ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ КРУПНИХ ОПОРНИХ ВАЛІВ БЕЗ ОСАДЖЕННЯ

Маркова М. О., Семенов В. М., Таган Л. В.

Досліджено вплив операції осадження на розподіл деформацій у тілі поковок. Було запропоновано замінити операцію осадження протяжкою укорочених злитків із застосуванням спеціальних механічних режимів кування. Розроблено раціональний процес кування великих валів. Дослідження засноване на методі скінчених елементів. Температурний інтервал моделювання процесу кування становив 1200–800°С, матеріал – сталь 45Cr3Mo1V. Число вузлів – 10000, число елементів – 3200, коефіцієнт Пуассона – 0,49. Досліджено деформований стан заготовки в процесі кування для двох варіантів – з осадженням і без осадження. Було встановлено, що використання осадження для досягнення достатньої величини укову не обов'язково. Рівномірний розподіл деформацій, які забезпечують необхідний уков, може бути забезпечено шляхом кування укорочених злитків опуклими бойками. У результаті на 25 % збільшена продуктивність процесу кування великих валів, кількість нагрівань знизилась з 8 до 6. Був розроблений новий енергоефективний процес кування великих валів без осадження з укорочених злитків, за допомогою програми скінчених елементів.

Исследовано влияние операции осадки на распределения деформаций в теле поковок. Было предложено заменить операцию осадки протяжкой укороченных слитков с применением специальных механических режимов ковки. Разработан рациональный процесс ковки крупных валов. Исследование основано на методе конечных элементов. Температурный интервал моделирования процесса ковки составлял 1200–800°С, материал – сталь 45Cr3Mo1V. Число узлов – 10000, число элементов – 3200, коэффициент Пуассона – 0,49. Исследовано деформированное состояние заготовки в процессе ковки для двух вариантов – с осадкой и без осадки. Было установлено, что использование осадки для достижения достаточной величины укова не обязательно. Равномерное распределение деформаций, которые обеспечивают требуемый уков, может быть обеспечено путем ковки укороченных слитков выпуклыми бойками. В результате на 25 % увеличена производительность процесса ковки крупных валов, количество нагревов снизилось с 8 до 6. Был разработан новый энергоэффективный процесс ковки крупных валов без осадки из укороченных слитков, с помощью программы конечных элементов.

The influence of upsetting operation on strain distribution in the forgings body was investigated. Changing of upsetting operation to drawing short ingots by application of special mechanical modes of forging was proposed. A rational process of the forging large shafts was developed. The study based on the finite element method. Temperature range of modeling the process of forging was 1200–800°C, the material – steel 45Cr3Mo1V. The number of grid points – 10000, the number of elements – 3200, Poisson's ratio – 0.49. Strain state of the workpiece during the forging of two options with upsetting and without upsetting were investigated. It was established that the useing of upsetting for of sufficient magnitude of forging ratio not required. Uniform distribution of strains that provide requested of forging ratio can be achieved through forging shortened ingots by convex die. As a result, approximately 25 % increased productivity of the process of forging large shafts, the amount of heating from below from 8 to 6. The new energy-efficient process of forging large shafts without upsetting of the shortened ingots designed using finite-element program.

Маркова М. А. аспирант кафедры ОМД, ДГМА
markova.mar.alex@mail.ru

Семенов В. М. д-р техн. наук, проф. каф. ПТМ, ДГМА

Таган Л. В. аспирант кафедры ОМД, ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.735.36

Маркова М. О., Семенов В. М., Таган Л. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ КРУПНИХ ОПОРНИХ ВАЛІВ БЕЗ ОСАДЖЕННЯ

Сучасні тенденції розвитку металургійної промисловості у світі вимагають розробки нових технологічних процесів виготовлення крупних деталей більшої маси з отриманням високого комплексу механічних властивостей [1]. На сьогоднішній день Україна входить у першу десятку країн з виробництва крупних поковок. Продукція вітчизняних заводів важкого машинобудування затребувана не тільки всередині країни, а й на світовому ринку. Це обумовлено унікальними можливостями українських підприємств, в області виробництва і кування злитків масою більше 350 тонн на автоматизованому кувальному комплексі 150 МН.

