

УДК 621.735.35

**Злигорев В. М.
Рагуліна Н. В.
Шевцов С. О.
Інчаков Є. В.
Косілов М. С.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСАДЖЕННЯ ЗАГОТОВОК З УВІГНУТИМИ ПІД КУТОМ 120° ГРАНЬЯМИ

Усі деталі машин у важкому та енергетичному машинобудуванні відносяться до виробів відповідального призначення й виготовляються способами гарячого пластичного деформування. Розміри й маса цих деталей передбачає виготовлення їх куванням. У якості заготовок для кування використовуються злитки. Ковальські злитки характеризуються низькою якістю, викликаною наявністю литої структури й дефектами металургійного походження (осьова рихлість). Для проробки литої структури й заковування осьової рихлості злитка поковки відповідального призначення повинні виготовлятися з коефіцієнтом укову більше 2,5...3,0. Заданий ступінь деформації литої заготовки можна забезпечити тільки із застосуванням операції осадження злитка. Однак в останніх роботах вітчизняних і закордонних дослідників було встановлено, що операція осадження циліндричних заготовок не сприяє закриттю осьових дефектів ковальських злитків.

Дослідження, представлені в роботах [1; 2], дозволили встановити, що осадження застосовується для проробки литої структури з метою підвищення ударної в'язкості й зниження анізотропії механічних властивостей. Однак результати досліджень у роботах [1, 2] показали істотне зниження рівномірності розподілу деформацій у процесі осадження. Автори не запропонували способи, які б збільшили рівномірність розподілу деформацій, що є основним напрямком підвищення якості крупних поковок.

Автори робіт [3, 4] встановили, що операція осадження застосовується як додаткова операція, яка призначається для збільшення коефіцієнту укову, а не для проробку внутрішньої структури металу. Однак дослідники не запропонували нові способи протягування замість операції осадження.

Z. J. Zhang і співавтори [5] встановили, що осадження із протягуванням забезпечує високу рівномірність розподілу деформацій уздовж осі заготовки, у порівнянні зі схемою протягування вирізними бойками. Це підтверджує ефективність застосування операції осадження. Однак автори не досліджували НДС у процесі осадження профільованих заготовок, що також може підвищити ефективність комбінування операцій протягування й осадження.

Для проектування нових технологічних процесів виробництва заготовок зі злитків необхідно мати інформацію про НДС заготовки й силові параметри у процесі кування [6]. На сьогоднішній день в теорії обробки металів тиском застосовується ряд методів визначення НДС, формозміни й силових параметрів деформування [7]. На розподіл НДС у тілі заготовки в процесі кування значний вплив чинить розподіл температур. У цьому зв'язку слід використовувати такі методи аналізу формозміни, які в комплексі враховують вплив температур і деформацій на напружений стан металу заготовки.

В. А. Behrens у роботі [8] встановив, що сучасним теоретичним методом дослідження процесів обробки тиском є метод скінчених елементів (МСЕ). Цей метод застосовується для визначення НДС металу заготовки. Розробка нових технологічних процесів кування не можлива без застосування МСЕ [9]. Тому дослідження процесів кування доцільно проводити цим методом.

Дослідження динаміки заковування осьової рихлості представлені у роботі [10]. Проектування нових технологічних процесів кування поковок відповідального призначення вимагає інформації про динаміку заковування осьових дефектів злитка при деформуванні за новими

схемах. Експериментальні методи застосовуються для дослідження НДС металу як у натурних поковках, так і на зменшених моделях. При дослідженні деформованого стану більшу популярність серед учених одержав метод координатних сіток [11]. Тому цей метод дослідження доцільно застосовувати для верифікації результатів розподілу деформацій, отриманих МСЕ [12].

Дослідження процесів кування крупних поковок – це складний процес, що пояснюється унікальністю заготовок за розмірами і витратами. Це вимагає проведення комплексних теоретичних й експериментальних досліджень перед апробацією нового способу кування у виробничих умовах.

