

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**ЗЛИГОРЄВ ВІТАЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.735.3-416

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
КУВАННЯ КРУПНИХ ПОКОВОК НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ  
СПОСОБУ ОСАДЖЕННЯ ПРОФІЛЬОВАНИХ ЗАГОТОВОК**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА, м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Марков Олег Євгенійович**,  
Донбаська державна машинобудівна академія  
(м. Краматорськ), завідувач кафедри «Механіка  
пластичного формування»;

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кухар Володимир Валентинович**,  
Державний вищий навчальний заклад  
«Приазовський державний технічний університет»  
(м. Маріуполь), завідувач кафедри «Обробка  
металів тиском»;

кандидат технічних наук, доцент  
**Чухліб Віталій Леонідович**,  
Національна металургійна академія України  
(м. Дніпро), доцент кафедри «Обробка металів  
тиском».

Захист відбудеться «02» грудня 2016 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 при Донбаській державній машинобудівній академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72).

Автореферат розісланий «01» листопада 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.01,  
кандидат технічних наук, доцент



Ю. К. Добронос

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У сучасних умовах для України важливо розвивати експортно-орієнтовані галузі промисловості. Значний обсяг експорту України забезпечує важке та енергетичне машинобудування. Конкурування на міжнародних ринках вимагає підвищення якості та зниження собівартості виробленої продукції. Всі деталі машин у важкому та енергетичному машинобудуванні відносяться до виробів відповідального призначення і виробляються способами гарячого пластичного деформування. Розміри і маса цих деталей вимагають їх виготовлення куванням. В якості заготовок для кування використовуються злитки. Ковальські злитки характеризуються низькою якістю, викликаною наявністю литої структури і дефектами металургійного походження (осьова рихлість). Для проробки литої структури і заковування осьової рихлості злитка крупні поковки відповідального призначення повинні виготовлятися з коефіцієнтом уковування більше 2,5...3,0. Заданий ступінь деформації литої заготовки можна забезпечити тільки із застосуванням операції осадження злитка. Однак в останніх роботах вітчизняних і зарубіжних вчених було встановлено, що операція осадження циліндричних заготовок не сприяє закриттю осьових дефектів ковальських злитків. Це пояснюється несприятливим деформованим станом в процесі осадження циліндричної заготовки. Радіальний плин металу при осадженні призводить до появи розтягуючих деформацій в осьовій зоні заготовки. Це, в свою чергу, призводить до появи внутрішніх розривів, які складно усунути подальшим куванням.

Виключити застосування операції осадження з усіх технологічних процесів кування не завжди можливо. Це обумовлено складністю отримання поковок з поперечним перерізом більшим, ніж переріз злитка, а також вимог замовника за коефіцієнтом уковування. Змінити напружено-деформований стан в процесі осадження можна за рахунок застосування заготовок спеціальної форми. Ця форма заготовок повинна забезпечувати появу стискаючих напружень і деформацій в дефектній осьовій зоні злитка для заковування пустот металургійного походження. Таким чином, до технологічного процесу кування повинна бути додана операція для профілювання ковальського злитка на спеціальний профіль. Профілювання злитка має забезпечувати таку форму заготовки, яка буде знижувати рівень розтягуючих напружень в осьовій зоні при осадженні.

У літературі відомі способи осадження заготовок з увігнутою бічною поверхнею. Увігнута бічна поверхня сприяє появі стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки, яку осаджують. Однак такий профіль заготовки операціями кування отримати складно, тому способи осадження заготовок з увігнутою бічною поверхнею не набули поширення в промисловості. У зв'язку з цим удосконалення технологічних процесів кування на основі застосування нового способу осадження профільованих заготовок для підвищення якості крупних поковок відповідального призначення за рахунок заковування осьових дефектів, запобігання утворенню поверхневих тріщин і підвищення проробки структури металу в об'ємі заготовки представляє значне наукове та практичне значення, що підтверджує актуальність теми дисертаційної роботи.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Результати роботи спрямовані на вирішення завдань, поставлених у Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року (рішення обласної Ради від 22.03.2002 р., номер 3 / 25-656). Дисертаційна робота виконана в рамках завдань, відповідних науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу закономірностей пластичного деформування» наукової школи кафедр «Обробка металів тиском» (ОМТ) і «Механіка пластичного формування» (МПФ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА). Робота виконана в рамках науково-дослідних робіт (НДР) ДДМА (№ держреєстрації 0115U004735, 0115U004736), а також в рамках НДР, які проводилися на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», при виконанні яких автор брав участь як виконавець.

**Мета й завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи – підвищення якості крупних поковок відповідального призначення за рахунок заковування осьових дефектів і підвищення проробки структури металу в об'ємі заготовки на основі застосування нового способу осадження профільованих заготовок.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і вирішені наступні завдання:

- провести аналіз основних показників якості крупних поковок відповідального призначення базових технологічних процесів кування й обґрунтувати напрямки подальшого їх удосконалення;
- розробити методику проведення теоретичних і експериментальних досліджень процесів профілювання і осадження чотирипроменевих заготовок;
- встановити вплив операції профілювання циліндричної заготовки на чотирипроменевий переріз з різними геометричними параметрами на напружено-деформований стан і заковування осьових дефектів на етапі профілювання, що дозволить спроектувати спеціальне ковальське оснащення;
- оцінити вплив геометрії чотирипроменевих заготовок на напружено-деформований стан і заковування осьових дефектів в процесі осадження профільованих заготовок, що дозволить встановити ефективну схему деформування;
- провести перевірку отриманих теоретичних результатів експериментальними дослідженнями зміни розмірів осьових дефектів при профілюванні і осадженні заготовок;
- розробити новий науково-обґрунтований спосіб осадження профільованих заготовок, який підвищує якість поковок відповідального призначення;
- на основі проведених комплексних теоретичних і експериментальних досліджень розробити технологічні та конструкторські рекомендації з проектування технологічних процесів кування за новими схемами деформування і інструменту для профілювання злитків, розробити методику для проектування процесів профілювання і осадження заготовок, яка дозволить підвищити якість одержаних поковок;
- провести промислову апробацію нових технологічних процесів із застосуванням осадження чотирипроменевих заготовок і впровадити їх у виробництво.

**Об'єкт дослідження.** Технологічні процеси кування крупних поковок.

**Предмет дослідження.** Параметри напружено-деформованого стану, закономірності зміни розмірів осьових дефектів в процесі профілювання та осадження чотирипроменевих заготовок, а також геометрія деформуєчого інструменту.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану заготовки та закриття осьових дефектів проводилися з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Перевірка достовірності отриманих теоретичних результатів проводилася експериментальними дослідженнями в лабораторних і виробничих умовах. Експериментальні дослідження базувалися на законах подібності і моделювання процесів гарячого пластичного деформування на свинцевих і сталевих зразках. Обробка результатів досліджень проводилася з використанням методів статистики. Достовірність встановлених наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечена використанням сучасних методів моделювання, підтверджена експериментальними дослідженнями та промисловою апробацією.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше на основі метода скінчених елементів встановлені закономірності зміни розмірів осьового дефекту в процесі профілювання чотирипроменевих заготовок з різними глибинами, кутами та радіусами скруглень увігнутих граней, що дозволило встановити раціональну геометрію деформуєчого інструменту для інтенсифікації закриття осьового дефекту;

2. Вперше встановлені параметри напружено-деформованого стану в процесі осадження чотирипроменевої заготовки з різною глибиною і кутом увігнутих граней, що дозволило вибрати схему деформування, яка забезпечує високий рівень стискаючих напружень в осьовій дефектній зоні злитка;

3. Вперше встановлені закономірності зсуву точок осьової зони заготовки при профілюванні випуклими бойками і подальшого осадження, що дозволило розробити ефективний спосіб кування крупних злитків;

4. Одержали подальший розвиток уявлення про силові параметри процесу осадження профільованих на чотирипроменевий переріз заготовок, що дозволило уточнити розрахунки з вибору обладнання та режимів деформування.

**Практичну цінність** роботи представляють наступні її основні результати:

– запропоновано новий спосіб осадження чотирипроменевих заготовок, який підвищує якість крупних поковок відповідального призначення;

– розроблені технологічні рекомендації для проектування нових процесів кування з використанням операції осадження чотирипроменевих заготовок;

– розроблено методика проектування технологічних процесів кування крупних поковок із застосуванням операції профілювання і осадження чотирипроменевих заготовок, яка дозволяє визначити геометрію деформуєчого інструменту і режими кування для максимального заковування осьових дефектів;

– розроблена нова конструкція випуклих бойків з клиновим профілем, яка підвищує рівномірність проробки структури за рахунок рівномірного розподілу деформацій та збільшує рівень стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки при профілюванні та осадженні;

– спроектовано і впроваджено нові технологічні процеси кування крупних поковок із застосуванням операцій профілювання і осадження чотирипроменевих заготовок, які підвищили якість поковок.

