

РОЗДІЛ II ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.735.3

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)61

Марков О. Є.
Хващинський А. С.
Мусорін А. В.
Лисенко А. А.
Молодецький В. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО СПОСОБУ КУВАННЯ ВЕЛИКИХ ЗЛИТКІВ НА ОСНОВІ ОСАДЖЕННЯ ЗАГОТОВОК З УСТУПАМИ

У роботі запропоновано та досліджено новий спосіб осадження заготовок з конічними виступами. Відносна висота заготовки перед осадкою становила $H/D = 3,0$. Напружено-деформований стан (НДС) досліджено для визначення рівня та знаку стискаючих напруг у заготовці. Крім того, оцінено параметр напруженого стану в місці розташування осьових дефектів. Визначено ступінь змикання осьового дефекту та величину опуклості. Ці параметри були визначені для різних розмірів діаметрів і висоти. Встановлено, що осадка заготовки з конічними виступами призводить до рівномірного розподілу деформації в тілі заготовки. Під час осадки на бічній поверхні і в осьовій зоні виникають стискаючі напруги внаслідок появи увігнутої форми заготовки. Крім того, спостерігається зменшення розмірів осьових дефектів і опуклості бічної поверхні. Визначено ефективні геометричні параметри заготовки. Встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти уступів призводить до зменшення опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. Опуклість збільшується при зменшенні діаметра уступів. «Діжка» розплющується і при подальшій осадці бічна поверхня заготовки набуває форми, наближеної до циліндричної. Відносний діаметр і висота виступів повинні бути $d/D = 0,5 \dots 0,7$ і $h/D = 0,4 \dots 0,6$ відповідно задля закриття дефектів під час осадки. Рекомендований ступінь осадки 50 %. Визначені рекомендації перевірені експериментально під час кування зливка масою 66 500 кг. Отримані експериментальні дані підтвердили результати моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Результати дослідження впроваджено в промисловість.

Ключові слова: кування, злиток, осадка, осьові дефекти, конічні виступи, закриття дефектів, стискаючі напруги, опуклість

Останнім часом зростає кількість поковок, виготовлених зі зливків. Це викликано збільшенням потужності важких машин. Низька якість виготовлених поковок пояснюється низькою якістю вихідних зливків [1, 2]. Брак при ультразвуковому контролі (УЗК) після кування великих поковок досягає 10 % [3]. Відмова по УЗК пояснюється осадкою злитків з неоднорідною структурою. У результаті ця структура пропрацьовується неоднорідно і в недостатній мірі [4]. Крім того, збільшення осьових дефектів зливка відбувається при осадці циліндричних заготовок плоскими плитами. Аналіз процесів кування з використанням осадки дозволив встановити, що традиційна схема кування не гарантує подрібнення структури зливка, а також забезпечення специфічних властивостей одержуваних деталей [5].

Високу якість одержуваних заготовок важливо отримати при виготовленні великих поковок відповідального призначення. Якість великих поковок визначається відсутністю внутрішніх і зовнішніх дефектів, а також однорідністю механічних властивостей. Ці вимоги зумовлені тим, що заготовкою є злиток [6]. Великі злитки характеризуються дефектами металургійного походження (осьова пористість, усадка та ін.). Ці дефекти зумовлюють низьку якість кованих зливків. Утворення тріщин на бічній поверхні заготовки часто виникає під час деформації легованої сталі. Крім того, злитки кування мають внутрішню неоднорідну структуру, зумовлену умовою кристалізації. Відсутність осьових і зовнішніх дефектів, а також усунення

неоднорідності структури можна забезпечити куванням в гарячому стані. Осьові дефекти злитка усуваються закриттям порожнини під дією напруги стиску при гарячій деформації. Під час кування необхідно забезпечити відповідний напружений стан. Ступінь структури фрагментації можна оцінити за допомогою величини та градієнта деформації в кованих частині. Змінювати напружено-деформований стан (НДС) у деформованій деталі можна за допомогою спеціальної форми заготовки та деформаційного інструменту, а також технологічних режимів кування [7]. Існує велика кількість методів кування, які спрямовані на підвищення якості великих кованих деталей для відповідальних цілей. Ці методи засновані на застосуванні нових ковальських операцій (осадка, протяжка та ін.) і спеціального деформуючого інструменту. Основний інтерес представляє операція осадки великих зливків. Це основна операція для підвищення якості поковок [8]. Відомо багато методів кування, які були спрямовані на підвищення якості великих поковок відповідального призначення. Ці способи засновані на використанні нових операцій кування (осадка, протяжка та ін.) і спеціальних інструментів деформування. Основний інтерес представляє операція осадки великих зливків. Ця операція є основною для підвищення якості поковки [8].

