

### ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ НА ОБИЧАЙКАХ З ОДНОСТОРОННІМ УСТУПОМ ПІД ЧАС РОЗКОЧУВАННЯ ПРОФІЛЬОВАНИМ СХІДЧАСТИМ ІНСТРУМЕНТОМ

**М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. Є. Марков**

Донбаська державна машинобудівна академія

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

**А. С. Хващинський**

ПАТ «Енергомашспецсталь»

вул. Радгоспна, м. Краматорськ, Донецька область, 84306, Україна.

**О. О. Шаповал**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна.

Розглянуто дефекти, утворені під час та після розкочування обичайок з одностороннім уступом. Наведено приклад застосування подібних обичайок у енергетичній промисловості для будівництва реакторів високого тиску. Встановлено, що при використанні профільованого східчастого бойка для розкочування обичайок з одностороннім уступом виникають затиски на уступі біля нахиленої ділянки. Це обумовлено малим кутом нахилу ділянки, який складає  $10^\circ$ . За для усунення дефекту запропоновано збільшити цей кут до  $30^\circ$ . Інший дефект виникає у випадку коли на початковій стадії розкочування деформується лише виступ. Цей дефект полягає у тому, що при деформуванні виступу частина уступу деформується об дорн, збільшуючи діаметр отвору з цього боку. Уникнути цього дефекту дозволить по стадійне розкочування: підготовче зі ступеню деформації 0,1-0,2 з більшою сходиною та остаточне з потрібним профілем.

**Ключові слова:** заготовка, затиск, обичайка, різновтовщинність, поковка, фасонний профіль, безшовне кільце.

### ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ НА ОБЕЧАЙКАХ С ОДНОСТОРОННИМ УСТУПОМ ПРИ РОСКАТКЕ ПРОФИЛИРОВАННЫМ СТУПЕНЧАТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

**М. С. Косілов, О. В. Герасименко, О. Е. Марков**

Донбасская государственная машиностроительная академия

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

**А. С. Хващинский**

ПАО «Энергомашспецсталь»

ул. Совхозная, г. Краматорск, Донецкая область, 84306, Украина.

**А. А. Шаповал**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина.

Рассмотрены дефекты, образованные в процессе и после раскатки обечаек с односторонним уступом. Приведен пример применения подобных обечаек в энергетической промышленности для строительства реакторов высокого давления. Установлено, что при использовании профилированного ступенчатого бойка для раскатки обечаек с односторонним уступом возникают зажимы на уступе возле наклоненного участка. Это обусловлено малым углом наклона участка, который составляет  $10^\circ$ . Для устранения дефекта предложено увеличить этот угол до  $30^\circ$ . Другой дефект возникает в случае, когда на начальной стадии раскатки деформируется только выступ. Этот дефект заключается в том, что при деформации выступа часть уступа деформируется об дорн, увеличивая диаметр отверстия с этой стороны. Избежать этого дефекта позволит по стадийная раскатка: предварительная со степенью деформации 0,1-0,2 с большей степенью и окончательная с нужным профилем.

**Ключевые слова:** заготовка, зажим, обечайка, разнотолщинность, поковка, фасонный профиль, бесшовное кольцо.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Не дивлячись на зростаючу популярність альтернативних джерел видобутку енергії (енергія вітру, сонця, геотермальні джерела, біопаливо та інші), атомні електростанції досі розглядаються, як один з головних та пріоритетних напрямків розвитку енергетичного сектору. Елементи атомних станцій повинні бути міцні, надійні, безпечні та забезпечувати цілісність усієї конструкції тривалий період. З цієї точки зору, все більше уваги приділяється виготовленню суцільних елементів зі складною формою поверхні, які раніше виготовлялися з декількох простих шляхом зварювання [1]. Вони можуть мати сферичну, конічну, східчасту або комбіновану форми [2–5].

Виготовлення таких деталей супроводжується значними витратами металу тому, що більша їх час-

тина іде у відходи у вигляді стружки. Матеріальні та енергетичні витрати є невід'ємною складовою собівартості виготовлення продукції [6]. Від скорочення витрат напряму залежить зниження собівартості продукції. Механічна обробка для отримання складної форми потребує багато часу. Зменшення тривалості цієї стадії знижує цикл виготовлення та суттєво підвищує виробничу потужність підприємства. На сьогодні вже розроблено достатньо конструкцій реакторів, при будівництві яких використовують елементи зі складною формою зовнішньої поверхні [7]. Таким чином доцільним буде виготовлення поковки, яка найбільш близька до форми заданого елементу реактору. В цьому випадку утворюється волокниста структура, яка забезпечує необхідну щільність та міцність, а при подальшій механічній

обробці значно зменшується об'єм металу, який іде у відходи. З цього приводу виробництво таких елементів є пріоритетом для кожного підприємства [8].

