

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-7-15

УДК 621.923.42

**Олег Марков¹, Антон Хващинський², Антон Мусорін³,
Марина Маркова⁴, Роман Житніков⁵**

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). Scopus Author ID: [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

²аспірант кафедри обробки металів тиском

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2690-8354>

Scopus Author ID: [57211480253](http://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

³аспірант кафедри обробки металів тиском

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: anton.m.95@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0571-8700>

⁴кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: markova.mar.alex@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7995-3511>

Scopus Author ID: [57023421000](https://orcid.org/0000-0002-7995-3511)

⁵аспірант кафедри обробки металів тиском

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: romajitnikov2015@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0540-8465>

РОЗРОБКА НОВОГО СПОСОБУ ДЕФОРМУВАННЯ ЗЛИТКІВ НА ОСНОВІ КУВАННЯ ПРОФІЛЬОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Останніми роками кількість масивних поковок, виготовлених зі злитків, збільшується. Однак якість таких поковок не завжди відповідає вимогам замовника. Низька якість масивних поковок пояснюється низькою якістю вихідних зливків. Збільшення діаметра конусного уступу (d/D) призводить до зниження ступеня закриття дефекту. Високі конусні уступи збільшують рівень закриття дефектів. Було встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти конусних уступів призводить до зниження опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. На першому етапі осадження формується подвійна бочка. Випуклість збільшується в разі зниження діаметра конусних торців. При подальшому осадженні подвійна бочка вирівнюється і бічна поверхня на останній стадії осадки набуває форми, близької до циліндричної. Відносні висота та діаметр конусних торців повинні становити 0,4...0,6 та 0,5...0,7 відповідно з погляду закриття осьових дефектів та рівномірного розподілу деформацій при осадженні. Отримані результати осадження у промислових умовах підтвердили встановлені технологічні рекомендації щодо форми та розмірів заготовок, які були отримані теоретичним моделюванням.

Ключові слова: поковка; осадження; внутрішні дефекти; конусні торці; заварювання пустот; гідростатичні напруження.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Осьові дефекти зливка усуваються закриттям пороженч від дії стискаючих напружень при гарячому деформуванні. Для цього необхідно забезпечити у процесі кування відповідний напружений стан. Оцінити ступінь подрібнення структури можна за величиною і градієнтом розподілу деформацій у тілі поковки. Напружений та деформований стан (НДС) у тілі заготовки можна змінювати за допомогою форми заготовки та деформуючого інструменту, а також технологічними режимами деформування [1]. Відома велика кількість способів кування, спрямованих на підвищення якості крупних поковок відповідального призначення. Ці способи засновані на застосуванні нових операцій кування (осадження, протяжка та ін.) та спеціального деформуючого інструменту. Основний інтерес представляє операція осадження великих зливків. Ця операція є основною, що підвищує якість поковки [2]. Зазвичай у виробництві застосовують осадження циліндричних заготовок. Цей спосіб характеризується несприятливими НДС

для закриття внутрішніх дефектів та нерівномірним розподілом деформацій. Аналіз літератури показав, що способи осадження великих заготовок відомо дуже багато. Перед використанням нового способу осадження треба проаналізувати дослідження, у яких розглянуто вплив різних способів осадження на закриття внутрішніх дефектів.

Постановка проблеми. У процесі виробництва крупних поковок відповідального призначення важливо гарантувати високу якість поковок. Якість крупних поковок визначається відсутністю внутрішніх дефектів. Ці вимоги викликані тим, що заготовкою є великий ковальський зливочок [3]. Великі зливки мають металургійні дефекти (осьові пустоти, усадкова раковина та ін.). Ці дефекти пояснюють занижку якість злиwkів. Ковальські зливки мають неоднорідну внутрішню будову, викликану умовами затвердіння рідкої сталі. Відсутність осьових пустот повинно бути гарантовано куванням нагрітих заготовок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При використанні МСЕ моделювався процес закриття внутрішніх порожнин у процесі деформування заготовок циліндричної форми [4]. За результатами моделювання було встановлено, що повне закриття внутрішніх дефектів в осьовій зоні зливка відбувається лише у процесі осадження низьких циліндричних заготовок. Крім того, порожнечі заварюються інтенсивніше в центральній частині зливка. Останнім часом розвиток МСЕ досягає високого рівня та дозволяє досліджувати зміни та формування внутрішньої структури [5].