У виробництві традиційно використовується операція осадки циліндричних заготовок. Цей метод характеризується несприятливим НДС для закриття внутрішніх дефектів і нерівномірним розподілом деформацій. Огляд літератури показав, що існує багато методів осадки великих заготовок. Дослідження, які показали вплив різних методів осадки на закриття внутрішніх дефектів, а також на розподіл деформації в тілі заготовки, необхідно проаналізувати перед використанням нового методу осадки. Значне збільшення зони ліквідації в осьовій частині зливка може бути підставою для застосування операції осадки [9]. Проте автори роботи не досліджували способи осадки профільованих заготовок для зміни НДС поковки під час деформації.

Метою дослідження є визначення ефективної геометрії заготовок з конічними виступами, що забезпечують рівномірний деформований стан, високий рівень стискаючих напружень, а також закриття осьових дефектів при осадці. За результатами досліджень необхідно визначити ефективну форму і розміри заготовок з конічними виступами.

Для вирішення зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі:

- розробити методіку досліджень операцій осадження заготовок;
- розробити новий науково-обґрунтований спосіб осадження заготовок, який підвищує щільність будови поковок;
- на основі проведених комплексних теоретичних і експериментальних досліджень розробити технологічні та конструкторські рекомендації з проектування техпроцесів деформування за новими схемами деформування.

Чисельна модель процесу деформування базується на теорії течії. Матеріалом заготовки вважається нестисливе пружнопластичне тіло.

Дискретизація наведених вище рівнянь базується на принципі віртуальних швидкостей і операцій. Невідомими є вузлові значення швидкостей і середні напруження. Скінчено-елементна сітка складалася з лінійного чотиригранного тетраедра. Заготовка з конічними виступами представлена на рис. 1. Зовнішній діаметр заготовки – D , загальна висота – H , діаметр і висота конічних виступів – d і h відповідно. Початковий діаметр осьового дефекту (d_0) дорівнював 10 % діаметра заготовки.

Швидкості деформації та коефіцієнт тертя були сталими. Ефективність осадки заготовки буде визначатися висотою конічних виступів, оскільки в цих частинах почнеться деформація металу за законом найменшого опору деформації. Низькі конічні виступи ($h/D < 0,2$) будуть аналогічні схемі осадки циліндричної заготовки. Високі конічні виступи ($h/D < 0,6$) значно збільшать загальну висоту заготовки та виникнуть вигини під час осадки. Тому для цього фактора було обрано інтервал від 0,2 до 0,6 (табл. 1).

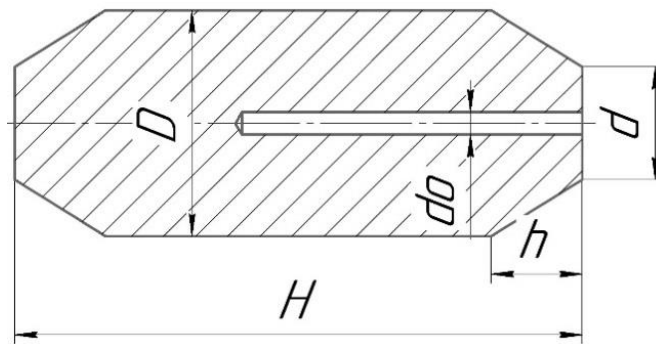


Рис. 1. Креслення заготовок з кінчними виступами

Основними факторами, що впливають на формозмінення, напружено-деформований стан та закриття внутрішніх дефектів під час осадки, є відносні діаметри (d/D) і відносна висота (h/D) кінчних уступів.

Діаметр торців заготовки впливає на площу контакту з плитами, а відповідно і на розмір зони з мінімальною деформацією. Збільшення діаметрів кінчних виступів ($d/D > 0,9$) буде аналогічно схемі осадки циліндричних заготовок. Малі діаметри кінчних виступів ($d/D < 0,5$) зменшать стійкість заготовок на плоских плитах. Тому для цього фактору було обрано інтервал від 0,5 до 0,9 (табл. 1).

Таблиця 1

Основні фактори та рівні варіації під час моделювання

№	Рівні факторів	
	d/D	h/D
1	0.5	0.2
2	0.7	0.2
3	0.9	0.2
4	0.5	0.4
5	0.7	0.4
6	0.9	0.4
7	0.5	0.6
8	0.7	0.6
9	0.9	0.6

Моделювання процесу осадження профільованих на чотирипроменевий переріз заготовок проводилось методом скінчених елементів (МСЕ). За результатами моделювання встановлювалось формозмінення штучного дефекту після деформування. Після профілювання усі заготовки осаджувалися на 50 %.