Для вирішення завдань отримання пустотілих поковок із профільованою поверхнею на Japan Steel Works, Ltd (JSW) розроблені спеціальні схеми роз-

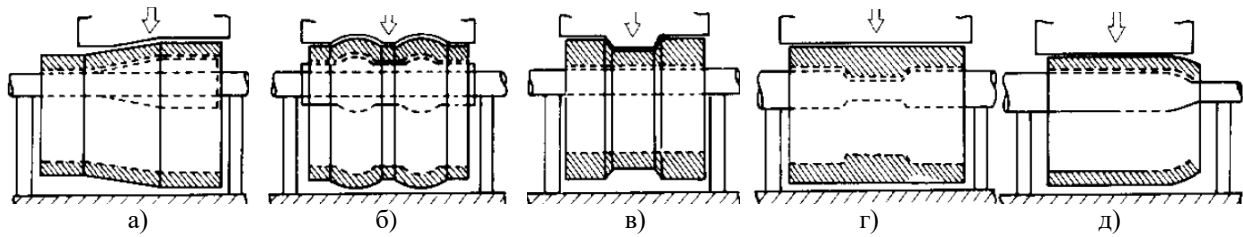


Рисунок 1 – Способи розкочування пустотілих обичайок з профільованою поверхнею

Завдяки розробленому способу розкочування (рис. 2) профільованим інструментом, компанією JSW було відковано конічну обичайку з циліндричними секціями. Кована обичайка не мала поздовжніх зварних швів. Завдяки суцільно кованій структурі виріб мав кращі механічні властивості у порівнянні з виробом, який зварювався, до того ж завдяки тому що була використана одна заготовка (злиток) поковка мала меншу неоднорідність хімічного складу. Пізніше [9] подібна технологія кування була вдосконалена за допомогою дослідження методом скінчених елементів та застосована для кування іншої обичайки з сталі SA508-3. Розподіл напружень деформованого стану вказує на те, що більші деформації переважно розподіляються на внутрішній поверхні поковки, а сторона з більшим діаметром отримує значно більшу деформацію, ніж сторона з меншим діаметром

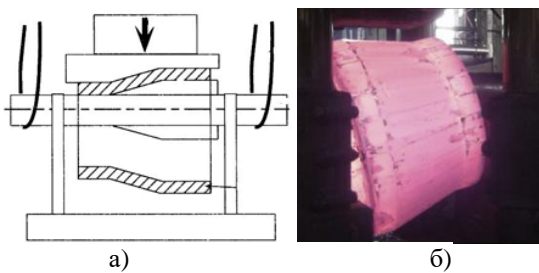


Рисунок 2 – Спосіб кування (а) та промислове виробництво (б) обичайки з циліндричними секціями

Безшовне кільце для резервуару парогенератора ядерного реактора з водяним охолодженням є одним з виробів, які виготовляють методом кування [10]. З огляду на профіль, його виробляють зі значними припусками для розкочування на дорні так само, як і поковки кілець, що мають прямокутний переріз. Обмеженням цього методу є великі витрати металу, оскільки гладке циліндричне кільце потрібно обробляти таким чином, щоб з нього за допомогою подальшої механічної обробки можна було отримати кінцеву профільовану форму кільця. Цей недолік усувається за допомогою винаходу, який дозволяє виробляти штуцерні й інші кільця, що мають фасонний профіль, методом вільного кування кільця з

кочування (рис. 1) [1]. Ці схеми знайшли застосування для виробництва наступних елементів реакторного блоку: конусний корпус парогенератора (а), нижній сферичний корпус парогенератора (б); корпуси із зовнішнім уступом (в) та внутрішнім виступом (г), нижній корпус реактора високого тиску (д).

прямокутним поперечним перетином та подальшим калібруванням профільованим бойком. Виріб фасонного профілю з одностороннім уступом, призначеного для виробництва кілець реакторів високого тиску представлені на рис. 3.

