. Отже для співвідношення розмірів уступу заготовки  $D_y^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 1,85$  необхідно прагнути до співвідношення розмірів виступу  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,5$  при  $\epsilon = 0,42$ , та  $D_6^{3a2} / d_{cp}^{3a2} = 2,4$  при  $\epsilon = 0,3$ , для яких різниця між діаметрами найменша.

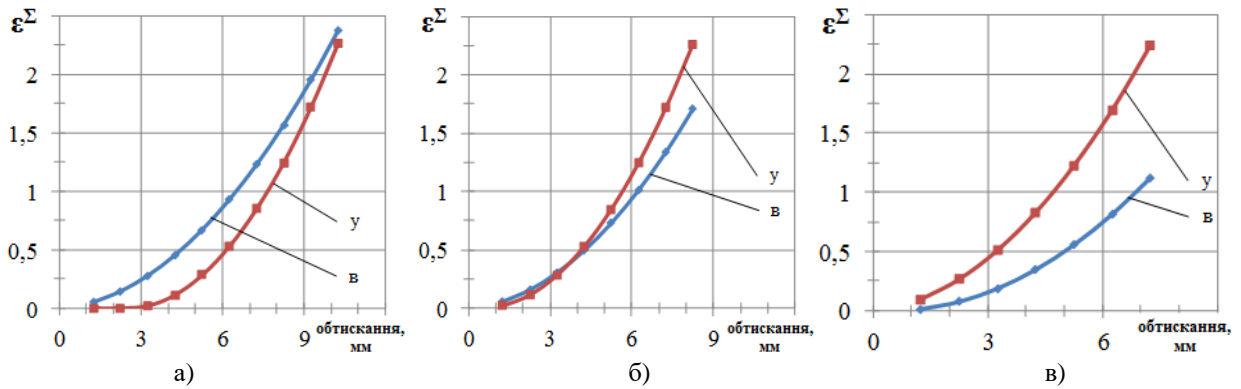


Рисунок 9 – Графічні закономірності накопиченої деформації від обтискання для виступу та уступу

для відносного діаметру заготовки  $D_y^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 1,85$ : а –  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,5$ ; б –  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,4$ ; в –  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3$

Різницю між діаметрами поковки з боку виступу та уступу можна оцінити одним показником – конусність поковки. Конусність поковки розраховувалася за наступною формулою

$$K_{пок} = \frac{|d_6^{нок} - d_y^{нок}|}{L^{нок}},$$

де  $d_6^{нок}$  – торцевий внутрішній діаметр поковки зі сторони виступу;  $d_y^{нок}$  – торцевий внутрішній діаметр поковки зі сторони уступу;  $L^{нок}$  – довжина.

Аналіз отриманих результатів конусності поковки від ступеня деформації  $\epsilon$  (рис. 10) дозволив встановити, що для відносного діаметру заготовки  $D_y^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 1,85$  зі збільшенням ступеня деформації конусність поковки має змінний характер. При  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,5$  на початковому етапі конусність збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу.

Потім конусність має постійне значення, що свідчить про рівномірне збільшення діаметру отвору з боку уступу та виступу. Подальше зниження кривої 1 пов'язане з більш інтенсивним зростанням діаметру отвору з боку уступу.

При  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,4$  на початковому етапі конус-

ність збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу. Поступове зниження пов'язане з деформуванням уступу та більш інтенсивним зростанням діаметру отвору з боку уступу. Інтенсивніше зростання діаметру отвору з боку уступу призводить до того, що при ступені деформації  $\epsilon = 0,3$  він починає перевищувати діаметр отвору з боку виступу і конусність знову починає зростати.

При  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3$  конусність одразу починає

збільшуватися, що пов'язано з одночасним розкочуванням виступу та уступу. Інтенсивніше зростання діаметру з боку уступу пов'язане з тим, що тонка стінка уступу отримує більшу ступінь деформації в порівнянні з стінкою виступу при однаковій абсолютній величині деформування.