Економічний ефект від впровадження нових технологічних процесів кування крупних поковок із застосуванням операції осадження чотирипроменевих заготовок на ПАТ «НКМЗ» з урахуванням пайової участі автора склав 1 875 873 грн. за рівнем цін 2015 р. Науково-дослідні результати дисертації використовуються в навчальному процесі кафедри ОМТ ДДМА при вивченні дисциплін «Технологія кування» і «Кування крупних поковок», а також при виконанні студентами курсових, дипломних проектів і магістерських робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні науково-практичні результати встановлені автором самостійно. При проведенні науково-дослідних робіт, результати яких опубліковані в співавторстві, автором поставлені завдання досліджень, виконано теоретичне дослідження, проведено аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень, сформульовано висновки і розроблені рекомендації для вдосконалення технологічних процесів кування крупних поковок. Автор брав участь у плануванні і проведенні експериментальних досліджень, а також у впровадженні результатів роботи у виробництво. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи, наукові й практичні результати доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): IV МНТК НКМЗ (Краматорськ, НКМЗ, 2005); XXI International Conference on Metallurgy and Materials «METAL 2012» (Brno, Czech Republic, 2012 р.); XVII МНТК, присвячена 80-річчю ПАТ «НКМЗ» «Досягнення й проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, НКМЗ, 2014); V МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвячена 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ (Київ: НТТУ «КПІ», 2014); ХІХ–ХІХ МНТК «Досягнення й проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2015–2016 рр.); VII МНТК «Ресурсозбереження й енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні й металургії» (Харків: НТУ ХПІ, 2015); IV МНТК молодих учених та студентів (Тернопіль, 2015); а також на щорічних наукових семінарах ДДМА (2015–2016 рр.) і об'єднаному науковому семінарі з ОМТ ДДМА (2016 р.).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 19 друкованих працях, з них 9 наукових статей у 9 спеціалізованих виданнях МОН України, 2 статті в закордонних виданнях, 1 монографія, 1 стаття в іншому виданні; 3 тези доповідей на МНТК. Нові технічні рішення захищені 3 патентами України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 12 додатків. Загальний об'єм роботи становить 201 сторінки, у тому числі основного тексту – 130 сторінок, 73 рисунків і 17 таблиць, список використаних джерел з 187 найменувань на 24 сторінках, додатки на 27 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надана загальна характеристика роботи, показана актуальність роботи, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і планами. Поставлено мету і завдання дослідження. Охарактеризована наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, їх апробація і впровадження, відзначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** розглянуті способи осадження злитків. Проаналізовано методи дослідження процесів кування крупних поковок. Виявлено шляхи подальшого вдосконалення способів осадження.

В останні роки кількість крупних поковок, виготовлених зі злитків, збільшується. Це, в першу чергу, пов'язано зі збільшенням кількості і потужності важких машин. Серед виробів заводів важкого машинобудування приблизно 72 % складають вали. Ці поковки застосовуються для отримання деталей прокатних валків, роторів та ін. Такі поковки відносяться до особливо відповідальних і до їх властивостей висуваються високі вимоги за ізотропністю механічних властивостей, внутрішньою структурою та ін.

Технологічні процеси кування крупних поковок передбачають застосування операції осадження для збільшення коефіцієнту уковування. При цьому високі коефіцієнти уковування не гарантують отримання стабільної високої якості одержуваних поковок. Характерним дефектом для кованих заготовок, що зазнають операцію осадження, є несучільність осьової зони поковки, яка визначається ультразвуковим контролем (УЗК). Причиною утворення осьової несучільності металу є операція осадження циліндричної заготовки. При осадженні циліндричної заготовки відбувається інтенсивний радіальний плин металу, що сприяє збільшенню розмірів осьової зони. Подальше протягування не забезпечує повного заковування осьових дефектів. В результаті при куванні валів брак з УЗК досягає 14 %. Розробка і проектування нових технологічних процесів кування спрямовані на пошук раціональних способів осадження для підвищення суцільності металу поковки.

Удосконаленням технологічних процесів кування займалися такі провідні вітчизняні та зарубіжні вчені: Ю. М. Антощенко, Л. П. Белова, В. О. Дуринін, П. В. Камнєв, Б. С. Каргін, О. А. Кобелєв, В. П. Кривошеєв, В. В. Кухар, О. Є. Марков, Я. М. Охріменко, Г. А. Піменов, Л. М. Соколов, І. Я. Тарновський, В. М. Трубін, В. О. Тюрін, В. Л. Чухліб, W. V. Bae, J. R. Cho, Y. D. Kim, C. Labergere, P. Lafon, F. Meng, M. Nakasaki, I. Takasu та інші.

Відомі в літературі тенденції розвитку металургійного виробництва спрямовані на розробку нових технологічних процесів кування крупних поковок, які гарантують отримання високої якості з низькою собівартістю. В процесі осадження для заварювання внутрішніх дефектів злитка в осьовій зоні необхідно забезпечити стан нерівномірного всебічного стискання.

У літературі відомі роботи, в яких пропонується виключити операцію осадження з технологічного циклу кування крупних поковок. Для цього С. Б. Каргін пропонує перед протягуванням робити обтискання злитка на трипроменевий переріз комбінованими бойками з циліндричними виступами.

Пропонований спосіб підвищує рівномірність проробки структури та заковування осьових дефектів. Однак, виключення операції осадження не дозволяє отримувати поковки з поперечним перерізом більшим, ніж переріз злитка.

Отримання заданих розмірів поковок без осадження можливе за рахунок кування укорочених злитків плоскими бойками із застосуванням проміжного профілювання випуклими бойками, як це було запропоновано О. Є. Марковим. Однак, виключення осадження за цим способом не дозволяє забезпечити вимоги замовника за коефіцієнтом уковування. Більш того, застосування нових укорочених злитків ( $H/D < 1,0$ ) зі спрямованою кристалізацією вимагає переоснащення існуючого на заводах важкого машинобудування парку виливниць.

Аналіз літературного огляду дозволив встановити, що застосування процесів кування крупних поковок з осадженням злитка не гарантують отримання необхідної якості одержуваних поковок за результатами УЗК, навіть при високих коефіцієнтах уковування, за рахунок неповного заковування осьових дефектів злитків. Один з напрямків вдосконалення технологічних процесів кування – профілювання заготовки перед осадженням. Профілювання заготовки дозволить змінити напружено-деформований стан (НДС) заготовки в процесі осадження з метою інтенсифікації заковування осьових дефектів злитка. Однак, в літературі немає даних про НДС і закриття порожнин в процесі осадження профільованих заготовок. Зміна форми заготовки перед осадженням є перспективним напрямком зниження рівня розтягуючих напружень в процесі осадження, що буде сприяти підвищенню якості крупних поковок за рахунок заковування внутрішніх дефектів злитків. На сьогоднішній день немає рекомендацій з геометричних параметрів профільованої заготовки перед осадженням, які б дозволили інтенсифікувати ступінь заковування осьових дефектів і підвищити рівномірність проробки структури металу. Ця обставина вимагає проведення спеціальних досліджень для встановлення впливу форми заготовки на закриття осьових дефектів в процесі осадження крупних заготовок. На основі літературного обзору були поставлені мета та задачі дослідження.

У **другому розділі** розроблена техніка проведення теоретичних і експериментальних досліджень процесів профілювання й осадження чотирипроменевих заготовок. Удосконалено методику дослідження зміни розмірів осьового дефекту в процесі профілювання та осадження заготовок. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень необхідно встановити ефективну геометрію профільованої заготовки, яка після осадження дозволить закувати осьову рихлість злитка.

Теоретичні дослідження проводилися з використанням скінчено-елементного аналізу. Дослідження було розділено на два етапи: встановлення впливу процесу профілювання випуклими бойками (радіусними та з клиновим профілем) на НДС заготовки; визначення НДС заготовки в процесі осадження профільованих чотирипроменевих заготовок. Досліджувалися такі співвідношення розмірів діаметрів виступів інструменту відносно діаметра заготовки  $D/D_{\text{заг}} = 0,25; 0,5; 1,0$ . Додатково моделювалися способи



профілювання випуклими бойками клинової форми, кут  $100^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  і  $180^\circ$  (плоскі бойки). Ступінь обтиснення заготовки при профілюванні становив 15 ... 25 %. Вихідні дані для моделювання: температура нагріву заготовки –  $1200^\circ\text{C}$ , температура бойків –  $20^\circ\text{C}$ , коефіцієнт тертя між бойками і заготовкою становив 0,35. Матеріал заготовки 34ХНМ, швидкість руху інструменту – 20 мм / сек. Діаметр заготовок дорівнював  $D = 1000$  мм. Кількість елементів, на які розбита заготовка, становила 62 000. Осьова пористість злитка моделювалася осьовим отвором з боку прибуткової частини, діаметр якого становив 10 % від діаметра заготовки з глибиною проникнення в тіло злитка на 75 %.

Теоретично досліджено механізм зміни розмірів осьового дефекту при осадженні чотирипроменевої заготовки. Результатами розрахунку є розподіл деформацій і середніх напружень в тілі заготовки, а також зміна форми і розмірів осьового дефекту в процесі осадження. Заготовка для теоретичних досліджень мала діаметр осьового штучного дефекту  $d_{0\text{деф}} = 0,1D$ , який моделює максимально можливий осьовий дефект в злитках. Перед осадженням заготовка мала увігнуті грані з кутом  $\alpha$ , рівним  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  (рис. 1). Відносна глибина увігнутих граней заготовки ( $d / D$ ) варіювалася в межах 0,75; 0,80; 0,85.