Крупні деталі відповідального призначення виготовляються куванням злитків, що дозволяє усунути внутрішні дефекти (осьова рихлість і порожнечі) та підвищити експлуатаційні характеристики крупних деталей [2]. Якість деталі в цілому визначається ступенем проробки литої структури злитка, заварюванням внутрішніх пустот, які можуть бути виявлені ультразвуковим контролем (УЗК). Особливе місце займають крупні поковки, які йдуть на виготовлення особливо крупних опорних прокатних вала товстолистового стану чистової маси 165 тонн. Готовий виріб має діаметр бочки 2000 мм при довжині бочки 5500 мм.

Крупні поковки масою понад 250 тонн вважаються унікальними і технологіям їх виготовлення відводять особливу увагу [3]. Серійність таких деталей одинична, отже, досвід виготовлення таких поковок відсутній. Проводити спеціальне експериментальне дослідження на натурних зразках в цьому випадку не рентабельно. Дослідження на зменшених моделях не дає повної картини проходження процесу деформування. Це і обумовлює складність проектування таких технологічних процесів. Ефективним інструментом для розробки технології кування крупних поковок є скінченно-елементне моделювання технологічного процесу [4, 5]. Тому дана робота спрямована на теоретичне дослідження процесу кування опорного вала зі злитка масою 355 тонн методом скінченних елементів (МСЕ) і отримання вихідної інформації для проектування технологічного процесу кування.

Мета роботи – дослідження впливу операції осадження злитку на розподіл коефіцієнта уковування у поковці, заміна ковальської операції осадження протяжкою укорочених злитків із застосуванням спеціальних механічних режимів кування, розробка раціонального технологічного процесу.

Кількісно проробку структури металу і заварювання внутрішніх дефектів злитків можна оцінити на підставі даних про розподіл логарифмічних деформацій e_i у тілі заготовки [6], які можуть бути перераховані на коефіцієнт уковування через співвідношення Уков = $\exp^{ei/2}$. На сьогоднішній день існує значна кількість комерційних програмних продуктів, на основі МСЕ, які здатні моделювати процеси кування злитків з визначенням напружено-деформованого стану (НДС) заготовки в процесі деформації. При комп'ютерному моделюванні процесів кування крупних поковок необхідно враховувати такі важливі фактори: зміна ковальських операцій протяжка – осадження – протяжка, багаторазові подачі, кантування, обтиснення, зміни інструмента, розміцнення при куванні проходами, застосування проміжних підігрівів заготовки та ін. Не всі існуючі комерційні програмні продукти можуть врахувати ці важливі параметри, а спеціалізованих скінченно-елементних програм для моделювання процесів кування злитків, з урахуванням складних процесів розміцнення, яке впливає на енергосилові параметри процесу і вибір устаткування, на сьогоднішній день немає. Тому для моделювання процесів кування крупних злитків був удосконалений математичний апарат МСЕ для врахування розміцнення матеріалу в гарячому стані і була розроблена на основі

МСЕ спеціалізована програма на кафедрі «Обробка металів тиском» (ОМТ) Донбаської державної академії (ДДМА), яка призначена для розрахунків технологічних процесів кування крупних поковок із злитків [7]. Для розробки раціонального технологічного процесу необхідно провести кілька комп'ютерних експериментів з різними варіантами застосувань операцій та інструменту, і з них обрати найбільш ефективний з точки зору отримання поковок високої якості при низьких витратах на їх кування. Для порівняння варіантів був обраний класичний технологічний процес кування опорних валів із застосуванням операції осадження та без використання осадження. Температурний інтервал моделювання процесу кування становив 1200–800°С, сталь 45Х3М1Ф, коефіцієнт уковування 2,65. Креслення поковки з цапфою для можливості утримання маніпулятором представлено на рис. 1. Розрахункова схема дискретизації злитка на скінченні елементи та форма поковки представлені на рис. 2. Ескізи поздовжнього переріза поковки після кування за двома різними схемами з інформацією про розподіл коефіцієнта уковування, представлені на рис. 3 і 4. Технологічний процес кування з використанням операції осадження передбачається реалізувати за вісім нагрівань (виносів).