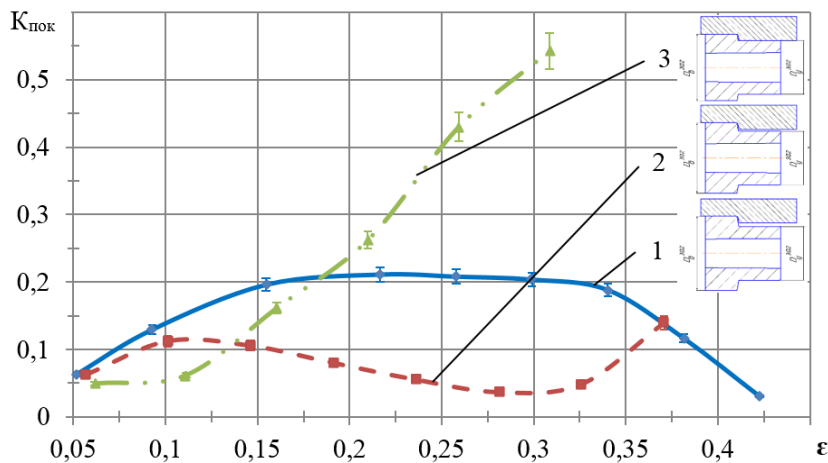


Рисунок 10 – Графічні закономірності конусності від ступеня деформування для відносного діаметру заготовки

$D_y^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 1,85$  при: 1 –  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,5$ ; 2 –  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,4$ ; 3 –  $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3$ .

Технологічний процес кування подібних поковок може бути реалізований в послідовності наведеній на рис. 11 [10]. Пустотілий злиток протягується на оправці до зовнішнього діаметра рівного діаметру бурта. Потім відрубуються дона та прибуткова частини злитка, а отримана заготовка відправляється у піч для нагрівання.

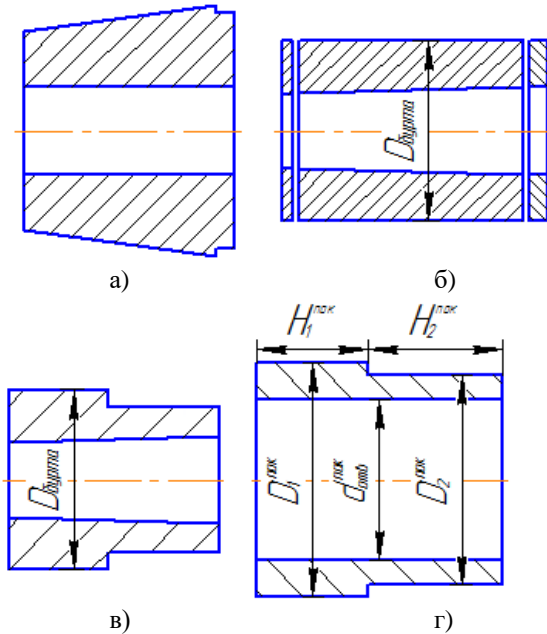


Рисунок 11 – Основні переходи технологічного процесу кування обичайки з буртом або фланцем

Після цього циліндрична заготовка розміщується на оправці і кується заготовка для розкочування. Отримана заготовка відправляється у піч. Далі виконується розкочування до заданих розмірів.

**ВИСНОВКИ.** Розкочування східчастої 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.

При розкочуванні східчастих пустотілих заготовок з співвідношенням діаметра уступу  $D_y^{заг} / d_{cp}^{заг} = 1,85$  зі збільшенням ступеня деформації конусність має змінний характер у випадках коли на початковій стадії деформується лише виступ, а саме при  $D_6^{заг} / d_{cp}^{заг}$  рівному 2,5 та 2,4. Зміна конусності відбувається у процесі одночасного розкочування виступу та уступу через більшу тангенціальну деформацію уступу. Більша тангенціальна деформація уступу призводить до збільшення конусності при  $D_6^{заг} / d_{cp}^{заг}$  рівному 2,3 починаючи з початкової стадії розкочування, через одночасне деформування виступу та уступу.

Виявлено, що змінюючи діаметр бурта можна регулювати форму готової поковки. Проаналізовано 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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Development of mono-bloc forging for CAP1400 reactor pressure vessel / W. Bao-zhong, L. Kai-quan, L. Ying [et al.] // 19th International forgemasters meeting, 29 September – 3 October 2014, Makuhari – 2014. – pp. 391–396.
2. 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 – pp. 15–23 – [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00273-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00273-3).
3. 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 – pp. 269–280 – <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.07.011>.
4. Research on key processing technology of nuclear power tapered cylinder forging / S. Nie, Z. Yu, D. Meng [et al.]. // Materials design, processing and applications – 2013 – pp. 2387 – 2394.
5. Современные тенденции изготовления тонкостенных пустотелых поковок для энергетической промышленности / О.Е. Марков, А.И. Лобанов, М.С. Косилов [и др.]. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – № 1. – С. 5–10. – ISSN 1993-8322.
6. High intensity forging for nuclear applications: Manufacturing and properties of nozzle shell with integral flange for EPR reactor pressure vessel. / T. Berger, E. Murai, I. Kurihara [et al.]. // Ironmaking & Steelmaking –2007 – № 3 – pp. 205–210 – <http://dx.doi.org/10.1179/174328107X174717>.
7. Иванов К.М. Оценка точности упругопластического анализа метода конечных элементов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 57–62.
8. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state (2017). / О.Е. Марков, А.В. Периг, V.N. Zlygoriev, [et al.]. // International journal of advanced manufacturing technology. 90, pp. 801–818. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.
9. Straightening of sheet with correction of waviness / A.V. Barabash, E.Yu. Gavril'chenko, E.P. Gribkov, O.E. Markov // Steel in translation. 44 (1), pp. 916–920. <http://dx.doi.org/10.3103/s096709121412002x>.
10. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О.Є. Марков, М.С. Косилов, О.В. Герасименко, С.О. Шевцов // Mechanics and advanced technologies. – 2017. – № 2. – С. 85–91. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575>.