Щоб розробити рекомендації із проектування технологічних процесів кування поковок відповідального призначення із застосуванням нового способу осадження, необхідно встановити НДС заготовок. Для проведення таких досліджень доцільно використовувати методи, що дозволяють із достатньою точністю моделювати процеси кування. До таких методів відноситься МСЕ, який зарекомендував себе як точний інструмент для проведення досліджень і дозволяє одержувати результати з високим ступенем вірогідності [13].

Мета роботи полягає у підвищенні якості крупних поковок відповідального призначення за рахунок заковування осьових дефектів і підвищення проробки структури металу в об'ємі заготовки на основі застосування нового способу осадження заготовок з увігнутими гранями.

Для досягнення зазначеної мети у роботі поставлені наступні завдання:

- розробити методику проведення теоретичних досліджень процесів осадження заготовок з увігнутими гранями;
- оцінити вплив геометрії заготовок з увігнутими гранями на напружено-деформований стан у процесі осадження, що дозволить встановити ефективну схему деформування.

Теоретичне дослідження процесу осадження заготовок з увігнутими гранями проводилося із застосуванням скінчено-елементного моделювання у програмі DEFORM 3D. Заготовка для теоретичних досліджень мала наступні геометричні параметри: діаметр виступів $D = 1500$ мм і довжину $L = 3750$ мм. Діаметр осьового штучного дефекту $d_0 = 0,1D$ (рис. 1), який моделює максимально можливу осьову рихлість у злитках. Перед осадженням заготовка мала увігнуті грані з кутом α , рівним 120° (рис. 1). Відносна глибина увігнутих граней заготовки (d/D) варіювалася в межах 0,75; 0,80; 0,85. Матеріал заготовки – сталь 34ХНМ, початкова температура проведення процесу 1200 °С, коефіцієнт тертя 0,35, сітка містить 60 000 елементів, швидкість руху деформуючого інструмента 20 мм / з [14, 15].

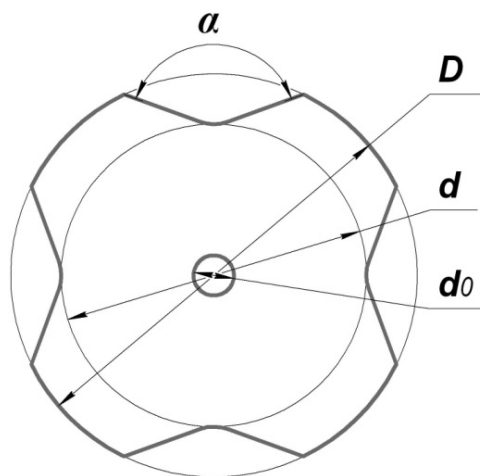


Рис. 1. Поперечний переріз заготовки з увігнутими гранями

Для визначення показника напруженого стану в осьовій зоні на середині висоти заготовки встановлювалася контрольна точка, в якій відслідковувалися середні напруження й інтенсивність напружень. Показник напруженого стану визначався по формулі:

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

де σ_{cp} – середні напруження, МПа;

σ_i – інтенсивність напружень, МПа.

На рис. 2–3 представлені результати розподілу інтенсивності логарифмічних деформацій і середніх напружень у поздовжньому перерізі заготовки після осадження на 50 %. Максимальні деформації ($e_i > 1,0$) локалізуються в осевій зоні на середині висоти заготовки, а мінімальні деформації ($e_i \approx 0$) у торцевих зонах заготовки, що контактують з інструментом. Зона пластичних деформацій якісно й кількісно збігається для різних параметрів увігнутого поперечного перерізу. Це дозволяє зробити висновок про незначний вплив форми поперечного перерізу заготовки з увігнутими гранями на деформований стан (див. рис. 2). Однак осадження заготовок з увігнутими гранями призводить до зміни напруженого стану металу заготовки в осевій зоні. Максимальні стискаючі напруження (– 70 МПа) виникають у місці розташування дефекту при глибині увігнутих граней 15 % (див. рис. 3, в).