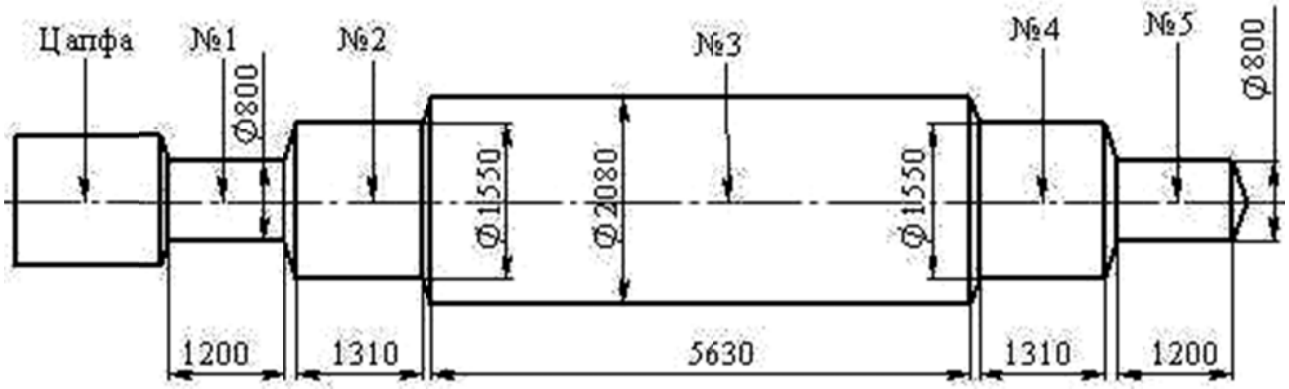

Рис. 1. Креслення поковки з цапфою

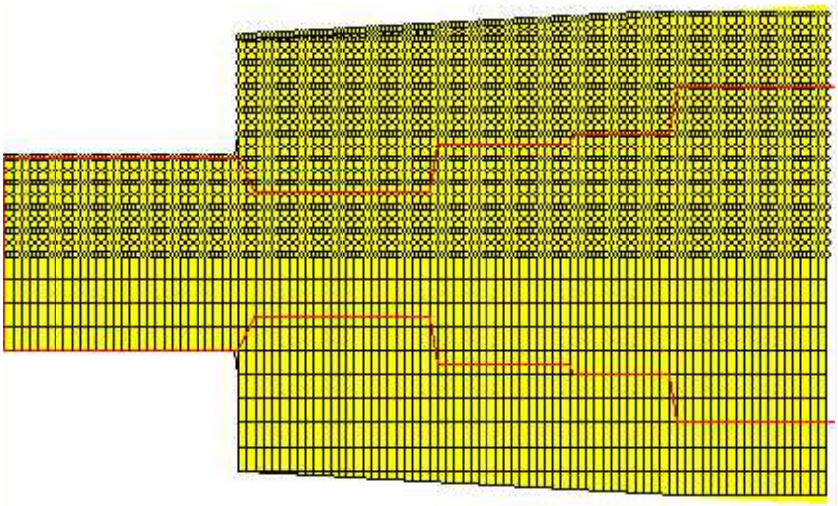

Рис. 2. Розрахункова схема поковки з розбивкою злитка на елементи

Базовий технологічний процес з використанням операції осадження.

