

УДК 621.736.2

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-25-36

Олег Марков, Володимир Панов, Юлія Іванова,
Антон Хващинський, Роман Житніков, Максим Косілов

УДОСКОНАЛЕННЯ ОПЕРАЦІЇ КУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ПУСТОТЛИХ ПОКОВОК ЗІ СКЛАДНИМ ПРОФІЛЕМ

Аналіз наукових публікацій дозволив виявити, що проблема підвищення коефіцієнта використання матеріалу при виготовленні східчастих обичайок на сьогодні не вирішена повністю. Відомі технологічні процеси кування великих обичайок полягають у закриванні уступів технологічним напуском на механічну обробку. Це приводить до зайвих витрат матеріалу, а також розрізування внутрішньої волокнистої структури. Моделювання дозволило встановити, що кування східчастим бойком призводить утворення конусності на обичайках. Макроструктурне дослідження дозволило визначити, що процес кування таких поковок східчастим бойком призводить до утворення волокнистої будови, яка повторює контур східчастої деталі.

Ключові слова: кування кілець; операція розкочування; великі поковки; східчаста обичайка; бойок; східчастий інструмент; конусність.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 29.

Актуальність теми дослідження. Пріоритетним напрямом розвитку машинобудування є розробка енергозберігаючих технологічних процесів виготовлення виробів відповідального призначення для енергетичних установок. Це пов'язане з розробкою та впровадженням нових наукомістких технологій, які сприяють підвищенню якості продукції внаслідок використання нових способів деформування. На сьогодні на підприємствах енергетичного машинобудування не вистачає досліджень і науково обґрунтованих рішень із розробки сучасних технологічних процесів кування поковок, які призначені для виготовлення деталей відповідального призначення. Основним завданням розвитку машинобудування є розробка принципово нових ресурсозберігаючих технологій, які забезпечують підвищення продуктивності, економію матеріальних і енергетичних ресурсів. Вирішення цих завдань сприяє впровадженню в промисловість прогресивних технологічних процесів кування обичайок [1]. Критеріями оптимальності в цьому випадку служать висока якість і прийнятна собівартість деталей відповідального призначення. Розвиток наукових основ для підвищення якості й зниження витрат при виготовленні масивних поковок відповідального призначення, вимагає проведення спеціальних досліджень, спрямованих на розробку нових і вдосконалення наявних технологічних процесів кування й ковальського інструмента. Це вимагає застосування інтегрованого підходу, який враховує складний ланцюг усієї технологічної послідовності виготовлення обичайок від виробництва злитків, подальшого їх кування і механообробки.

Постановка проблеми. Актуальною науково-практичною проблемою в процесах кування масивних поковок є виготовлення заготовок зі східчастим профілем, який повторює геометрію деталі. Це дасть можливість не перерізувати внутрішню волокнисту будову заготовки й підвищити коефіцієнт використання металу. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести дослідження нового способу розкочування східчастих поковок на основі моделювання на свинцевих і сталевих заготовках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимізація технологічних процесів виготовлення масивних заготовок полягає у виключенні або в заміні неефективних, енергоємних операцій такими, які не приводять до збільшення витрат і водночас гарантують одержання заданої якості [2]. Однією з таких операцій є операція осадження. Виключити операцію осадження можна застосовуючи нові злитки [3; 4]. Як зазначено в роботі [5], з метою підвищення якості поковок відповідального призначення, для розробки нових перспективних енергоустановок підвищеної потужності була розроблена технологія виробництва великогабаритних обичайок. У роботі [6] проведено оцінювання технічних переваг виробництва великогабаритних поковок відповідального призначення. Однак у роботах [2–6] не розкриті технологічні режими й рекомендації для кування обичайок.

У роботі [7] з метою економії металу при виготовленні пустотілих деталей удосконалена технологія відливання пустотілих злитків. Проведене моделювання процесу заливання та кристалізації пустотілого злитка вказало на зниження сегрегації і меншу глибину усадочної раковини в порівнянні звичайними злитками. Однак у роботі [7] не досліджується ліквідація в отриманих злитках і відсутні дані щодо механічних властивостей отриманих обичайок.

Дослідження [8] дозволило розробити нову технологію лиття 200-тонного пустотілого злитка для виготовлення обичайок. Отримана поковка мала високі показники механічних властивостей. Однак у роботі [8] не зазначена послідовність технологічних операцій кування і яким чином це вплинуло на отримані механічні властивості поковки.

Використання пустотілого злитка як напівфабрикату для виробництва пустотілих поковок є не тільки економічно ефективним, але дає поліпшення якості поковок. Механічні властивості поковок стають більш однорідними в усіх напрямках, а розміри макроліквідацій значно нижче, ніж у випадку використання звичайного злитка [9]. Однак у роботі [9] не зазначені результати металографічних досліджень для отриманих поковок.

У роботі [10] зазначено, що під час виготовлення кільця за традиційною технологією кування зі звичайного злитка були розглянуті різні емпіричні співвідношення геометричних розмірів кілець. Ці рекомендації були запропоновані для належного контролю форми в процесі кування кілець на оправці. Для одержання тонкостінного кільця ці рекомендації підвищують коефіцієнт використання матеріалу в порівнянні зі способом традиційного розкочування кілець. У роботі не досліджений вплив способу деформування на показники якості, а також відсутня інформація про умови проведення експерименту й розміри отриманих поковок.

