

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НОВОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ ПОКОВОК  
ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ****О. С. Марков, А. С. Хващинський, Р. Ю. Житніков, А. В. Мусорін, Є. А. Рагузін**Донбаська державна машинобудівна академія  
вул. Академічна, 72, г. Краматорськ, 84313, Україна.

E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com; mto@dgma.donetsk.ua

Досліджено спосіб осадження масивних злитків. Запропонований спосіб полягає в осадженні профільованих злитків. Розроблено методику проведення досліджень методом скінчених елементів. Методика дозволила встановлювати закономірності заковування внутрішніх дефектів злитка. Кут граней чотирипроменевих заготовок становив  $150^\circ$ . Відносна глибина увігнутих граней варіювалася в межах 15%...25% від діаметра заготовки. На основі скінчено-елементного моделювання були встановлені середні напруження в меридіональному перерізі після осадження чотирипроменевих заготовок. Величина стискаючих напружень визначалась на базі параметра жорсткості схеми напруженого стану. Теоретичне дослідження дозволило встановити розподіл параметрів напружень в об'ємі поковки при осадженні чотирипроменевих заготовок. Скінчено-елементне дослідження дозволило встановити, що раціональна глибина увігнутих граней повинна становити 15% від діаметра заготовки. При такій глибині граней відбувається максимальне заковування внутрішнього отвору. Отримані результати пояснюються параметром схеми напруженого стану, який показує наявність стискаючих напружень внаслідок підпору увігнутих граней. Результати скінчено-елементного моделювання перевірялися експериментальними дослідженнями. Крім цього проводилася апробація отриманих результатів на натурних сталевих поковках. 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 що стискають.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО ПРОЦЕССА КОВКИ ПОКОВОК  
ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ****О. Е. Марков, А. С. Хващинский, Р. Ю. Житников, А. В. Мусорин, Е. А. Рагузин**Донбасская государственная машиностроительная академия  
ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84313, Украина.

E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com; mto@dgma.donetsk.ua

Исследован способ осадки массивных слитков. Предложенный способ заключается в осадке профилированных слитков. Разработана методика проведения исследований методом конечных элементов. Методика позволила устанавливать закономерности заковки внутренних дефектов слитка. Угол граней четырехлучевых заготовок составил  $150^\circ$ . Относительная глубина вогнутых граней варьировалась в пределах 15% ... 25% от диаметра заготовки. На основе конечно-элементного моделирования были установлены средние напряжения в меридиональном сечении после осадки четырехлучевых заготовок. Величина сжимающих напряжений определялась на базе параметра жесткости схемы напряженного состояния. Теоретическое исследование позволило установить распределение параметров напряжений в объеме поковки при осадке четырехлучевых заготовок. Конечно-элементное исследование позволило установить, что рациональная глубина вогнутых граней должна составлять 15% от диаметра заготовки. При такой глубине граней происходит максимальная заковка внутреннего отверстия. Полученные результаты объясняются параметром схемы напряженного состояния, который показывает наличие сжимающих напряжений вследствие подпора вогнутых граней. Результаты конечно-элементного моделирования проверялись экспериментальными исследованиями. Кроме этого проводилась апробация полученных результатов на натурных стальных поковках. В результате исследований, выполненных в работе, было установлено, что осадка четырехлучевых заготовок повышает качество массивных деталей.