Збільшення глибини увігнутих граней сприяє зниженню рівня й площі зони стискаючих середніх напружень. Досліджувані схеми характеризуються перевагою стискаючих напружень у тілі заготовки, за винятком периферійної бічної зони, яка має форму бочки (див. рис. 3).

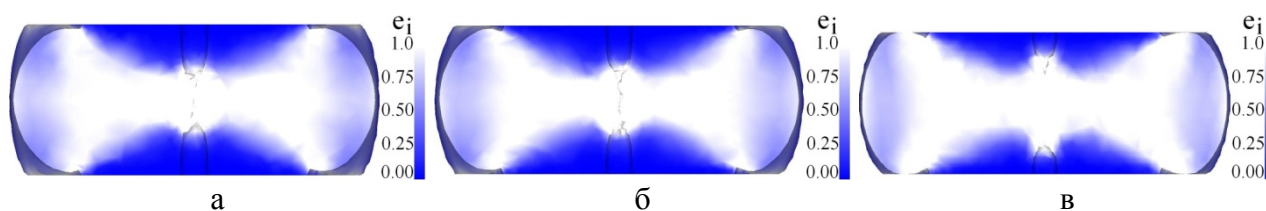


Рис. 2. Розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій при осадженні заготовок з увігнутими гранями:

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

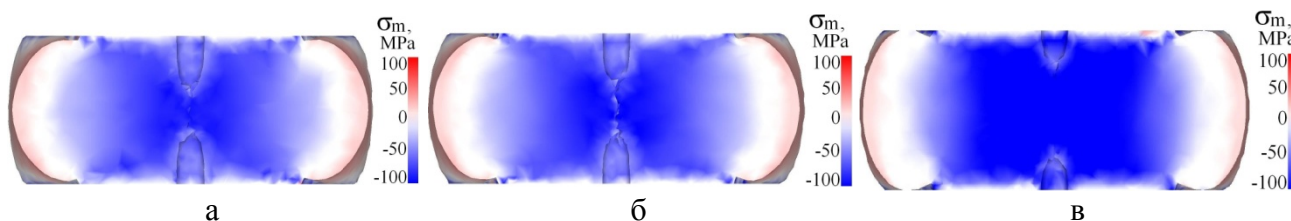


Рис. 3. Розподіл середніх напружень при осадженні заготовок з увігнутими гранями:

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

На рис. 4 представлені результати розподілу інтенсивності логарифмічних деформацій (e_i) по висоті заготовки (H) після осадження заготовок на 50 % для різних глибин увігнутих граней. Рівномірний розподіл деформацій по висоті забезпечує заготовка з глибиною увігнутих граней $d/D = 0,85$ (рис. 4, крива 3).

Проведений аналіз формозміни осевого дефекту дозволив встановити, що максимальна інтенсивність його закриття відбувається в процесі осадження заготовок з співвідношенням $d/D = 0,85$. Ці результати пояснюються відповідним напруженим станом в осевій зоні заготовки в процесі осадження. Показник схеми напруженого стану (Π_{σ}) зі знаком «мінус» свідчить про перевагу стискаючих напружень в осевій зоні заготовки, що сприяє заварюванню осевих дефектів (рис. 5). Загальною закономірністю процесу осадження заготовок з увігнутими гранями є збільшення рівня стискаючих напружень в осевій зоні при

збільшенні ступеня деформації (див. рис. 5). Можна відзначити, що заготовка з параметрами $d/D = 0,85$ має високий рівень стискаючих напружень ($\Pi\sigma = -9,4$) при ступені осадження $\varepsilon = 0,5$.

