

**Олег Марков¹, Антон Хващинський², Антон Мусорін³,
Марина Маркова⁴, Антон Лисенко⁵**

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

E-mail: oleg.markov.umd@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: antl31@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5454-6357>

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО СПОСОБУ КУВАННЯ ВЕЛИКИХ ЗЛИТКІВ НА ОСНОВІ ОСАДЖЕННЯ ПРОФІЛЬОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Аналіз напруженого стану дозволив встановити, що в тілі заготовки у процесі осадження виникає стан нерівномірного всебічного стискання. Підвищення рівня стискаючих напружень в осевій та бічній зонах можливе при осадженні низьких заготовок ($H/D < 3,0$). Збільшення ступеня осадження від 0,1 до 0,45 призводить до зміни параметра напруженого стану η від $-1,0$ до 0. Подальше осадження до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Встановлено, що зменшення діаметра конусних торців призводить до зниження цього параметра η . Цей параметр має більш сприятливі умови для закриття осевих дефектів в інтервалі $-1,5...-0,6$ при осадженні з відносним діаметром конусних уступів 0,5.

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

Рис.: 5. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Останніми роками кількість масивних поковок, виготовлених зі злитків, збільшується. Це спричинено збільшенням потужності важких машин. Однак якість поковок не завжди відповідає вимогам замовника. Низька якість масивних поковок пояснюється низькою якістю вихідних злитків [1]. При куванні масивних поковок брак ультразвукового контролю (УЗК) досягає 10 % [2]. Брак по УЗК пояснюється процесом осадження злитків з неоднорідною структурою. У результаті ця структура опрацьовується нерівномірно та недостатньо. Крім того, при осадженні циліндричних заготовок плоскими плитами відбувається збільшення розмірів осевої пухкості зливка. Аналіз процесів кування заготовок із застосуванням операції осадження дозволив встановити, що базова схема кування не гарантує подрібнення структури зливка та забезпечення заданих властивостей отриманих деталей [3].

Постановка проблеми. При виробництві масивних поковок відповідального призначення дуже важливо забезпечити високу якість одержуваних заготовок. Якість масивних поковок визначається відсутністю внутрішніх та зовнішніх дефектів, а також рівномірністю механічних властивостей. Ці вимоги викликані тим, що заготовкою є масивний ковальський зливок [4]. Масивні зливки характеризуються дефектами металургійного походження (осеова пухкість, усадочна раковина та ін.). Ці дефекти визначають низьку якість ковальських злитків. У процесі деформування легованих сталей часто відбувається тріщиноутворення на зовнішній поверхні заготовки. Крім цього, ковальські зливки мають внутрішню неоднорідну структуру, викликану умовами кристалізації. Відсутність осевих та зовнішніх дефектів, а також усунення неоднорідної структури має бути забезпечено куванням у гарячому стані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значне збільшення ліквідаційної зони в осьовій частині зливка є наслідком використання неефективних ковальських операцій. Тому перед удосконаленням технологічних процесів кування великих поковок слід провести аналіз відомих із літератури досліджень основних операцій, які використовуються при куванні.

Згідно з результатами, представленими в роботі [5], осадження застосовується для подрібнення литої структури, щоб підвищити ударну міцність металу і знизити анізотропію механічних властивостей. Проте результати досліджень [5] показують суттєве зниження рівномірності деформацій у процесі осадження. Авторами не запропоновані способи, що підвищують рівномірність деформацій.

У роботі [6] досліджувався механізм формування тріщини під час осадження масивних дископодібних поковок на основі використання метода скінчених елементів (МСЕ). Автори розробили діаграму розподілу напруженого стану в процесі осадження. Встановлено, що масивні ступені деформації заготовки за умови всебічного нерівномірного стискання призводять до розшарування металу та утворення внутрішніх тріщин. Таким чином, операція осадження циліндричних заготовок не призводить до покращення якості кованих деталей. До того ж автори не досліджували закриття осьових дефектів зливка у процесі осадження.

У роботі [7] досліджувався вплив геометричних параметрів бойків для профілювання зливка та закриття осьових дефектів у заготовках. На підставі цих досліджень було запропоновано бойки опуклої форми та режими профілювання заготовок. Проте дослідження операції осадження не було проведено.