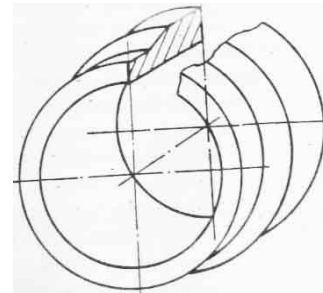


Рисунок 3 – Профільоване кільце з одностороннім уступом для виготовлення котлів високого тиску

Зі злитка спочатку отримують поковки круглого перетину (білет), відсікають прибілку і донну частину, потім отриманий блок осаджують, прошивають і розкочують на дорні плоским бойком, надаючи форму кільця з прямокутним перетином. При цьому кільце-заготовку одягають на дорн, величина діаметра якого становить 0,8–1 величини внутрішнього діаметра кільця, і роблять попередню ковку таким чином, що висота кільця становить 0,8–1 кінцевої висоти, а товщина стінки кільця в 2–4 рази перевищує його кінцеву товщину. Далі проводять кування профільованим бойком, робоча поверхня якого відповідає зовнішньому контуру поковки. Недоліком способу є складність прогнозування формотворення під час остаточного розкочування.

Злиток масою 500 т потребувався для виготовлення поковки, яка була першою великогабаритною поковкою виготовленою на 14000 т пресі, встановленому на JSW у 2003 році [11]. Прибуткова та донна частини були відрубані, для забезпечення потрібного об'єму поковки, потім блок був осаджений, прошитий, протягнутий на оправці і розкочений, щоб отримати необхідну форму, яка включала уступ на ділянці між фланцем і зоною патрубків. Зона патрубків і фланець мали товщину близько 700 мм. Але не зрозуміло чому для виготовлення такої габаритної поковки не засовувався пустотілий злиток.

Спосіб виготовлення кільцевих поковок із зовнішньою поверхнею у вигляді концентричних, послідовно зменшуваних у діаметрі від одного торця до другого циліндричних уступів передбачає попереднє формоутворення конічної порожнистої заготовки та її кінцеве кування розкочуванням на оправці [12]. Після отримання конусної заготовки, її розміщують на оправці та починають розкочування зі сторони меншого діаметра, формуючи ступень меншого діаметра. Розкочування ведуть до формування зовнішньої поверхні у вигляді циліндрів. Недоліком способу є те, що для утворення конусної заготовки необхідно розширити парк оснащення, для збільшення номенклатури отримуваних обичайок. Також в роботі відсутні рекомендації щодо розмірних діапазонів отримуваних виробів.

Для підвищення коефіцієнта використання металу і зниження трудомісткості виготовлення виробів в формі усіченого конуса з виступом на зовнішній або внутрішній поверхні з боку меншого діаметра поковки шляхом зменшення величини напуску запропоновано використовувати бойок з виступом або оправку з різними діаметрами [13]. Попереднє розкочування виконують з двома виступами на поковці, а в останньому виносі роблять розкочування виступу з одного боку. Заготовка збільшується у діаметрі з одного боку, а з іншого не змінюється, таким чином виникає конусна форма. У роботі наведено приклад експериментального випробування виготовлення поковки на свинцевих заготовках, але нажалі відсутні рекомендації щодо закономірностей формозміни заготовки під час розкочування в залежності від ступеня деформації.

Для отримання кільцевих поковок з виступом на внутрішній та зовнішній поверхнях [14], запропоновано використовувати кільцеву заготовку з висотою, рівній ширині внутрішнього виступу поковки. Перед розкоченням її центрують на оправці по бічних поверхнях, а розкочування виробляють в дві стадії, на першій з яких заготовку розкочують на Т-подібний профіль з оформленням виступу по внутрішній поверхні поковки. Потім її надрубують по зовнішній поверхні в двох паралельних площях, розташованих на відстані рівній ширині зовнішнього виступу поковки. Після чого здійснюють другу стадію розкочування, остаточно оформлюючи профіль поковки. Недоліком способу є необхідність часто змінювати бойок під час кування, через що поковка буде простоювати та втрачати температуру, що може призвести до одержання неправильної форми поковки.

Отримувати кільцеві деталі з двотавровим профілем перетину з зовнішніми та внутрішніми полками пропонується за рахунок формування внутрішніх полиць висотою, рівною 0,2–0,7 висоти заготовки з одночасним оформленням кільцевого виступу виступаючого за зовнішню периферійну поверхню бандажів на величину, рівну 0,2–2,5 висоти виступу, а потім останній деформують до отримання зовнішніх полиць [15]. Недоліком способу є вірогідність отримання неправильної форми поковки під час останньої операції через те що може деформуватися внутрішній бург.

Розширити номенклатуру одержуваних деталей шляхом виготовлення кільцевих поковок з кільцевим виступом по внутрішній поверхні і відповідним йому кільцевим поглибленням і при цьому підвищити якість готового виробу можна за рахунок використання оправки з кільцевим поглибленням, кільцеве поглиблення по зовнішній поверхні формують використовуючи фігурний бойок [16]. Попереднє формоутворення виробляють розкочуванням кільцевої заготовки до величини внутрішнього діаметра, що перевищує максимальний діаметр оправки. Але в роботі відсутні рекомендації щодо формування заготовки з буртом на внутрішньому діаметрі для подальшого розкочування профільованим бойком.