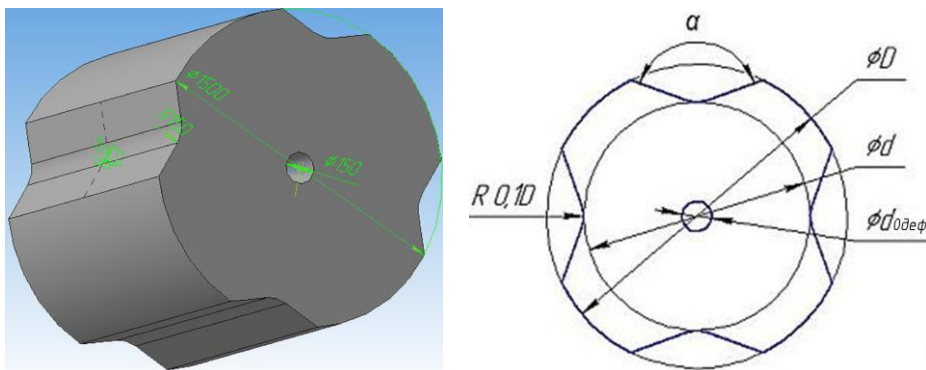


Рисунок 1 – 3D модель та поперечний переріз чотирипроменевої заготовки

Для визначення розмірів осьового дефекту в процесі осадження чотирипроменевої заготовки на внутрішній поверхні дефекту були розставлені 13 контрольних точок від торця заготовки до лінії горизонтальної симетрії. Координати даних точок після осадження є вихідними значеннями для подальшого розрахунку середнього об'єму дефекту. НДС заготовки визначався після осадження її на 50 %. Показник напруженого стану

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

де  $\sigma_{cp}$  – середні напруження, МПа;

$\sigma_i$  – інтенсивність напружень, МПа.

Метою експериментальних досліджень процесів профілювання та осадження була перевірка результатів теоретичних досліджень та можливості

використання запропонованої технологічної схеми, отриманої на підставі теоретичних досліджень. Крім того, результати даних експериментальних досліджень будуть використані для оцінки ефективності запропонованих технічних рішень і розроблених практичних рекомендацій. Для проведення експериментальних досліджень були відлиті свинцеві заготовки циліндричної форми діаметром 50 мм і висотою 75 мм. В процесі профілювання замірявся поперечний переріз імітованого дефекту. Відносне обтиснення на обидві сторони становило 20 %.

Була удосконалена методика неруйнівного контролю вимірювання розмірів осьового дефекту для комплексної оцінки впливу процесів профілювання і осадження чотирипроменевих свинцевих заготовок на закриття внутрішніх порожнин. Після профілювання випуклими бойками отриманні заготовки осаджували плоскими плитами на ступінь деформації 50 % з поетапним фіксуванням (кожні 5 мм) зміни об'єму дефекту. Для порівняння механізму заковування осьового дефекту за новим способом осадження чотирипроменевих заготовок проводилося додаткове дослідження процесу осадження циліндричної заготовки. Діаметри і висота заготовок, а також механічні режими деформування були ідентичні для можливості порівняння отриманих результатів.

Перевірка достовірності отриманих результатів механізму заковування дефекту на свинцевих зразках проводилася перевірочним експериментом на моделях зі сталі 34ХНМ і 70Х3ГНМФ (рис. 2, а). Осьова рихлість злитка моделювалася отвором діаметром 4 мм на 3/4 довжини заготовки. Ступінь деформації при профілюванні заготовки становив 20 %. Зразки нагрівалися в електричній печі до температури 1200 °С і профілювалися випуклими бойками з клиновим профілем (рис. 2, б), після чого проводилося осадження профільованих заготовок плоскими плитами. Після деформування в місці свердління робили розріз заготовки для проведення металографічних досліджень, щоб виявити ступінь заковування осьового дефекту.



Рисунок 2 – Сталеві заготовки (а) та деформуючий інструмент (б)

У **третьому розділі** досліджено вплив геометричних параметрів чотирипроменевих заготовок на НДС заготовки і заковування осьового дефекту в процесі профілювання й осадження.

На першому етапі було визначено НДС в процесі профілювання циліндричної заготовки випуклими радіусними бойками; на другому етапі – визначено НДС в процесі профілювання циліндричної заготовки випуклими бойками з клиновим профілем. Додатково досліджувався механізм заковування осьового дефекту для нових способів кування.

*Профілювання випуклими радіусними бойками з діаметром виступу  $D = D_{\text{сaa}}/4$ .* Було встановлено, що після обтискання випуклими радіусними бойками на ступінь  $\varepsilon = 25\%$  закриття осьового дефекту відбувається приблизно на 50%. Нерівномірність розподілу логарифмічних деформацій в цьому випадку становить  $\Delta\varepsilon = 1,47$ . Середні напруження в місці розташування осьового дефекту та периферійних шарах – розтягуючі ( $\sigma_{\text{срп}} = 10$  МПа,  $\sigma_{\text{срп}} = 25$  МПа, відповідно).

*Профілювання випуклими радіусними бойками з діаметром виступу  $D = D_{\text{сaa}}/2$ .* Збільшення діаметра виступу бойків незначно підвищує нерівномірність розподілу деформацій за перерізом профільованої заготовки  $\Delta\varepsilon = 1,55$ . Середні напруження в центральній зоні – стискаючі ( $\sigma_{\text{срп}} = -26$  МПа), на периферії – розтягуючі ( $\sigma_{\text{срп}} = 22$  МПа).

*Профілювання випуклими радіусними бойками з діаметром виступу  $D = D_{\text{сaa}}$ .* Подальше збільшення діаметра виступу інструменту призводить до збільшення нерівномірності розподілу інтенсивності деформацій в тілі заготовки  $\Delta\varepsilon = 2,45$ . Це пояснюється збільшенням зони ускладненої деформації під верхнім випуклим бойком за рахунок збільшення площі контакту заготовки і інструменту і, відповідно, локалізацією максимальних деформацій в осьовій зоні. При цьому підвищується рівень стискаючих напружень в осьовій зоні  $\sigma_{\text{срп}} = -45$  МПа, з одночасним зменшенням розтягуючих напружень в периферійних шарах чотирипроменевої заготовки  $\sigma_{\text{срп}} = 7$  МПа.

*Профілювання випуклими бойками з клиновим профілем  $\alpha = 100^\circ$ .* Було встановлено, що цей кут бойків не забезпечує достатнього рівня локалізації деформацій в області розташування осьового дефекту для його закриття. Для цієї схеми деформування також характерно низьке значення показника жорсткості схеми напруженого стану в осьовій зоні, який становить  $P\sigma \approx -1,5$ .

*Профілювання випуклими бойками з клиновим профілем  $\alpha = 120^\circ$ .* В цьому випадку відбувається зниження нерівномірності розподілу деформацій ( $\Delta\varepsilon \approx 1,75$ ). При цьому максимальні деформації локалізуються в місці розташування осьового дефекту. Для цієї схеми деформування показник жорсткості схеми НС становить  $P\sigma \approx -1,8$ . Даний НДС призводить до повного закриття осьового дефекту на всій його довжині після обтискання циліндричної заготовки на 35%.

*Профілювання плоскими бойками  $\alpha = 180^\circ$ .* Отримані результати з НДС дозволили встановити, що схема характеризується високою нерівномірністю розподілу деформацій в об'ємі заготовки ( $\Delta\varepsilon \approx 2,75$ ). Максимальні деформації локалізуються в центральній осьовій зоні заготовки з рівнем  $\approx 3,0$ . Показник жорсткості схеми напруженого стану  $P\sigma \approx -2,1$ .

*Напружено-деформований стан заготовки і заковування осьового дефекту в процесі осадження чотирипроменевих заготовок.* Проведені вище дослідження дозволили встановити, що раціональною геометрією інструменту для профілювання є випуклі бойки з клиновим профілем, які мають радіус округлення, рівний приблизно половині радіуса заготовки. На НДС в процесі осадження профільованої заготовки також впливає глибина увігнутих граней. У дослідженні варіювалася відносна глибина увігнутих граней  $d/D$  в діапазоні 0,75; 0,80; 0,85 (див. рис. 1).

На підставі аналізу отриманих результатів був зроблений висновок, що інтенсивність закриття дефекту вище при осадженні заготовок профільованих бойками з кутами  $120^\circ$  при глибині увігнутих граней  $d/D = 0,8 \dots 0,85$ . Кількісне порівняння ступеня закриття осьового дефекту після осадження на 50 % профільованих заготовок з різною глибиною увігнутих граней і їх кутом представлено на рисунку 3. Середній діаметр осьового дефекту, розрахований через його об'єм і висоту осадженої заготовки залежить від глибини увігнутих граней чотирипроменевої заготовки. Глибина увігнутих граней більше 20 % ( $d/D = 0,75$ ) не сприяє заковуванню осьових дефектів заготовки в процесі осадження (див. рис. 3). Глибина увігнутих граней заготовки  $d/D$  чинить більший вплив на закриття дефекту. Це пояснюється зменшенням підпору увігнутих граней при наближенні форми заготовки до призматичної. Для кута  $120^\circ$  зі збільшенням глибини увігнутих граней ступінь закриття дефекту збільшується (див. рис. 3, крива 1). Ефективна геометрія чотирипроменевої заготовки з точки зору заковування осьових дефектів при осадженні – глибина увігнутих граней  $d/D = 0,8 \dots 0,85$  і кут  $\alpha = 120^\circ$ .

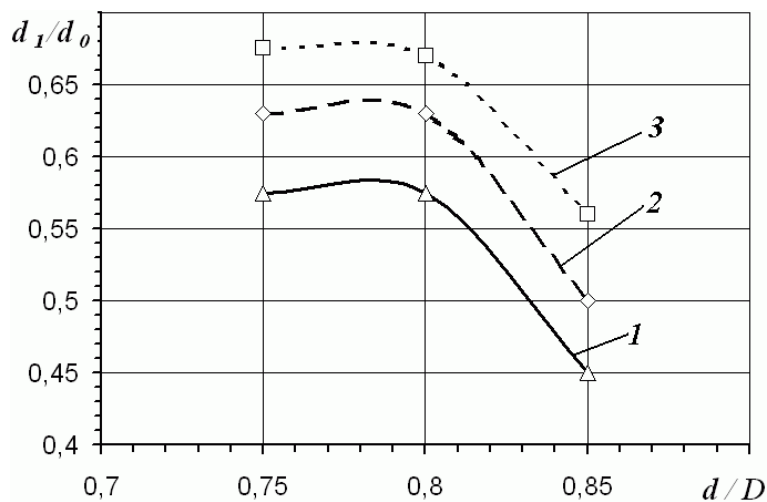


Рисунок 3 – Зміна відносного діаметра дефекту після осадження на 50 % в залежності від глибини увігнутих граней ( $d/D$ ) для різних кутів ( $\alpha$ ):  
 1 –  $\alpha = 120^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 150^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 180^\circ$

Осадження профільованих заготовок з увігнутим поперечним перерізом призводить до зміни напруженого стану металу заготовки в осьовій зоні. Максимальні стискаючі напруження ( $\sigma_{cp} = -70$  МПа) виникають в місці розташування дефекту при кутах  $\alpha$ , рівних  $120^\circ$  і глибині увігнутих граней 15 %.

