

УДК 621.321

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-2(20)-46-52

Олег Марков, Антон Хващинський,  
Володимир Панов, Павло Різак, Роман Житніков

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ МАСИВНИХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

**Актуальність теми дослідження.** Технологічні процеси кування масивних поковок відповідального призначення потребують точного встановлення технологічних режимів процесу деформування. Це потрібно для забезпечення високої якості та оптимальних витрат при виготовленні виробів вагою від 20 до 200 тонн. Оптимальні технологічні режими кування можна встановити на основі даних напружено-деформованого стану заготовки при куванні.

**Постановка проблеми.** Кування великих поковок є дрібносерійним та одиничним видом дороговартісного виробництва з низькою ліквідністю, тому ці процеси потребують попереднього скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану та силових параметрів кування. Моделювання повинно дозволяти точно встановлювати напружено-деформований стан заготовки в процесі кування.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На основі аналізу публікацій за останні роки було встановлено, що основну увагу при моделюванні процесів кування великих поковок методом скінчених елементів приділяли формозміненню заготовки при використанні нових способів кування та деформуючого інструменту.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Невирішеними залишаються питання щодо ефективних кута та глибини граней чотирипроменевої заготовки, які дозволять інтенсифікувати заковування внутрішніх дефектів.

**Метою статті** є підвищення якості деталей відповідального призначення за рахунок заварювання внутрішніх дефектів на основі вдосконалення операції осадження чотирипроменевих злитків.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі досліджений спосіб осадження масивних злитків. На основі скінчено-елементного моделювання був встановлений розподіл інтенсивності деформацій у меридіональному перерізі після осадження чотирипроменевих заготовок. Теоретичне дослідження дозволило встановити розподіл деформацій в об'ємі поковки при осадженні чотирипроменевих заготовок. Скінчено-елементне дослідження дозволило встановити, що раціональна висота граней повинна становити 15 % від діаметра заготовки. При такій висоті граней відбувається максимальне заковування внутрішнього отвору.

**Висновки відповідно до статті.** Скінчено-елементне дослідження дозволило встановити, що раціональна висота граней повинна становити 15 % від діаметра заготовки. У результаті досліджень виконаних у роботі було встановлено, що осадження чотирипроменевих заготовок підвищує якість масивних деталей.

**Ключові слова:** кування; осадження; злиток; внутрішній дефект; масивна деталь; чотирипроменева заготовка; увігнуті грані; МСЕ; параметр напруженого стану; напруження стискання.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** Технологічні процеси кування масивних поковок відповідального призначення потребують точного встановлення технологічних режимів процесу деформування. Це потрібно для забезпечення високої якості та оптимальних витрат при виготовленні виробів вагою від 20 до 200 тонн. Оптимальні технологічні режими кування можна встановити на основі даних напружено-деформованого стану заготовки при куванні.

**Постановка проблеми.** Кування великих поковок є дрібносерійним та одиничним видом дороговартісного виробництва з низькою ліквідністю, тому ці процеси потребують попереднього скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану та силових параметрів кування. Моделювання повинно дозволяти точно встановлювати напружено-деформований стан заготовки в процесі кування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробка та проєктування технологічних процесів виготовлення масивних поковок спрямовані на пошук раціональних способів осадження для підвищення дрібнозернистості структури металу. У масивних злитках основна локалізація усадкових дефектів відбувається в осьовій зоні. Це викликано відповідним напружено-деформованим станом (НДС) при деформуванні. Застосування операцій осадження та протягування підвищує рівномірність механічних властивостей, але при цьому підвищується трудомісткість і енергоємність процесу кування.

Останніми роками кількість масивних поковок, виготовлених зі злитків, підвищується. Це пояснюється збільшенням потужності важких машин. Однак якість виготовлених поковок не завжди відповідає вимогам замовника. Низька якість масивних поковок пояснюється низькою якістю вихідних злитків [3; 4].

Потреба в масивних кованих деталях, що виготовляються з використанням операції осадження, останнім часом зросла, як показано в роботі [5]. Якість таких поковок визначається механічними властивостями та ступенем неоднорідності структури металу. Застосувані процеси кування масивних поковок не гарантують одержання високої якості.