Для виготовлення корпусу реактора були отримані куванням дві обичайки. Одна із зовнішнім, а інша – із внутрішнім фланцем. Особливістю способу є те, що обичайки із фланцем кувалися із застосуванням східчастого верхнього бойка [11–13]. Однак у згаданих роботах [11–13] відсутні рекомендації щодо співвідношення розмірів заготовки, яка була використана для розкочування й параметри робочої поверхні інструмента.

Спосіб виготовлення великогабаритної поковки обичайки реакторного блоку [14] передбачав кування кільця та фланця з подальшим їхнім зварюванням. Це призвело до збільшення кількості зварних швів, які в умовах радіації приводять до передчасної їхньої корозії. Було б доцільно розглянути в роботі спосіб виготовлення суцільнокованого поковки із фланцем.

У роботах [15–17], досліджений процес формування конічної обичайки із циліндричними ділянками. Процес кування складається із традиційних операцій, але на останніх переходах, використовуючи спеціальне оснащення, кується циліндрична ділянка поковки. Однак у роботах [15–17] відсутні дані про режими кування заданої поковки.

Виготовлення поковок із буртом супроводжується дефектами на торці уступу або на внутрішній поверхні з боку виступу [18]. Раціональним способом вирішення цієї проблеми є моделювання процесу розкочування методом скінченних елементів (МСЕ). У роботі [19] МСЕ досліджуються фактори, які впливають на виникнення дефектів під час виготовлення пустотілих заготовок. Але в роботі не зазначено, як хімічний склад матеріалу впливає на якість виробів. Наявність дефектів у поверхневих шарах заготовки може служити причиною подальшого утвору тріщин під час кування.

Автори роботи [20] оптимізували процес кування масивних поковок на основі МСЕ, який полягає в дослідженні впливу форми інструмента на формозміну заготовки в процесі кування. Подібна концепція, ефективність якої продемонстрована лише на конкретному прикладі, не поєднує можливості віртуального аналізу, практичних спостережень і може застосовуватися тільки для оцінки конкретного процесу кування.

У роботах [21–24] досліджувалося закриття внутрішніх несучільностей при протягуванні й осадженні гарячих злитків. Установлені технологічні параметри – подача й обтискання при деформуванні. У роботі [25] за допомогою МСЕ виконано порівняння способів протягування плоским і комбінованими бойками. Встановлено, що у випадку використання комбінованих бойків деформації на 15 % більше зосереджують у центральній зоні поковки. Але в роботах [21–24] відсутні дані про розвиток внутрішніх дефектів при прошиванні й розкочуванні.

У дослідженні [26] перевірялася можливість розкочування великогабаритних обичайок. Були встановлені напруження, які виникають у деформуючому інструменті й поковці. У роботі [27] проведено комп'ютерне моделювання, тест на свинці в масштабі 1:30, тест на прототипі в масштабі 1:5 і тест на макеті в масштабі 1:1 для вдосконалення процесу кування обичайок. Але в зазначених роботах [26; 27] представлені результати кування поковок із простою геометрією, а кування складнопрофільних обичайок не розглядалося.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наукових публікацій [14–27] дозволив виявити, що завдання підвищення коефіцієнта використання матеріалу при механічній обробці й поліпшення механічних характеристик матеріалу при виготовленні східчастих обичайок на сьогодні не вирішено повністю. На поверхні обичайок призначається значний технологічний напуск на механічну обробку. Це призводить до зайвих витрат матеріалу, а також розрізування внутрішньої волокнистої структури. Тому необхідно вдосконалювати спосіб кування масивних східчастих обичайок.

Метою статті є підвищення якості й коефіцієнта використання матеріалу за рахунок моделювання і удосконалення технологічного процесу кування обичайок із фланцем.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити методику моделювання процесу розкочування обичайок із фланцем;
- провести експериментальне моделювання процесу розкочування обичайки із фланцем на свинцевих заготовках і за результатами моделювання встановити залежності зміни форми поковки від різних співвідношень геометричних розмірів заготовки й технологічних режимів кування;
- провести металографічні дослідження отриманих деталей новим способом на сталевих моделях для оцінки впливу нового способу деформування на якість поковок.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом для моделювання розкочування в лабораторних умовах був обраний свинець [28], оскільки цей метал має низьку температуру рекристалізації (≈ 20 °С). Моделювання на свинцевих заготовках не суперечить положенням теорії подібності [29]. Для зміни механічних характеристик модельного матеріалу у свинець додавалася сурма (до 5 %). Оснащення та схема кування для проведення експериментального моделювання представлена на рис. 1. У процесі кування варіювалася величина обтискання зразка. Для дослідження виготовлялися пустотілі моделі у масштабі 1:50. Отвір у заготовці мав конусність (1:100). Ця конусність виходить на попередній операції протягування на конічній оправці. Для спрощення розрахунків і позначень при дослідженні було ухвалене рішення ввести параметр середнього діаметра отвору (d_{cp}). Розкочування проводилося на гідравлічному пресі зусиллям 0,1 МН, швидкість деформування 5 мм/с. Для макроструктурних досліджень було виконано розкочування моделей зі сталі.