У літературі тема кування поковок обичайок зі значною різницею в розмірах поперечного перерізу, а саме з одностороннім уступом, розкрита не достатньо. Через не достатню ви-вченість деформування профільованим інструментом, зокрема східчастим бойком, відсутня інформація щодо утворення дефектів, під час кування та рекомендації для їх усунення чи мінімізації. Отримання куванням обичайок зі значною різницею в розмірах поперечного перерізу, найбільш близьких до заданої форми, з мінімальними дефектами та високої якості є актуальною проблемою для сучасної промисловості.

Мета роботи – аналіз утворення дефектів та шляхи їх усунення під час розкочування пустотілих поковок зі східчастою зовнішньою поверхнею.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для моделювання процесу розкочування, використовувалася програма DEFORM–3D (тимчасова ліцензія ДГМА). В основі програми закладено метод скінченних елементів, який найбільше узгоджується з експериментальними даними [17, 18]. Геометрія для моделювання процесу створювалася в системі тривимірного проектування Компас 3D (ліцензія ДДМА). Граничні умови мали наступні параметри:

матеріал – 42CrMo4,  
початкова температура заготовки – 1200 °С,  
кількість елементів сітки – 80000 шт,  
переміщення головного інструменту – 40 мм/с,  
температура бойка та дорна – 100 °С,  
фактор тертя – 0,7.

У роботі проводяться дослідження процесів гарячого пластичного деформування, яке характеризується великою кількістю і складністю процесів, що протікають в металі. Такі процеси залежать від розмірів, форми, хімічного складу матеріалу, температурних, швидкісних умов, умов навколишнього середовища і так далі. Для відтворення процесів, які протікають в натуральному зразку і моделі, необхідно задовольнити основним умовам і законам подоби: геометричному, реологічному і кінематичному.

Геометричні умови подібності:

$$\frac{h_n}{h_m} = \frac{b_n}{b_m} = \frac{l_n}{l_m} = n,$$

де  $h_n, h_m, b_n, b_m, l_n, l_m$  – геометричні параметри натурального і модельного зразків;  $n$  – масштабний коефіцієнт подібності.

Кінематична умова подоби:

$$v_m = v_k \cdot n,$$

де  $v_m$ ,  $v_n$  - швидкість деформування моделі і натурального зразка відповідно.

Для виявлення загальних закономірностей процесів пластичної формозміни часто вибирають матеріал моделі відмінним від матеріалу натурі. Для дослідження процесів гарячої обробки металів в лабораторних умовах рекомендовано використовувати свинець, так як цей метал добре піддається обробці, пластичний, має низьку температуру рекристалізації ( $\approx 20^\circ\text{C}$ ) і плавлення ( $\approx 330^\circ\text{C}$ ). Моделювання на свинцевих заготовках не суперечить положенням теорії подоби, тому для цього матеріалу можна реалізувати повний металургійний цикл.

Для проведення дослідження виготовлялися свинцеві заготовки з відносним діаметром з боку виступу  $D_e^{заз} / d_{cp}^{заз} = 2,5$  та відносними діаметрами з

боку уступу  $D_y^{заз} / d_{cp}^{заз} = 1,65; 1,84; 2,03$ . Для розкочу-

вання використовувався східчастий бойок та дорн  $\text{Ø}30$  мм. Дослідження були проведені в лабораторних умовах на гідравлічному пресі BLELL K-G но-

мінальним зусиллям 100 кН.

Зразки отримувалися шляхом лиття свинцю у форму зі стрижнем з подальшою механічною обробкою. Усі відлиті зразки мали діаметр виступу 80 мм, діаметр уступу 65 мм та висоту уступу 49 мм. Висота виступу відлітої заготовки складала 53 мм, що на 20 мм більше ніж потрібно. Запас висоти робився для того, щоб усадочна раковина, що утворюється під час кристалізації, не потрапила у тіло заготовки, яка в подальшому розкочувалася. Під час лиття виливниці мала температуру  $180^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ , з метою усунення нашарування свинцю на стінки під час лиття. Підігрів виконувався за допомогою промислового фену HeiBluftpistole ВНА 1500 з максимальною температурою нагрівання  $500^\circ\text{C}$ . Охолодження заготовок відбувалося разом з виливницею на повітрі. Відлиті заготовки в подальшому були механічно оброблені до потрібних розмірів для отримання зразків згідно з плануванням експерименту.