Збільшення кута увігнутих граней і їх глибини сприяють зниженню рівня стискаючих середніх напружень.

Загальною закономірністю процесу осадження заготовок з увігнутим поперечним перерізом є збільшення рівня стискаючих напружень в осевій зоні при збільшенні ступеня деформації. Заготовка з параметрами  $d/D = 0,85$  і  $\alpha = 120^\circ$  має максимальний показник жорсткості схеми напруженого стану ( $P\sigma = -9,4$ ) при ступені осадження  $\varepsilon = 50\%$ . Зменшення показника  $P\sigma$  прямо пропорційно зменшенню кута увігнутих граней від  $180^\circ$  до  $120^\circ$  і зменшення глибини граней  $d/D$ .

Новий технологічний процес кування передбачає послідовне застосування операцій профілювання і осадження, що в комплексі впливає на НДС в тілі заготовки і заковування осевого дефекту. Для визначення спільного впливу операцій профілювання і осадження чотирипроменевої заготовки були досліджені три кути клина випуклих бойків  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  і  $180^\circ$  (плоскі бойки). Після профілювання на чотирипроменеву заготовку (рис. 4, а) і осадження її на 50% (рис. 4, б) був встановлений зсув 3-х обраних точок по висоті заготовки (P1, P2, P3) відносно її осі, щоб оцінити ступінь розкриття або закриття осевих дефектів при куванні за новою технологією. Досліджувані точки розставляли від осі на відстані 5% від радіуса заготовки. Це дозволило промоделювати максимальні розміри осевої рихлості злитка.

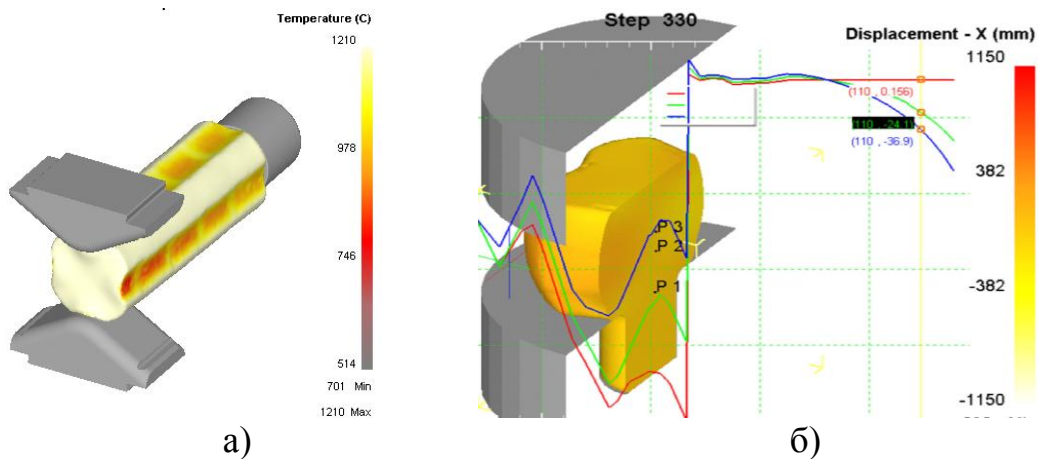


Рисунок 4 – Скінчено-елементна модель профілювання чотирипроменевої заготовки (а) та її осадження з полем зсуву точок вздовж осі  $X$  (б)

Після узагальнення отриманих результатів були встановлені кількісні показники зсуву осевих точок заготовки для різних кутів увігнутих граней і ступенів обтиснень (рис. 5, а). Для універсальності отриманих результатів поточний абсолютний зсув точок було віднесено до їх вихідного положення ( $d_1/d_0$ ). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що мінімальний зсув точок від осі заготовки (максимальне закриття осевої рихлості) забезпечує схема осадження чотирипроменевої заготовки, яка була попередньо профільована бойками з кутом  $120^\circ$  на глибину 10% (рис. 5, а, крива 3). Отримані результати пояснюються впливом на зсув точок осевої зони підпором увігнутих граней заготовки.

Була встановлена закономірність зміни показника жорсткості схеми напруженого стану після осадження профільованої заготовки в залежності від різних ступенів обтиснень при профілюванні і кутів випуклих бойків (рис. 5, б). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що збільшення глибини увігнутих граней і кутів практично прямо пропорційно зменшує показник жорсткості схеми напруженого стану в осьовій зоні заготовки. Високий рівень стискаючих напружень забезпечує осадження чотирипроменевих заготовок з глибиною увігнутих граней 10 % від діаметра вихідної заготовки і кутом увігнутих граней  $120^\circ$ .

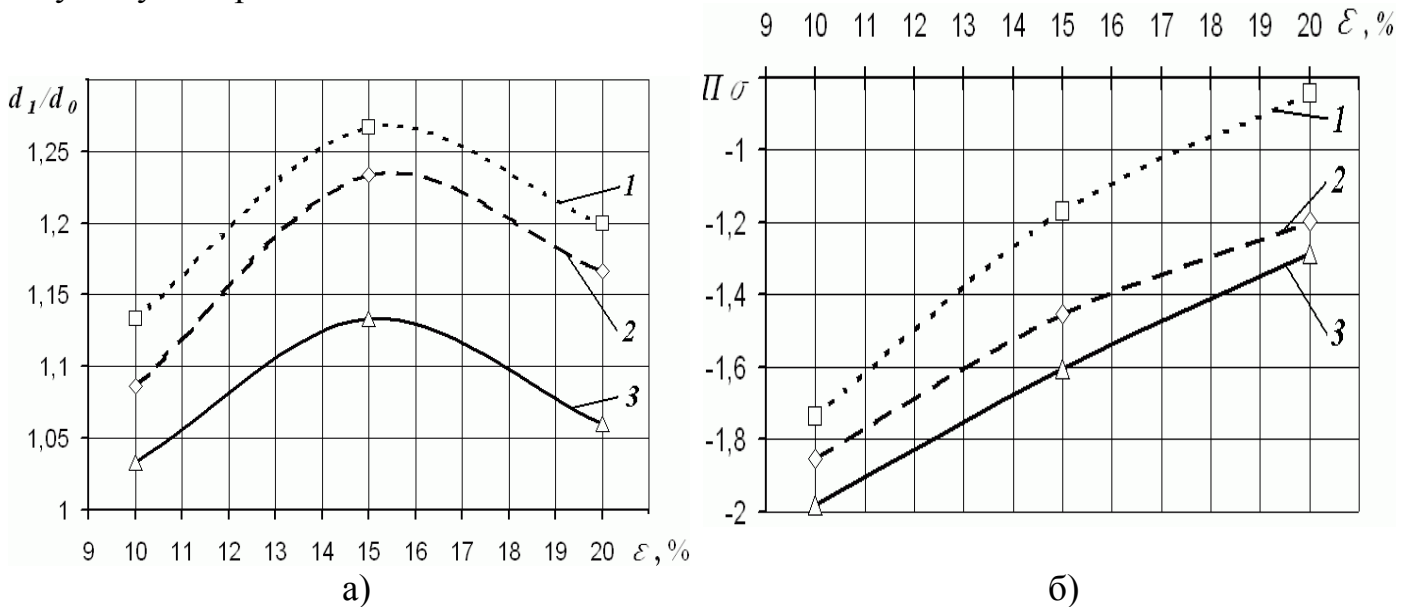


Рисунок 5 – Відносний зсув точок (а) і показник жорсткості схеми напруженого стану осової зони злитка (б) в процесі профілювання та подальшого осадження в залежності від обтиснення та кута увігнутих граней:  $180^\circ$  (1);  $150^\circ$  (2) и  $120^\circ$  (3)

Для досліджуваних профілів чотирипроменевих заготовок були встановлені закономірності впливу кутів клину бойків і ступенів обтиснень при профілюванні на силу осадження (рис. 6).