Сталеві пустотілі заготовки перед деформацією нагрівалися в печі до температури 1050 °С з витримкою 25 хв. Одиначне обтискання за одне коло обертання (прохід по колу) заготовки становило 0,5 мм.

Розрахунки процесу розкочування поковок зі змінною по довжині товщиною стінки представляє складне дослідницьке завдання, що викликане впливом значної кількості факторів на цей процес. Тому для одержання інформації, яка описує зміну розмірів

заготовки в процесі деформування, було проведене планування експерименту. Як план був обраний повнофакторний план (ПФЕ) за типом 3^2 . У результаті планування були визначені: центр плану й рівні варіювання. Центр плану для відносного діаметра виступу становив 2,4, при рівні варіювання – 0,1. Для ступеня деформації центр плану становив 0,2, а крок 0,1. При цих параметрах є можливість максимально охопити розмірний діапазон заготовок, які можуть виготовлятися з уступами. Швидкість деформування і коефіцієнт тертя під час експерименту не мінялися. Отже, виділено два головних фактори, що чинять вплив на процес розкочування обичайок із фланцем – відносний діаметр виступу заготовки й ступінь деформації (див. табл.) і параметри їх варіювання.

Таблиця. Основні фактори й рівні їх варіювання для плану ПФЕ 3^2

Фактори й інтервали їх варіювання	x_1	x_2
	$D_в/d_{cp}$	ε
Інтервал варіювання Δx_i	0,1	0,1
Нижній рівень $x_i = -l$	2,5	0,1
Середній рівень $x_i = 0$	2,4	0,2
Верхній рівень $x_i = +l$	2,3	0,3

Для розмірів заготовок зі співвідношенням $D_y/d_{cp}=1,85$ (D_y – зовнішній діаметр уступу) досліджувалися дві схеми кування. Перша – спочатку розкочуванням деформується фланець (рис. 1, а), друга – одночасно обтискається фланець і уступ (рис. 1, б). Після обтискання заготовок найменшу конусність отримано для обичайки, яка була продеформована з діаметром виступу $D_в/d_{cp}$ рівним 2,5 ($D_в$ – зовнішній діаметр виступу), а найбільшу з $D_в/d_{cp} = 2,3$ (рис. 2).

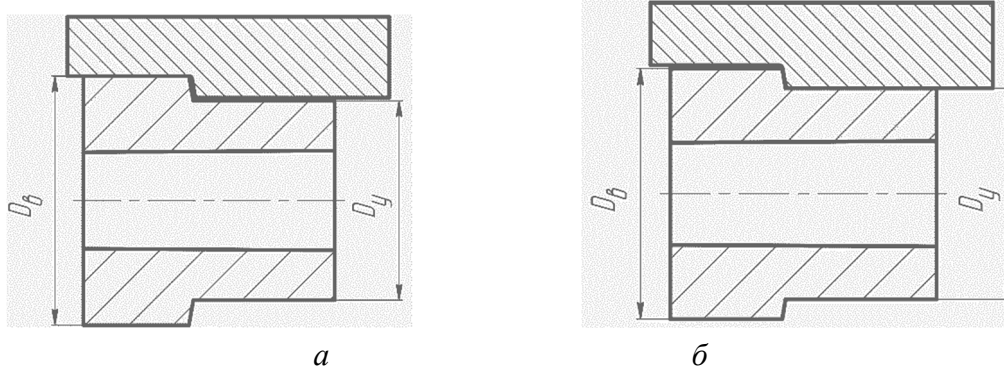


Рис. 1. Дві схеми кування обичайок із фланцем:
а – деформація починається з виступу;
б – деформація починається з виступу й уступу



Рис. 2. Обичайки після кування ($D_y/d_{cp}=1,85$):
а – $D_в/d_{cp} = 2,5$; б – $D_в/d_{cp} = 2,4$; в – $D_в/d_{cp} = 2,3$

Для східчастого зразка з D_b/d_{cp} , рівним 2,5 ступінь обтискання виступу більше, ніж уступу (рис. 3, а). Це пояснюється різницею між висотою сходу на заготовці й бойку. У результаті цього уступ на початковому етапі не обтискається. При подальшому обтисненні обтискається виступ і уступ.

Для східчастого зразка з D_b/d_{cp} , рівним 2,4 деформація фланця більше уступу в початковий момент кування (рис. 3, б). Різниця діаметрів у фланці й уступі зменшується, коли починається деформуватися уступ. Для східчастого зразка з $D_b/d_{cp}=2,3$ (рис. 3, в) фланець і уступ куються одночасно. При цьому діаметр із боку уступу збільшується швидше, ніж виступу.