**Ключевые слова:** ковка, осадка, слиток, внутренний дефект, массивная деталь, четырехлучевая заготовка, вогнутые грани, МКЭ, параметр напряженного состояния, сжимающие напряжения.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Конкурування на міжнародних ринках виробництва деталей енергетичного машинобудування вимагає поліпшення якості й зниження собівартості виробленої продукції. Великогабаритні деталі у важкому машинобудуванні виготовляються куванням злитків. Метал злитка має низькі механічні властивості, які є наслідком дендритної структури й дефектами усадочного походження [1]. Усунення дендритної структури й заварювання внутрішніх дефектів дозволить підвищити якість масивних поковок. У цьому випадку необхідно виготовляти поковки з високим уковом. Операція ковальського осадження заготовки в технологічному циклі кування використовується для

підвищення укову. Однак вплив операції осадження на заварювання внутрішніх дефектів за літературним даними неоднозначний й зустрічається суперечлива інформація із цього питання. Актуальним напрямком досліджень є вдосконалення операції осадження, здійснюване за рахунок зміни форми заготовок, що осаджуються. Осадження заготовок спеціальної форми дозволить змінити деформований і напружений стан, що підвищить здрібнювання литої структури й заварювання внутрішніх дефектів [2].

МСЕ було вивчено заковування внутрішніх дефектів при осадженні заготовок плоскими плитами з різною геометрією [3]. На основі скінчено-елементного аналізу автори встановили, що ступінь

деформації має вагомий вплив на закриття дефектів, ніж гідростатичний тиск. Отримані результати суперечать відомим даним інших дослідників [4], які стверджують, що ступінь заковування осьової пористості залежить від НДС у поковках.

Підвищити пророблення структури поковок при осадженні можна, використовуючи спосіб, який передбачає білетування й осадження заготовки. При білетуванні торцям заготовки надають форму конуса [5]. Обмеження способу полягає в складності одержання конічних торців заготовки. Більше того, у роботі не встановлено НДС і механізм заковування внутрішніх дефектів при куванні.

Автори робіт [6, 7] досліджували вплив гідростатичного тиску як параметра для оцінки заковування внутрішніх дефектів. Однак автори у своїх роботах не розглядали розподіл деформацій в об'ємі заготовки при куванні. Оцінити ступінь закриття внутрішніх дефектів можна тільки на підставі комплексного врахування напружень і деформацій заготовки при куванні.

У роботі [8] вивчався механізм заковування внутрішніх дефектів, які мають сферичну форму. Автори досліджували вплив розмірів дефектів на їхнє закриття. У результаті було визначено, що НДС навколо внутрішніх дефектів є основним чинником, який впливає на закриття дефектів. Запропонована модель для прогнозування закриття дефектів у масивних заготовках у процесі кування, яке було заснована на результатах скінчено-елементного моделювання. Основним недоліком цього дослідження є використання штучних дефектів сферичної форми, а осьові дефекти злитків мають подовжену форму.

У роботі [9] досліджувався розподіл деформацій у процесі кування зразків циліндричної форми при різних ступенях обтиснення. Встановлена залежність утвору тріщин на бічній поверхні заготовки. Розроблені рекомендації, які сприяють підвищенню якості поверхні масивних поковок представлені в статтях [10, 11]. Однак у роботах не розглянутий вплив напруженого стану на утворення тріщин на поверхні, які є важливою науково-практичною проблемою при осадженні злитків.

У роботі [12] порівнюються два способи поведінки осьової пористості злитка в процесі кування, які враховували накопичення пошкоджень у пластично-деформованому тілі, на основі використання моделі пористого матеріалу. Було визначено, що нижній кут вирізу бойків повинен бути в діапазоні 90–120° для кращого заварювання осьової пористості злитка. Однак, досліджені схеми не забезпечують виникнення в тілі заготовки рівномірних деформацій.

При куванні масивних поковок зі злитків дуже важливо забезпечити високу рівномірність деформацій, щоб гарантувати ізотропію механічних властивостей. У процесі осадження для заварювання внутрішніх дефектів злитка в осьовій зоні необхідно забезпечити стан нерівномірного всебічного стискання. На сьогоднішній день застосовуються варіанти осадження, які не забезпечують достатній рівень стискаючих напружень, які виникають в осьовій зоні злитка для підвищення щільності металу поковки [13].