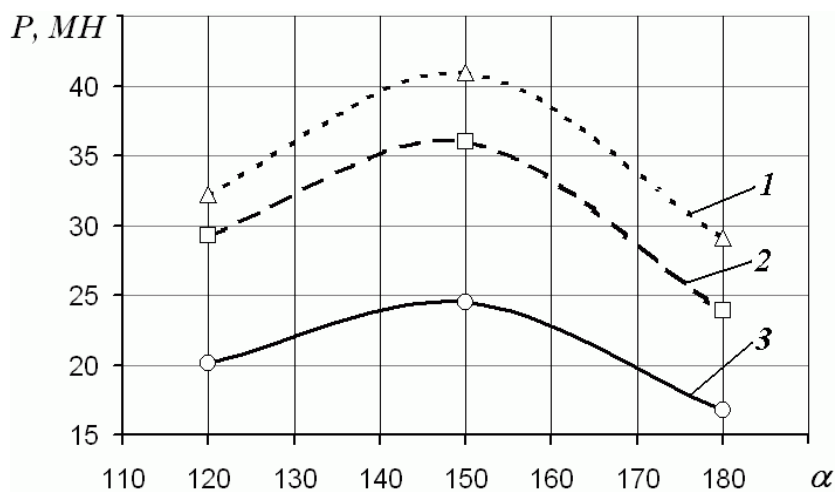


Рисунок 6 – Сила осадження ( $\varepsilon = 50\%$ ) чотирипроменевих заготовок в залежності від кута та глибини увігнутих граней: 10 % (1); 15 % (2) и 20 % (3)

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що формування увігнутих граней підвищує силу деформування. Це пояснюється тим, що при осадженні заготовок з увігнутими гранями відбувається підпір течії металу в радіальному напрямку, що збільшує показники напруженого стану в осьовій зоні заготовки. Зі збільшенням глибини увігнутих граней при профілюванні сила осадження знижується (див. рис. 6, криві 2 та 3), що пояснюється зменшенням площі поперечного перерізу заготовки при збільшенні ступеня обтиснення. Отримані закономірності мають максимум при куті увігнутих граней  $150^\circ$ .

У **четвертому розділі** виконані експериментальні дослідження впливу профілю чотирипроменевої заготовки на її деформований стан і ступінь закриття осьових дефектів в процесі профілювання і осадження. Були порівняні результати теоретичних й експериментальних даних на свинцевих і сталевих зразках.

Експериментальні дослідження деформованого стану та закриття осьового дефекту проводилися на моделях. З одного торця заготовки наносилася квадратна координатна сітка з кроком 3,0 мм, а з протилежного – осьовий отвір діаметром 5,0 мм, який моделював осьову рихлість злитка. У процесі дослідження встановлювався вплив на деформований стан заготовки і ступінь заковування осьового дефекту наступних параметрів: кут випуклих бойків ( $\alpha = 120^\circ$  і  $150^\circ$ ) і ступінь обтиснення ( $\varepsilon = 20\%$ ). Отримані деформовані сітки на етапі профілювання заготовки випуклими бойками свідчать про рівномірну деформацію в центральних і периферійних шарах (рис. 7). Це пояснюється зменшенням розмірів непродформованої зони під інструментом (як у випадку протягання плоскими бойками).

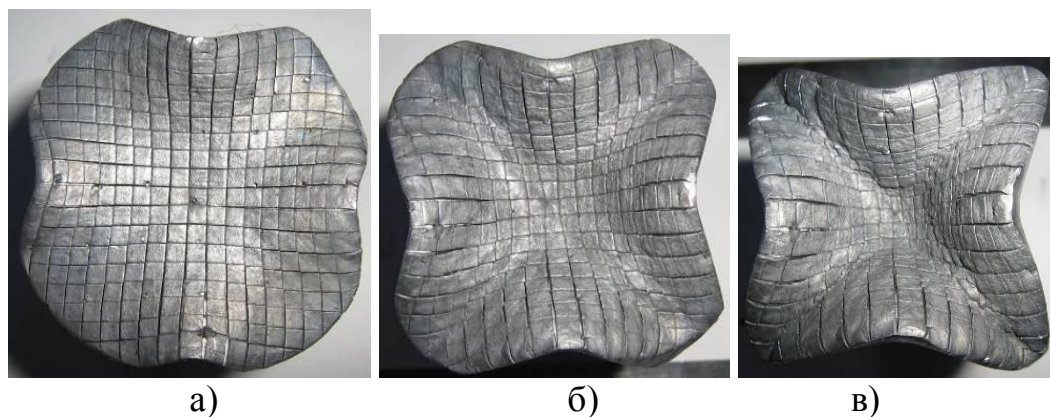


Рисунок 7 – Координатні сітки, отримані після обтискання свинцевих заготовок бойками з кутом  $120^\circ$  на різний ступінь деформації: а – 10 %; б – 15 %; в – 20 %

Дослідження зміни розмірів осьового отвору при профілюванні випуклими бойками дозволили встановити, що обтиснення бойками з кутом  $120^\circ$  сприяє інтенсивному закриттю осьових дефектів (рис. 8). Кількісна оцінка ступеня закриття осьового дефекту при профілюванні бойками з різними кутами для ступенів обтиснення, рівних 10 %; 15 % і 20 %, представлена на рисунку 9. При профілюванні циліндричної заготовки випуклими бойками з різними кутами і ступенем обтиснення 10 % не відбувається повного закриття дефекту (див. рис. 9,

крива 1). Ступінь обтиснення 20 % при куті  $120^\circ$  забезпечує максимально можливе закриття дефекту для розглянутих схем профілювання (див. рис. 9, крива 3). Це пояснюється збільшенням рівня стискають напружень при формуванні глибоких увігнутих граней з більш гострими кутами. У зв'язку з цим, кут  $120^\circ$  є ефективним при профілюванні заготовки на чотирипроменевий переріз для заковування осьових дефектів. Отримані результати щодо закриття осьових дефектів при профілювання відповідають теоретичним даним.

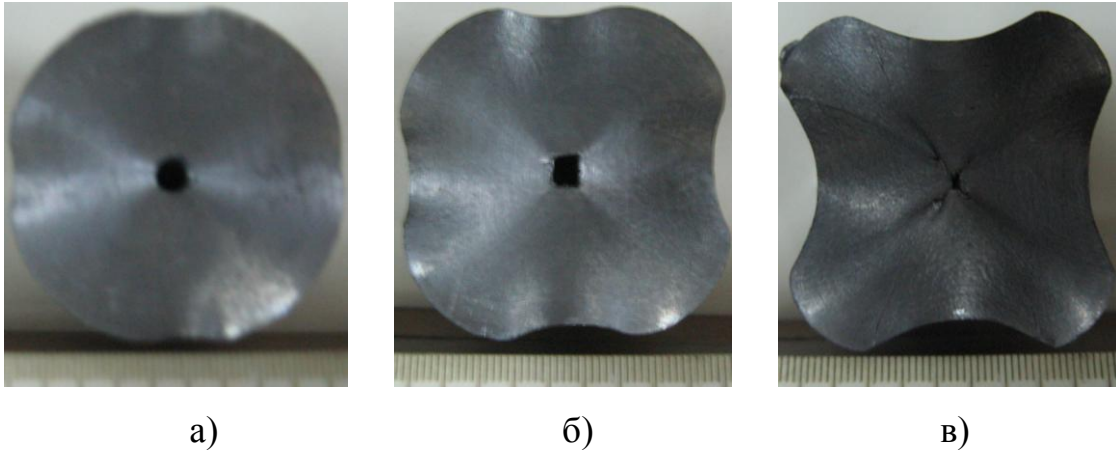


Рисунок 8 – Форма осьового дефекту після профілювання на різний ступінь обтиснення: а – 10 %; б – 15 %; в – 20 % випуклими бойками з кутом  $120^\circ$

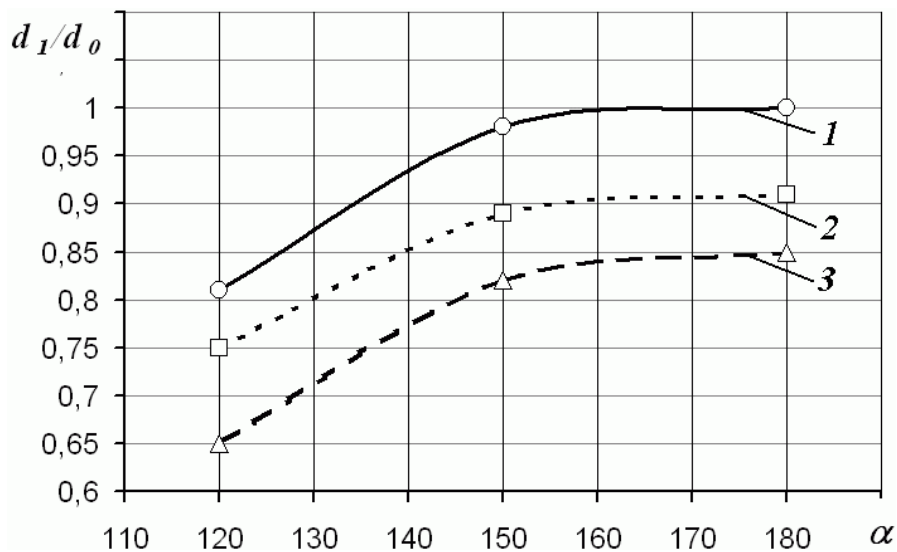


Рисунок 9 – Відносний діаметр дефекту після профілювання бойками з різними кутами і ступенем обтиснення: 1 – 10 %; 2 – 15 %; 3 – 20 %

Аналіз результатів дослідження силових параметрів профілювання випуклими бойками (рис. 10) дозволив зробити висновок, що при збільшенні кута випуклих бойків і ступеня деформації зростає сила при профілюванні на чотирипроменевий переріз. Це пояснюється збільшенням площі контакту заготовки з інструментом при збільшенні ступеня обтиснення ( $\epsilon$ ) циліндричної заготовки випуклими бойками. Збільшення кута випуклості бойків до  $180^\circ$  сприяє значному збільшенню сили профілювання зі збільшенням обтиснення.