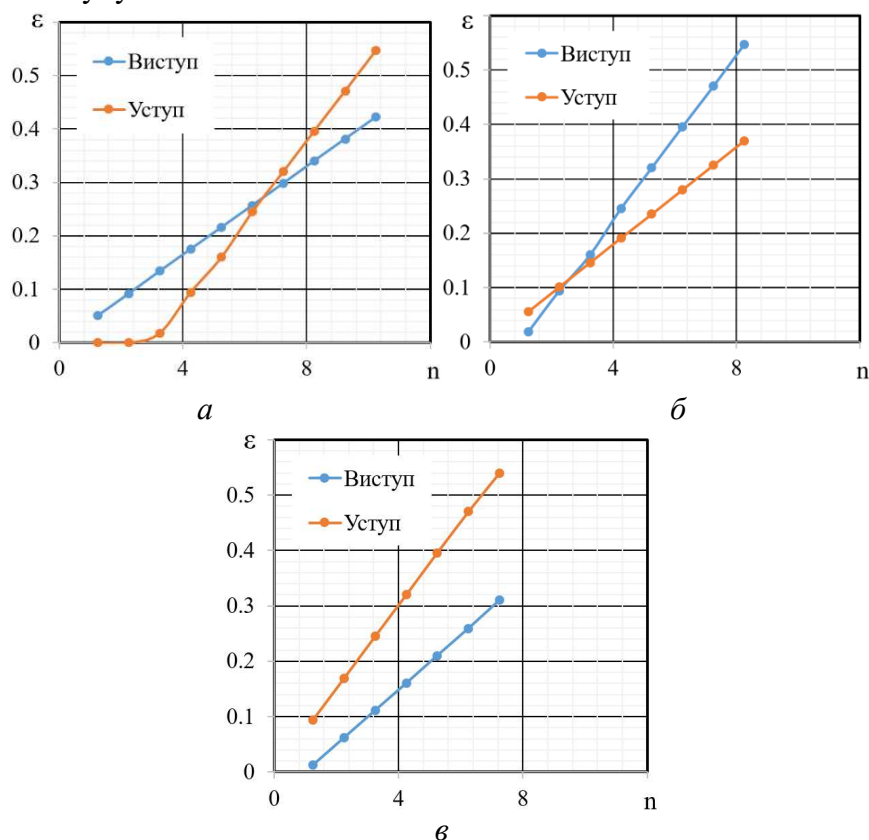


Рис. 3. Закономірності зміни ступеня обтискання фланця й уступу (ε) від числа проходів ($D_y/d_{cp}=1,85$):
 а – $D_b/d_{cp}=2,5$; б – $D_b/d_{cp}=2,4$; в – $D_b/d_{cp}=2,3$

Для обичайки з $D_b/d_{cp} = 2,3$ внутрішній діаметр $d_{п.в}/L_{п}$ на початковому етапі кування збільшується інтенсивніше, ніж $d_{п.в}/L_{п}$, однак криві не перетинаються, що вказує на появу конусності. Інтенсивне зростання $d_{п.в}/L_{п}$ у всіх випадках характеризується значним обтисканням уступу. Аналіз даних зміни величини конусності для поковок із $D_y/d_{cp} = 1,85$ (рис. 4, а) дозволив виявити, що при збільшенні ступеня обтискання фланця конусність міняється по-різному. Для $D_b/d_{cp} = 2,5$ конусність збільшується, що пояснюється деформацією фланця. Далі конусність не змінюється, що пояснюється рівномірним збільшенням внутрішнього діаметра уступу й фланця. Подальше зниження конусності пов'язане зі збільшенням внутрішнього діаметра уступу. Різниця між сумарними ступенями деформації уступу й фланця знижується, що зменшує конусність східчастої поковки.

При зростанні ступеня обтискання (ε) відношення внутрішніх діаметрів фланця й уступу зменшуються (рис. 4, б). Водночас збільшуються діаметри заготовок для випадків, коли D_b/d_{cp} стають рівними 2,5 і 2,4. Відношення діаметрів фланця і уступу для $D_b/d_{cp} = 2,5$ наближається до одиниці і, як наслідок, зменшується конусність.

Крива 2 знижується нижче за одиницю, що вказує на зміну напрямку конусності в процесі деформації. Крива 3 не перевищує одиниці, що відповідає постійному утворенню конусності обичайки.