При плануванні експерименту були визначені розміри заготовок і встановлені схеми розкочування, які умовно можна поділити на наступні: першим деформується виступ (рис. 4, а), одночасне деформування виступу та уступу (рис. 4, б) та першим деформується уступ (рис. 4, в).

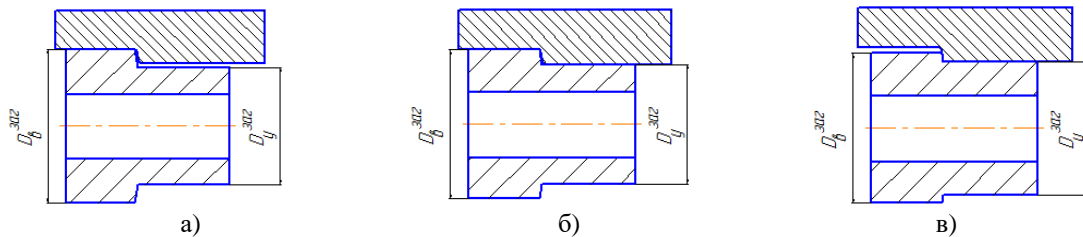


Рисунок 4 – Схеми розкочування: а) – деформування уступу на початковій стадії; б) – одночасне деформування виступу та уступу на початковій стадії; в) – деформування уступу на початковій стадії

При проектуванні технологічного процесу кування поковок з одностороннім уступом необхідно враховувати те, що при розкочуванні швидкість збільшення діаметру з боку уступу більша через більшу ступінь деформації [19]. З цієї точки зору перспективним для вивчення та застосування є розкочування зі змінюваною конусністю під час деформування, а саме схема зображена на рисунку 1 а, коли спочатку деформується виступ. Але в цьому випадку на заготовці можуть виникати затиски та різнововщинність уступу. Це потребує застосовувати шляхи їх усунення при розробці технологічного процесу.

Під час виконання експерименту на свинцевому сплаві та теоретичного дослідження МСЕ у всіх схем були виявлені затиски (рис. 5). Вони утворилися на уступі біля виступу. Їх виникнення обумовлено кутом ступені, який отримується під час протягування уступу та отримання заготовки для розкочування. В наведеному дослідженні був використаний кут нахилу ступені  $10^\circ$ , як на заготовці, так і на бойку. В першому випадку (рис. 5, а) спочатку деформується виступ, метал частково затікає під бойок, що спричиняє виникнення затиску. У другому випадку (рис. 5, б) зажим утворюється через радіус округлення на бойку. Метал заповнює просвіт між бой-

ком та заготовкою. В третьому випадку (рис. 5, в), коли спочатку деформується уступ, вже на початковій стадії збільшується конусність з боку уступу та виникає більший діаметр. Кут ступені зменшується, між бойком та заготовкою утворюється простір, який заповнюється металом, що спричиняє виникнення затиску. З огляду на те, що для всіх схем характерною ознакою є виникнення затиску, для попередження виникнення цього дефекту пропонується збільшити кут нахилу ступені заготовки та бойка. Завдяки цьому площа контакту між бойком та заготовкою на нахилений ділянці буде більша, а простір між ними буде відсутній.

При розкочуванні поковок по схемі зображеній на рисунку 2 а, з відносним діаметром уступу  $D_y^{заз} / d_{cp}^{заз} \leq 1,85$  та з відносним діаметром виступу  $D_e^{заз} / d_{cp}^{заз} \leq 2,5$ , утворювалася різнововщинність уступу до початку його деформування (рис. 6). Це призводить до більшого збільшення довжини (уширення) уступу в порівнянні зі збільшенням довжини виступу.

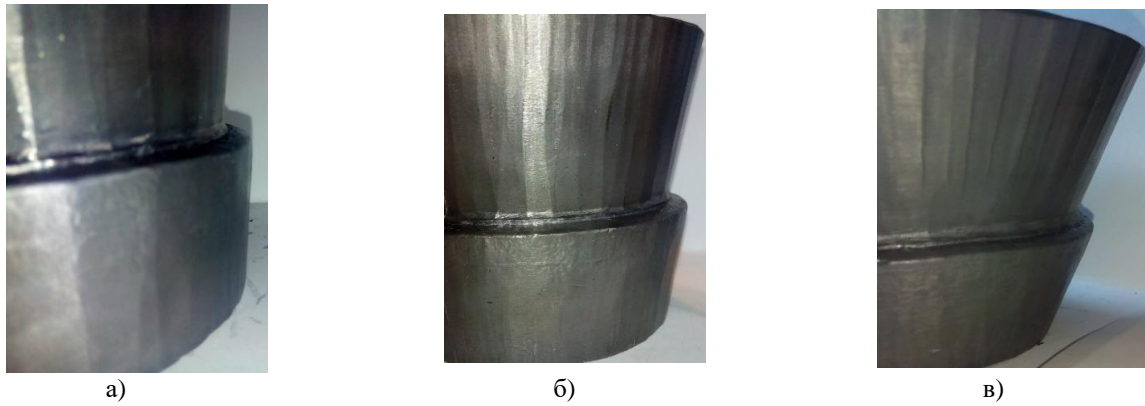


Рисунок 5 – Затиски утворені при розкочуванні: а) – деформування уступ на початковій стадії; б) – одночасне деформування виступу та уступу на початковій стадії, в) – деформування уступу на початковій стадії