У роботі [6] розглянуто спеціальні методи кування масивних виробів. Ці методи кування відрізняються типом використовуваних операцій, режимами деформування й геометрією бойків [7]. Механічні властивості деталей переважно залежать від використання операцій осадження й подальшого протягування. При розробці ефективних техпроцесів деформування основний інтерес становить вдосконалення операції осадження.

Зростання виробництва поковок високої якості вимагає розвитку і впровадження нових техпроцесів кування з низькими витратами, як відзначається в роботі [8]. Однак у роботі не досліджувалися нові способи осадження, що дозволяють знизити силу деформування. Деформування секційним інструментом або зміна перерізу заготовки дозволяє знизити силу осадження [9].

Основним дефектом поковок після осадження є несучільність в осьовій зоні, яка встановлюється ультразвуковим контролем [10]. На думку авторів, виникнення цього дефекту пояснюється несприятливим НДС при осадженні заготовок циліндричної форми за рахунок появи радіального плинину металу, що приводить до внутрішніх розривів металу заготовки. Оригінальна модель, що описує закриття дефектів, а також враховує орієнтацію дефектів і деформований стан заготовки розроблена авторами роботи [11]. Модель була розроблена й перевірена на основі значної кількості експериментів методом скінчених експериментів (МСЕ). Однак великогабаритні злитки мають внутрішні дефекти, подовженої форми тому ці дефекти краще моделювати осьовим отвором. Однак отримана модель не є універсальною для моделювання закриття осьової пористості.

Авторами роботи [12] запропонований спосіб і оснащення для осадження дисків із бобишкою. Осадження проводиться із застосуванням операції розгонки поля диска. Обмеженням цього способу осадження є те, що інструмент не перекриває все поле диску. Залишаються непродеформовані ділянки з утворенням затисків, що призводить до збільшення витрат металу при механічній обробці.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** На основі літературного огляду встановлено, що вдосконалення техпроцесів кування з використанням спеціального способу осадження заготовок являє собою важливе наукове та практичне значення, яке підтверджує актуальність роботи [13; 14]. Більше того, осадження не забезпечують високих і ізотропних механічних властивостей осьової зони деталі через неповне заковування внутрішніх дефектів злитка, що вимагає проведення подальших досліджень у цьому напрямі. Одним із напрямів удосконалення операції осадження є застосування профілювання заготовки перед осадженням. Встановлено, що увігнуті грані з кутом  $120^\circ$  не сприяють повному закриттю осьової пористості. Збільшення глибини граней при цьому куті знижує ступінь заварювання внутрішніх дефектів. Тому потрібно проводити подальші дослідження для визначення ефективних кута та глибини граней чотирипроменевої заготовки, які дозволять інтенсифікувати заковування внутрішніх дефектів.

**Метою статті** є підвищення якості деталей відповідального призначення за рахунок заварювання внутрішніх дефектів на основі вдосконалювання операції осадження чотирипроменевих злитків.

**Виклад основного матеріалу.** Моделювання процесу осадження профільованих на чотирипроменевий переріз заготовок проводилося методом скінчених елементів (МСЕ). За результатами моделювання встановлювалися розподіл НДС поковки й формозміна осьового дефекту після осадження. Після профілювання всі заготовки осаджувалися на 50 %. Рівняння зв'язку компонент напружень і швидкостей деформацій

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

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

$S_{ij}$  – компоненти девіатора напружень.

Крива течії матеріалу задана рівнянням  $\bar{\sigma} = \sigma(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)$ ,

де  $\bar{\varepsilon}$ ,  $\dot{\bar{\varepsilon}}$ ,  $T$  – інтенсивності деформацій і швидкостей деформацій;

$T$  – температура.

Заготовки для скінчено-елементного моделювання мали такі розміри (рис. 1): зовнішній діаметр заготовки  $D = 1,5$  м, висота заготовки  $H = 3,75$  м, діаметр отвору дефекту приймався 10 % від зовнішнього діаметра заготовки (0,15 м), кут граней заготовки становив  $150^\circ$ . Глибина увігнутих граней ( $h = d/D$ ) досліджувалася в діапазоні 15, 20 і 25 % від діаметра заготовки.