На основі досліджень, представлених у роботі [14], було визначено, що для заварювання внутрішніх дефектів злитка необхідно використовувати операцію протягування перед осадженням. Авторами запропонований параметр для оцінки ступеня заварювання внутрішніх дефектів у процесі гарячого деформування, який урахує нерівномірність напруженого стану в процесі осадження. Операція осадження без протягування збільшує розміри осьових дефектів. У роботі авторами не встановлений вплив форми бойків на нерівномірність проковування структури металу.

Головним фактором, на думку авторів роботи [15], який визначає проковування структури й властивості майбутньої деталі, є уков. Однак аналіз різних варіантів кування необхідно робити за даними розподілу накопиченої деформацій в об'ємі заготовки. Це не було зроблено в цій роботі.

Характерними дефектами для кованих заготовок із застосуванням операції осадження, є несущільність осьової зони поковки, яка визначається ультразвуковим контролем (УЗК). Причиною утворення осьової несущільності заготовки може служити операція осадження циліндричної заготовки.

На основі літературного огляду встановлено, що класичне осадження не забезпечує високих і ізотропних механічних властивостей осьової зони деталі через неповне заковування внутрішніх дефектів злитка, що вимагає проведення подальших досліджень у цьому напрямку. Одним з напрямків удосконалення операції осадження є застосування профілювання заготовки перед осадженням. Встановлено, що увігнуті грані з кутом 120° не сприяють повному закриттю осьової пористості. Тому потрібно проводити подальші дослідження для визначення ефективних кута й глибини граней чотирипроменевої заготовки, які дозволять інтенсифікувати заковування внутрішніх дефектів.

Мета роботи – розробка нового способу осадження за для підвищення якості деталей відповідального призначення за рахунок заварювання внутрішніх дефектів. Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлені наступні завдання:

- установити вплив форми чотирипроменевих заготовок на розподіл напружень і заварювання внутрішніх дефектів після осадження;
- розробити новий науково-обґрунтований спосіб осадження чотирипроменевих заготовок, який підвищує щільність внутрішньої будови поковок;
- провести впровадження вдосконаленої операції осадження чотирипроменевих заготовок.

**МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Дослідження формозміни і параметрів НДС заготовки в процесі кування проводилося МСЕ. У зв'язку з цим була розроблена методика теоретичних досліджень на основі чисельних методів дослідження. За результатами моделювання встановлювалися розподіл НДС поковки й формозміна осьового дефекту після осадження. Після профілювання всі заготовки осаджувалися на 50 %.

Заготовки 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°. Глибина увігнутих граней ( $h = d / D$ ) досліджувалася в діапазоні 15 %, 20 % і 25 % від діаметра заготовки. Матеріал заготовки – конструкційна сталь 34ХНМ, температурний інтервал кування для цієї сталі 1200 ... 800°С. Модуль Юнга 2•105 МПа; коефіцієнт Пуассона 0,3. Вихідні дані для розрахунку: початкова температура  $t = 1200^{\circ}\text{C}$ ; швидкість деформування  $v = 40 \text{ мм / с}$ . Параметр схеми напруженого стану осової зони заготовки

$$P_{\sigma} = \frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i}$$

де  $\sigma_{cp}$  – гідростатичний тиск, МПа;  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень, МПа.

Для проведення експериментальних досліджень були виготовлені свинцеві заготовки циліндричної форми діаметром 50 мм і висотою 70 мм. На торці заготовки в осевій її зоні висвердлювався отвір діаметром 5 мм, який імітував осевий дефект злитка. Після цього проводилося деформування отриманих заготовок випуклим інструментом, кут опуклих бойків із клиновим профілем становив 150°. У процесі профілювання виконувалися виміри поперечного перерізу осового дефекту. Отвір дефекту підключався до лабораторної бюретки. Зміна рівня рідини в бюретці дозволило визначити поточний об'єм дефекту при деформуванні, а далі його середній діаметр.