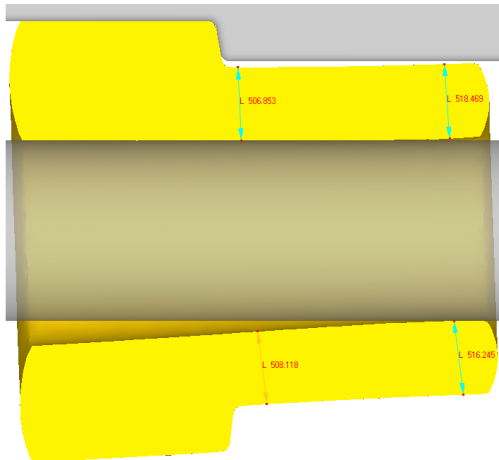


Рисунок 6 – Змінення товщини стінки заготовки на початковому етапі розкочування

Таким чином частина металу, яка повинна була текти у радіальному напрямку і збільшити діаметр, була спрямована у продольному напрямку.

Діаметр необхідного розміру з боку уступу не утворився і форма поковки залишилася конусною з більшим діаметром з боку виступу. Це пояснюється тим, що при розкочуванні отвір збільшується з боку виступу і поковка приймає конусну форму. В цей час з боку уступу діаметр змінюється у розмірі через, те що по внутрішній поверхні уступу поковка знизу упирається у дорн і, таким чином, діаметр з цього боку також збільшується, через що стінка в цьому місці трохи збільшується. Тому, з огляду на це, пропонується виконувати розкочування поступово. Спочатку деформувати виступ бойком з величиною ступені більшою ніж потрібно, до розкочування уступу з ступенем деформації 0,1 – 0,2. Потім бойком з необхідним профілем контуру розкочувати до потрібних розмірів.

**ВИСНОВКИ.** Під час виконання роботи був встановлений діапазон відносних розмірів, завдяки яким визначені основні схеми розкочування. Встановлено, що для усіх схем характерна наявність дефекту – затиску на уступі біля виступу. Для його усунення запропоновано збільшити кут нахилу ступені. Також для схеми, в якій на початковій стадії розкочування деформується уступ, характерна нері-

вномірною товщиною стінки уступу. Це виникає через, те що уступ упирається у дорн під час деформування виступу. Нерівномірність товщини стінки призводить до більшого уширення уступу під час його деформування. Рішення полягає у використанні двох бойків з різними ступенями. Перше розкочування підготовче, друге – остаточне.

#### ЛІТЕРАТУРА

- 1 Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant. K. Suzuki, I. Sato, M. Kusuhashi, H. Tsukada. *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)
- 2 Моделювання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування. М.С. Косілов, О.С. Марков, О.В. Герасименко, С.О. Шевцов. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. № 35. С. 25–29.
- 3 Кальченко П.П., Марков О.Е. Новые технологические процессыковки крупных прессовых поковок – Краматорск: ДГМА, 2014. 100 с.
- 4 Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process. I.G. Zhabankov, O.E. Markov, A.V. Perig. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. №71(5–8). PP. 865–872. – <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
- 5 Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel. [W. Bao-zhong, L. Kai-quan, L. Ying et al.]. *19th International Forgemasters Meeting*. 2014. PP. 391–396.
- 6 Straightening of sheet with correction of waviness. A.V. Barabash, E.Yu. Gavril'chenko, E.P. Gribkov, O.E. Markov. *Steel in translation*. 2014. № 44 (1). PP. 916–920. <http://dx.doi.org/10.3103/s096709121412002x>.
- 7 Carelli M.D., Ingersoll D.T. Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments. *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*. 2015. PP. 27–60. <http://doi.org/10.1533/9780857098535.1.27>
- 8 Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем. О.С. Марков, М.С. Косілов, О.В. Герасименко, С.О. Шевцов. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. № 2. С. 85–91. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575>.