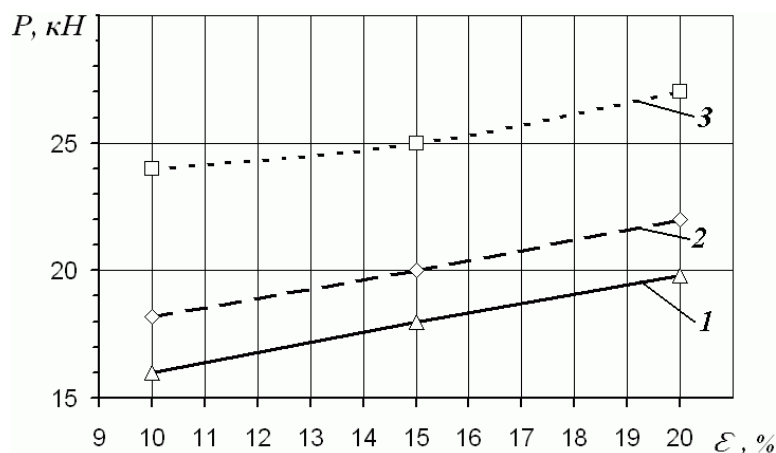


Рисунок 10 – Сила деформування при профілюванні на чотирипроменевий переріз при різних ступенях обтиснення та кутах бойків: 120 ° (1); 150 ° (2) и 180 ° (3)

Результати дослідження ступеня закриття осьових дефектів в процесі осадження свинцевих заготовок циліндричної форми та з чотирипроменевим перерізом представлені на рисунку 11. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що при осадженні циліндричної заготовки на 30 % діаметр штучного осьового дефекту збільшується на 5 % (див. рис. 11, крива 1). Подальше осадження на 60 % сприяє зменшенню розмірів осьового дефекту на 25 ... 30 %. Отримані результати підтверджують низьку ефективність процесу осадження циліндричних заготовок. Осадження профілюваних заготовок на чотирипроменевий переріз випуклими бойками з кутом 150 ° зі ступенем обтиснення 20 % збільшує інтенсивність заковування осьового дефекту, у порівнянні з осадженням циліндричних заготовок (див. рис. 11, крива 2). Зменшення кута клину випуклих бойків (до 140 ° і 120 °) сприяє збільшенню ступеня заковування осьового дефекту в процесі осадження (рис. 11, криві 3 і 4).

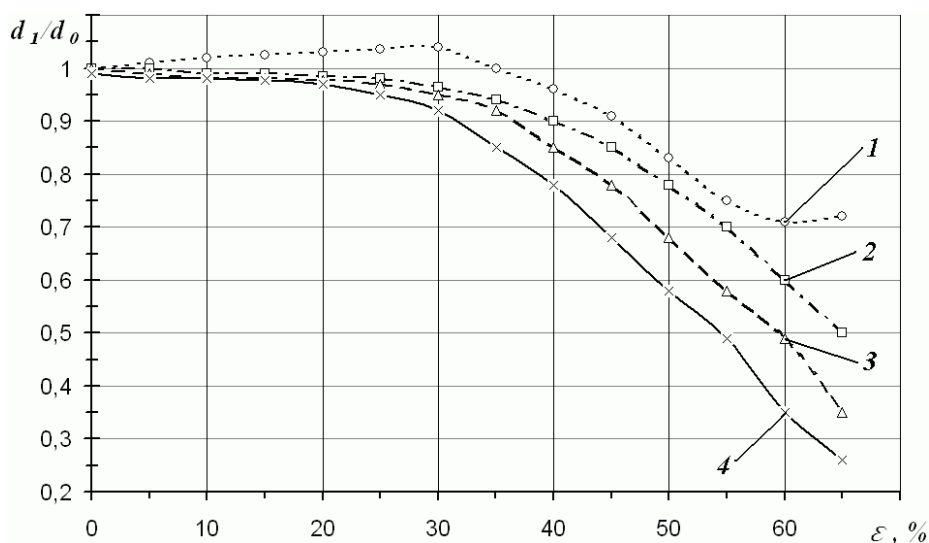
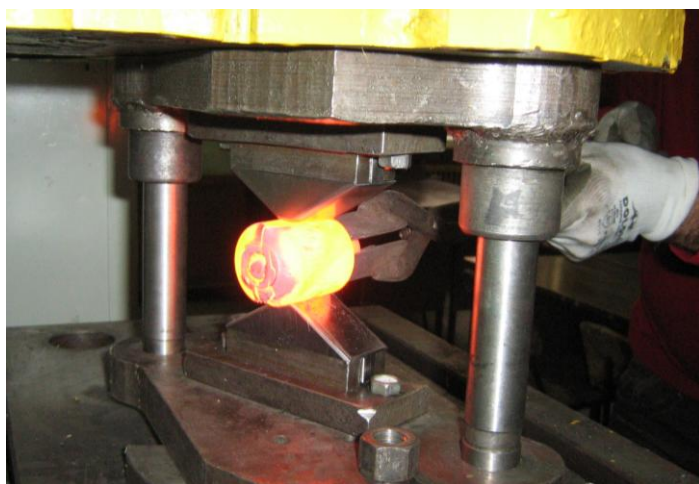


Рисунок 11 – Зміна розмірів осьового дефекту в процесі осадження циліндричної заготовки (1) і чотирипроменевої заготовки з кутами увігнутих граней 150 °, 140 ° и 120 ° (криві 2, 3 и 4, відповідно)

Осадження чотирипроменевих заготовок більш ніж на 50 % сприяє інтенсивному закриттю осьового дефекту при куті увігнутих граней  $120^\circ$  (див. рис. 11, крива 4). Це пояснюється підвищенням рівня стискаючих напружень у центральній зоні заготовки, як це було встановлено в теоретичному дослідженні. Отримані результати дозволили зробити висновок, що інтенсивне закриття осьового дефекту в процесі осадження чотирипроменевої заготовки відбувається при деформації  $\epsilon > 25\%$  (див. рис. 11, крива 4). Після осадження на 60 % середній діаметр дефекту зменшується на 65 %. Порівняння механізмів закриття осьового дефекту в процесі осадження циліндричних і чотирипроменевих заготовок дозволяє зробити висновок, що при осадженні чотирипроменевих заготовок інтенсивність заковування осьового дефекту вище, що підтверджує ефективність запропонованого нового способу осадження. Ефективний кут випуклих бойків при профілюванні циліндричної заготовки –  $120^\circ$ , обтиснення при профілюванні – 20 %.

Отримані результати перевірялися дослідженнями на сталевих зразках (сталь 34ХНМ і 70Х3ГНМФ). Деформувалися заготовки з різним співвідношенням  $H/D = 1,5; 2,0; 2,5$ . Після нагрівання заготовок до температури  $1200^\circ$  проводилося їх профілювання випуклими бойками (рис. 12, а) з кутом  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  і  $180^\circ$  (плоскі бойки) з сумарним обтисненням за два проходи 20 %. Після профілювання заготовки осаджувалися на 50 % (рис. 12, б).



а)



б)

Рисунок 12 – Процес профілювання сталевих заготовок на чотирьохпроменевий переріз (а) та їх подальше осадження на 50 % (б)

Після шліфування й полірування площин зрізу проводилося дослідження залишків осьового дефекту після кування за новим способом. В результаті досліджень було встановлено, що кут увігнутих граней  $120^\circ$  в процесі осадження заготовок забезпечує повне заковування осьових дефектів (рис. 13, а). При профілюванні заготовок випуклими бойками з кутами  $150^\circ$  та  $180^\circ$  та їх подальшому осадженні не відбувається повного заварювання осьового дефекту (рис. 13, б, в). Аналогічні результати характерні для осадження циліндричних заготовок без профілювання (рис. 13, г).

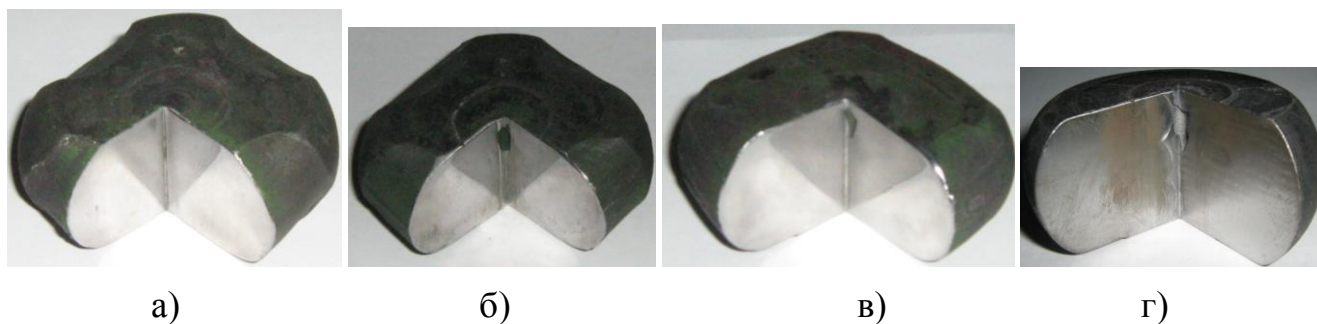


Рисунок 13 – Осьовий дефект після осадження на 50 % профільованих заготовок з різними кутами увігнутих граней: 120 ° (а); 150 ° (б); 180 ° (в) та циліндричної (г)

У **п'ятому розділі** на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень були розроблені рекомендації з удосконалення технологічних процесів кування крупних поковок відповідального призначення. Розроблені рекомендації потребували їх підтвердження на натурних сталевих заготовках.

Були проведені дослідження нових технологічних процесів кування опорних валків зі сталі 70ХЗГНМФ в умовах ковальсько-пресового цеху ПАТ «НКМЗ». Експериментальні дослідження проводилися на виробничих замовленнях, згідно яких за новою і базовою технологіями були виготовлені по 3 поковки. Поковки виготовлялися зі злитків масою 57 400 кг, що забезпечувало умови фізичної та хімічної подібності проведених досліджень. Відмінність нового технологічного процесу полягала в застосуванні операції профілювання заготовки двома випуклими бойками з обтисненням 300 мм (20 % від діаметра) до отримання чотирипроменевої заготовки з відстанню між увігнутими гранями 1 200 мм (рис. 14, а). Після профілювання проводилося осадження заготовки (рис. 14, б). Для нового технологічного процесу була знижена величина коефіцієнта уковування з 2,28 до 1,96 для бочки та з 25,0 до 21,5 для шийок валка.