Нові процеси кування масивних заготовок відповідального призначення було досліджено у роботі [8]. Було встановлено, що раціональним кутом вирізних бойків для підвищення рівня стискаючих напружень у тілі заготовки та забезпечення універсальності ковальського інструменту є кут, що дорівнює 135° . Однак проблема підвищення однорідності деформацій при куванні із застосуванням процесу профілювання заготовки не досліджена в цій роботі.

У роботі [9] досліджувався вплив геометричних параметрів бойків на закриття осьових дефектів у заготовках. На підставі проведених досліджень було запропоновано бойки опуклої форми. Дослідження [10] дозволили встановити, що закриття осьової пористості зливка відбувається після попереднього протягування. Авторами встановлено параметр для оцінки закриття порожнеч у процесі кування. Цей параметр враховує напружений стан та гідростатичні напруження в заготовці при осадженні. Було встановлено, що осадження вздовж осі зливка без попереднього його протягування не сприяє заварюванню осьової пористості. Авторами не досліджено вплив геометрії деформуючого інструменту на рівномірність структури поковок.

Осадження з подальшим протягуванням гарантує високу рівномірність розподілу деформацій вздовж осі заготовки, як це було встановлено авторами роботи [11], порівняно зі схемою протягування вирізними бойками. Це підтверджує ефективність операції осадження. Проте автори не досліджували НДС осадження попередньо профільованих заготовок.

Вплив операцій осадження та протягування при куванні валів з масивних злитків на подрібнення структури металу досліджувалося у роботі [12]. Було запропоновано новий спосіб осадження. У роботі запропонований спеціальний деформуючий інструмент. Проте автори роботи не досліджували вплив форми бойків на закриття пустот у процесі кування спеціальними бойками.

Пристрій для кування заготовок на радіально-обтискних машинах, представлений у роботі [13]. Встановлено вплив нової конструкції бойків на закриття порожнин у процесі радіального кування. Однак запропонована схема деформації призводить до інтенсивного подовження заготовки. Цей аспект не дозволяє накопичувати деформації з високим рівнем у тілі заготовки у процесі кування за запропонованим способом.

У роботі [14] показано, що при застосовуванні бойків опуклої форми досягається значне накопичення пластичних деформацій високого рівня осьової зони заготовки. Бойок опуклої форми також запропонований у роботі [15]. У запропонованих роботах не досліджено впливу профілювання заготовки на розподіл деформацій у процесі осадження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перспективним напрямом підвищення рівномірності деформацій та рівня стискаючих напружень є профіль торців заготовки перед операцією осадження [16]. Профільювання торців заготовок сприятиме подрібненню структури металу, що є в «мертвих» зонах заготовки. Крім того, осадження заготовки з профільованими торцями змінить НДС металу.

Метою статті є визначення ефективної геометрії заготовок з конусними торцями, що забезпечує рівномірний деформований стан та високий рівень стискаючих напружень.

Виклад основного матеріалу. Основними параметрами при моделюванні процесів кування масивних заготовок є нерівномірність розподілу напруженого та деформованого станів у металі заготовки. Простим критерієм для оцінки нерівномірності розподілу деформацій є різниця максимальних та мінімальних логарифмічних деформацій по всьому об'єму поковки. Однак цей показник не враховує величину площі кожної зони з певною деформацією. Це важлива оцінка розподілу деформацій. Більш точним описом є використання середньозваженої логарифмічної деформації:

$$e_{с.з} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot e_i}{\sum_{i=1}^n F_i},$$

де F_i – площі зон із різними деформаціями, мм²;

$\sum_{i=1}^n F_i$ – загальна площа поперечного перерізу осадженої заготовки, мм²;

e_i – логарифмічна деформація в певній зоні.

Основним параметром, що впливає на пластичні та енергосилові характеристики процесу деформування, є параметр напруженого стану металу. Цей параметр показує рівень та знак напружень, що виникають при деформуванні

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження, МПа;

σ_i – інтенсивність напружень, МПа.

Знак «мінус» параметра η свідчить, що в заготовки досліджуваної схеми деформування виникає напружений стан нерівномірного стискання. Величина параметра η показує рівень переважаючих напружень. Для визначення параметрів НДС заготовки у процесі осадження використано метод скінчених елементів (МСЕ) з урахуванням програмного продукту Deform 3D. Оцінка результатів моделювання проводилася за такими показниками: параметр напруженого стану η , середньозважена деформація (e).