Згідно базової технології кування опорного валу [8] встановлено, що після осадження злитку до діаметра Ø 4200 мм і подальшого протягування до поковочних розмірів отримуємо розподіл коефіцієнту уковування за перерізом поковки, що представлений на рис. 3. Бочка вала отримала меншу проробку, ніж шийки вала. Охолодження металу на поверхні поковки

призвело при куванні шийок поковки до утворення утягнень на уступах між бочкою і шийкою валу. Осадження підвищує загальний рівень накопичених деформацій у тілі заготовки, отримані результати свідчать про високу ступінь проробки металу в периферії шийок поковки валу (коефіцієнт уковування в середньому близько 7,5), що перевищує заданий коефіцієнт уковування (2,65), але даний технологічний процес призведе до підвищених енергетичних витрат, які пов'язані з великою кількістю операцій і підігрівів заготовки. Коефіцієнт уковування більше 2,5–3,0 не забезпечує значного підвищення механічних властивостей. Недоліками є поверхневі дефекти і дефекти форми поковки (затиски, тріщини, утяжини). З точки зору недостатнього заварювання осьових дефектів є осьова частина шийки вала поковки з прибуткової сторони злитка, яка має меншу величину проробки. Це пояснюється осадженням злитка на плиті з отвором, отриманням великого перерізу заготовки і неможливістю проникнення осередку деформації до осі поковки при протягуванні, тому необхідно корегувати механічні режими кування, інструмент і ковальські операції. При цьому розрахункове зусилля осадження перевищує рівень 250 МН. Тому необхідно замінити енергоємну операцію осадження протяганням спеціальним інструментом і термомеханічними режимами кування для забезпечення умови усунення металургійних дефектів.

У зв'язку з цим можливе застосування злитків з відношенням H / D = 1,0–1,2, широких бойків (для забезпечення подач більшої величини) опуклої геометрії [9].

Новий технологічний процес без використанням операції осадження.

Після внесення корегувань в технологічний процес і його моделювання отримали результати розподілу коефіцієнту уковування по перетину поковки (рис. 4). Отримані результати якісно повторюють попередні (рис. 3), за винятком меншого рівня накопиченого коефіцієнту уковування за рахунок виключення операції осадження. При цьому в шийках вала забезпечується коефіцієнт уковування ≈ 5,5–6,0, а в бочці ≈ 3,0. Таким чином, виключення операції осадження злитку дозволить протяжкою забезпечити з вихідних розмірів укороченого злитку коефіцієнт уковування необхідної величини. Це дозволить зменшити кількість нагрівань з 8 до 6. Продуктивність процесу кування збільшиться приблизно на 25 %.

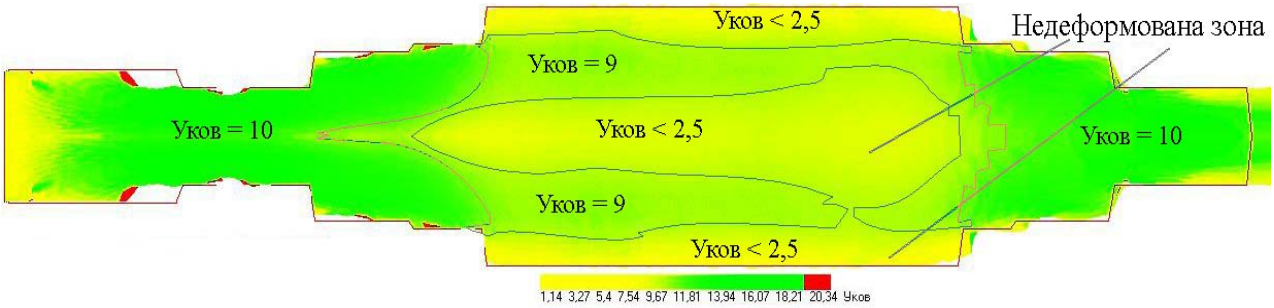

Рис. 3. Розподіл коефіцієнту уковування по перетину поковки опорного вала за базовою технологією із застосуванням операції осадження