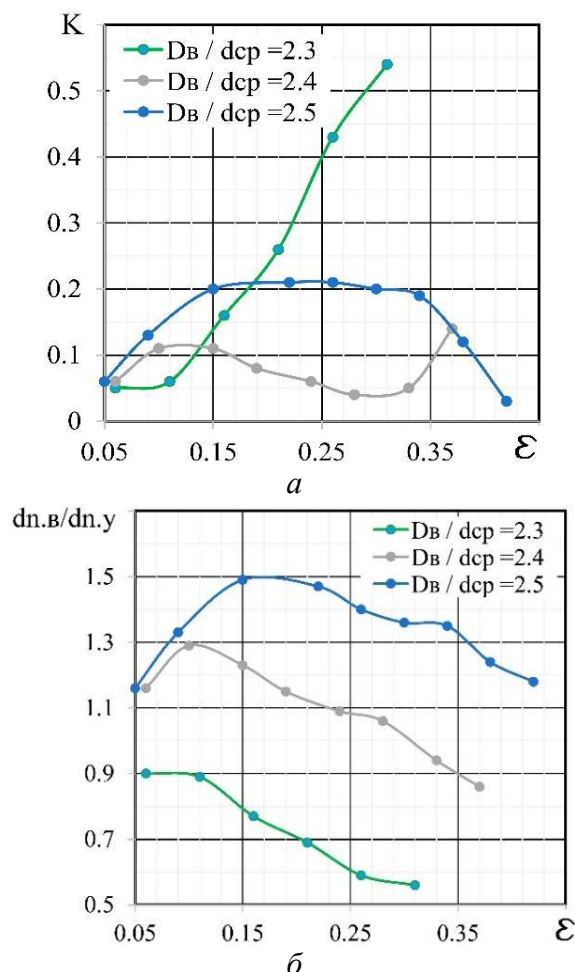


Рис. 4. Формозмінення поковки залежно від ступеня обтискання:
а – зміна конусності; б – зміна внутрішніх діаметрів уступу й фланця

Первинну інформацію про зміну структури металу після деформування і виявлення переважного плинну металу можна одержати після аналізу макроструктури поковки. У цьому випадку необхідно встановити змінення структури металу в місці уступу. Макроструктурний аналіз обичайки (рис. 5), отриманої за новою схемою кування підтвердив, що виріб має спрямовану текстуру, волокна якої повторюють профіль отриманої обичайки.

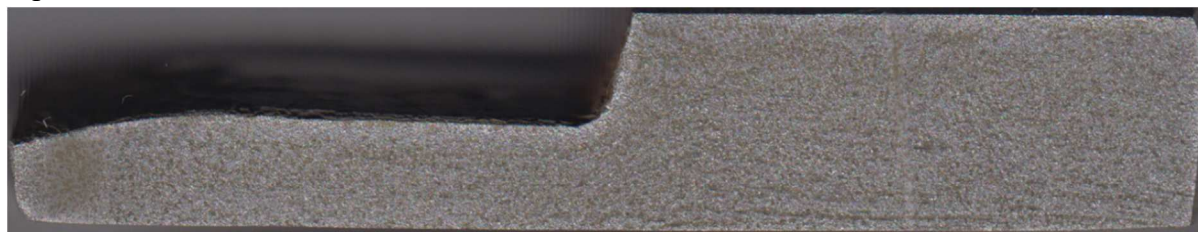


Рис. 5. Результати експерименту на сталевих моделях

Встановлено, що розроблений спосіб кування деформує метал в уступі інтенсивніше, ніж у виступі (рис. 5). Розташування волокна відповідає контурам обичайки. Це знизить кількість волокон, які будуть перерізуватися при механічній обробці.

На основі результатів моделювання на сталевих зразках і свинці були виявлені закономірності зміни форми обичайки при куванні профільованим бойком. У результаті були виявлені раціональні режими обтискання при куванні східчастих обичайок і визначені переваги запропонованого способу перед традиційним способом кування:

– застосування заготовки з уступом і профільованого бойка дало можливість одержувати обичайки із фланцем. У результаті стало можливим знизити величину технологічного напуску, що дозволило знизити витрати металу на 6...10 %;

– кування профільованим бойком дало можливість одержувати виріб, який повторює форму й розміри деталі, у результаті зменшується час механічної обробки уступу;

– цей процес може бути використаний також для виробництва східчастих обичайок конусної форми, як показано в роботі [29].

До недоліків розробленого технологічного процесу кування можна віднести:

– різне обтискання виступу й уступу східчастої обичайки може привести до незначної анізотропії механічних властивостей у цих зонах;

– процес утворення конусності обичайки ускладнює процес обертання східчастої обичайки на дорні.

Технічне застосування встановлених результатів – розробка нового технологічного процесу кування обичайок із фланцями.

У попередніх роботах [14-27] досліджувалися технологічні процеси кування конусних обичайок. Представлена робота розкриває особливості виготовлення куванням конічних і циліндричних обичайок із фланцями.

Слід зазначити, що в роботі не досліджувалися процеси одержання розкочуванням конусних обичайок, які мають розширення з боку виступу. У зв'язку із цим подальше моделювання процесів кування східчастих обичайок необхідно спрямувати на визначення закономірностей, які дозволять встановити вплив форми й розмірів східчастої заготовки та профілю деформуючого східчастого бойка. Це дозволить побільшати діаметр обичайки з боку виступу в процесі деформування.

Висновки. 1. Розроблена методика моделювання процесу розкочування обичайок із фланцем на свинцевих і сталевих зразках, яка дозволила встановити формозміну східчастої заготовки в процесі розкочування профільованим бойком. Її особливістю є можливість дослідження формозміни східчастих заготовок і оцінити базові показники якості одержуваних поковок за новою технологією. Розроблена методика дозволила провести дослідження процесу розкочування великогабаритних поковок на зменшених моделях, що знизило витрати на проведення експериментів.