У дослідженнях [6] представлений метод осадження з обертанням верхнього інструменту, що деформує. Цей метод сприяє зменшенню викривлення форми заготовки після осадження. У роботі [7] досліджено спосіб осадження з обертанням. Процес полягає в лінійному переміщенні інструменту з обертанням осадочних плит у процесі осадження. На думку авторів, цей спосіб приводить до зменшення сили деформування та зменшення неоднорідності деформацій. Це призводить до зменшення випуклості бічної поверхні у процесі осадження.

Автори роботи [8] запропонували оригінальну модель для закриття порожнин, яка враховує їхню геометрію та орієнтацію, а також деформований стан заготовки. Модель була розроблена та перевірена великою кількістю експериментів МСЕ. Однак великі зливки мають внутрішні дефекти, такі як осьова пористість, яка краще моделюється осьовим отвором. Таким чином, отримана в роботі модель не є адекватною для моделювання процесів кування.

У роботі [9] МСЕ вивчили закриття осьових дефектів при осадженні заготовок плоскими плитами різної форми. На основі чисельного аналізу автори встановили, що ступінь деформації надає більшого впливу на закриття порожнин, ніж гідростатичний тиск. Однак отримані результати суперечать відомим даним дослідників [10], які стверджують, що ступінь закриття осьових дефектів залежить від НДС у поковках.

Вплив гідростатичного тиску як параметра для оцінки опрацювання структури розглянуто у роботі [11]. У роботі показано, що ефективною оцінкою закриття осьових дефектів є рівень стискаючих напружень в осьовій зоні. Однак автори не розглядали напружений стан у процесі деформування профільованої заготовки.

У статті [12] автори вивчали механізми закриття внутрішніх дефектів, що мають сферичну форму. Автори досліджували вплив розмірів порожнин на їхнє закриття. Було встановлено, що НДС навколо внутрішніх дефектів є основним фактором, що впливає на закриття порожнечі. Запропоновано модель для прогнозування змін закриття порожнин у великих заготовках у процесі кування. Ця модель була отримана за результатами МСЕ. Основним недоліком цього дослідження є використання дефектів сферичної форми, а осьові дефекти злитків мають подовжену форму. Операцію осадження можна використовувати з додатковими операціями для збільшення укова, але ця операція не сприяє закриттю внутрішніх порожнин, як це було встановлено [13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перспективним напрямом підвищення ступеня закриття внутрішніх дефектів є профілювання торців циліндричної заготовки перед операцією осадження [14]. Це профілювання дозволить змінити НДС металу заготовки для підвищення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні поковки.

Метою статті є визначення ефективної геометрії заготовок із конусними торцями, що забезпечує закриття осьових дефектів у процесі осадження.

Виклад основного матеріалу. Для визначення розмірів осьового дефекту в процесі осадження заготовки з конусними торцями на межі дефекту було розставлено 13 точок від торця заготовки до лінії горизонтальної симетрії. Координати цих точок після моделювання осадження є вихідними значеннями подальших розрахунків середнього об'єму дефекту. Середній діаметр дефекту визначався через середню площу його поперечного перерізу (об'єм дефекту віднесений до його висоти).

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot V_d}{\pi(H_0 - v_t \cdot t)'}}$$

де t – час руху деформуючого інструменту, с.;

v_t – швидкість руху інструменту, прийнята 40 мм / с.;

H_0 – початкова висота заготовки, мм;

k – коефіцієнт, що враховує розрахунок половини висоти, $k = 2$.

Ескізи заготовок для осадження наведено на рис. 1.

Закриття осьових дефектів. Зміна розмірів та форми осьового дефекту в процесі осадження заготовок із різними відносними діаметрами та висотами конусних уступів представлені на рис. 2. Ці результати дозволяють встановити ступінь закриття осьового дефекту.