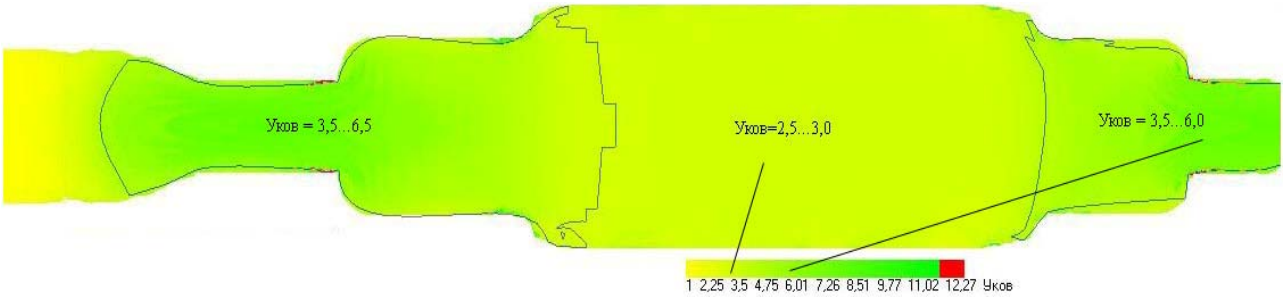

Рис. 4. Розподіл коефіцієнту уковування в поковці без застосування операції осадження

Для кількісної оцінки ефективності схеми кування необхідно порівняти розподіл деформацій за перерізом поковки. Перетини проводилися в середині кожної ділянки (поковка має 4 уступів і бочку вала, не досліджується крайня ліва ділянка, яка є цапфою для утримання маніпулятором і видаляється в кінці кування). На рис. 5 представлено розподіл деформацій по діаметру кожної ділянки для схеми кування з операцією осадженням (лінія 1) і без осадження (лінія 2).

Порівнюючи розподіл логарифмічних деформацій на дільниці № 1 (рис. 5, а) для двох схем кування встановлено, що схема кування з осадженням (лінія 1) забезпечує більш високий рівень накопичення деформацій, однак деформації розподіляються менш рівномірно, ніж для схеми кування укороченого злитку без осадження (лінія 2, рис. 5, а). При цьому максимальні деформації для першої схеми виникають на відстані ≈ 0,6 R, де R – радіус першої ділянки, а для другої в осьовій зоні ділянки. Рівень деформацій в осьовій зоні для другої схеми кування вище, ніж для першої. Це пояснюється складністю проникнення осередку деформації до осі заготовки при куванні заготовки значного діаметра, який збільшився після осадження злитка. Низький рівень логарифмічних деформацій на поверхні заготовки для другої схеми пояснюється впливом на НДС контактних сил тертя. Середні логарифмічні деформації по перетину складуть 2,5–3,0, що є високим рівнем, який буде забезпечувати достатнє опрацювання литої структури.

Для дільниці № 2 також можна відзначити появу максимальних деформацій в осьовій зоні для схеми кування без осадження і на відстані ≈ 0,9 R для першої схеми деформування (рис. 5, б). При цьому рівень накопичених деформацій в осьовій зоні приблизно однаковий для двох схем кування. Аналогічні закономірності з ділянками № 1 і № 2 мають протилежні ділянки вала № 4 та № 5 (рис. 5, г, д) з незначною різницею за величиною накопичених деформацій, що пояснюється конусом тіла злитка і відповідно різним ступенем деформації лівих і правих уступів валу.

Основна ділянка поковки (№ 3) – бочка вала також, як і уступи для першої схеми деформування характеризуються меншою величиною накопичених деформацій в осьовій зоні (рис. 5, в), що призводить до нерівномірності розподілу деформацій по перетину.

Це значно більше, ніж для другої схеми кування без осадження (лінія 2, рис. 5, в), в цьому випадку деформації по перетину розподіляються рівномірно. У середньому величина накопичених деформацій для другої схеми складає ≈ 1,5, що в перерахунку на коефіцієнт уковування складе ≈ 2,5.