Дослідження напруженого стану в процесі осадження. Збільшення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки можливе за рахунок створення підпору збоку заготовки. Перспективним рішенням цього завдання є використання заготовок з конусними торцями перед осадженням (рис. 1). Формування увігнутої поверхні в процесі осадження підвищить рівномірність розподілу деформацій та забезпечить підпор в осьовій зоні. Цей аспект не досліджений сьогодні і немає конкретних рекомендацій щодо раціональної геометрії таких заготовок перед осадженням.

НДС досліджуваних заготовок під час процесу осадження визначався за середніми напруженнями в поздовжньому перерізі (рис. 2).

Максимальні стискаючі напруження в центральній зоні не спостерігаються. Площа зони із середніми напруженнями $-10 \dots -20$ МПа незначна і становить $10 \dots 20$ % загальної площі перерізу. Загальний рівень середніх напружень зі знаком мінус у тілі заготовки низький. Однак утворюється значна глибина увігнутої бічної поверхні в центральній частині за рахунок утворення подвійної бочки з боку торців заготовки. Цей результат збігається з відомими даними класичного осадження високих заготовок із співвідношенням $H/D > 2,5$.

Крім середніх напружень, додатково визначалася інтенсивність напружень (σ_i) у центрі заготовки. Для опису механізму закриття дефекту можна скористатися показником напруженого стану. Цей показник показує, наскільки середні напруження більші за інтенсивність напружень, а також знак цих напружень. Утворення опуклої бічної поверхні (бочки) при осадженні є причиною утворення тріщини на зовнішній поверхні заготовки в результаті виникнення в цій зоні напружень розтягу. Тому аналіз нових методів деформування без встановлення рівня напружень розтягу не буде повним. У результаті було проведено додаткове моделювання напруженого стану у процесі осадження високих заготовок. За результатами цих досліджень встановлені знак і величина напружень на бічній поверхні поковки. Розрахований параметр напруженого стану (η) на середній периферійній частині заготовки залежно від ступеня осадження для різних діаметрів конусних торців (d/D) для відносної висоти конусного уступу $h/D = 0,6$ (рис. 3).

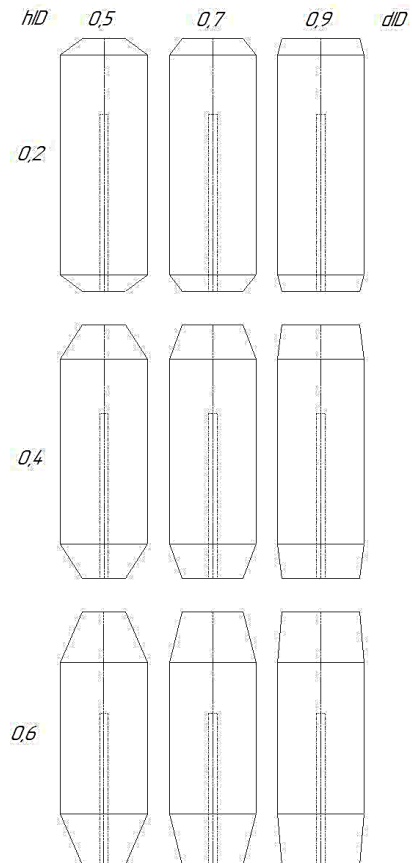


Рис. 1. Ескізи заготовок для осадження

Джерело: розроблено авторами.