Матеріал модельованих заготовок 50Cr5Mo; температура нагріву заготовок і деформаційного інструменту становили 1180°C і 150°C відповідно; швидкість деформування $v = 40$ мм/с; ступінь осадки склав 60 %. Коефіцієнт тертя між заготовкою та плитами за Зібелем становив $\mu = 0,35$. Діаметр і висота заготовок становили $D = 1000$ мм і $H = 3000$ мм відповідно. Кількість скінчених елементів становила 40 000. Напруження течії для сталі 50Cr5Mo в гарячому стані показано на рис. 2. Для МСЕ моделювання використовували 2D модель, оскільки процес осадки є вісесиметричною задачею.

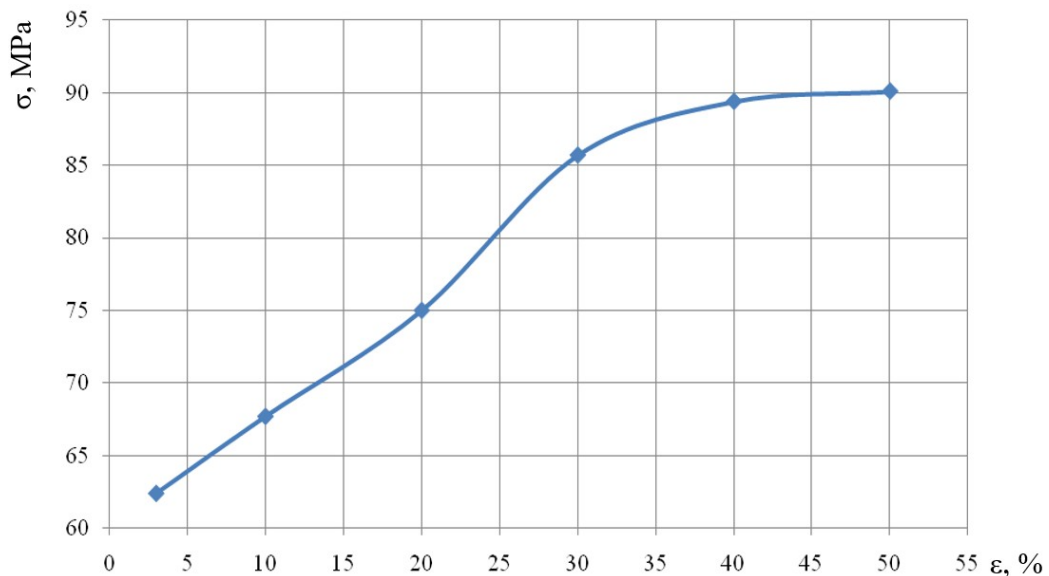


Рис. 2. Напряга течії сталі 50Cr5Mo при температурі 1180 °C

Основним параметром кування великого злитка є нерівномірність розподілу деформацій в поковці. Оскільки деформація може свідчити про подрібнення внутрішньої литої структури злитка. Простим критерієм оцінки нерівномірності розподілу деформації є різниця між максимальною та мінімальною ефективними деформаціями в тілі деталі ($\Delta e = e_{max} - e_{min}$). Однак цей критерій не враховує значення та розміри кожної зони конкретної деформації, але ці дані дуже важливі для аналізу результатів розподілу деформацій. Дані розмірної ділянки з питомою деформацією дозволяють оцінити рівень і об'єм литої структури помелу злитка. Більш точною формулою для оцінки максимального подрібнення структури металу є середньозважена еквівалентна деформація.

Перевагою середньозваженої деформації є врахування площі кожної зони з певною деформацією, інакше оцінка деформованого стану буде неадекватною.

Підвищення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки можливо за допомогою підпору з боку бічної поверхні заготовки. Перспективним рішенням цієї проблеми є використання заготовок з конічними виступами перед осадкою.

Утворення увігнутої поверхні при осадці підвищує рівномірність розподілу деформацій і забезпечує підпор в осьовій зоні. Цей аспект сьогодні не досліджувався і немає конкретних рекомендацій щодо раціональної геометрії таких заготовок до осадки.

НДС досліджуваних заготовок під час осадки визначали за середніми напруженнями в позовжньому перерізі. У центральній зоні максимальні напруги стиску не виникають. Площа зони із середніми напруженнями від -10 до -20 МПа незначна і становить від 10 до 20 % загальної площі перетину. Загальний рівень середніх напружень зі знаком «мінус» в тілі заготовки низький. Проте значна глибина увігнутої бічної поверхні формується в центральній частині заготовки шляхом утворення подвійної «бочки» з уступів заготовки. Цей результат збігається з відомими даними для класичної осадки високих заготовок із співвідношенням $H/D > 2,5$.