За результатами проведених теоретичних досліджень для гарантованого отримання якісної заготовки відповідно до вимог замовника розроблено і впроваджено технологічний процес кування поковки «Опорний вал». Для виготовлення поковки замість осадження схема кування була замінена протягуванням укороченого злитку опуклим бойком з залишковою протяжкою вирізними бойками, що забезпечило в осьовій зоні злитка НДС всебічного нерівномірного стискання для заварювання осьової рихлості злитка. За результатами УЗК, які наведені в таблиці, в об’ємі поковки внутрішніх дефектів, що перевищують вимоги стандартів SEP 1921, не виявлено. Отримана поковка відповідає технічним умовам замовника.

За результатами промислової апробації проведено порівняння результатів моделювання процесу кування злитку з реальною виробничою технологією кування. Результати скінченно-елементного моделювання по формозміні і тепловому стану заготовки в процесі кування відповідає реальним виробничим даними у табл. 1. Розміри заготовки в процесі кування збігаються з точністю 5–7 %. Отримані в результаті скінченно-елементного моделювання утяжини на переході з бочки валу на шийки були відзначені на реальній поковці.

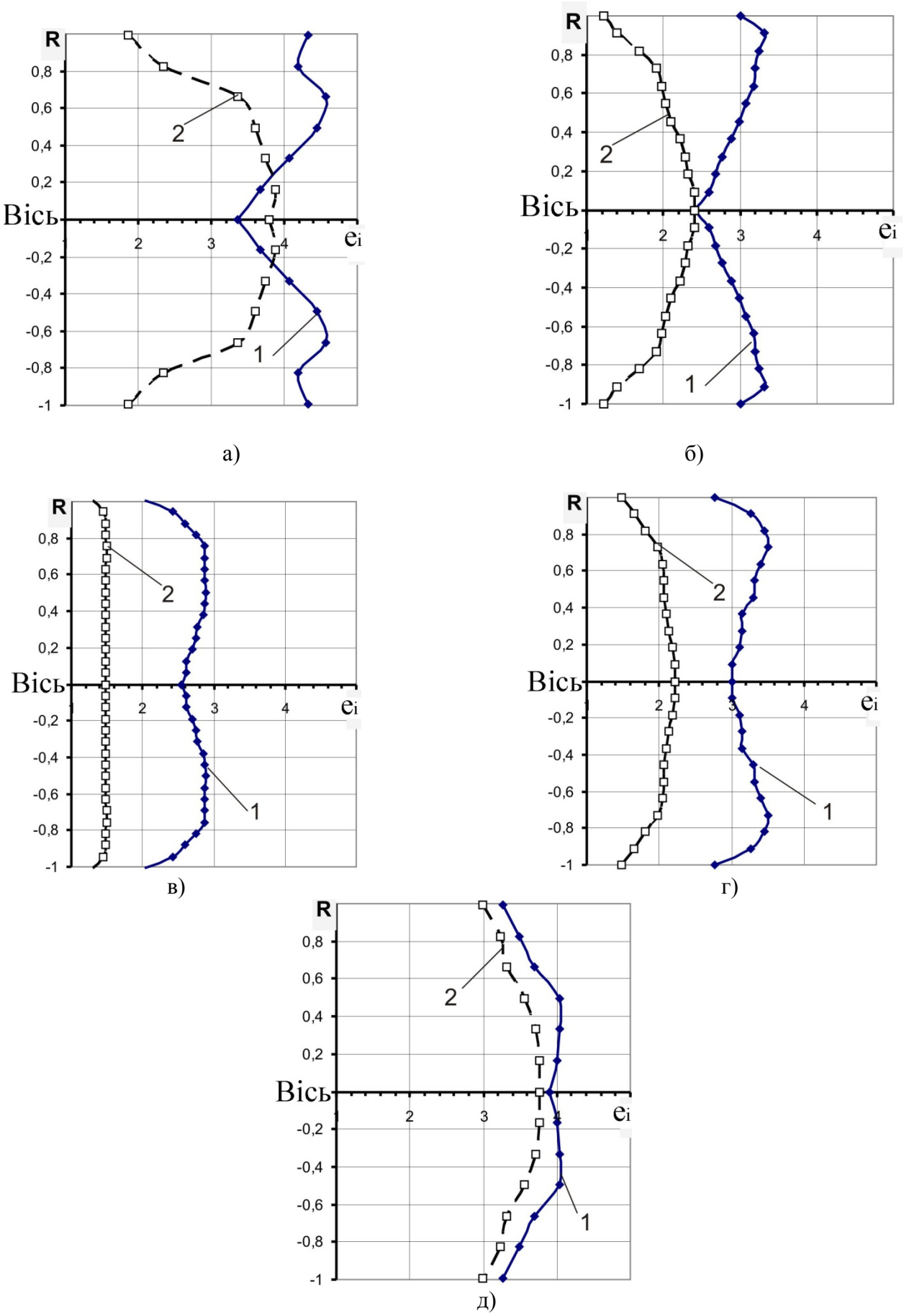

Рис. 5. Розподіл логарифмічних деформацій по ділянкам поковки для двох схем кування

Таблиця 1

Результати ультразвукового контролю

УЗК по SEP 1921	Фактичний результат
Поверхня глибиною 200–400 мм – (1,0–0,7) R по класу d / d (Ø 2 мм)	відхилень не встановлено
Середні шари – (0,7–0,2) R по класу c / c (Ø 3 мм)	відхилень не встановлено
Центральні шари Ø 400 мм – (0,2–0,0) R – по класу b / b (Ø 5 мм)	відхилень не встановлено

ВИСНОВКИ

Із застосуванням розробленої програми на основі МСЕ досліджено деформований стан заготовки в процесі кування і спроектований новий енергозберігаючий технологічний процес кування крупних опорних валів без осадження з укорочених злитків. Отримані результати показали, що застосування операції осадження для отримання достатньої величини, коефіцієнту уковування не обов'язково. Забезпечити рівномірний розподіл деформацій, достатніх для отримання заданого коефіцієнта уковування, можливо за рахунок протягування опуклими бойками укорочених злитків. Розроблене технологічне рішення дозволило проводити кування особливо крупних злитків без осадження. В результаті приблизно на 25 % підвищилася продуктивність процесу кування крупних валів, кількість нагрівань знизилося з 8 до 6.