З аналізу отриманих результатів осадження заготовок з конусними уступами було зроблено висновок, що повного закриття дефекту заготовки немає. Загальною ознакою досліджуваних схем осадження є інтенсивніше закриття дефектів у зоні між уступом і центральними частинами заготовки. Проте ступінь закриття дефекту всім схем різна. Мінімальне закриття дефекту відбувається при осадженні заготовок з формою близькою до циліндричної ($d/D = 0,9$). Це пояснюється осадкою майже циліндричної заготовки. В цьому випадку відсутній підпор з боку бічної поверхні заготовки. У результаті відбувається радіальний плин металу зі збільшенням діаметра заготовки та діаметра дефекту.

Закриття дефекту відбувається інтенсивніше при осадженні заготовок із конусними уступами при відносних діаметрах $d/D = 0,5 \dots 0,7$. Відносна висота конусних уступів (h/D) значно впливає на ступінь закриття дефекту. Проте зміна форми осьового дефекту відбувається рівномірно по висоті. Дефект після осадження має складну форму. Тож у дослідженні визначався середній діаметр дефекту. Цей діаметр було віднесено до вихідного діаметра. Аналіз результатів осадження заготовок дозволив встановити, що інтенсивніше закриття дефекту відбувається для високих конусних уступів ($h/D = 0,6$). Особливо за відносного діаметра уступу $d/D = 0,7$ (рис. 2). За таких умов дефект закривається приблизно на 35 % ($\frac{d_k}{d_0} = 0,65$). Найменші висоти конусних уступів призводять до зниження закриття дефекту.