Відповідно до досліджуваних завдань необхідно визначити напружений стан у місці розташування осьового дефекту заготовки на половині висоти заготовки. Це дозволить визначити механізм зміни розмірів дефекту. Механізм закриття дефекту можна описати параметром напруженого стану η . Цей параметр показує, наскільки середні напруги перевищують еквівалентні напруги, а також знак цих напруг.

За результатами досліджень визначено знак і величину напружень на бічній поверхні заготовки. Параметр напруженого стану (η) на середній периферійній частині заготовки розраховували залежно від ступеня деформації ($\epsilon_H = \Delta h/H_0$) для різних діаметрів конічних виступів (d/D) та відносної висоти заготовки. конічні уступи $h/D = 0,6$ (рис. 4). Літературні дані свідчать про те, що зміна відносної висоти уступів не робить істотного впливу на параметр η . Тому цей параметр

у роботі не досліджувався.

Аналіз отриманих результатів дозволяє визначити, що після обсадки заготовки конічними виступами більше ніж на 50 % параметр η має позитивне значення. Це підтверджує виникнення несприятливих умов під час осадки високих заготовок (рис. 3).

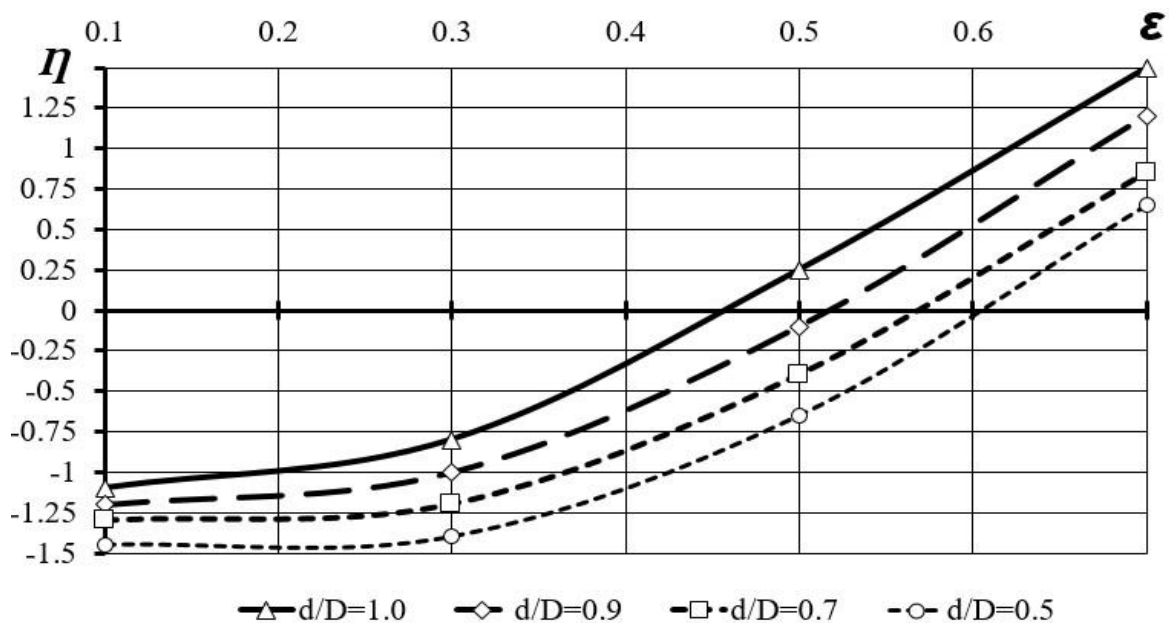


Рис. 3. Параметр напруженого стану в залежності від ступеня деформації (ϵ) при різних діаметрах уступів (d/D) (відносна висота конічного уступу $h/D = 0,6$)

Зони з мінімальними деформаціями, розташовані біля уступів, мають однакові форми та розміри при однакових діаметрах уступів (d/D). Це пояснюється тим, що ці зони мають однакові площі контакту заготовки з плитами.

Отримані результати пояснюються даними середньозважених деформацій (рис. 4). Рівень цих деформацій низький. Зменшення відносної висоти конічних уступів (h/D) призводить до зменшення рівня деформацій.