а



б

Рисунок 14 – Процес профілювання випуклими боками (а) і осадження профільованої чотирипроменевої заготовки (б)

Додатково за новим технологічним процесом кування з профілюванням на чотирипроменеву заготовку та її подальшим осадженням було виготовлено куванням 22 поковки опорних валків. Отримані результати з УЗК перевірялися та порівнювалися з відповідними базовими технологічними процесами даних поковок, що виготовляються на ПАТ «НКМЗ». Аналіз результатів УЗК реалізованих технологічних процесів кування опорних валків із застосуванням профілювання і осадження чотирипроменевих заготовок дозволив зробити висновок, що в поковках осьових дефектів в бочці і шийках валка, які перевищують вимоги Європейського стандарту SEP 1921, не виявлено, на відміну від базового технологічного процесу. Отримані результати підтверджують позитивний вплив увігнутих граней профільованої заготовки на підвищення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні і заковування осьових дефектів в процесі осадження.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива науково-технічна задача з удосконалення технологічних процесів кування крупних поковок на основі використання способу осадження чотирипроменевих заготовок, що дозволило підвищити якість поковок відповідального призначення за рахунок заковування внутрішніх дефектів.

1. На основі літературного огляду було встановлено, що існуючі процеси кування поковок відповідального призначення не завжди відповідають вимогам замовника по УЗК. Один з напрямків удосконалення технологічних процесів кування є профілювання заготовки перед осадженням. У зв'язку з цим, були поставлені мета та задачі дослідження. Розроблені спеціальні методики моделювання процесів профілювання і осадження чотирипроменевих заготовок на основі МСЕ, а також методики дослідження на свинцевих та сталевих моделях з осьовим отвором, що моделюють осьову рихлість, для виявлення ефективної схеми деформування, яка забезпечує появу в осьовій зоні стискаючих напружень і заковування осьових дефектів.

2. На основі МСЕ було встановлено, що профілювання випуклими бойками з кутом  $120^\circ$  виключає утворення значних зон ускладненої деформації під інструментом, що сприяє проробленню поверхневих і центральних шарів заготовки. Встановлено, що схеми профілювання на чотирипроменевий переріз випуклими бойками з клиновим профілем підвищують рівень стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки, що сприяє закриттю осьового дефекту заготовки при обтисненні на 20 %.

3. Скінчено-елементні дослідження процесів осадження чотирипроменевих заготовок з різними кутами та глибинами увігнутих граней дозволили встановити, що осьовий дефект в процесі осадження закривається інтенсивніше при кутах увігнутих граней  $\alpha = 120^\circ \dots 150^\circ$  і глибині увігнутих граней  $d/D = 0,8 \dots 0,85$ . Рекомендований ступінь деформації, при якому буде відбуватися заковування осьових дефектів при осадженні, становить не менше 50 %.

4. Було встановлено, що осадження чотирипроменевих заготовок, які були попередньо отримані протягуванням випуклими бойками з кутом  $120^\circ$  на глибину 10 ... 20 %, забезпечує мінімальний зсув точок осьової зони заготовки.

Збільшення глибини та кута увігнутих граней практично прямо пропорційно зменшує жорсткість схеми напруженого стану в осьовій зоні заготовки.

5. Формування увігнутих граней при профілюванні циліндричної заготовки підвищує силу деформування. Зі збільшенням глибини увігнутих граней сила осадження знижується. Кут увігнутих граней у діапазоні  $145^\circ \dots 155^\circ$  забезпечує максимум сили осадження. Це дозволило виключити з рекомендацій цей кут бойків.

6. У результаті експериментальних досліджень на моделях була підтверджена раціональна геометрія випуклих бойків і механічні режими профілювання заготовки на чотирипроменевий переріз, а саме: кут випуклих бойків –  $120^\circ$ , обтиснення – 20 %. У процесі осадження чотирипроменевої заготовки інтенсивне закриття осьового дефекту відбувається при деформації більше 25 %. Після осадження на 60 % середній діаметр дефекту зменшується на 65 %. Дослідження на сталевих зразках дозволили зробити висновок, що профілювання випуклими бойками з кутом  $120^\circ$  та подальше осадження гарантує заковування осьових дефектів заготовки.

7. Розроблений новий спосіб та практичні рекомендації для профілювання злитків на чотирипроменевий переріз і подальше їх осадження. Спроектовано нову конструкцію випуклих бойків. Розроблені послідовність та методики складання нових технологічних процесів кування із застосуванням осадження чотирипроменевих заготовок. На ПАТ «НКМЗ» впроваджені нові технологічні процеси кування крупних поковок із застосуванням осадження чотирипроменевих заготовок. Розроблені нові технологічні процеси кування забезпечили підвищення якості крупних поковок і зниження браку з 14 % до 8 %. Механічні властивості деталей підвищилися в середньому на 8 ... 11 %. Економічний ефект від впровадження нових технологічних процесів кування крупних поковок на ПАТ «НКМЗ» з урахуванням часткової участі склав 1 875 873 грн. за рівнем цін на 2015 р. Результати досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри ОМТ ДДМА.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Применение способа осадки слитков кольцами в процессахковки валов / И. С. Алиев, О. Е. Марков, М. В. Олешко, В. Н. Злыгорев // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 94–98. – ISSN 2076-2115.

2. Внедрение энергосберегающего технологического процессаковки крупных слитков без осадки / О. Е. Марков, В. М. Олешко, В. Н. Злыгорев, И. А. Грачев // КШП. ОмД. – Москва, 2011. – № 10. – С. 33–36.

3. Markov O. Investigation of the New Technological Process of Forging Large Shafts without Upsetting / O. Markov, V. Oleshko, V. Zligorev // METAL 2012: Proceedings on CD-ROM. – Brno, Czech Republic, 2012. – ISBN 978-80-87294-29-1. Available on Web site : <http://www.metal2012.com>

4. Элементы штамповки в процессахковки крупных поковок / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, В. Н. Злыгорев, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 62–70.

5. Уменьшение металлоемкости сложнопрофилированных полых изделий получаемых ковкой / И. А. Грачев, В. Н. Злыгорев, Я. М. Чикота, Я. Г. Жбанков // Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2 (39). – С. 75–80.

6. Алиев И. С. Исследование процессовковки бойками выпуклой геометрии с интенсивными пластическими деформациями / И. С. Алиев, М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев / Вісник НТУУ КПІ. Секція машинобудування. – № 75 (2015). – С. 125–130.

7. Розподіл інтенсивності деформацій при куванні бойками з випуклим профілем / І. С. Алієв, М. О. Маркова, В. М. Злигорєв, Ю. О. Ячмінь // Вісник НТУ «ХП». Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 47 (1166). – С. 7–10.

8. Повышение качества крупных поковок за счет применения схемковки с интенсивными пластическими деформациями / О. Е. Марков, В. Н. Злыгорев, Н. А. Руденко, А. В. Коляденко // Научный вестник ДГМА. – 2015. – № 2 (17E). – С. 115–119. [www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/№2\(17E\)\\_2015/article/19](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(17E)_2015/article/19)

9. Формоизменение и напряженно-деформированное состояние заготовки при ковке с применением профилирования заготовки / О. Е. Марков, В. Н. Злыгорев, Н. А. Руденко, Ю. О. Ячмень // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2015. – № 3 (18E). – С. 213–219. – ISSN 2219-7869. [www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/№3\(18E\)\\_2015/article/31.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№3(18E)_2015/article/31.pdf)

10. Маркова М. А. Заковка отверстия при ковке бойками с выпуклым рабочим профилем / М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев, П. И. Ризак // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – № 1 (34). – С. 57–63.

11. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / О. Е. Markov, А. V. Perig, М. А. Markova, V. N. Zlygoriev // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2016. – Vol. 83. – № 9–12. – P. 2159 – 2174. – [DOI: 10.1007/s00170-015-8217-5](https://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5).

12. Использование выпуклых бойков для повышения качества крупных плит / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков, М. С. Косилов, Н. И. Нагиев // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2016. – № 1 (19E). – С. 59–65. – ISSN 2219-7869. [www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/№1\(19E\)\\_2016/article/10](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1(19E)_2016/article/10)

13. Злыгорев В. Н. Совершенствование технологических процессовковки крупных поковок на основе разработки нового способа осадки четырехлучевых заготовок : монография / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков // – Краматорск : ДГМА, 2016. – 148 с.

14. Пат. 50416 Україна, МПК В 21 J 13/02 (2006.01). Чотирибойковий кувальний пристрій зі змінними бойками / Шумаков В. Ф., Злигорєв В. М., Грачов І. А., Бугайов О. М., Глинський В. М., Карасьов А. К. ; заявник та патентовласник Закрите акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u200912506 ; заявл. 03.12.2009 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11. – 4 с. : іл.

15. Пат. 96572 Україна, МПК В 22 D 7/00, В 22 D 47/00 (2015.01). Спосіб одержання сифонних злитків / Шумаков В. Ф., Злигорєв В. М., Грачов І. А., Бугайов О. М., Глинський В. М., Гур'єв А. А., Чикота Я. М.; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201409418; заявл. 26.08.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. – 4 с. : іл.