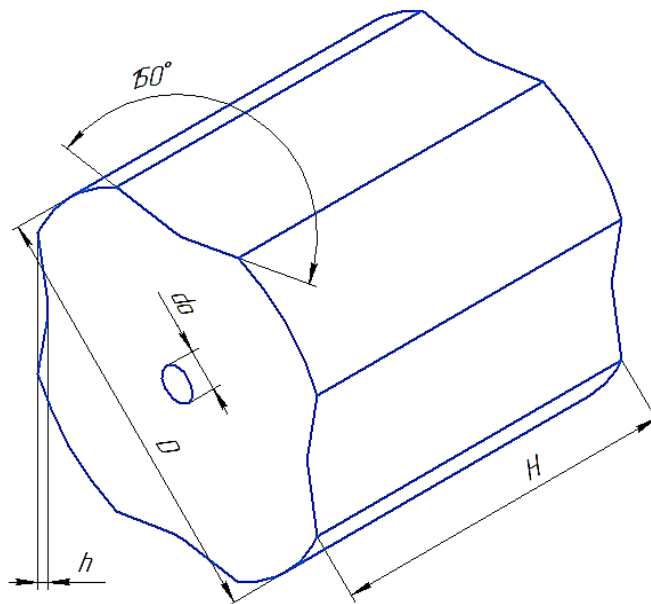


Рис. 1. 3D-модель профільованої заготовки на чотирипроменевий переріз

Матеріал – сталь 70X3ГНМФ, температура нагрівання заготовки  $1150^\circ\text{C}$ , температура інструмента –  $20^\circ\text{C}$ , коефіцієнт тертя 0,45, сітка містить 75 000 елементів, швидкість деформування 35 мм / с. Параметр 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 дефектів у процесі осадження чотирипроменевої заготовки чинить вплив глибина увігнутих граней. У дослідженні використовувалися увігнуті грані з кутом  $150^\circ$  і відносною їхньою глибиною  $d/D$ , яка становила 25; 20 і 15 %. Ступінь заковування отвору після осадження профільованих чотирипроменевих 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 більше для зразків із відносною глибиною граней 15 %. Заготовки, профільовані на глибину 25 %, показали гірші результати щодо закриття осьового дефекту.

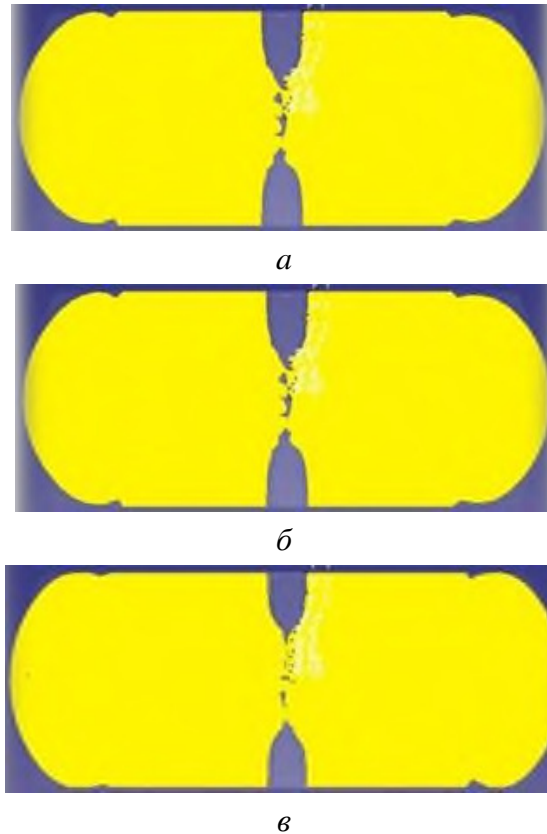


Рис. 2. Заковування отвору після осадження профільованих чотирипроменевих заготовок на 50 %:  
 а –  $d/D=25\%$ ; б –  $d/D=20\%$ ; в –  $d/D=15\%$

Залежність механізму заковування отвору в процесі осадження чотирипроменевих моделей з різною відносною висотою граней показано на рисунку 3. Аналіз отриманих результатів дозволив установити, що відносна глибина граней більше 15 % не приводить до збільшення ступеня заковування дефекту.

Після осадження чотирипроменевих заготовок з  $d/D=15\%$  на 50 % відбувається заковування діаметра дефекту на 50 % (рис. 3).