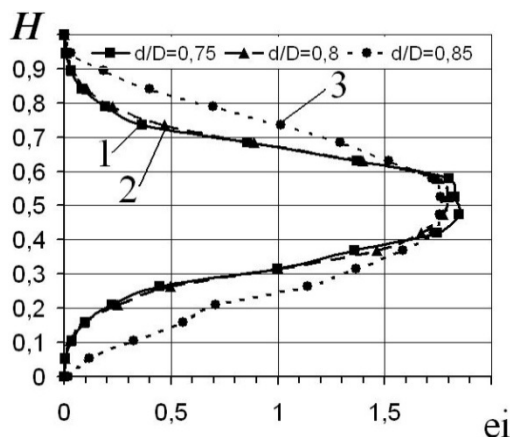


Рис. 4. Розподіл логарифмічних деформацій по висоті заготовки після осадження на 50 % з різними глибинами увігнутих граней:

1 – $d/D = 0,75$; 2 – $d/D = 0,80$;
3 – $d/D = 0,85$

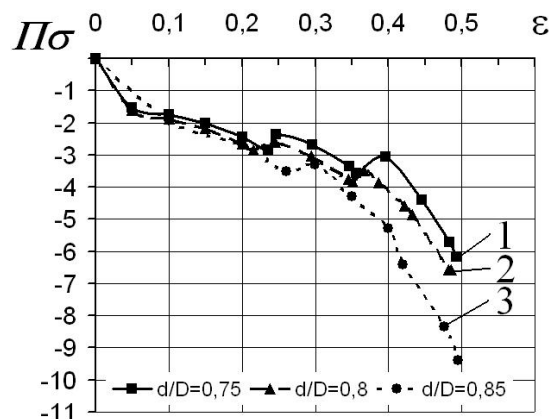


Рис. 5. Показник схеми напруженого стану в процесі осадження заготовок з різними глибинами увігнутих граней:

1 – $d/D = 0,75$; 2 – $d/D = 0,80$;
3 – $d/D = 0,85$

ВИСНОВКИ

Розподіл деформацій за перерізом заготовки якісно й кількісно збігається для різних параметрів увігнутого поперечного перерізу, що свідчить про незначний вплив глибини увігнутих граней на деформований стан (див. рис. 2). Слід відзначити, що осадження заготовок з увігнутими гранями призводить до зміни напруженого стану металу в осьовій зоні. Максимальні стискаючі напруження виникають у місці розташування дефекту при глибині увігнутих граней 15 % (див. рис. 4, в). Це позитивно позначиться на заварюванні внутрішніх осьових дефектів злитка.

Отримані результати дозволили встановити, що збільшення глибини увігнутих граней сприяє зниженню рівня й розмірів зони стискаючих середніх напружень. Досліджувані схеми характеризуються високим рівнем стискаючих напружень у процесі осадження, за винятком бічної поверхні, яка має форму бочки (див. рис. 4).

Значення показника схеми напруженого стану зі знаком «мінус» свідчать про виникнення стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки, що сприяє заварюванню осьових дефектів у процесі осадження. При збільшенні ступеня деформації при осадженні заготовок з увігнутими гранями підвищується рівень стискаючих напружень в осьовій зоні (див. рис. 5). Можна відзначити, що заготовка із глибиною увігнутих граней $d/D = 0,85$ і кути $\alpha = 120^\circ$ забезпечує високий рівень стискаючих напружень ($\Pi\sigma = -9,4$) при ступені деформації $\varepsilon = 50\%$. При цьому максимальні значення інтенсивності логарифмічних деформацій (e_i) виникають у заготовок з $d/D = 0,85$.

REFERENCES

1. Baoguang S. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots [Jelektronnyj resurs] / S. Baoguang, K. Xiuhong, L. Dianzhong // J. Materials Processing Technology. – 2010. – № 210. – P. 703–711. – Rezhim dostupa: URL: [doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010).
2. Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging [Jelektronnyj resurs] / E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch, D. C. Shah // J. Mech. Working Tech. – 1989. – № 19. – P. 195–210. – Rezhim dostupa: URL: [doi:10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0378-3804(89)90004-1).
3. Kitamura K. Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging [Jelektronnyj resurs] / K. Kitamura, M. Terano // CIRP Ann – Manuf Techn. – 2014. – 63(1). – P. 293–296. – Rezhim dostupa: URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>.