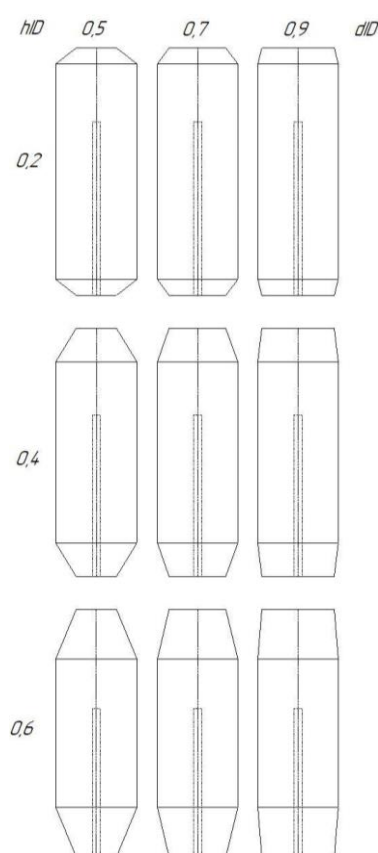


Рис. 1. Ескізи заготовок для осадження

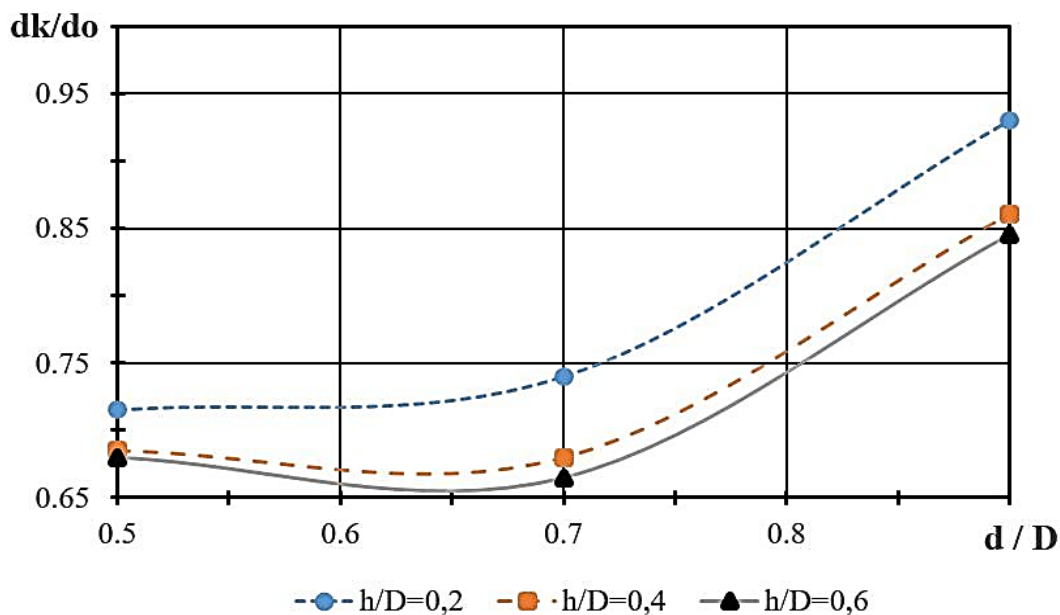


Рис. 2. Зміна відносного діаметра дефекту після осадження на 50 % залежно від відносного діаметра (d/D) та відносної висоти (h/D) конусного уступу

Визначення випуклості поковки після осадження. Перевагою осадження заготовок з конусними уступами є зменшення випуклості бічної поверхні за рахунок формування увігнутої бічної поверхні. Випуклість бічної поверхні є важливим параметром під час виготовлення деталей дисків (шестірні, колеса та ін.). Це пов'язано з тим, що остаточною операцією їх виготовлення є операція осадження. Випуклість бічної поверхні збільшує об'єм металу заготовки. Цей метал втрачається при механічній обробці. Досліджуваний процес осадження може знизити випуклість та витрати металу. Величину випуклості можна оцінити параметром

$$Q = \frac{V_{\text{заг}} - V_{\text{цил}}}{V_{\text{заг}}} \cdot 100\%,$$

де $V_{\text{заг}}$ – об'єм заготовки до осадження, м³;

$V_{\text{цил}}$ – об'єм циліндричної частини поковки після осадження, м³.

Запропонована формула дозволяє врахувати реальний об'єм заготовки для різних розмірів конічних уступів. На основі цієї формули була розрахована випуклість для досліджуваних схем деформування. Розрахований графік зміни випуклості після осадження на 50 % залежно від відносного діаметра (d/D) та відносної висоти (h/D) конусних уступів (рис. 3). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що в межах 0,5...0,7 відносних діаметрів уступів випуклість мінімальна й не змінюється. Отримані результати корелюють із даними закриття осьових дефектів (рис. 2). Ці дані додатково пояснюють, що закриття осьових дефектів пов'язане з течією металу в радіальному напрямку. Збільшення потоку металу в радіальному напрямку знижуватиме закриття осьових дефектів.

Мінімальна випуклість відповідає конусним уступам із відносною висотою $h/D = 0,4$. Це пояснюється локалізацією деформацій близько до уступів з утворенням подвійної бочки з глибокою увігнутістю. Діаметр та довжина конусних уступів заготовки впливають на формозміну при осадженні. Було встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти конусних уступів призводить до зниження випуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. У першому етапі осадження формується подвійна бо-

чка. Випуклість збільшується в разі зниження діаметра конусних уступів. При подальшому осадженні подвійна бочка вирівнюється і бічна поверхня на останній стадії осадки набуває форми близької до циліндричної.