16. Пат. 106233 Україна, МПК F 16 H 55/06, C 21 D 9/32 (2006.01). Спосіб виготовлення вала-шестірні важконавантаженої відкритої зубчастої передачі / Волошин О. І., Злигорєв В. М., Мартиненков С. Л., Петров А. Г., Ковальов Ю. М., Токарев О. О., Вовненко Є. М., Токарев Ю. О.; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201508821; заявл. 14.09.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. – 4 с. : іл.

17. Марков О. Е. Совершенствование технологииковки крупных плит V-образными бойками / О. Е. Марков, Е. А. Цветкова, В. Н. Злыгорев // IV МНПК НКМЗ. – Краматорск, 2005. – С. 94–96.

18. Усовершенствование технологического процесса производства полых поковок типа труб / В. Н. Злыгорев, И. А. Грачев, Я. М. Чикота, Я. Г. Жбанков // Тези доповідей V МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ. – Київ: НТТУУ «КПІ», 19–23 травня 2014 року. – С. 78–80.

19. Маркова М. А. Заковка отверстия в процессековки без оправки / М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев // Матеріали МНТК молодих учених та студентів, 25–26 листопада, Тернопіль : Тернопільській національний технічний університет ім. І. Палюя, 2015. – С. 178–179.

### **Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві:**

[1] – розроблення методики досліджень процесів осадження, порівняння отриманих результатів з виробничими даними; [2] – розроблення технологічного процесу кування валків для впровадження на ПАТ «НКМЗ»; [3] – дослідження формозміни заготовки на свинцевих зразках у процесі протягування; [4] – аналіз результатів досліджень та виявлення технологічних можливостей використання елементів штампування при виготовленні крупних поковок; [5, 19] – запропонування нового способу виготовлення високоякісних поковок, розроблення технологічних переходів кування; [6] – уточнення геометрії вирізних бойків з випуклим профілем на базі промислових даних, розроблення методики досліджень; [7] – розроблення методики проведення досліджень та запропонування технологічних режимів кування без оправки; [8] – проектування технологічних переходів кування поковок, аналіз результатів досліджень; [9] – запропонування способу профілювання заготовок випуклими бойками, розроблення технологічних переходів та рекомендацій для промислового впровадження; [10, 18] – оцінка ступеня заковування отвору при куванні випуклими бойками; [11] – розроблення нового технологічного процесу та аналіз даних промислового впровадження; [12] – досліджено НДС при профілюванні заготовки випуклими бойками; [13] – запропонування нового способу осадження,

проведення дослідження та аналіз одержаних результатів; [14] – розроблення конструкції оснащення для кування випуклими бойками; [15] – запропонування нового способу виготовлення ковальських злитків для кування крупних поковок високої якості; [16] – розроблення технологічних переходів кування валів за новою технологією; [17] – дослідження впливу випуклого бойка на якість крупних плит.

## АНОТАЦІЯ

**Злигорєв В. М. Удосконалення технологічних процесів кування крупних поковок на основі використання способу осадження профільованих заготовок. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2016.

Дисертаційна робота спрямована на розв'язання важливої науково-технічної проблеми удосконалення технологічних процесів кування крупних поковок відповідального призначення на основі застосування операції осадження профільованих заготовок.

В результаті скінчено-елементного моделювання було встановлено, що кування випуклими бойками з кутом, рівним  $120^\circ$ , підвищує рівень стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки, що сприяє закриттю осьового дефекту заготовки при обтисненні на 20%. Більш того, осьовий дефект в процесі осадження закривається інтенсивніше при кутах увігнутих граней  $\alpha = 120^\circ \dots 150^\circ$  і глибини увігнутостей  $d/D = 0,8 \dots 0,85$ . Рекомендований ступінь деформації, при якій буде відбуватися заковування осьових дефектів при осадженні, становить не менше 50%. Формування увігнутих граней заготовки підвищує силу деформування в процесі осадження. Зі збільшенням глибини увігнутих граней сила осадження знижується.

В результаті досліджень була встановлена раціональна геометрія випуклих бойків і механічні режими профілювання заготовки на чотирипроменеві переріз, а саме: кут випуклих бойків –  $120^\circ$ , обтиснення 10...20%. В процесі осадження чотирипроменевої заготовки інтенсивне закриття осьового дефекту відбувається при деформації більше 25%. Дослідження на сталевих зразках дозволили зробити висновок, що профілювання випуклими бойками з кутом  $120^\circ$  гарантує заковування осьових дефектів заготовки.

Розроблено практичні рекомендації для профілювання злитків на чотирипроменевий переріз і подальше їх осадження. Розроблено послідовність складання ефективних технологічних процесів кування із застосуванням осадження чотирипроменевих заготовок. Спроектвані та впроваджені нові технологічні процеси кування крупних поковок із застосуванням осадження чотирипроменевих заготовок. Розроблені нові технологічні процеси кування забезпечили підвищення якості крупних поковок і зниження браку з 14% до 4%. Механічні властивості деталей підвищилися в середньому на 8...11%.



**Ключові слова:** осадження, профілювання, випуклі бойки, осьова рихлість, злиток, обтискання, заковування осьових дефектів, МСЕ, напружено-деформований стан.

## АННОТАЦІЯ

**Злыгорев В.Н. Совершенствование технологических процессовковки крупных поковок на основе использования способа осадки профилированных заготовок. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2016.

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической проблемы совершенствования технологических процессовковки крупных поковок ответственного назначения на основе применения операции осадки профилированных заготовок.

Разработаны специальные методики моделирования процессов профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на основе МКЭ, а также методики исследования на свинцовых и стальных моделях с осевым отверстием, моделирующие осевую рыхлость для выявления эффективной схемы деформирования, которая обеспечивает заковку осевых дефектов.

В результате конечно-элементного моделирования было установлено, что ковка выпуклыми бойками с углом, равным  $120^\circ$ , повышает уровень сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки, что способствует закрытию осевого дефекта заготовки при обжатии на 20 %. Более того, осевой дефект в процессе осадки закрывается интенсивнее при углах вогнутых граней  $\alpha = 120^\circ \dots 150^\circ$  и их глубине  $d/D = 0,8 \dots 0,85$ . Рекомендуемая степень деформации, при которой будет происходить заковка осевых дефектов в процессе осадки, составляет не менее 50 %. Формирование вогнутых граней в заготовке повышает силу деформирования в процессе осадки. С увеличением глубины вогнутых граней сила осадки снижается.

В результате исследований была установлена рациональная геометрия выпуклых бойков и механические режимы профилирования заготовки на четырёхлучевое сечение, а именно: угол выпуклых бойков –  $120^\circ$ , обжатие 10 ... 20 %. В процессе осадки четырёхлучевой заготовки интенсивное закрытие осевого дефекта происходит при деформации более 25 %. Исследования на стальных образцах позволили сделать вывод, что профилирование выпуклыми бойками с углом в  $120^\circ$  гарантирует заковку осевых дефектов заготовки.

Разработаны практические рекомендации для профилирования слитков на четырёхлучевое сечение и последующую их осадку. Разработана последовательность составления эффективных технологических процессовковки с применением осадки четырёхлучевых заготовок. Спроектированы и внедрены новые технологические процессыковки крупных поковок с применением осадки четырёхлучевых заготовок. Разработанные новые технологические процессыковки

обеспечили повышение качества крупных поковок и снижение брака с 14 % до 4 %. Механические свойства деталей повысились в среднем на 8 ... 11 %.

**Ключевые слова:** осадка, профилирование, выпуклые бойки, осевая рыхлость, слиток, обжатие, заковывание осевых дефектов, МКЭ, напряженно-деформированное состояние.

## ABSTRACT

**Zlygoriev V. N. Improvement of forging processes of large forgings based on upsetting of profiled workpieces. – Manuscript.**

Dissertation for the candidate of technical sciences degree on the speciality 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2016.

The thesis is aimed at solving of important scientific and technical problems of improving the forging processes of large parts with responsible destination based on the upsetting operation of profiled workpieces.

It was found that forging by convex dies with an angle equal to  $120^\circ$ , increases the level of compressive stress in the axial zone of the workpiece. This facilitate the closure of the axial defect at a reduction of 20 %. Moreover, the axial defect during upsetting is closed at angles of the convex dies  $\alpha = 120^\circ \dots 150^\circ$ . A depth of the concavity faces has to  $d / D = 0.8 \dots 0.85$ . The recommended degree of deformation which will occur a closing of the axial defects is not less than 50 %. Formation of the concave faces of the workpiece enhances a deformation force during upsetting. Increasing of the concave faces depth leads to reducing of an upsetting force.

The rational geometry of convex dies and mechanical modes of the profiling on a workpiece with concave cross-section has been established. The angle of the convex die is  $120^\circ$  and reduction is 10 ... 20 %. The intensive closing of the axial defect during upsetting of the workpiece with concave cross-section occurs at deformation more than 25 %. Steel-samples investigations have concluded that the profiling by convex dies with the angle of  $120^\circ$  ensures a complete closing of the workpiece axial defects.

Practical recommendations for the profiling ingots to the workpiece with concave cross-section and subsequent upsetting have been designed. The sequence designing of effective forging processes using of the workpieces upsetting with concave cross-section has been developed. New forging processes of large parts with upsetting operation of the workpieces with concave cross-section have been implemented. Developed new forging processes improved a high quality of large forgings and decline of spoilage from 14 % to 4 %. The mechanical properties of parts increased by an average of 8 ... 11%.

**Keywords:** upsetting, profiling, convex dies, axial porosity, ingot, reduction, closing of axial defects, FEM, stress-strain state.

Підп. до друку 05.09.2016. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.  
Тираж 110 пр. Зам. № 86.

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК №1633 від 24.12.2003