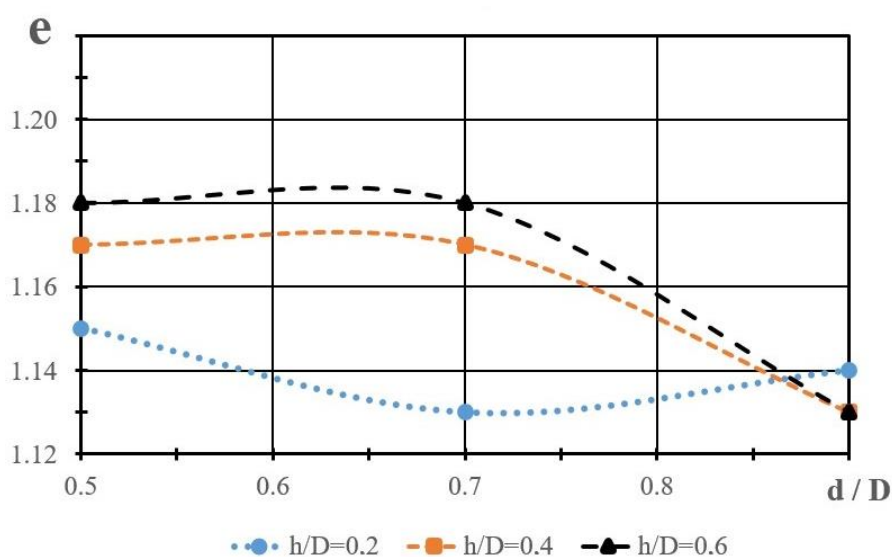


Рис. 4. Середньозважена деформація для різної відносної висоти (h/D) і діаметра (d/D) конічних виступів

Зміна розмірів і форми осевого дефекту при осадці з різними відносними діаметрами

і висотою конічних виступів представлені на рис. 5. Ці результати дозволяють визначити ступінь закриття осьового дефекту. На підставі аналізу отриманих результатів для заготовок з конічними виступами зроблено висновок, що повного закриття дефекту не відбувається. Спільною рисою досліджуваних схем є більш інтенсивне закриття дефектів у зонах між уступами та центральними частинами заготовки. Однак ступінь закриття дефекту для кожної деформації схеми різний. Мінімальне закриття дефекту виникає при осадці заготовки за формою, подібною до циліндричної ($d/D = 0,9$). Це пояснюється осадкою майже циліндричної заготовки. У цьому випадку відсутній підпор з боку бічної поверхні. Це призвело до радіальної течії металу зі збільшенням діаметрів заготовки та дефекту. Закриття дефекту відбувається інтенсивніше, ніж при осадці конічними виступами при його відносних діаметрах $d/D = 0,5 \dots 0,7$.

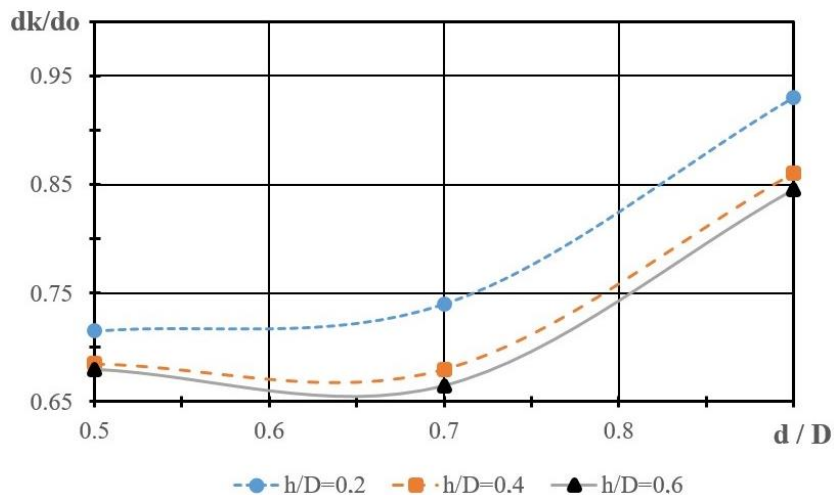


Рис. 5. Зміна відносного діаметра дефекту після осадки на 50 % в залежності від відносного діаметра виступу (d/D) і висоти (h/D) конічного виступу

Опуклість бічної поверхні збільшує об'єм металу заготовки. Цей метал буде втрачений під час механічної обробки. Досліджені процеси осадки можуть зменшити опуклість і витрату металу. Тому додатково розраховувався параметр діжкоподібності Q . На основі цього параметра розраховано опуклість досліджуваних схем деформування. Розраховано графік опуклості залежно від відносного діаметра (d/D) і висоти (h/D) уступів після обсадки на 50 % (рис. 6).