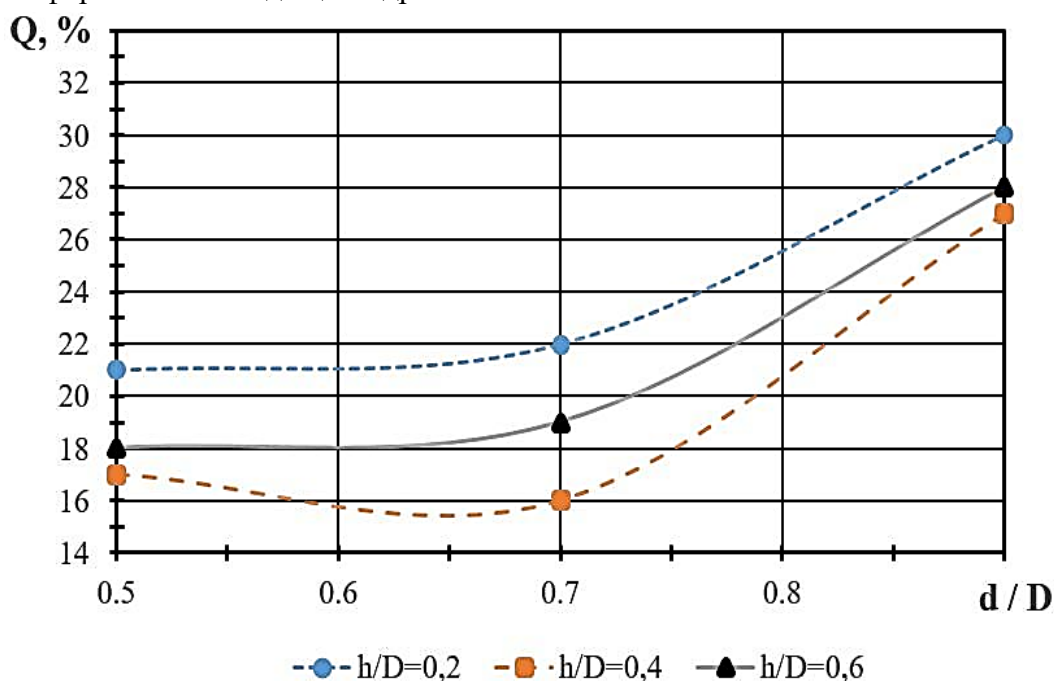
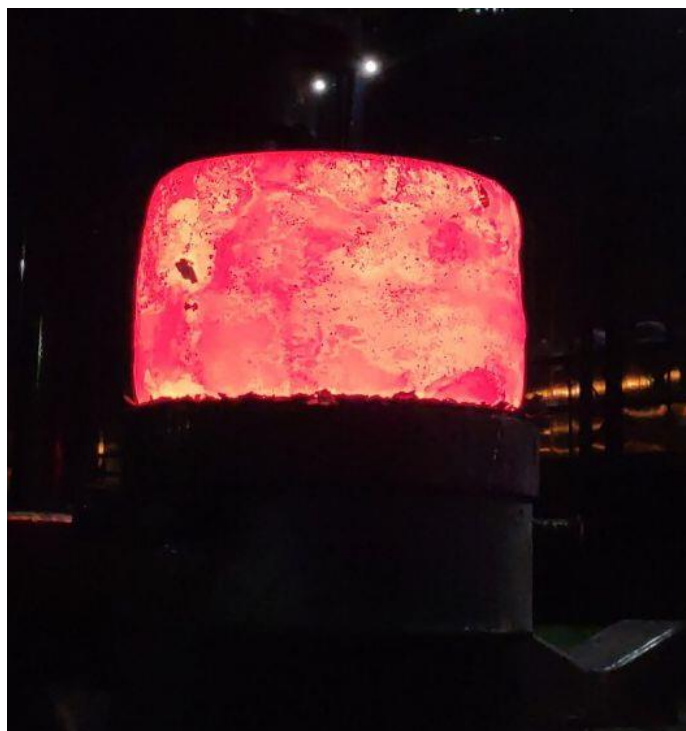


Рис. 3. Опуклість після осадження на 50 % залежно від відносних діаметрів (d/D) та висот (h/D) конусних уступів

Експериментальне дослідження осадження заготовки з кінцевими уступами. Отримані результати моделювання МСЕ треба перевірити експериментальним дослідженням. Для отримання точніших результатів дослідження процесу кування великих зливок необхідно проводити у промислових умовах. Експеримент на реальних поковках дозволить отримати точніший результат, ніж експеримент на зменшених моделях. У цьому випадку будуть враховані всі фактори, що впливають на процес кування (тепловий стан, коефіцієнт тертя тощо).