2. Експериментальне моделювання на свинцевих і сталевих зразках дозволило встановити, що для східчастих зразків із фланцем з $D_b/d_{cp} = 2,4...2,5$ при куванні конусність збільшується. При одночасному обтисненні фланця й уступу відбувається утворення конусності. Збільшення обтискання приводить до зміни напрямку конусності. Це виникає в результаті інтенсивної деформації в уступі, що приводить до збільшення діаметра. Було встановлено, що основним параметром заготовок для керування плином металу при розкочуванні є величина уступу. Відносна висота уступу в діапазоні 0,45 забезпечує одержання обичайки з мінімальною конусністю.

3. Аналіз макроструктури східчастої обичайки виявив, що кування заготовки зі змінною товщиною стінки профільним бойком забезпечує розташування волокна за формою виробу, що дозволить виключити перерізання волокна при механічній обробці і забезпечить підвищення втомної міцності деталі.

Список використаних джерел

1. Markov O., Gerasimenko O., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R., Puzyr R. Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3/1(99), Pp. 42-48. URL: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>.

2. Kukhar V., Balalayeva E., Hurkovska S., Sahirov Yu., Markov O., Prsyazhnyi A., Anishchenko O. The Selection of Options for Closed-Die Forging of Complex Parts Using Computer Simulation by the Criteria of Material Savings and Minimum Forging Force. *Intelligent Communication, Control and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 989. Pp. 325–331. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3_35.
3. Markov O. E., Gerasimenko O. V., Shapoval A. A., Abdulov O. R., Zhytnikov R. U. Computerized simulation of shortened ingots with a controlled crystallization for manufacturing of high-quality forgings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 103, Pp. 3057–3065. doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4>.
4. Markov O. E., Gerasimenko O. V., Kukhar V. V., Abdulov O. R., Ragulina, N. V. Computational and experimental modeling of new forging ingots with a directional solidification: the relative heights of 1.1. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019. Vol. 41(8). P. 310. doi: <http://doi.org/10.1007/s40430-019-1810-z>.
5. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. Development of a new process for expanding stepped tapered rings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2/1(98). Pp. 39-46. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>.
6. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5/1(95). Pp.16-24. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>.
7. A study on the fabrication of a large hollow ingot by CAE /S. Oh, K. Lee, Chang-won [et al.]. *18th International forgemasters meeting*, 12-15 September 2011, Pittsburgh, 2011. Pp. 179–182.
8. Ohashi N., Enami T., Wanaka H., Aso K. Manufacturing process and properties of nuclear RPV shell ring forged from hollow ingot. *Nuclear engineering and design*. 1984. № 81. Pp. 193–205.
9. The development of hollow ingot casting technology at Vítkovice Heavy Machinery A. S. / P. Machovčák, A. Opler, Z. Carbol [et al.]. *Metal: 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*, 15–17 May 2013, Brno, 2013.
10. Process optimization for high fracture toughness of maraging steel rings formed by mandrel forging / A. K. Jha, K. Sreekumar, T. Tharian [et al.]. *Journal of manufacturing processes*. 2010. № 12. Pp. 38–44.
11. Development of mono-bloc forging for CAP1400 Reactor pressure vessel / W. Bao-zhong, L. Kai-quan, L. Ying, Z. [et al.]. *19th International forgemasters meeting*, 29 September – 3 October 2014, Makuhari, 2014. Pp. 391–396.
12. Wang B. Development of mono-bloc nozzle shell for CAP1400 RPV. *Book of Abstracts: 20th International forgemasters meeting*, 11.09 – 14.09.2017, Graz, 2017. P. 52.
13. Tanaka Y. Reactor pressure vessel (RPV) components: processing and properties. *Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels (RPVs) in Nuclear Power Plants*. Sawston: 1, 2015. (Woodhead Publishing). (Energy; 26). Pp. 26–43.
14. 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. Volume 34, Issue 3. Pp. 205–210.
15. 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.
16. 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. Vol. 418, Issues 1–3. Pp. 269–280.
17. Suzuki K., Sato I., Kusuhashi M., Tsukada H. Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant. *Nuclear engineering and design*. 2000. № 198. Pp. 15–23.
18. Cleaver C., Allwood J. Incremental profile ring rolling with axial and circumferential constraints. *CIRP Annals – Manufacturing technology*. 2017. № 66. Pp. 285–288.
19. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation / A. Kermanpur, M. Eskandari, H. Purmohamad [et al.]. *Materials and design*. 2010. Vol. 31, Issue 3. Pp. 1096–1104.