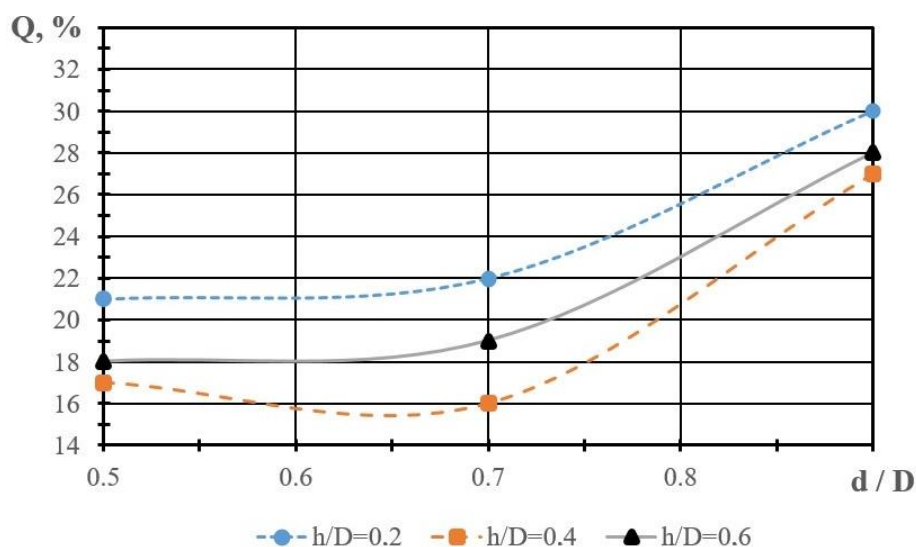


Рис. 6. Опуклість залежно від відносних діаметрів (d/D) і висоти (h/D) конічних виступів після осадки на 50 %

Отримані результати моделювання МСЕ необхідно перевірити шляхом експериментального дослідження. Для отримання більш точних результатів дослідження кування злитків необхідно проводити в промислових умовах. Експерименти на реальних заготовках дозволять отримати більш точний результат, ніж експерименти на зменшених моделях. При цьому будуть враховані всі фактори, що впливають на процес кування (тепловий стан, коефіцієнт тертя тощо). На менших моделях важко забезпечити реальне теплове поле під час гарячої деформації.

Експериментальне дослідження виконано на заготовці, яка за формою, розмірами, матеріалами та термошвидкісним режимом деформації повністю відповідала заготовці з моделювання МСЕ. Експеримент проводився на зливку масою 66 500 кг зі сталі 50Cr5Mo. Злиток після нагріву до температури 1180°C профілювали для отримання конічних виступів (рис. 7). Відносний діаметр і висота конічних виступів дорівнювали $d/D = 0,6$ і $h/D = 0,6$ відповідно. Ці геометричні параметри визначені як оптимальні за результатами теоретичних досліджень щодо закриття осьових дефектів і рівномірного розподілу деформацій при осадці. Після профілювання та нагріву злиток осаджували плоскою верхньою матрицею (рис. 9).



Рис. 7. Осадка заготовок з уступами плоскими плитами

Осадка заготовок із більшим діаметром ($d/D = 0,9$) і меншою висотою ($h/D = 0,2$) конічних виступів (рис. 8, а) призвела до інших результатів. А саме, при осадці така заготовка має явну опуклість на бічній поверхні («діжка») (рис. 8, б), що перевищує розміри, отримані при осадці в попередньому випадку (з конічними виступами $d/D = 0,6$, а $h/D = 0,6$). Це додатково підтверджує ефективність визначених вище геометричних параметрів конічних виступів.



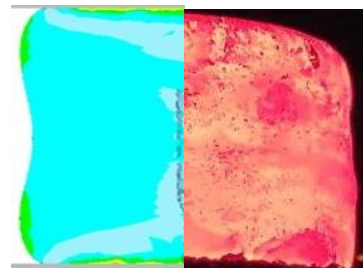
а)



б)

Рис. 8. Осаджена заготовка з діаметром і висотою конічних виступів $d/D = 0,9$ $h/D = 0,2$ відповідно

Мінімальна опуклість відповідає уступам з відносною висотою h/D 0,6. Це пояснюється локалізацією деформацій у виступах з утворенням «подвійної діжки» з глибокою увігнутістю. Діаметр і довжина виступів заготовки впливають на формування форми при осадці. Аналіз результату експерименту підтверджує, що після осадки заготовка має мінімальну увігнутість (рис. 9).



МСЕ Експеримент

Рис. 9. Порівняння напівзаготовок, отриманих МСЕ (зліва) та експериментально (праворуч)

Отримані експериментальні результати підтверджують зміну НДС під час осадки заготовки з уступами. Проведено ультразвукове випробування після кування. УЗК показав, що під час осадки розміри дефектів зменшилися. Додатково встановлено, що відсутність опуклості на бічній поверхні («діжка») під час осадки виключає утворення тріщини.