На зменшених моделях складно забезпечити реальне температурне поле заготовки у процесі гарячого деформування великих заготовок. Експеримент проводився на злитку масою 66500 кг зі сталі 50X5Mo. Злиток після нагрівання до температури 1180 °C профілювався для отримання конусних уступів (рис. 4, а). На відміну від МСЕ моделювання, заготовка мала циліндричну цапфу з боку правого уступу (рис. 4, а). Ця цапфа необхідна для утримання заготовки в процесі кування після осадження. Відносний діаметр і висота конусних уступів становили $d/D = 0,6$ та $h/D = 0,6$ відповідно. Ці геометричні параметри були встановлені як оптимальні за результатами теоретичного дослідження з погляду закриття осьових дефектів та рівномірного розподілу деформацій при осадженні. Після профілювання та підігріву зливка осадження проводили плоскими плитами (рис. 4, б).

Аналіз отриманих результатів дозволив підтвердити, що після осадження заготовка має мінімальну випуклість (рис. 4, б). Це підтверджує зміну НДС у процесі осадження заготовки з конусними уступами. Після кування був проведений ультразвуковий контроль (УЗК), який показав, що у процесі кування сталося зменшення розмірів внутрішніх дефектів. Додатково було встановлено, що відсутність випуклої бічної поверхні («бочки») у процесі осадження унеможливило утворення тріщин (рис. 4, б). Осадження таких злитків без конусних уступів із такої ж сталі завжди призводило до утворення тріщин.

*a**б*

*Рис. 4. Формування конусних уступів на злитку (а)
та наступне осадження отриманої заготовки плоскими плитами (б)*

За результатами експериментальних досліджень у промислових умовах випуклість зменшилась на 10...15 % у порівнянні з відомим способом осадження. При цьому зменшилась кількість та розміри внутрішніх дефектів на 20...25 % за результатами УЗК.

Висновки. Збільшення діаметра конусного уступу (d/D) призводить до зниження ступеня закриття дефекту. Високі конусні уступи збільшують рівень закриття дефектів. Було встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти конусних уступів призводить до зниження випуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. У першому етапі осадження формується подвійна бочка. Випуклість збільшується в разі зниження діаметра конусних уступів. При подальшому осадженні подвійна бочка

вирівнюється і бічна поверхня на останній стадії осадки набуває форми, близької до циліндричної. Відносні діаметр та висота конусних торців повинна становити $d/D = 0,5 \dots 0,7$ та $h/D = 0,4 \dots 0,6$ відповідно з погляду закриття осьових дефектів та рівномірного розподілу деформацій при осадженні. Отримані результати кування у промислових умовах підтвердили встановлені рекомендації щодо геометрії заготовок МСЕ. За результатами експериментальних досліджень у промислових умовах випуклість зменшилась на 10...15 % у порівнянні з відомим способом осадження. При цьому зменшилась кількість та розміри внутрішніх дефектів на 20...25 % за результатами УЗК.

