

УДК 621.735.3

**Марков О. Є.**  
**Злигорєв В. М.**  
**Житніков Р. Ю.**  
**Інчаков Є. В.**  
**Різак П. І.**

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ ЧОТИРИПРОМЕНЕВИХ ЗАГОТОВОК З КУТОМ УВІГНУТИХ ГРАНЕЙ 150°**

В сучасних умовах для України важливий розвиток експортно-орієнтованих галузей промисловості. Значний обсяг експорту України забезпечує важке і енергетичне машинобудування. Конкурування на міжнародних ринках вимагає підвищення якості та зниження собівартості виробленої продукції.

Крупногабаритні деталі в важкому машинобудуванні виготовляються куванням злитків. Метал злитка має низькі механічні властивості, які є наслідком дендритної структури і вадами усадочного походження. Усунути дендритну структуру і заварити внутрішні порожнечі можна, якщо виготовляти поковки з високим уковом. Для цього в технологічному циклі кування використовується ковальське осадження заготовки. Однак в літературі можна зустріти суперечливу інформацію про вплив операції осадження на заварювання внутрішніх пустот. Актуальним напрямом досліджень є вдосконалення операції осадження, яке можна здійснити за рахунок зміни форми заготовки, що осаджують. Це дозволить змінити деформований і напружений стан заготовки, що підвищить проробку литої структури і якість поковок в цілому [1].

Розробка і проектування техпроцесів виготовлення крупногабаритних поковок спрямовані на пошук раціональних способів осадження для підвищеної проробки структури металу. У крупногабаритних деталях основна локалізація внутрішніх дефектів виявляється в осьовій зоні. Це викликано відповідним напружено-деформованим станом (НДС) при деформуванні. Застосування операцій осадження і протягування підвищує рівномірність механічних властивостей, але при цьому підвищується трудо- і енергоємність процесів кування.

В останні роки кількість крупних поковок, виготовлених із злитків, підвищується. Це, в першу чергу, пов'язано зі збільшенням потужності важких машин. Однак якість вироблених поковок не завжди відповідає вимогам замовника. Низька якість вироблених крупних поковок пояснюється низькою якістю вихідних злитків [2, 3].

Авторами роботи [4] показано, що останнім часом зросла потреба у виготовленні масивних деталей, які виготовляються з використанням осадження. Якість таких поковок визначається за механічними властивостями і ступенем неоднорідності структури металу. Застосовувані процеси кування масивних поковок не гарантують отримання високої якості.

В роботі [5] показано, що існують спеціальні методи кування крупногабаритних виробів. Ці методи кування відрізняються типом використовуваних операцій, режимами деформування і геометрією бойків [6]. Механічні властивості деталей переважно залежать від призначення осадження і подальшого протягування. При цьому резерви розробки нових техпроцесів кування ще повністю не вичерпані. При розробці ефективних техпроцесів деформування основний інтерес викликає вдосконалення операції ковальського осадження.

В роботі [7] відзначається, що зростання обсягів виробництва поковок високої якості вимагає розвитку і впровадження нових техпроцесів кування крупногабаритних заготовок для деталей з низькими витратами на кування. Однак у роботі не досліджувалися нові способи осадження, які дозволяють знизити силу деформування. Знизити силу операції осадження можна за рахунок деформування секційним інструментом або зміною площі перетину заготовки [8].

Метою роботи є підвищення механічних властивостей деталей відповідального призначення за рахунок заварювання внутрішніх пустот і підвищення рівномірності поковки структури злитка на основі вдосконалення операції осадження чотирипроменевих злитків.

Моделювання процесу осадження профільованих на чотирипроменевої переріз заготовок проводилось методом скінчених елементів (МСЕ). За результатами моделювання встановлювались розподіл НДС поковки та формозмінення штучного дефекту після деформування. Після профілювання усі заготовки осаджувалися на 50 %.

Рівняння зв'язку компонент швидкостей напружень і деформацій:

$$S_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\bar{\epsilon}}} \dot{\epsilon}_{ij},$$

де  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – компоненти швидкостей деформацій і напружень;

$S_{ij}$  – компоненти дивергенції напружень.

Крива течії задана рівнянням  $\bar{\sigma} = \sigma(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$ , де  $\bar{\epsilon}$ ,  $\dot{\bar{\epsilon}}$ ,  $T$  – інтенсивності деформацій і швидкостей деформацій;

$T$  – температура.