ВИСНОВКИ

1. Збільшення ступеня осадки від 0,1 до 0,45 призводить до зміни параметра напруженого стану η від $-1,0$ до 0 . Подальша осадка до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Визначено, що зменшення діаметра уступів призводить до зменшення параметра η .
2. Збільшення діаметра уступу (d/D) призводить до зменшення ступеня закриття дефекту. Високі виступи збільшують ступінь дефектів закриття.
3. Встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти уступів призводить до зменшення опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. Опуклість збільшується при зменшенні діаметра уступів. «Діжка» розплющується і при подальшій осадці бічна поверхня заготовки набуває форми, наближеної до циліндричної. Відносний діаметр і висота виступів повинні бути $d/D = 0,5 \dots 0,7$ і $h/D = 0,4 \dots 0,6$ відповідно задля закриття дефектів під час осадки.
4. Отримані результати кування в промислових умовах підтвердили визначені рекомендації геометрії заготовки методом МСЕ. Розроблені рекомендації з геометричних параметрів заготовки з конічними виступами були реалізовані при виготовленні великих поковок.

REFERENCES

1. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr₂Ni₄MoV forging ingot. *Mater. Design.* 2012. 35, pp. 446-456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
2. Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *J Mater Process Tech.* 2009. 209(4), pp. 1950-1959. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>
3. Markov O.E., Perig A.V., Markova M.A., Zlygoriev V.N. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2016. 83 (9-12), pp. 2159-2174. DOI: 10.1007/s00170-015-8217-5 <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
4. Chao Feng, Zhenshan Cui, Mingxiang Liu, Xiaoqing Shang, Dashan Sui, Juan Liu. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model. *Journal of Materials Processing Technology.* 2016. 237 (2016), pp. 371-385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.030>
5. Chao Feng, Zhenshan Cui, Mingxiang Liu, Xiaoqing Shang, Dashan Sui, Juan Liu. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model. *Journal of Materials Processing Technology.* 2016. 237, pp. 371-385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.030>
6. 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. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.* 2019. 41(8). doi:10.1007/s40430-019-1810-z

7. Markov O.E. Forging of large pieces by tapered faces. *Steel in Translation*. 2012. 42(12), pp. 808-810. doi:10.3103/S0967091212120054

8. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facet. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5 (1-95), pp. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142674 <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>

9. Lee Y.S., Lee S.U., Van Tyne C.J., Joo B.D., Moon Y.H. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach. *J Mater Process Tech.* 2011. 211(6), pp. 1136-1145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017>.

Марков О. Е., Хващинский А. С., Мусорин А. В., Лысенко А. А., Молодецкий В. В. Исследование нового способаковки крупных слитков на основе осадки заготовок с уступами

В работе предложен и исследован новый способ осадки заготовок с коническими выступами. Относительная высота заготовки перед осадкой составляла $H/D = 3,0$. Напряженно-деформированное состояние (НДС) исследовано для определения уровня и знака сжимающих напряжений в заготовке. Кроме того, оценен параметр напряженного состояния в местоположении осевых дефектов. Определены степень смыкания осевого дефекта и размер выпуклости. Эти параметры были определены для разных размеров диаметров и высоты. Установлено, что осадка заготовки коническими выступами приводит к равномерному распределению деформации в теле заготовки. Во время осадки на боковой поверхности и осевой зоне возникают сжимающие напряжения вследствие появления вогнутой формы заготовки. Кроме того, наблюдается уменьшение размеров осевых дефектов и выпуклость боковой поверхности. Определены эффективные геометрические параметры заготовки. Установлено, что уменьшение диаметра и увеличение высоты уступов приводит к уменьшению выпуклости в изучаемом диапазоне размеров заготовки. Выпуклость увеличивается при уменьшении диаметра уступов. «Бочка» выравнивается и при последующей осадке боковая поверхность заготовки принимает форму, приближенную к цилиндрической. Относительный диаметр и высота выступов должны быть $d/D = 0,5 \dots 0,7$ и $h/D = 0,4 \dots 0,6$ соответственно для закрытия дефектов при осадке. Рекомендованная степень осадки 50%. Определенные рекомендации проверены экспериментально при ковке слитка массой 66 500 кг. Полученные экспериментальные данные подтвердили результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Результаты исследования внедрены в промышленность.

Ключевые слова: ковка, слиток, осадка, осевые дефекты, конические выступы, закрытие дефектов, сжимающие напряжения, выпуклость.