Список використаних джерел

1. Computerized simulation of shortened ingots with a controlled crystallization for manufacturing of high-quality forgings / Markov O. E., Gerasimenko O. V., Shapoval A. A., Abdulov O. R., Zhytnikov R. U. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103. – Pp. 3057–3065. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4>.
2. Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet / Smyrnov Y. N., Skliar V. A., Belevitin V. A., Shmyglya R. A., Smyrnov O. Y. // *Steel in Translation*. – 2016. – Vol. 46(5). – Pp. 325-328. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091216050132>.
3. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr₂Ni₄MoV forging ingot / Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. // *Mater. Design*. – 2012. – Vol. 35. – Pp. 446-456. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>.
4. Zhang X-X. A criterion for void closure in large ingots during hot forging / Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. // *J Mater Process Tech*. – 2009. – Vol. 209(4). Pp. 1950-1959. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>.
5. Dobrzański L. A. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels / Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2008. – Vol. 29 (2). – Pp. 139–142.
6. Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging / Baiqing Z., Haixing L., Yifei T., Dongbo L., Yong X. // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Article ID 531756. – 9 p. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.
7. Ameli A. A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process / Ameli A., Movahhedy M.R. // *Int J Adv Manuf Tech*. – 2007. – Vol. 33(1–2). – Pp. 7–17. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2>.
8. Hippenstiel F. Recent developments in gear steels for use in power generation plants / Hippenstiel, F., Johann, K.-P. // *Forgemasters Meeting, Santander*. – Spain, 3–7 Nov. 2008.
9. Markov O.E. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting [Electronic resource] / Markov O.E., Oleshko M.V., Mishina V.I. // *Metalurgical and Mining Industry* – 2011. – Vol. 3(7)ю – Pp. 7–90. – Accessed mode: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>.
10. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / Markov O.E., Perig A.V., Markova M.A., Zlygoriev V.N. // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2016. – Vol. 83(9-12). – Pp. 2159–2174. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.
11. Saby M. A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming / Saby M., Bouchard P.-O., Bernacki M. // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2015. – Vol. 105. – Pp. 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 / Markov O.E. // *Steel in Translation*. – 2012. – Vol. 42(12). – Pp. 808–810. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.
13. Development of forging process design to close internal voids / Kakimoto H., Arikawa T., Takahashi Y., Tanaka T., Imaida Y. // *J Mater Process Tech*. – 2010. – Vol. 210(3). – Pp. 415-422. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>.
14. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot / Kun C., Yitao Y., Guangjie S., Kejia L. // *Computational Materials Science*. – 2012. – Vol. 51(1). Pp. 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. <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 30Cr₂Ni₄MoV forging ingot. *Mater. Design*, 35, 446–456. <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. <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. <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. <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. <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. <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. <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. <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. <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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>.

Отримано 21.05.2022

**Oleg Markov¹, Anton Khvashchynskiy², Anton Musorin³,
Marina Markova⁴, Roman Zhytnikov⁵**

¹Doctor of Technical Science, Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>
ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

²postgraduate of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2690-8354>
Scopus Author ID: [57211480253](http://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

³postgraduate of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: anton.m.95@mail.ru. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0571-8700>

⁴PhD of Technical Science, docent of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: markova.mar.alex@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7995-3511>
Scopus Author ID: [57023421000](https://orcid.org/0000-0002-7995-3511)

⁵postgraduate of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: romajitnikov2015@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0540-8465>

DEVELOPMENT NEW METHOD OF DEFORMATION INGOTS BASED ON FORGING OF PROFILED WORKPIECES

Quantity of massive parts produced from an ingot is increasing today. It is caused by increasing of a massive equipment powerful. However, the quality of produced forging parts does not corresponds to customer's requirements. Poor quality of the produced forging parts is caused by low quality of forging ingots.

Defects of ultrasonic test after forging of the massive forging parts equal to 10 %. The defects after ultrasonic test are caused by upsetting operation of the ingots with no equal internal structure. As a result, internal structure is processed unevenly and insufficiently. Increasing of the ingot internal defects occurs during upsetting operation of billets by flat deformation tools.

The purpose of this work is establishing the rational geometry of billets with conical faces which guarantee the welding of the axial defects during upsetting operation.

Rising diameter of conical face provide decreasing of defect welding degree. The toll conical faces rise the degree of the welding defects. It was established that decreasing of the diameter and rising of the height the conical faces provide to reduction of convexity of the workpiece. In the initial step of the upsetting operation the "double convexity" is occurred. The convexity is growing at the diameter decrease of the conical faces. The "double convexity" levels out and the external surface of the workpiece obtains the nearly cylindrical shape in the finish upsetting. The relative height and diameter of the conical faces have to be 0.4...0.6 and 0.5...0.7 respectively concerning the welding defects and equable distribution of the deformations at the upsetting. Obtained data of the upsetting in the manufactured conditions verified the established technological recommendations of the workpiece shape and dimensions obtained by theoretical modeling.

Keywords: forged part; upsetting; internal defects; conical faces; cavity welding; hydrostatic stresses.

Fig.: 4. References: 14.