Після профілювання на чотирипроменевий переріз отримані заготовки осаджували плоскими плитами на ступінь деформації 70% з поетапним фіксуванням (кожне 5 мм) зміни об'єму дефекту. Дослідження закриття отвору додатково проводилось на зразках зі сталі 34ХНМ. Сталеві заготовки нагрівалися до температури 1150 °С і профілювалися на чотирипроменевий переріз опуклим інструментом з подальшим осадженням.

Осадження чотирипроменевих заготовок змінює напружений стан у поковці (рис. 1). У середній і осевій її частині виникають середні напруження зі знаком мінус, які свідчать про виникнення в зоні осової пористості заготовки стискаючих напружень з величиною близької –85 МПа при відносній глибині  $d / D = 0.15$  (рис. 1).

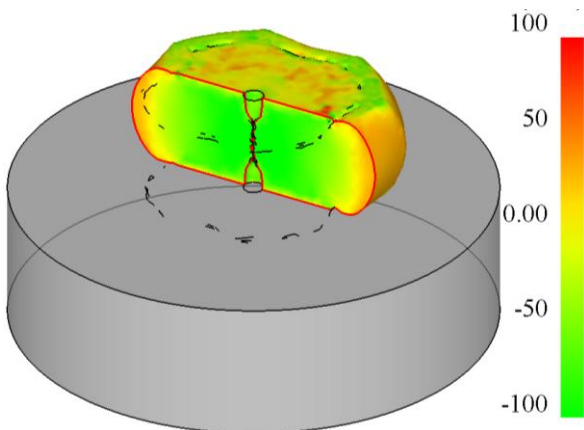


Рисунок 1 – Середні напруження при осадженні чотирипроменевих заготовок ( $d / D = 0,15$ )

Підвищення відносної глибини граней чотирипроменевих заготовок приводить до змінення розподілу середніх напружень у метали заготовки. Глибокі грані зменшують площу й величину стискаючих напружень. Осадження чотирипроменевих заготовок не виключає утворення діжки подібної бічної поверхні з локалізацією на цій поверхні розтягувальних напружень.

Увігнутий профіль впливає на гідростатичний тиск, який виникає у заготовці при осадженні. Увігнуті грані чотирипроменевої заготовки повинні підвищити рівень стискаючих напружень. Для оцінки величини стискаючих напружень можна використовувати параметр жорсткості схеми напруженого стану ( $P_{\sigma}$ ).

Параметр жорсткості схеми напруженого стану зі знаком «мінус» свідчить, що в тілі заготовки виникають стискаючі напруження (рис. 2), що буде закрити внутрішні дефекти ковального злитка.

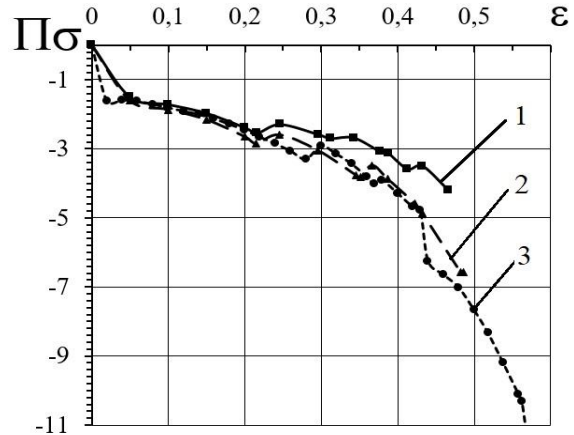


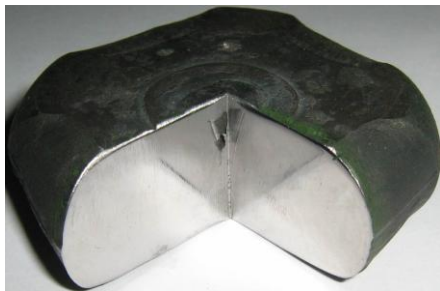
Рисунок 2 – Параметр жорсткості схеми напруженого стану при осадженні чотирипроменевих заготовок: 1 –  $d / D = 25\%$ ; 2 –  $d / D = 20\%$ ; 3 –  $d / D = 15\%$