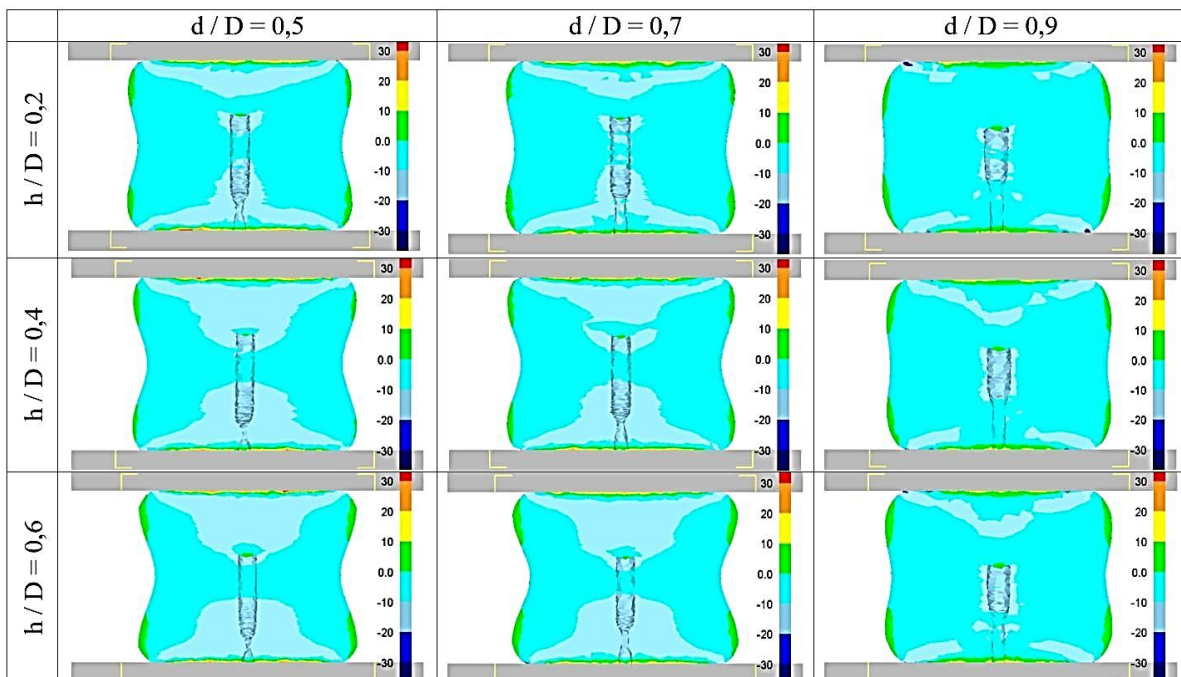


Рис. 2. Розподіл середніх напружень у поздовжньому перерізі заготовки з конусними торцями після осадження високих заготовок

Джерело: розроблено авторами.

З літератури відомо, що варіювання відносної висоти уступів не помітно впливає на параметр η , тому в роботі він не досліджується.