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. № 418. PP. 269–280. – <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.07.011>

10 Соколов Л.Н., Алиев И.С., Марков О.Е., Алиева Л.И. Атлас технологических процессовковки крупных поковок: учеб. пособие для студентов специальности «Обработка металлов давлением» по дисциплине «Технологияковки». Ч. 3. Краматорськ: ДГМА, 2007. 172 с.

11 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.

12 Современные тенденции изготовления тонкостенных пустотелых поковок для энергетической промышленности. [О.Е. Марков, А.И. Лобанов, М.С. Косилов та ін.]. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 1. С. 5–10.

13 Современные способы получения тонкостенных деталей ответственного назначения. О.Е. Марков, А.О. Шарун, М.С. Косилов, Е.В. Инчаков. *Обработка материалов давлением*. 2017. № 1. С. 115–122.

14 Разработка технологии и производство удлиненной обечайки активной зоны корпуса реактора проекта ввэр-тои из стали 15Х2НМФА кл.1. [Шкляев С.Э., Титова Т.И., Ратушев Д.В. и др.] Сборник трудов 9-й международной научно-технической

конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 19-22 мая 2015 г. Подольск, 2015. 11 с.

15 Дослідження формозмінення поковки при розкочуванні інструментом ступінчастої форми. Марков О.Є., Косілов М.С., Станков В.Ю., Різак П.І. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць*. Краматорськ. № 40, 2017. С. 114-120.

16 Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування О.Є. Марков, М.С. Косилов, О.В. Герасименко, С.О. Шевцов *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. № 3. С. 47–53.

17 Development of a new process for forging plates using intensive plasticdeformation. О.Е. Markov, A.V. Perig, M.A. Markova, V.N. Zlygoriev. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2016. № 83 (9-12). P. 2159–2174. – <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015- 8217-5>

18 A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. [О.Е. Markov, A.V. Perig, V.N. Zlygoriev et al.]. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2017. № 90. PP. 801–818.

<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016- 9378-6>.

19 Дослідження формозміни та деформованого стану східчастих заготовок під час розкочування профільованим бойком. М.С. Косілов, О.Є. Марков, О.В. Герасименко, Є.В. Инчаков. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. № 5. С. 82–88.

#### DEFECT FORMATION ON SHELLS WITH ONE-WAY LEDGE WHILE ENLARGING WITH A PROFILED STEPPED INSTRUMENT

**M. Kosilov, O. Herasymenko, O. Markov**

Donbas State Machine-Building Academy

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

**A. Khvashchynskiy**

PJSC «Energomashspetsstal»

vul. Radgospna, Kramatorsk, 84306, Ukraine.

**A. Shapoval**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine.

**Purpose.** To analyze the mechanism of formation of defects during the enlarging of hollow forgings with the stepped outer surface and to suggest ways to eliminate them. The article deals with defects formed during and after the enlarging of one-way ledge shells, which are used in the manufacture of pressure vessels. An example of the use of such shells in the power industry for the construction of high-pressure reactors is given. **Methodology.** To simulate the enlarging process, the DEFORM-3D program (temporary license of the DGMA) was used. This program is based on the finite element method. To implement the experiment, a planning method was used. There were three main planning schemes, depending on what part deformed at the initial stage 1 - ledge 2 - both salient and ledge 3 – salient. In order to maximally approximate experimental research to real conditions, it is necessary to meet to the basic conditions of the law of similarity. Lead was used to study the processes of hot metal processing under laboratory conditions, since this material is well processed and has a low temperature of recrystallization and melting. **Results.** It has been established that cramps occur on the ledge near the inclined site by using a profiled step die for enlarging shells with a one-way ledge. This is due to the small angle of inclination of the plot, which is 10°. In order to eliminate the defect, it is proposed to increase this angle to 30°. Another defect occurs in the case when at the initial stage the salient deforms of enlarging only. This defect consists in case of deforming the salient, part of the ledge deforms about the drow, increasing the diameter of the hole on this side. Avoid this defect will allow for staggering enlarging: preparatory with a degree of deformation 0,1-0,2 with a larger step and the final with the desired profile. **Originality.** For the first time, an enlarging of stepped hollow forgings was executed using a profiled die and the mechanism of formation of defects on the forgings received was investigated. **Practical value.** This research will allow to improve the quality and accuracy of the manufactured rails with a rope or a flange using a profiled die. References 19, figures 6.