У процесі осадження чотирипроменевих заготовок підвищується рівень стискаючих напружень (рис. 2). Аналіз отриманих результатів дозволив установити, що при відносній глибині граней 15% виникають максимальні стискаючі напруження після деформації на 50 % ( $P_{\sigma} = -11$ ). Самий низький рівень стискаючих напружень ( $P_{\sigma} = -4,2$ ) відповідає глибині увігнутих граней  $d/D=25\%$  і ступеню деформації при осадженні  $\epsilon=0,46$ . Такий напружений стан у цьому випадку приводить до неповного закриття осових дефектів.

Дослідження заковування отвору при осадженні чотирипроменевих заготовок перевірялися деформуванням зразків зі сталі 34ХНМ у гарячому стані. Нагрівання сталевих зразків проводилося до температури 1150 °С з подальшим їхнім протягуванням на чотирипроменевий переріз інструментом із клиновим профілем з кутом 150 ° зі ступенем деформації 20% і кантуванням на 90 ° (рис. 3, а). Після додаткового підігріву заготовки здійснювалося осадження. Далі зразки охолоджувалися й розрізалися в місці розташування дефекту (рис. 3, б).



а)



б)

Рисунок 3 – Експериментальне дослідження на сталевих зразках: а) – протягування на чотирипроменевий переріз; б) – форма отвору після осадження чотирипроменевої заготовки

На основі аналізу результатів макроструктурного дослідження встановлено, що при осадженні чотирипроменевої заготовки з кутом увігнутих граней  $150^\circ$  не відбувається повного заковування осевого дефекту (рис. 3, б).

За розробленим технологічним процесом кування із профілюванням на чотирипроменеву заготовку і її подальшого осадження було виготовлено 22 поковки опорних валків. Ступінь обтиснення при профілюванні опуклими бойками становила в середньому 10% на одну сторону від діаметра заготовки (рис. 4, а). Застосований ступінь обтиснення був установлений на підставі результатів теоретичних й експериментальних моделювань. Після профілювання на чотирипроменевий переріз заготовка осаджувалася (рис. 4, б).



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Апробація осадження чотирипроменевих заготовок масою 57,4 тон: а) – процес профілювання; б) – процес осадження; в) – отримано поковка

Після осадження проводилися звичайні операції кування для надання заготовці форми східчастого валу. Після термічної (рис. 4, с) й механічної обробки деталі проходили ультразвуковий контроль для виявлення внутрішніх дефектів.

**ВИСНОВКИ.** Досліджений новий спосіб осадження чотирипроменевих заготовок з кутом граней  $150^\circ$  і різними глибинами цих граней. За результатами досліджень встановлено НДС заготовки й закономірності зміни розмірів осевого отвору в процесі осадження. Аналіз отриманих результатів дозволив установити ефективні рекомендації процесу осадження і його переваги перед існуючим способом деформування:

- максимальне заковування отвору відбувається після осадження на 65% для відносної глибини граней 15... 20 % від діаметра заготовки.

- увігнуті грані величиною 15 % від діаметра заготовки приводять до виникнення в тілі заготовки стискаючих напружень після осадження на 55%, що підтверджується параметром напруженого стану на рівні – 10...– 11. Підвищення рівня деформації при осадженні чотирипроменевих заготовок приводить до підвищення величини стискаючих напружень у тілі поковки.