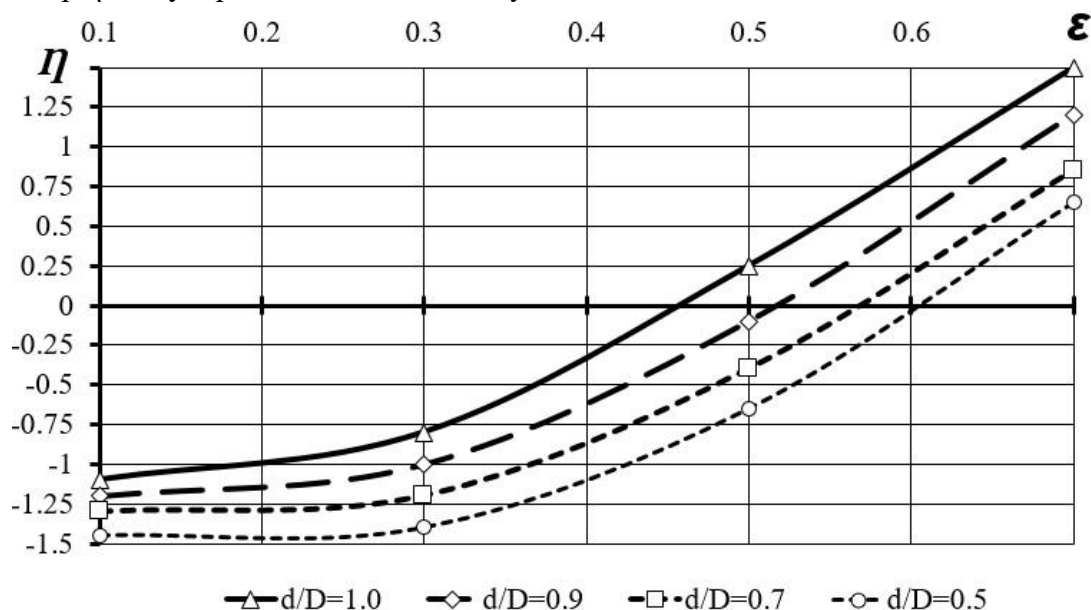


Рис. 3. Параметр напруженого стану залежно від рівня деформування (ϵ) для різних діаметрів уступів (d/D) для відносної висоти конусного уступу $h/D = 0,6$
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що після осадження заготовок із конусними уступами понад 50 % параметр η має позитивне значення для досліджуваних схем деформування. Це підтверджує виникнення несприятливих умов при осадженні високих заготовок (рис. 3). У разі збільшення ступеня деформування від 0,1 до 0,45 параметр η змінюється від -1 до 0 . Подальше деформування до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Встановлено, що зі зменшенням відносного діаметра конусних уступів параметр η при осадженні знижується. Осадження заготовок з відносним діаметром конусних уступів, рівним 0,9, призводить до змінення параметра η від $-1,2$ до $+1,25$ в інтервалі деформування 0,1...0,7. При осадженні заготовок з відносним діаметром уступу 0,5 цей параметр змінюється в інтервалі $-1,5$... $+0,6$ при ступені деформації від 0,1 до 0,7.

Дослідження деформованого стану після осадження. Розподіл логарифмічних деформацій після осадження заготовок представлений на рис. 4. Зони максимальних деформацій розташовуються одна від одної на значній відстані. Збільшення висоти конусних уступів збільшує цю відстань і сприяє появі в центральній частині заготовки значних деформацій. Зони мінімальних деформацій, розташовані біля уступів, мають схожі форми та розміри для однакових діаметрів уступів (d/D). Це пояснюється тим, що ці зони мають рівні площі контакту заготовки з інструментом.

Отримані результати пояснюються даними середньозважених деформацій (рис. 5). Рівень цих деформацій є низьким. Зменшення відносної висоти конусних уступів (h/D) приводить до зниження рівня деформацій.

Встановлено, що на першому етапі процесу осадження деформації локалізуються в конусних уступах заготовки. Такий розподіл деформацій призводить до виникнення подвійної бочки, яка при осадженні пояснює появу стискаючих напружень на бічній поверхні та в центральній частині заготовки. У процесі осадження заготовок з конусними уступами нерівномірність розподілу деформацій знижується при зменшенні діаметра ко-

нусного уступу. Висота конусних ділянок також впливає на нерівномірність розподілу деформацій. Максимальна рівномірність розподілу деформацій виникає в процесі осадження заготовки. Однак у цьому випадку відсутні локальні зони зі значними деформаціями.

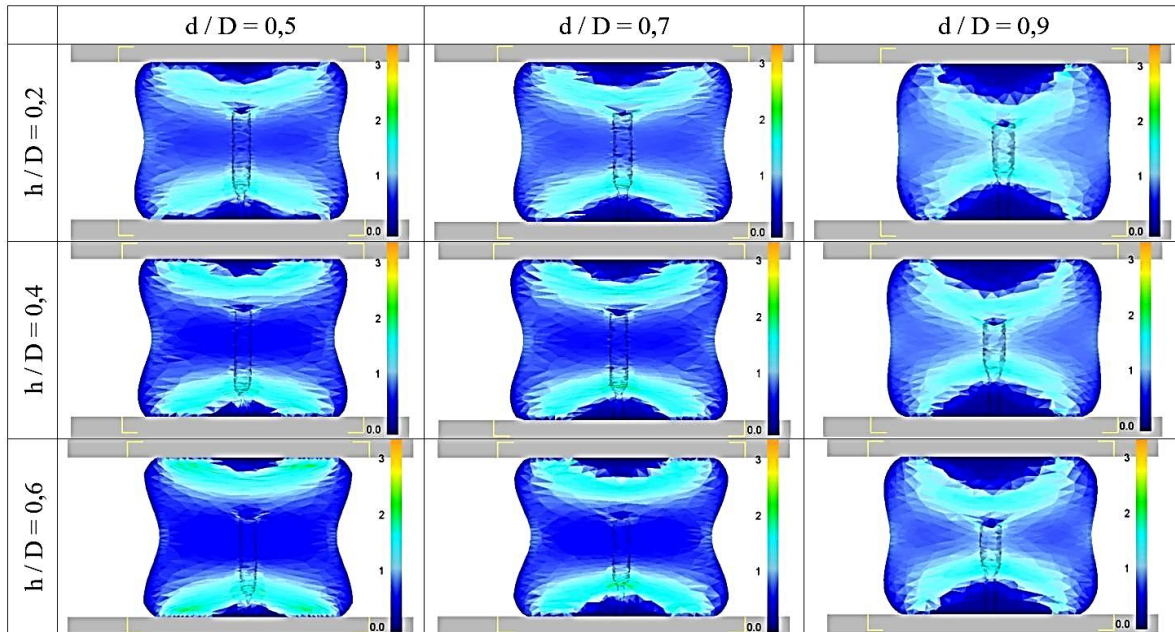


Рис. 4. Розподіл логарифмічних деформацій за перерізом заготовки з конусними уступами після осадження

Джерело: розроблено авторами.