20. Khoury I., Giraud-Moreau L., Lafon P., Labergère C. Towards an optimization of forging processes using geometric parameters. *Journal of materials processing technology*. 2006. № 177(1). Pp. 224–227.
21. Development of forging process design to close internal voids / H. Kakimoto, T. Arikawa, Y. Takahashi [et al.]. *Journal of materials processing technology*. 2010. Vol. 210, Issue 3. Pp. 415–422.
22. Suzuki K., Sato I., Tsukada H. Manufacturing and material properties of ultra large size forgings for advanced BWRPV. *Nuclear engineering and design*. 1994. Volume 151, Issues 2–3. Pp. 513–522.
23. Chen K., Yang Y., Shao G., Liu K. Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot. *Computational materials science*. 2012. Vol. 51, Issue 1. Pp. 72–77.
24. Banaszek G., Stefanik A. Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging. *Journal of materials processing technology*. 2006. Vol. 177, Issues 1–3. Pp. 238–242.
25. Improvement in the reliability of shells for light water reactors by manufacture from hollow ingots / P. Bocquet, R. Blondcau, I. Poittrault [et al.]. *Nuclear engineering and design*. 1991. Vol. 130, Issue 3. Pp. 467–475.
26. Raz K., Vaclav K. Using of a hydraulic press in production and manufacturing of large rings. *Procedia engineering*. 2014. № 69. Pp. 1064–1069.
27. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 55 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada [et al.]. *Nuclear engineering and design*. 1985. № 84. Pp. 261–272.
28. Markov O. E., Perig A. V., Zlygoriev V. N., Markova M. A., Kosilov M. S. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*. 2017. Vol. 39(4). Pp. 4649–4665. doi: <https://doi.org/10.1007/S40430-017-0812-Y>.
29. Markov O. E., Perig A. V., Zlygoriev V. N., Markova M. A., Grin A. G. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017. Vol. 90. Pp. 801–818. doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.

References

1. Markov, O., Gerasimenko, O., Khvashchynskyi, A., Zhytnikov, R., Puzyr, R. (2019). Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1(99), pp. 42–48. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>.
2. Kukhar, V., Balalayeva, E., Hurkovska, S., Sahirov, Yu., Markov, O., Prysiazhnyi, A., Anishchenko O. (2018). The Selection of Options for Closed-Die Forging of Complex Parts Using Computer Simulation by the Criteria of Material Savings and Minimum Forging Force. *Intelligent Communication, Control and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 989, pp. 325–331. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3_35
3. Markov, O. E., Gerasimenko, O. V., Shapoval, A. A., Abdulov, O. R., & Zhytnikov, R. U. (2019). Computerized simulation of shortened ingots with a controlled crystallization for manufacturing of high-quality forgings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, pp. 3057–3065. doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4>.
4. Markov, O. E., Gerasimenko, O. V., Kukhar, V. V., Abdulov, O. R., & Ragulina, N. V. (2019). Computational and experimental modeling of new forging ingots with a directional solidification: the relative heights of 1.1. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(8), p. 310. <http://doi.org/10.1007/s40430-019-1810-z>.
5. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L., Shapoval, A., Kosilov, M. (2019). Development of a new process for expanding stepped tapered rings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/1(98), pp. 39–46. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>.
6. Markov, O., Zlygoriev, V., Gerasimenko, O., Hrudkina, N., Shevtsov, S. (2018). Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1(95), pp. 16–24. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>.
7. Oh, S., Lee, K., Chang-won [et al.] (12–15 September 2011). A study on the fabrication of a large hollow ingot by CAE. *18th International forgemasters meeting* (pp. 179–182).
8. Ohashi, N., Enami, T., Wanaka, H., Aso, K. (1984). Manufacturing process and properties of nuclear RPV shell ring forged from hollow ingot. *Nuclear engineering and design*, (81), pp. 193–205.

9. Machovčák, P., Opler, A., Carbol, Z. [et al.] (15–17 May 2013). The development of hollow ingot casting technology at Vítkovice Heavy Machinery A. S. *Metal: 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*. Brno.
10. Jha, A. K., Sreekumar, K., Tharian, T. [et al.] (2010). Process optimization for high fracture toughness of maraging steel rings formed by mandrel forging. *Journal of manufacturing processes*, (12), pp. 38–44.
11. Wang Bao-zhong, Liu Kai-quan, Liu Ying, Zhang Wen-hui, Zhao De-li (2014). Development of mono-bloc forging for CAP1400 Reactor pressure vessel. *19th International forgemasters meeting* (pp. 391–396). Makuhari.
12. Wang B. (2017). Development of mono-bloc nozzle shell for CAP1400 RPV/B. Wang. *Book of Abstracts: 20th International forgemasters meeting* (p. 52). Graz.
13. Tanaka Y. (2015). Reactor pressure vessel (RPV) components: processing and properties. *Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels (RPVs) in Nuclear Power Plants*. Sawston: 1, (Woodhead Publishing) (Energy; 26) (pp. 26–43).
14. Berger, T., Murai, E., Kurihara, I., Nakamura, T., Sasaki, T., Yoshida, T., & 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(3), pp. 205–210.
15. Shao Min Nie, Zhao Qing Yu, Dong Ning Meng, Rong Sheng Qi, Xin Gang Liu, Miao Jin (2013). Research on key processing technology of nuclear power tapered cylinder forging. *Materials design, processing and applications* (pp. 2387–2394).
16. Mingyue Sun, Luhan Hao, Shijian Li, Dianzhong Li, Yiyi Li. (2011). Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels. *Journal of nuclear materials*, 418(1–3), pp. 269–280.
17. 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), pp. 15–23.
18. Cleaver, C., Allwood, J. (2017). Incremental profile ring rolling with axial and circumferential constraints/C. Cleaver. *CIRP Annals – Manufacturing technology*, (66), pp. 285–288.
19. Kermanpur, A., Eskandari, M., Purmohamad, H., Soltanic, M. A., Shateri, R. (2010). Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation. *Materials and design*, 31(3), pp. 1096–1104.
20. Khoury, I., Giraud-Moreau, L., Lafon, P., Labergère, C. (2006). Towards an optimization of forging processes using geometric parameters. *Journal of materials processing technology*, 177(1), pp. 224–227.
21. Hideki Kakimoto, Takefumi Arikawa, Yoichi Takahashi, Tatsuya Tanaka, Yutaka Imaida. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *Journal of materials processing technology*, 210(3), pp. 415–422.
22. Suzuki, K., Sato, I., Tsukada, H. (1994). Manufacturing and material properties of ultra large size forgings for advanced BWRPV. *Nuclear engineering and design*, 151(2–3), pp. 513–522.
23. Chen, K., Yang, Y., Shao, G., Liu, K. (2012). Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot. *Computational materials science*, 51(151), pp. 72–77.
24. Banaszek, G., Stefanik, A. (2006). Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging. *Journal of materials processing technology*, 177(1–3), pp. 238–242.
25. Bocquet, P., Blondeau, R., Poitraul, I., Badeau, J.P., Dumont, R. (1991). Improvement in the reliability of shells for light water reactors by manufacture from hollow ingots. *Nuclear engineering and design*, 130(3), pp. 467–475.
26. Raz, K., Vaclav, K. (2014). Using of a hydraulic press in production and manufacturing of large rings. *Procedia engineering*, 69, pp. 1064–1069.
27. Onodera, S., Kawaguchi, S., Tsukada, H., Moritani, H., Suzuki, K., Sato, I. (1985). Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 55 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties. *Nuclear engineering and design*, (84), pp. 261–272.
28. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., Kosilov, M. S. (2017). Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 39(4), pp. 4649–4665. <https://doi.org/10.1007/S40430-017-0812-Y>.