Моделі для скінчено-елементного моделювання мали такі розміри: зовнішній діаметр заготовки  $D = 1,5$  м, висота заготовки  $H = 3,75$  м, діаметр отвору дефекту приймався 10 % від зовнішнього діаметру заготовки (0,15 м), кут граней заготовки становив  $150^\circ$  (рис. 1). Глибина увігнутих граней ( $d/D$ ) досліджувалась у діапазоні 15 %, 20 % та 25 % від діаметру заготовки. Матеріал – сталь 70ХЗГНМФ, температура нагрівання заготовки  $1150^\circ\text{C}$ , температура інструменту –  $20^\circ\text{C}$ , коефіцієнт тертя 0,45, сітка містить 75 000 елементів, швидкість деформування 35 мм / с.

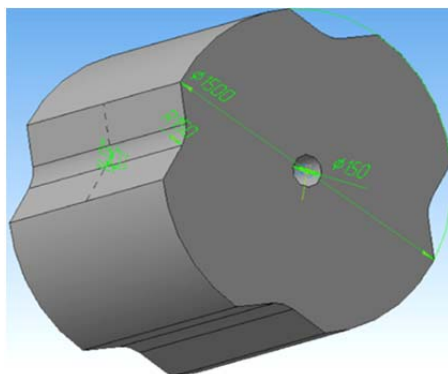


Рис. 1. 3D-модель профільованої заготовки на чотирипроменевої переріз

Показник схеми напруженого стану осьової зони заготовки:

$$\Pi_\sigma = \frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i},$$

де  $\sigma_{cp}$  – гідростатичний тиск, МПа;

$\sigma_i$  – інтенсивність напружень, МПа.

На заковування в процесі осадження чотирипроменевої заготовки впливає глибина увігнутих граней. У дослідженні використовувалися грані з кутом  $150^\circ$  і відносна їх глибина  $d/D$  становила 25 %, 20 % та 15 %. Ступінь заковування отвору після осадження профільованих чотирипроменевої заготовок на 50 % показано на рис. 2. За результатами моделювання було виявлено, що для розглянутих параметрів глибин граней відбувається заковування отвору в середній частині поковки. Ступінь заковування отвору більша для зразків з відносною глибиною граней 0,85. Заготовки, профільовані на глибину  $d/D = 0,75$ , показали гірші результати по закриттю осьового дефекту.

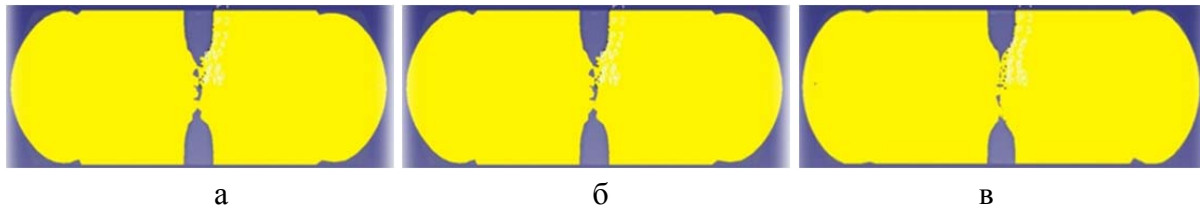


Рис. 2. Заковування отвору після осадження профільованих чотирипроменевих заготовок на 50 %:

а –  $d/D = 0,75$ ; б –  $d/D = 0,80$ ; в –  $d/D = 0,85$

Залежність механізму заковування отвору у процесі осадження чотирипроменевих моделей з різною відносною висотою граней показана на рис. 5. Аналіз отриманих результатів (рис. 3) дозволив встановити, що відносна глибина граней більше за 15 % ( $d/D = 0,85$ ) не призводить до збільшення ступеня заковування дефекту.

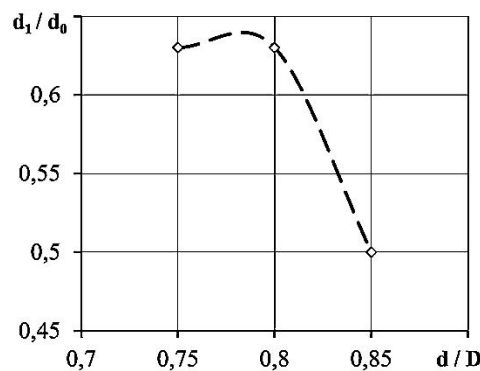


Рис. 3. Залежність відносного діаметру отвору у процесі осадження чотирипроменевих моделей з різною відносною глибиною граней

Після осадження чотирипроменевих заготовок з  $d/D = 0,85$  на 50 % відбувається заковування середнього відносного діаметру ( $d_1/d_0$ ) дефекту на 50 % (рис. 3).