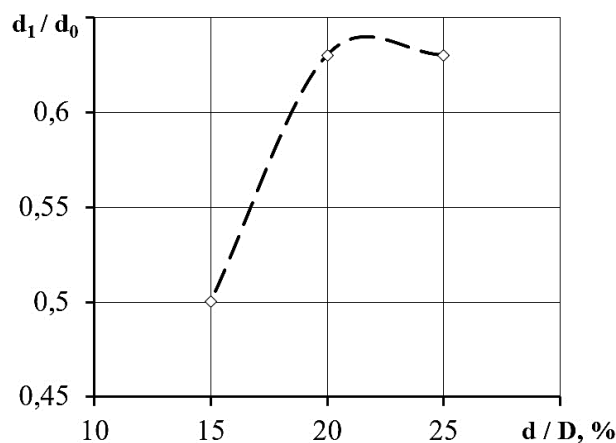


Рис. 3. Залежність відносного діаметра отвору в процесі осадження чотирипроменевих моделей із різною відносною глибиною граней

Розподіл логарифмічних деформацій у меридіональному перерізі поковки після деформації на 50 % представлено на рис. 4. Деформації з максимальною величиною розташовуються в центральній частині поковки, а з мінімальною – на плоских торцях поковки. Розподіл деформацій для різних параметрів заготовок із чотирипромінним перерізом має

схожі результати. Але при осадженні чотирипроменевих заготовок із глибиною граней  $d/D = 15\%$  площа деформацій із максимальною величиною більше на 35...45% у порівнянні з іншими параметрами заготовок (рис. 4).

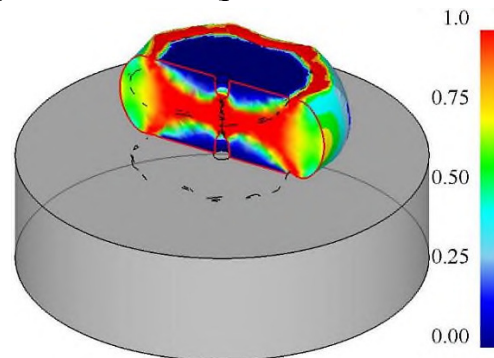


Рис. 4. Розподіл логарифмічних деформацій у процесі осадження чотирипроменевих заготовок ( $d/D = 0,15$ )

**Висновки відповідно до статті.** Установлений вплив кута граней чотирипроменевих заготовок  $150^\circ$  на розподіл деформацій, напружень і заварювання внутрішніх дефектів після осадження. Заковування отвору починає відбуватися при деформації 10%. Максимальне заковування отвору відбувається після осадження на 65% при відносній глибині граней 15...20% від діаметра заготовки. Увігнуті грані глибиною 15% від діаметра заготовки після осадження на 55% приводять до виникнення в тілі заготовки стискаючих напружень. Розроблений новий науково обґрунтований спосіб осадження чотирипроменевих заготовок, який підвищує якість масивних поковок. На основі проведених комплексних теоретичних досліджень розроблені рекомендації для проєктування техпроцесів кування за новими схемами деформування.

#### Список використаних джерел

1. 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. P. 3057–3065. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4>.
2. Smyrnov Y. N., Skliar V. A., Belevitin V. A., Shmyglya R. A., Smyrnov O. Y. Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46(5). P. 325-328. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091216050132>.
3. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton  $30Cr_2Ni_4MoV$  forging ingot. *Mater. Design*. 2012. Vol. 35. P. 446-456. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>.
4. 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. Vol. 209(4). P. 1950-1959. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>.
5. Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008. Vol. 29 (2). P. 139–142.
6. Baiqing Z., Haixing L., Yifei T., Dongbo L., Yong X. Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Article ID 531756. 9 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.
7. Ameli A., Movahhedy M. R. A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process. *Int J Adv Manuf Tech*. 2007. Vol. 33(1–2). P. 7–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2>.
8. Hippenstiel F., Johann K.-P. Recent developments in gear steels for use in power generation plants. *Forgemasters Meeting*, Santander, Spain. 2008. 3–7 Nov.
9. Markov O. E., Oleshko M. V., Mishina V. I. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. *Metalurgical and Mining Industry*. 2011. Vol. 3(7). P. 87–90. DOI: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>.

10. Markov O. E., Perig A. V., Markova M. A., Zlygoriev V. N. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *Int J Adv Manuf Technol.* 2016. Vol. 83(9-12). P. 2159–2174. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.