29. 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. *Int J Adv Manuf Technol*, 90, pp. 801–818. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.

UDC 621.321

*Oleg Markov, Volodymyr Panov, Yuliya Ivanova, Anton Khvashchynskiy,
Roman Zhytnikov, Maksym Kosilov*

IMPROVEMENT OF THE FORGING OPERATION OF LARGE-SIZED EMPTY FORGINGS WITH A COMPLEX PROFILE

The priority direction in the development of mechanical engineering is the development of energy-saving technological processes for the manufacture of critical products for power plants. This is due to the development and implementation of new high-tech technologies that improve product quality due to the use of new methods of deformation. An actual scientific and practical problem in the forging processes of massive forgings is the production of blanks with a stepped profile that repeats the geometry of the part. This will make it possible not to cut the internal fibrous structure of the workpiece and increase the metal utilization rate.

The analysis of scientific publications has revealed that the problem of increasing the utilization rate of the material and improving the mechanical characteristics of the material in the manufacture of stepped shells has not been completely solved today. The well-known technical processes for forging large shells consist in closing the ledges with a technological overlap for machining. This leads to unnecessary waste of material, as well as cutting the inner fibrous structure. Therefore, this problem has not been resolved at this time.

The research objective is improving the quality and utilization of material by modeling and improving the technical process of forging shells with a flange.

Physical modeling on lead and steel samples made it possible to establish that forging with a step striker leads to the formation of taper on the shells. This is due to the fact that when forging the shoulder of the shell, the metal is deformed in the tangential direction due to the difference in wall thicknesses of the stepped hollow billet. An increase in the degree of reduction of the ledge leads to an increase in its diameter. Macrostructural studies of the cut stepped shell made it possible to determine that the process of forging such forgings with a stepped striker leads to the formation of a fibrous internal structure, which repeats the contour of the stepped part. This arrangement of the inner fiber excludes the possibility of cutting them during machining. According to the results of an experimental study on lead and steel models, it was found that forging of stepped shells becomes possible, that allows to expand the technical capabilities of the operation of rolling large-sized critical parts.

Analysis of the research results revealed that forging a workpiece with a variable wall thickness with a profile striker ensures the location of the fiber in the shape of the product, which will eliminate fiber cutting during machining and increase the fatigue strength of the part.

Keywords: ring forging; rolling operation; large forgings; stepped shell; striker; stepped tool; taper.

Fig.: 5. **Table:** 1. **References:** 29.

Марков Олег Євгенійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Markov Oleg – Doctor in Technical science, Professor, Head of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

SCOPUS Author ID: 55648046800

Панов Володимир Володимирович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Panov Volodymyr – aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: v.panov@emss.dn.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2373-319X>

Іванова Юлія Олегівна – аспірант кафедри обробки металів тиском, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Ivanova Yuliya – aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: yachmen.yuliya@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4145-9665>

Хвацинський Антон Станіславович – аспірант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Khvashchynskiy Anton – aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2690-8354>

Житніков Роман Юрійович – аспірант кафедри комп’ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Zhytnikov Roman – aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: romajitnikov2015@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0540-8465>

Косілов Максим Сергійович – аспірант кафедри комп’ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна)

Kosilov Maksym – aspirant of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: kosilovmaksims@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6412-3366>