- отримані результати по формозміні й ультразвуковому контролю перевірялися й рівнялися з відповідними базовими технологічними процесами кування даних поковок;

– аналіз результатів УЗК для поковок, виготовлених з використанням нового методу осадження, дозволяє зробити висновок, що отримані поковки відповідають вимогам стандарту SEP 1921. Отримані результати підтверджують позитивний вплив увігнутих граней профільованої заготовки на збільшення величини стискаючих напружень в осевій зоні й заварювання внутрішніх дефектів у процесі кування. Виготовлені поковки відповідали вимогам замовника. Отримані результати підтверджують дані теоретичного дослідження, отримані з використанням МСЕ й експериментальних результатів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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, № 3(7), pp. 87–90. <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>
2. 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, 83(9-12), 2159–2174. <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
3. Dudra S. P., Im Y. T. Analysis of void closure in open-die forging. *J. Mach. Tools Manuf.*, 1990, № 30, pp. 65–75. [https://doi:10.1016/0890-6955\(90\)90042-H](https://doi:10.1016/0890-6955(90)90042-H)
4. Chen K., Yang Y., Shao G., Liu K. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot. *Computational Materials Science*, 2012, № 51(1), pp. 72–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>
5. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool. O. Markov, M. Kosilov, V. Panov, V. Kukhar, S. Karnaukh, N. Ragulina, P. Bochanov, P. Rizak. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6/1(102), pp. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>
6. Nakasaki M., Takasu I., Utsunomiya H. Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, 177, pp. 521–524. <https://doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.04.102>
7. Markov O. E., Perig A. V., Zlygoriev V. N., Markova M. A., Grin A. G. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *Int J Adv Manuf Technol.*, 2017, 90, pp. 801–818. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>
8. Chen M-S., Lin Y. C. Numerical simulation and experimental verification of void evolution inside large forgings during hot working. *International Journal of Plasticity*, (2013, № 49, pp. 53–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.02.017>
9. Markov O. E., Perig A. V., Zlygoriev V. N., Markova M. A., Kosilov M. S. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2017, № 39(4), pp. 4649–4665. <https://doi.org/10.1007/S40430-017-0812-Y>
10. Sheikhi S., Rech R., Wahlers F., Bokelmann D., Wupperman C., Bonfig K. W., Notzel R., Steingier K. J. *Fortschritte beim Freiformschmieden in den letzten 25 Jahren*. Stahl und Eisen, 2010, № 1, pp. 2–14.
11. Aksakal B., Osman F. H., Bramley A. N. Determination of experimental axial and sideways metal flow in open die forging. *Material and Desing*, 2008, № 3, pp. 576–583.
12. Christiansen P., Martins P. A. F., Bay N., Hattel J. H. Multi-objective optimization of die geometry in ingot forging. *Proceeding 11th International Conference on Technology of Plasticity*, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan *Procedia Engineering*. 81. pp. 2457–2462. <https://doi:10.1016/j.proeng.2014.10.350>
13. Cho J. R., Bae W. B., Kim Y. H., Choi S. S., Kim D. K. Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modeling method. *J. Mater. Process. Technol.*, 1998, 80–81, pp. 161–165.
14. Kakimoto H., Arikawa T., Takahashi Y., Tanaka T., Imaida Y. Development of forging process design to close internal voids. *J Mater Process Tech.*, 2010, 210(3), pp. 415–422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>
15. 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, 51(1), pp. 72–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>

## COMPUTERIZED MODELING OF A NEW FORGING PROCESS OF FORGINGS OF RESPONSIBLE PURPOSE

O. Markov, A. Khvashchynskyi, R. Zhytnikov, A. Musorin, E. Raguzin

Donbas State Machine-Building Academy

vul. Akademichna, 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine. E-mail: oleg.markov.umd@gmail.com