Розробка техпроцесу кування неможлива без встановлення розподілу температур у процесі осадження чотирипроменевих заготовок. Розподіл температурних полів в тілі заготовки впливає на силові та деформаційні параметри, а також на вичерпання ресурсу пластичності матеріалу. Для спрощення дослідження досить простежити зміну температури по перерізу заготовки. На рис. 4 представлено розподіл температур чотирипроменевих заготовок з різними параметрами граней після деформування на 50 %.

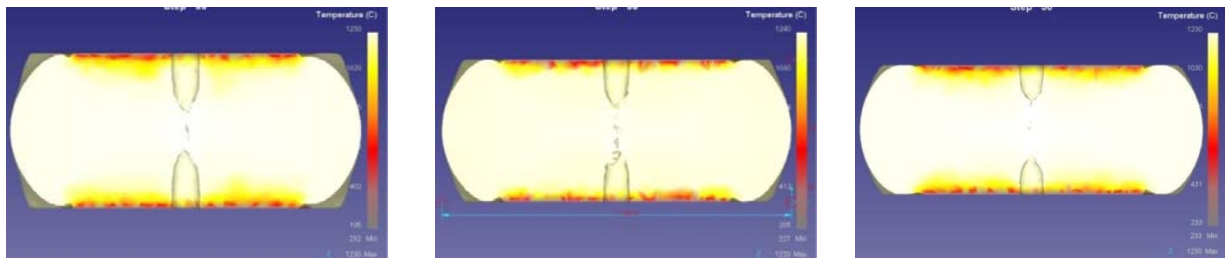


Рис. 4. Розподіл температур при осадженні чотирипроменевих заготовок:

а –  $d/D = 0,75$ ; б –  $d/D = 0,80$ ; в –  $d/D = 0,85$

Аналіз способу осадження чотирипроменевих заготовок з різними глибинами граней дозволив встановити, що розподіл температур в процесі кування знаходиться в температурному інтервалі. Тепловий стан заготовки для різних варіантів осадження збігається, отже, охолодження заготовки в процесі деформування має однаковий вплив на НДС і далі не досліджується.

Розподіл логарифмічних деформацій у меридіональному перерізі поковки після деформації на 0,5 вихідної висоти представлено на рис. 5. Осадження чотирипроменевих заготовок з різними параметрами увігнутого поперечного перерізу призводить до розподілу деформацій, аналогічних процесу осадження циліндричних зразків. Деформації з максимальною величиною розташовуються в центральній частині поковки, а з мінімальною – на плоских торцях поковки. Розподіл деформацій для різних параметрів заготовок з чотирипроменевим перерізом схожий. Але при осадженні чотирипроменевих заготовок з глибиною граней  $d/D = 0,85$  площа деформацій з максимальною величиною більша на 35...45 % у порівнянні з іншими параметрами заготовок (рис. 5, в).

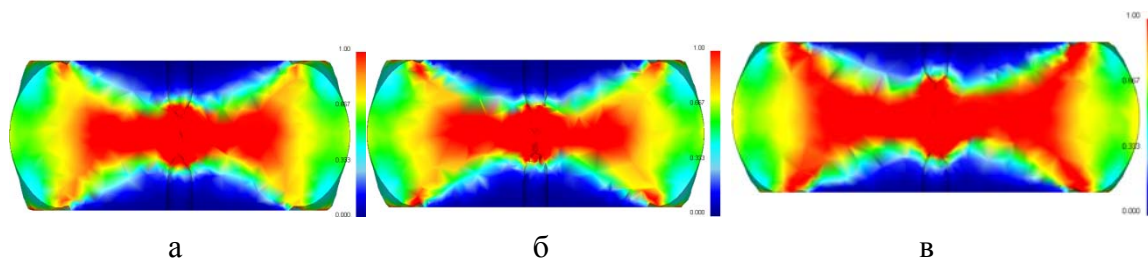


Рис. 5. Розподіл логарифмічних деформацій у процесі осадження чотирипроменевих заготовок:

а –  $d/D = 0,75$ ; б –  $d/D = 0,80$ ; в –  $d/D = 0,85$

Осадження чотирипроменевих заготовок змінює напружений стан у поковці (рис. 6). В середній та осьовій частині поковки виникають середні деформації зі знаком мінус, що свідчить про утворення у зоні осьової рихлості заготовки стискаючих напружень з величиною близько – 85 МПа при відносній глибині  $d/D = 0,85$  (рис. 6, в).

Підвищення відносної глибини граней чотирипроменевих заготовок призводить до змінення розподілу середніх напружень у металі заготовки. Глибокі грані зменшують площу й величину стискаючих напружень. Осадження чотирипроменевих заготовок не виключає утворення діжкоподібної бічної поверхні з локалізацією на цій поверхні розтягуючих напружень.