4. Mitani Y. Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic finite element method [Jelektronnyj resurs] / Y. Mitani, V. Mendoza, K. Osakada // *J. Mater. Process. Technol.* – 1991. – № 27. – P. 137–149. – Rezhim dostupa: URL: [doi:10.1016/0924-0136\(91\)90049-K](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90049-K).
5. Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D [Jelektronnyj resurs] / Z. J. Zhang, G. Z. Dai, S. N. Wu, L. X. Dong, L. L. Liu // *Materials Science and Engineering: A.* – 2009. – 499 (1–2). – P. 49–52. – Rezhim dostupa: URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.135>.
6. Vafaeesefat A. Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming [Jelektronnyj resurs] / A. Vafaeesefat // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2011. – 1. – P. 93–98. – Rezhim dostupa: <http://doi.org/10.1080/10426914.2010.498072>
7. Thermal-Elastic-Plastic Simulation of Internal Stress Field of Quenched Steel 40Cr Cylindrical Specimens by FEM [Jelektronnyj resurs] / L. Liu, B. Liao, Q. Li, Y. Wang, Q. Yang // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2011. – 5. – P. 732–739. – Rezhim dostupa: <http://doi.org/10.1080/10426910903367428>
8. Numerical and experimental investigations on the extension of friction and heat transfer models for an improved simulation of hot forging processes [Jelektronnyj resurs] / B. A. Behrens, M. Alasti, A. Bouguecha, T. Hadifi, J. Mielke, F. Schäfer // *International Journal of Material Forming.* – 2009. – Vol. 2. – P. 121–124. – Rezhim dostupa: URL: [DOI: 10.1007/s12289-009-0618-2](https://doi.org/10.1007/s12289-009-0618-2).
9. Just H. Blick in das Innere eines Freiformschmiede-prozesses / Hendrik Just // *Stahl und Eisen.* – 2006. – № 12. – P. 70–72.
10. The Influence of Block Shape on the Elimination of Axial Defects of Ingots when Forging Large Forged Pieces / I. S. Aliiev, L. N. Sokolov, O. E. Markov, A. N. Lagutina, V. M. Oleshko // *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej.* – Czestochowa, 2004. – № 39. – P. 375–382.
11. Zbankov I. G. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process [Jelektronnyj resurs] / I. G. Zbankov, O. E. Markov, A. V. Perig // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2014. – Vol. 72, Issue 5–8. – P. 865–872. – Rezhim dostupa: URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-014-5727-5>.
12. Markov, O. E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces [Jelektronnyj resurs] / O. E. Markov // *Steel in Translation.* – 2012. – 42 (12). – P. 808–810. – Rezhim dostupa: URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091212120054>.
13. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation [Jelektronnyj resurs] / O. E. Markov, A. V. Perig, M. A. Markova, V. N. Zlygoriev // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2016. – 83(9-12): 2159–2174. – Rezhim dostupa: URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.
14. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state [Jelektronnyj resurs] / O. E. Markov, A. V. Perig, V. N. Zlygoriev, M. A. Markova, A. G. Grin // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2017. 90: 801 – 818. – Rezhim dostupa: URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.
15. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state [Jelektronnyj resurs] / O. E. Markov, A. V. Perig, V. N. Zlygoriev, M. A. Markova, M. S. Kosilov // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* – 2017. 39(4):1-17. – Rezhim dostupa: URL: <https://doi.org/10.1007/S40430-017-0812-Y>.

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

Рагуліна Н. В. – мол. наук. співроб. ДДМА;

Шевцов С. О. – мол. наук. співроб. ДДМА;

Інчаков Є. В. – аспірант ДДМА;

Косілов М. С. – аспірант ДДМА.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

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

E-mail: zvn@nkmz.donetsk.ua; nadenkaragylina@gmail.com; sheser.ssa1@gmail.com;
mto@dgma.donetsk.ua; kosilovmaksims@gmail.com