**Purpose.** The work studies the method for upsetting the massive ingots. The proposed method comprises the upsetting of profiled ingots. **Methodology.** The work has developed a methodology for conducting the research by the finite element method. A technique for conducting theoretical studies by finite element method (FEM) has been developed. The technique is intended to determine the stress state and the shaping. The technique made it possible to establish the laws of forging internal defects of an ingot. The angle of the faces of the four-beam blanks was 150°. The relative depth of the concave faces varied within 15% ... 25% of the diameter of the work piece. **Results.** Based on the finite element modeling, average stresses in the meridional section were established after settling the four-beam work pieces. The magnitude of the compressive stresses was determined based on the rigidity parameter of the stress state. A theoretical study made it possible to establish the distribution of stress parameters in the forging volume during the upsetting of four-beam blanks. The finite element study allowed us to establish that the rational depth of the concave faces should be 15% of the diameter of the work piece. With such a depth of the faces, the maximum closing of the inner hole occurs. **Originality.** The results obtained are explained by the parameter of the stress state scheme, which shows the presence



of compressive stresses due to the support of concave faces. The results of finite element modeling were verified by experimental studies. **Practical value.** In addition to this, the results were tested on full-scale steel forgings. The obtained results on deformation and ultrasonic control were checked and equalized with the corresponding basic technological processes of forging of these forgings. Analysis of the results of ultrasound for forgings made using a new method of deposition allows us to conclude that the obtained forgings meet the requirements of SEP 1921. As a result of studies performed in the work, it was found that the upsetting of four-beam blanks improves the quality of massive parts. References 15, figures 4.

**Key words:** forging, upsetting, ingot, internal defect, massive part, four-beam billet, concave faces, FEM, stress state parameter, compressive stresses.

REFERENCES

1. 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), pp. 87–90.  
<http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>
2. 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>
3. Dudra, S. P., Im, Y. T. (1990), "Analysis of void closure in open-die forging", *Mach. Tools Manuf.*, 30, pp. 65–75. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90042-H](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90042-H)
4. Chen, K., Yang, Y., Shao, G., Liu, K. (2012), Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot, *Computational Materials Science*, 51(1), pp. 72–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>
5. Markov, O., Kosilov, M., Panov, V., Kukhar, V., Karnaukh, S., Ragulina, N., Bochanov, P., Rizak, P. (2019), "Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6/1(102), pp. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>
6. Nakasaki, M., Takasu, I., Utsunomiya, H. (2006), "Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling", *J. Mater. Process. Technol.*, 177, pp. 521–524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.102>
7. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., Grin, A. G. (2017), "A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state", *Int J Adv Manuf Technol.*, 90, pp. 801 – 818. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>
8. Chen, M-S., Lin, Y. C. (2013), "Numerical simulation and experimental verification of void evolution inside large forgings during hot working", *International Journal of Plasticity*, 49, pp. 53–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.02.017>
9. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., Kosilov, M. S. (2017), "Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state", *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 39(4), pp. 4649–4665. <https://doi.org/10.1007/S40430-017-0812-Y>
10. Sheikhi, S., Rech, R., Wahlers, F., Bokelmann, D., Wupperman, C., Bonfig, K. W., Notzel, R., Steingier, K. J. (2010). *Fortschritte beim Freiformschmieden in den letzten 25 Jahren. Stahl und Eisen*, № 1, pp. 2–14.
11. Aksakal, B., Osman, F. H., Bramley, A. N. (2008), "Determination of experimental axial and sideways metal flow in open die forging", *Material and Desing*, № 3, 576–583
12. Christiansen, P., Martins, P. A. F., Bay, N., Hattel, J. H. (2014), "Multi-objective optimization of die geometry in ingot forging", *Proceeding 11th International Conference on Technology of Plasticity*, Nagoya, Japan, 81, pp. 2457–2462  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.350>
13. Cho, J. R., Bae, W. B., Kim, Y. H., Choi, S. S., Kim, D. K. (1998), "Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modeling method", *J. Mater. Process. Technol.*, № 80–81, pp/ 161–165
14. 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), pp. 415–422.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>
15. 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), pp. 72–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>

Стаття надійшла 25.03.2020.