**Key words:** workpiece, clamp, shell, different thickness, forging, shaped profile, seamless ring, material costs.

## REFERENCES

1. Suzuki, K., Sato, I., Kusuhashi, M., Tsukada, H. (2000), Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant, *Nuclear engineering and design*. 198 (1-2), PP. 15-23. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00273-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00273-3)
2. Kosilov, M.S., Markov, O.Ye., Herasymenko, O.V., Shevtsov, S.O. (2017), Modeliuvannya deformovanoho stanu skhidchastykh pusotilykh pokovok v protsesi rozkochuvania [Modeling of the deformed state of stepped bulky forgings during the rolling process], *Visnyk NTU «KhPI»*, no. 35, pp. 25-29.
3. Kalchenko, P.P., Markov, O.E. (2014), *Novyye tehnologicheskie protsessy kovki krupnykh pressovykh pokovok* [New technological processes of forging large press forgings], Kramatorsk, DGMA.
4. Zhibankov, I.G., Markov, O.E., Perig, A.V. (2014), Rational parameters of profiled workpieces, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 72 (5-8), PP. 865-872. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
5. Bao-zhong, W., Kai-quan, L., Ying, L., Wen-hui, Z., De-li, Z. (2014), Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel, *19th International Forgemasters Meeting, Makuhari*, PP. 391-396.
6. Barabash, A.V., Gavril'chenko, E.Yu., Gribkov, E.P., Markov, O.E. (2014), Straightening of sheet with correction of waviness, *Steel in translation*. 44 (12), pp. 916-920. <http://dx.doi.org/10.3103/s096709121412002x>.
7. Carelli, M.D., Ingersoll, D.T. (2015), Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments, *Handbook of small modular nuclear reactors*, no. 1, <https://doi.org/10.1533/9780857098535.1.27>.
8. Markov, O.E., Kosilov, M.S., Gerasimenko, O.V., Shevtsov, S.O. (2017), Osoblivosti protsesu vigotvleniya pustotilykh 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>
9. 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>
10. Sokolov, L.N., Aliev, I.S., Markov, O.E., Alieva, L.I. (2007), *Atlas tehnologicheskikh protsessov kovki krupnykh pokovok: ucheb. posobie dlya studentov spetsialnosti «Obrabotka me-tallov davlenie» po distsipline «Tehnologiya kovki»* [Atlas of technological processes of forging of large forgings: study. Handbook for students of the specialty "Processing of media pressure" in the discipline "Technology forging"], 3 ed., Kramatorsk: DGMA.
11. 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.
12. Markov, O.E., Lobanov, A.Y., Kosylov, M.S., Sharun, A.O., Ynchakov, E.V (2017), *Sovremennyye tendentsii izgotovleniya tonkostennykh pustotelykh pokovok dlya energeticheskoy promyshlennosti* [Modern tendencies of manufacturing thin-walled hollow forgings for the power industry], *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*, no. 1, pp. 5-10.
13. Markov, O.E., Sharun, A.O., Kosilov, M.S., Inchakov, E.V. (2017), *Sovremennyye sposobyi polucheniya tonkostennykh detaley otvetstvennogo naznacheniya* [Modern methods of obtaining thin-walled parts of a responsible designation], *Obrabotka materialov davleniem*, 1(44), pp. 115-122.
14. Shklyayev, S.E., Titova, T.I., Ratushev, D.V. (2015), *Razrabotka tehnologii i proizvodstvo udlinennoy obechayki aktivnoy zonyi korpusa reaktora proekta VVER-TOI iz stali 15H2NMFA kl.1* [Development of technology and manufacture of the rectangular waist of the active zone of the vver-toy project reactor house from steel 15H2NMFA cl.1], Podolsk: OKB "Gidropress".
15. Markov, O.E., Kosilov, M.S., Stankov, V.Yu., Rizak, P.I. (2017), *Doslidzhennya formozminennya pokovki pri rozkochuvanni instrumentom stupinchastoyi formi* [Investigation of forging modification during rolling with a tool of step form], *Nadiynist instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prats*, 2(40), pp. 114-120.
16. Markov, O.Ye., Kosylov, M.S., Herasimenko, O.V., Shevtsov, S.O. (2017), *Analiz formozminy ta deformovanoho stanu pustotilykh stupinchastoyi pokovky v protsesi rozkochuvannia* [Analysis of mold and deformed state of hollow stepped forging in rolling process], *Mechanics and Advanced Technologies*, 3(84), pp. 47-53.
17. 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*, no. 83 (9-12), 2159-2174. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
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*, vol. 90, no. 1-4, pp. 801-818. – <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.
19. Kosilov, M.S., Markov, A.E., Gerasimenko, A.V., Inchakov, E.V. (2017), *"Doslidzhennia formozminy ta deformovanoho stanu skhidchastykh zahotovok pid chas rozkochuvannia profilovanykh boikom* [Research forming and strain state of stepped workpieces during enlarging by profiled die]", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University*, no. 106 (5), pp. 82-88.

Стаття надійшла 26.03.2018.