**THE STUDY OF FORMALIZATION AND DEFORMED STATE OF STEP BLANKS  
DURING THE ENLARGING BY PROFILED DIE**

**M. Kosilov, O. Markov, O. Gerasimenko, E. Inchakov**

Donbass State Engineering Academy

vul. Akademicheskaya, 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine. E-mail: mto@dgma.donetsk.ua

**Purpose.** To establish the regularities of the shape change and the deformed state of stepped hollow forgings during enlarging. **Methodology.** Modeling the skidding process has been performed using the finite element method in the DEFORM 3D program. Experiments have been conducted in laboratory conditions on lead models using BLELL K-G hydraulic press with a nominal effort of 100 kN. **Results.** Simultaneous deformation of the protrusion and the ledge leads to the conical forging. Taper on the side of the ledge occurs at the initial stage of rolling and during the whole process it increases. The emergence of a conical shape has been explained by the fact that during slipping, with the same absolute deformation (stroke), the ledge gets more accumulated deformation through a more precise wall. **Practical value.** Increasing energy consumption in the world requires improvement of NPP constructions. The main responsible unit of the NPP is the reactor block frame. The design of the reactor block frame has been improved by reducing the connecting elements and manufacturing complex profiled parts to increase the life of the reactor block frame. The literature analysis made it possible to establish there is already a sufficient amount of development and industrial testing of the enlarging of profiled forgings.

**Key words:** a shell, an enlarging, forgings of the NPP, the finite element method, the deformed state.

REFERENCES

1. 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
2. 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. Vol. 8 (198), pp. 15-23.
3. Sun, M., Hao, L., Li, S., Li, D. and Li, Y.. (2011), Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels. Journal of nuclear materials. Vol. 418 (1-3), pp. 269-280. – <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.07.011>
4. Nie, S., Yu, Z., Meng, D., Qi, X. Liua and M. Jin (2013), Research on key processing technology of nuclear power tapered cylinder forging. *Materials design, processing and applications*. Vol. 5(1), pp. 2387-2392.
5. Markov, O.E., Lobanov, A.I., Kosilov, M.S., Sharun, A.O. and Inchakov, E.V. (2017), Sovremennyye tendentsii izgotovleniya tonkostennyih pustotelyih pokovok dlya energeticheskoy promyshlennosti [Modern trends in the manufacture of thin-walled hollow forgings for the power industry]. *Visnik Donbaskoyi derzhavnoyi mashinobudivnoyi akademiyi*. Vol. 5 (1), pp. 5–10.
6. 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*. Vol. 34 (254), pp. 205-210.
7. Yvanov, K.M. (2002), Otsenka tochnosti upruhoplastycheskoho analiza metoda konechnikh elementov [Estimation of the accuracy of elastoplastic analysis of the finite element method]. *Udoskonalennyya protsesiv i obladnannya obrobky tyskom u metalurhiyi i mashynobuduvanni : zb. nauk. prats'*. Vol. 256 (1), pp. 57-62.
8. 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*. Vol. 90(1-4), pp. 801–818. – <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.
9. Barabash, A.V., Gavril'chenk, E. Yu., Gribkov, E.P. and Markov O.E. (2014), Straightening of sheet with correction of waviness . *Steel in translation*. Vol. 44 (12), pp. 916–920. – <http://dx.doi.org/10.3103/s096709121412002x>.
10. Markov, O.E., Kosilov, M.S., Gerasimenko, O.V. and Shevtsov, S.O. (2017), Osoblivosti protsesu vigotvleniya pustotilyh pokovok z burtom ta flantsem [Process features of manufacturing hollow forgings with a hole and a flange]. *Mechanics and advanced technologies*. Vol. 6 (2), pp. 85–91. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575>

Стаття надійшла 30.11.2017.