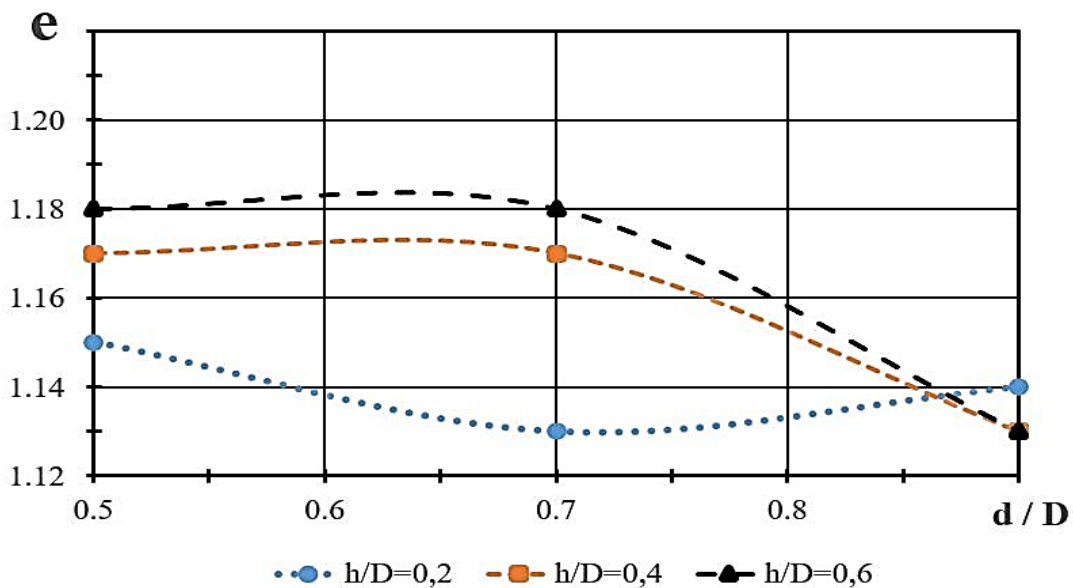


Рис. 5. Середньозважена деформація для різних відносних висот (h/D) та діаметрів конусних уступів (d/D)

Джерело: розроблено авторами.

Збільшення відносної висоти конусних уступів призводить до локалізації зон із максимальними деформаціями. Осадження заготовок з конусними уступами призводить до зниження нерівномірності деформацій при зменшенні діаметра уступу заготовки. Осадження заготовки з відносним діаметром уступу (d/D), рівним 0,5, забезпечує мінімальну нерівномірність деформацій. У цьому випадку зона мінімальних деформацій займає не-

значний обсяг заготовки. Висота конусних ділянок заготовки також впливає нерівномірність розподілу деформацій. Осадження заготовок з відносною висотою уступів, що дорівнює 0,2...0,4, забезпечує високу рівномірність розподілу деформацій. Збільшення висоти конусних уступів призводить до локалізації зон максимальних деформацій у центральній частині заготовки.

Висновки. Аналіз напруженого стану дозволив встановити, що в тілі заготовки у процесі осадження виникає стан нерівномірного всебічного стискання. Підвищення рівня стискаючих напружень в осевій та бічній зонах можливе при осадженні низьких заготовок ($H/D < 3,0$). Збільшення ступеня осадження від 0,1 до 0,45 призводить до зміни параметра напруженого стану η від $-1,0$ до 0 . Подальше осадження до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Встановлено, що зменшення діаметра конусних торців призводить до зниження цього параметра η . Цей параметр має більш сприятливі умови для закриття осевих дефектів в інтервалі $-1,5...-0,6$ при осадженні з відносним діаметром конусних уступів 0,5. Осадження високих заготовок призводить до зниження рівня інтенсивності деформацій та зниження рівномірності їх розподілу. Розроблені співвідношення геометричних параметрів заготовок з конусними уступами можуть бути запроваджені під час виробництва масивних поковок.