11. Saby M., Bouchard P.-O., Bernacki M. A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming. *Finite Elements in Analysis and Design.* 2015. Vol. 105. P. 63–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.07.003>.

12. Markov O. E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation.* 2012. Vol. 42 (12). P. 808–810. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.

13. Kakimoto H., Arikawa T., Takahashi Y., Tanaka T., Imaida Y. Development of forging process design to close internal voids. *J Mater Process Tech.* 2010. Vol. 210(3). P. 415–422. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>.

14. Kun C., Yitao Y., Guangjie S., Kejia L. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot. *Computational Materials Science.* 2012. Vol. 51(1). P. 72–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>.

### References

1. 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, 3057–3065. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4>.

2. Smyrnov, Y. N., Skliar, V. A., Belevitin, V. A., Shmyglya, R. A., & Smyrnov, O. Y. (2016). Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet. *Steel in Translation*, 46(5), 325–328. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091216050132>.

3. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>.

4. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>.

5. 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.

6. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.

7. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2>.

8. 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).

9. 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. DOI: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>.

10. Markov, O. E., Perig, A. V., Markova, M. A., Zlygoriev, V. N. (2016). Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *Int J Adv Manuf Technol.*, 83(9-12), 2159–2174. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.

11. Saby, M., Bouchard, P.-O., Bernacki, M. (2015). A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming. *Finite Elements in Analysis and Design*, 105, P. 63–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.07.003>.

12. Markov, O.E. (2012). Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation*, 42 (12), 808–810. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.

13. Kakimoto, H., Arikawa, T., Takahashi, Y., Tanaka, T., Imaida, Y. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *J Mater Process Tech.*, 210(3), 415–422. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>.

14. Kun, C., Yitao, Y., Guangjie, S., Kejia, L. (2012). Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot. *Computational Materials Science*, 51(1), 72–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>.

UDC 621.321

Oleg Markov, Anton Khvashchynskiy, Volodymyr Panov, Pavel Rizak, Roman Zhytnikov  
**IMPROVEMENT OF THE DRAUGHT PROCESS OF MASSIVE WORKPIECES  
FOR THE PRODUCTION OF PARTS FOR ENERGY ENGINEERING**

**Urgency of the research.** Technological processes of forging large-sized workpieces with responsible destination require precise determination of technological modes of the deformation process. It is necessary to ensure high quality and optimal cost in the manufacture of products weighing from 20 to 200 tons. The optimal technological forging regimes can be established on the basis of the data of the stress-strain state of the workpiece during forging.

**Target setting.** The forging of large forgings is a small-scale and single type of expensive production with low liquidity; therefore, these processes require preliminary finite-element modeling of the stress-strain state and power parameters of forging. Modeling should allow to accurately establish the stress-strain state of the workpiece in the forging process.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Based on the analysis of publications in recent years, it was found that the main attention in modeling the processes of forging large forgings using the finite element method was given to changing the shape of the workpiece when using new methods of forging and deforming tools.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Unresolved issues remain the effective angle and depth of the faces of the four-beam blanks, which will intensify the forging of internal defects.

**The research objective** is to improve the quality of responsible parts by welding of the internal defects on the basis of improving the operation of the upsetting of four-beam ingots.

**The statement of basic materials.** The method of draught of large ingots has been investigated in this work. Strains effective and mean stresses in the longitudinal cross-section of the workpiece with concave faces after draught have been determined by finite element modeling. The theoretical investigations allowed to determine a distribution of stresses and strains parameters into body of the four-beam workpieces after draught. Finite element modeling allowed to found a rational depth of the concave faces should be which has to be 15 % from workpiece diameter. Maximum closing of the internal defect take place for this depth of the concave faces.

**Conclusions.** Finite element modeling allowed to found a rational depth of the concave faces should be which has to be 15 % from workpiece diameter. It has been established that draught of the four-beam workpieces improved a quality of the massive parts.

**Keywords:** forging; upsetting; ingot; internal defect; massive part; four-beam workpiece; concave faces; FEM; compressive stresses.

Fig.: 4. References: 14.

**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 of 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

**Хващинський 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** – PhD student 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>

**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** – PhD student 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>

**Різак Павло Іванович** – молодший науковий співробітник, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна)

**Rizak Pavlo** – Junior Researcher, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

**E-mail:** pariz-1@mail.ru

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2574-2521>

**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** – PhD student 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>