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tanaka Y. Development of high purity large forgings for nuclear power plants / Y. Tanaka, I. Sato // J. Nucl. Mater., 2011, 417, 854–859.

2. Внедрение энергосберегающего технологического процесса ковки крупных слитков без осадки / О. Е. Марков [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – Москва, 2011. – № 10. – С. 33–36.

3. Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot / Y. Kim, J. Cho, W. Bae // J. Mater. Process. Technol., 2011, 211, 1005–1013.

4. Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D / Z. J. Zhang, G. Z. Dai, S. N. Wu, L. X. Dong, L. L. Liu // J. Mater. Sc. and Eng., 2009, A 499, 49–52.

5. Марков О. Е. Совершенствование технологического процесса ковки крупных валов на базе DEFORM – 3D / О. Е. Марков // Инженерные системы – 2011 : сб. научн. трудов. – Москва, 5–8 апреля 2011 г. – Т. 1. – М. : РУДН, 2011. – С. 142–146. – ISSN 978-5-209-04053-8.

6. Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modeling method / J. R. Cho, W. B. Bae, Y. H. Kim, S. S. Choi, D. K. Kim // J. Mater. Process. Technol., 1998, 80–81, 161–165.

7. Установление связи напряжений и деформаций для конечно-элементного моделирования процессов кування слитков / О. Е. Марков [и др.] // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 11–16. – ISSN 2076-2151.

8. Марков О. Е. Особенности ковки прокатных валков из слитков массой более 300 тонн / О. Е. Марков, С. В. Янчук // Енергомашспецсталь : II наук.-техн. конф. – Краматорськ, 2008. – С. 22–24.

9. *Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting / O. E. Markov, M. V. Oleshko, V. I. Mishina // Metalurgical and Mining Industry. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3, № 7. – P. 87–90.*

Стаття надійшла до редакції 27.11.2013 р.

.