Список використаних джерел

1. Глезер А. М. Основные направления использования нанотехнологий в металлургии / А. М. Глезер // Металлург. – 2010. – № 1. – С. 5-7.
2. Быков Ю. А. Способы получения конструкционных наноматериалов. Часть 1 / Ю. А. Быков, С. Д. Карпухин // Наноинженерия. – 2012. – № 6. – С. 11-19.
3. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов, Д. А. Павлик, В. Ф. Малышев. – Минск : Наука и техника, 1994. – 232 с.
4. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Логос, 2003. – 87 с.
5. Колесников А. Г. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов / А. Г. Колесников, А. С. Шинкарев // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 11. – С. 34-44.
6. Полякова М. А. Влияние технологических параметров совмещенного процесса на механические свойства и структуру углеродистой проволоки / М. А. Полякова, А. Е. Гулин, О. А. Никитенко // Металлургические процессы и оборудование. МГТУ им. Г. И. Носова. – 2013. – № 3(33). – С. 20-25.
7. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. – № 11. – С. 15-20.
8. Миленин А. А. Автоматизированная система проектирования технологии свободнойковки / А. А. Миленин, В. А. Афанасьев, А. С. Николаенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 49–54.
9. Тюрин В. А. Методики Московского института стали и сплавов для разработки и исследования инновационных технологийковки / В. А. Тюрин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 32–35.
10. Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / В. Л. Чухлеб, Д. Ю. Ключев, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкалянец // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 103-106.
11. Дурынин В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с. : ил.
12. Development of forging process design to close internal voids / Н. Kakimoto, Т. Arikava, Y. Takahashi, Т. Tanaka, Y. Imaida // J. Mater. Process Technol. – 2010. – № 210. – Pp. 415-422.
13. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 5. – С. 27–29.

14. Онищенко А. К. Аналитическое исследованиековки крупных поковок с учетом температурной неоднородности материала / А. К. Онищенко, А. А. Мишулин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 10. – С. 14–19.

15. Polozine A. Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank / Alexandre Polozine, Lirio Schaeffer // J. Mater. Process Technol. – 2008. – № 195. – Pp. 260–266.

16. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites / Ma Feng-cang, Lu Wei-jie, Qin Ji-ning, Zhang Di, Ji Bo // Mater. and Des. – 2007. – № 28. – Pp. 1339–1342.

References

1. Glezer, A.M. (2010). Osnovnye napravleniia ispolzovaniia nanotekhnologii v metallurgii [The main directions of the use of nanotechnologies in metallurgy]. *Metallurg – Metallurgist*, (1), 5-7.

2. Byikov, Yu.A., & Karpuhin, S.D. (2012). Sposobyi polucheniia konstruktsionnykh nanomaterialov. Chast 1 [Methods of obtaining structural nanomaterials. Part 1]. *Nanoinzheneriia – Nanoengineering*, (6), 11-19.

3. Segal, V.M., Reznikov, V.I., Kopyilov, V.I., Pavlik, D.A., & Malyishev, V.F. (1994). *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniia metallov [Processes of plastic structure of metals]*. Nauka i tehnika.

4. Valiev, R.Z., & Aleksandrov, I.V. (2003). *Nanostrukturnyie materialyi, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiiey [Nanostructural materials obtained by intensive plastic deformation]*. Logos.

5. Kolesnikov, A.G., & Shinkarev, A.S. (2014). Analiz sposobov izmelcheniia struktury pri poluchenii metallicheskiykh konstruktsionnykh materialov [Analysis of structure grinding methods in the production of metallic structural materials]. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman – Science and Education. MSTU im. N. E. Bauman*, (11), 34-44.

6. Polyakova, M.A., Gulin, A.E., & Nikitenko, O.A. (2013). Vliianie tehnologicheskikh parametrov sovmeshchennogo protsessa na mehanicheskie svoistva i strukturu uglerodistoi provoloki [Influence of technological parameters of the combined process on mechanical properties and structure of carbon wire]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie. MGTU im. G. I. Nosova – Metallurgical processes and equipment. MSTU im. G. I. Nosova*, (3(33)), 20-25.