Марков О. Е., Хващинський А. С., Мусорін А. В., Лисенко А. А., Молодецький В. В. Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження заготовок з уступами

У роботі запропоновано та досліджено новий спосіб осадження заготовок з конічними виступами. Відносна висота заготовки перед осадкою становила $H/D = 3,0$. Напружено-деформований стан (НДС) досліджено для визначення рівня та знаку стискаючих напруг у заготовці. Крім того, оцінено параметр напруженого стану в місці розташування осьових дефектів. Визначено ступінь змикання осевого дефекту та величину опуклості. Ці параметри були визначені для різних розмірів діаметрів і висоти. Встановлено, що осадка заготовки з конічними виступами призводить до рівномірного розподілу деформації в тілі заготовки. Під час осадки на бічній поверхні і в осевій зоні виникають стискаючі напруги внаслідок появи увігнутої форми заготовки. Крім того, спостерігається зменшення розмірів осьових дефектів і опуклості бічної поверхні. Визначено ефективні геометричні параметри заготовки. Встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти уступів призводить до зменшення опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. Опуклість збільшується при зменшенні діаметра уступів. «Діжка» розплющується і при подальшій осадці бічна поверхня заготовки набуває форми, наближеної до циліндричної. Відносний діаметр і висота виступів повинні бути $d/D = 0,5 \dots 0,7$ і $h/D = 0,4 \dots 0,6$ відповідно задля закриття дефектів під час осадки. Рекомендований ступінь осадки 50%. Визначені рекомендації перевірені експериментально під час кування зливка масою 66 500 кг. Отримані експериментальні дані підтвердили результати моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Результати дослідження впроваджено в промисловість.

Ключові слова: кування, злиток, осадка, осьові дефекти, конічні виступи, закриття дефектів, стискаючі напруги, опуклість

Markov O. E., Khvashchynskyi A. S., Musorin A. V., Lysenko A. A., Molodetskie V. V. Study of new forging process of ingots based on deformation of workpieces with conical ledges

New process of workpieces upsetting with ledges has been developed and studied in the work. Workpiece's ratio length before deformation was $H/D = 3.0$. Strain and stress condition has been studied to find the sign and level of compress stresses in a forged piece. Moreover, the parameter of the stress state in the zone location of the cavities has been evaluated. The closing degree of axial cavities has been determined. This parameter has been found for different heights and diameters. It has been found that the workpiece upsetting with ledges leads to a uniform stress into the forged-piece body. During deformation on the perical surface and in the central zone there is compress stress due to the formation forged-piece with the concave size. Moreover, there is a closing of the internal cavities and recess on the lateral surface. Effective geometrical parameters of the initial workpiece have been found. It has been established that a decrease in the diameter and an increase in the height of the ledges leads to a decrease in the convexity in the studied range of workpiece sizes. The convexity increases as the diameter of the ledges decreases. The "barrel" is leveled and during subsequent upsetting, the side surface of the workpiece takes on a shape close to cylindrical. The relative diameter and height of the protrusions should be $d/D = 0.5 \dots 0.7$ and $h/D = 0.4 \dots 0.6$, respectively, to close defects during

upsetting. The effective degree of deformation is 50%. Determined relations have been checked out by experimentally in the process of the ingot's forging weight equal to 66.5ton. Obtained practical results confirms the FEM results. The results of the investigation have been introduction in the manufacturing.

Keywords: forging, upset, internal defects, ingot, ledges, defects welding, compressive strains.

Марков Олег Євгенійович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою АВП ДДМА

Марков Олег Євгенєвич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой АПП ДГМА

Markov Oleg – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA

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

ORCID: [0000-0002-2467-9607](https://orcid.org/0000-0002-2467-9607)

Хващинський Антон Станіславович – аспірант ДДМА

Хващинский Антон Станіславович – аспірант ДГМА

Khvashchynskiy Anton – Graduate student DSEA

E-mail: antonio.hvashherman@ukr.net

ORCID: [0000-0002-2690-8354](https://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

Мусорін Антон Володимирович – аспірант ДДМА

Мусорин Антон Владимирович – аспірант ДГМА

Musorin Anton – Graduate student DSEA

E-mail: anton.m.95@mail.ru

ORCID: [0000-0002-4145-9665](https://orcid.org/0000-0002-4145-9665)

Лисенко Антон Андрійович – аспірант ДДМА

Лысенко Антон Андреевич – аспірант ДГМА

Lysenko Anton – Graduate student DSEA

E-mail: antl31@ukr.net

ORCID: [0000-0001-5454-6357](https://orcid.org/0000-0001-5454-6357)

Молодецький Віталій Васильович – начальник відділу ПрАТ «НКМЗ»

Молодецкий Виталий Васильевич – начальник отдела ЧАО «НКМЗ»

Molodetskiy Vitalii – Head of Department NKMZ

E-mail: Molvvet2876@gmail.com

ORCID: [0000-0001-5766-1684](https://orcid.org/0000-0001-5766-1684)

ПрАТ «НКМЗ» – Приватне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ

ЧАО «НКМЗ» – Частное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск

NKMZ – Novokramatorsky Mashinostroitelnyy Zavod, Kramatorsk

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

DSEA – Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.