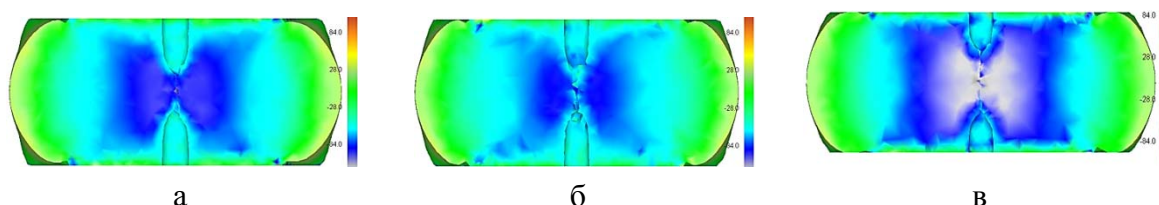


Рис. 6. Гідростатичні напруження при осадженні чотирипроменевих заготовок:

а –  $d/D = 0,75$ ; б –  $d/D = 0,80$ ; в –  $d/D = 0,85$

Досліджено новий спосіб осадження чотирипроменевих заготовок з кутом граней  $150^\circ$  та різними глибинами цих граней. За результатами дослідження встановлено НДС заготовки та закономірності зміни розмірів осьового отвору у процесі осадження. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити ефективні рекомендації процесу осадження та його переваги перед існуючим способом деформування.

Заковування отвору починає відбуватися при деформації 10 %. Максимальне заковування отвору відбувається після осадження на 65 % для відносної глибини граней 15... 20 % від діаметра заготовки. Увігнуті грані величиною 15 % від діаметра заготовки призводять до виникнення у тілі заготовки стискаючих напружень після осадження на 55 %. Крім цього, в осьовій зоні чотирипроменевої заготовки для зазначених параметрів виникають максимальні деформації, що будуть сприяти заковуванню внутрішніх дефектів. Підвищення рівня деформації при осадженні чотирипроменевих заготовок призводить до підвищення величини стискаючих напружень в тілі поковки.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз основних показників якості крупногабаритних поковок та базових техпроцесів кування і обґрунтовано напрямки їх подальшого вдосконалення. Цей напрямок полягав у вдосконаленні способу осадження чотирипроменевих заготовок.

Розроблено методіку досліджень операцій профілювання і осадження чотирипроменевих заготовок, яка дозволила кількісно оцінити НДС заготовки при осадженні і встановити ступінь заварювання внутрішніх дефектів.

Встановлено вплив кута граней чотирипроменевих заготовок 150° на розподіл деформацій, температур, напружень і заварювання внутрішніх порожот після осадження. Заковування отвору починає відбуватися при деформації 10 %. Максимальне заковування отвору відбувається після осадження на 65 % для відносної глибини граней 15...20 % від діаметра заготовки.

## REFERENCES

1. 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), 16-24. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>
2. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. (2012). *Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr<sub>2</sub>Ni<sub>4</sub>MoV forging ingot. Mater. Design*, 35, 446-456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
3. Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. (2009). *A criterion for void closure in large ingots during hot forging. J Mater Process Tech.*, 209(4), 1950-1959. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>
4. Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. (2008). *Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 29 (2), 139-142
5. Baiqing Z., Haixing L., Yifei T., Dongbo L., Yong X. (2015). *Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging. Mathematical Problems in Engineering*. – Article ID 531756, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.
6. Ameli A., Movahhedy M. R. (2007). *A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process. Int J Adv Manuf Tech.*, 33(1-2), 7-17. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2>.
7. Hippenstiel F., Johann K.-P. (2008). *Recent developments in gear steels for use in power generation plants. Forgemasters Meeting, Santander, Spain, (3-7 Nov. 2008)*.
8. Markov O. E., Oleshko M. V., Mishina V. I. (2011). *Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. Metalurgical and Mining Industry*, 3(7), 87-90. <http://www.metalljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>.

Марков О. Є. – д-р техн. наук, зав. каф. ДДМА;

[oleg.markov.omd@gmail.com](mailto:oleg.markov.omd@gmail.com)

Злигорев В. М. – канд. техн. наук, головний металург ПрАТ «НКМЗ»;

[zvn@nkmz.donetsk.ua](mailto:zvn@nkmz.donetsk.ua)

Житніков Р. Ю. – аспірант ДДМА;

[mto@digma.donetsk.ua](mailto:mto@digma.donetsk.ua)

Інчаков Є. В. – аспірант ДДМА;

Різак П. І. – мол. наук. співроб. ДДМА.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

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