7. Tyurin, V.A. (2007). Innovatsionnyie tehnologii kovki s primeneniem makrosdviгов [Innovative forging technologies using macroshears]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (11), 15–20.

8. Milenin, A.A., Afanasev, V.A., & Nikolaenko, A.S. (2008). Avtomatizirovannaya sistema proektirovaniya tehnologii svobodnoy kovki [Automated system for designing free forging technology]. *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobky tyskom v metallurgii ta mashynobuduvanni – Improvement of processes and control of vise processing in metallurgy and machine-building* (pp. 49-54).

9. Tyurin, V.A. (2005). Metodiki Moskovskogo instituta stali i splavov dlia razrabotki i issledovaniya innovatsionnyih tehnologiy kovki [Methods of the Moscow Institute of Steel and Alloys for the development and research of innovative forging technologies]. *Izvestiya vuzov. Chernaia metallurgii – Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*, (10), 32–35.

10. Chukhleb, V.L., Kliuev, D.Yu., Prokopenko, I.S., & Ashkelianets, A.V. (2011). Formirovanie prognoziruemiy pokazateley kachestva pokovok v usloviyah OAO «ArselorMittal Krivoy Rog» [Formation of predicted quality indicators of forgings under the conditions of OAO ArcelorMittal Kryvyi Rih]. *Obrabotka materialov davleniem – Processing of materials by pressure*, (1(26)), 103–106.

11. Durynin, V. A., & Solntsev, Yu.P. (2006). *Issledovanie i sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva s tseliu povysheniia resursa stalnykh izdelii iz krupnykh pokovok otvetstvennogo naznacheniiia [Research and improvement of production technology to increase the resource of steel products from large forgings for critical purposes]*. KHMIZDAT.

12. Kakimoto, H., Arikava, T., Takahashi, Y., Tanaka, T., & Imaida, Y. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *J. Mater. Process Technol.*, (210), 415-422.

13. Tyurin, V.A. (2006). Innovatsionnye tehnologii kovki [Innovative forging technologies]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (5), 27–29.

14. Onischenko, A.K., & Mishulin, A.A. (2006). Analiticheskoe issledovanie kovki krupnyih pokovok s uchetom temperaturnoy neodnorodnosti materiala [Analytical study of forging large forgings taking into account the temperature inhomogeneity of the material]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo – Forging and stamping production*, (10), 14–19.

15. Polozine, A., & Schaeffer, L. (2008). Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank. *J. Mater. Process Technol.*, (195), 260–266.

16. Ma, Feng-cang, Lu, Wei-jie, Qin, Ji-ning, Zhang, Di, & Ji, Bo. (2007). The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites. *Mater. and Des.*, (28), 1339-1342.

Отримано 11.02.2022

UDC 621.923.42

**Oleg Markov¹, Anton Khvashchynskyi², Anton Musorin³,
Marina Markova⁴, Anton Lysenko⁵**

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

E-mail: oleg.markov.ond@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)

²PhD Student 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](https://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

³PhD Student 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)

⁵PhD Student of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: antl31@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5454-6357>

STUDY NEW METHOD OF MASIVE INGOTS UPSETTING OF WORKPIECES WITH CONICAL FACES

Quantity of massive parts produced from an ingot is increasing today. It is caused by increasing in the capacity of a massive equipment. 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, this 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 uniform distribution of the deformations, and significant hydrostatic stresses.

Analysis of the strain and stress states allows find that in the billet at the upsetting operation occurs the state with non-uniform compress stresses. Raising the degree of the compressive stresses in the internal and external parts can be obtained after upsetting of the shot billets ($H/D < 3.0$). Raising the deformation degree from till 0.45 provides to letdown factor of the stress state η from $-1,0$ to 0 . The upsetting till 0.7 raises this factor to $+1.5$. It was established that decreasing diameter of the conical faces leads to reduction the factor η . This factor has a more significant influence for welding of the internal cavities in the $-1.5...-0.6$ at upsetting operation with the comparative diameter of the conical faces of the 0.5.

Upsetting of the toll billets leads to the reduction degree of logarithmic strains and reduction equability of the localization. Obtained geometrical parameters of the billets with conical faces are able to be introduced in producing of the massive forged parts.

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

Fig.: 5. References: 16.