

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Клемешов Євген Сергійович

УДК 621.735.5

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ  
МЕТАЛОЗАОЩАДЖУВАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ ШАТУННОЇ ШИЙКИ  
ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ

Спеціальність 05.03.05  
«Процеси та машини обробки тиском»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро-2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національній металургійній академії України  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, доцент, Чухліб Віталій Леонідович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, завідувач кафедри обробки металів тиском.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор Кухар Володимир Валентинович, завідувач кафедри обробки металів тиском Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь;
- доктор технічних наук, професор Марков Олег Євгенович, завідувач кафедри механіки пластичного деформування Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.084.02 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д08.084.02,

д.т.н., професор

Т.М. Миронова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** До великогабаритних важких поковок, в тому числі і колінчастих валів, які виготовляють вільним куванням, відносять вироби масою більше 1...2 тонн. В якості матеріалу поковки колінчастого валу зазвичай використовують леговані марки сталей, які забезпечують високі показники міцності, витривалості матеріалу при знакозмінному навантаженні та жаростійкість. При куванні великогабаритних колінчастих валів зазвичай використовують технологічний напуск для спрощення форми поковки до типового гладкого валу з подальшим видаленням напуску механічною обробкою для отримання шатунної шийки.

Основною операцією кування при виготовленні поковок колінчастих валів є протягування (ковальська витяжка). Відомі основні підходи до виконання цієї операції при використанні стандартизованого за розмірами деформуючого інструменту, яким, однак, неможливо наблизити форму коліна валу в поковці до форми готового виробу. Рекомендована товщина бойка гідравлічного пресу, на якому здійснюється кування заготовки зі зливка масою 6,5 т, по відношенню до діаметра заготовки ( $D_{\text{заг}}$ ) може складати від 0,5 і більше. Для отримання шатунної шийки колінчастого валу вільним куванням необхідно застосовувати бойки з товщиною менше 0,5 від діаметра заготовки, які до даного часу на підприємствах не використовувалися. Це зумовлено, зокрема, обмеженим знанням щодо закономірностей впливу такого деформуючого інструменту з товщиною, наприклад, 0,1..0,3 від діаметра заготовки («тонкий боек», «тонкий інструмент»), а також відносного ступеню деформації на формозміну шатунної шийки та щок колінчастого валу. Товщина бойка та відносний ступінь деформації обмежені великим видовженням шатунної шийки та можливим вигином заготовки, що також може призводити до заклинювання бойка металом.

Відомий підхід до визначення раціональних параметрів кування при застосуванні метода оцінки об'ємної нерівномірності деформації (за Чухлібом В.Л.). Даний метод базується на визначенні коефіцієнта нерівномірності деформації в поперечних перерізах поковки, однак не враховує різниці між середнім значенням коефіцієнта нерівномірності по перерізу та значенням цього параметру у певних точках перерізу. Це перешкоджає адекватній оцінці нерівномірності деформації по перерізах та узгодженню рівню нерівномірності деформації з її кількісним вираженням.

Зазначені обставини не дозволяють визначити раціональні параметри кування при використанні «тонкого» деформуючого інструменту для отримання шатунної шийки колінчастого валу, а це веде до додаткових витрат металу на етапі механічної обробки при видаленні ковальського напуску з шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

Зважаючи на це, робота яка спрямована на визначення закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки колінчастого валу при співвідношенні товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі менше 0,5, а також визначення умов максимального наближення форми та розмірів

поковки до готового виробу для зменшення витрат металу при виготовленні великогабаритних колінчастих валів, актуальна.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Виконана дисертаційна робота відповідає напрямку наукових досліджень Національної металургійної академії України (НМетАУ). Дослідження виконані в рамках програми та відповідної тематики держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри обробки металів тиском НМетАУ: ДР №0116U002657, ДР №0115U003169, а також госпдоговірної науково-дослідної роботи з ПрАТ «Дніпропрес Сталь» (ДР №0117U005159). Автор був виконавцем цих робіт.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки колінчастого валу при співвідношенні товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, а також визначенні умов максимального наближення форми та розмірів поковки до готового виробу для зменшення витрат металу при виготовленні великогабаритних колінчастих валів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

1) виконати аналіз відомих результатів досліджень в галузі виготовлення поковок колінчастих валів, зокрема, визначити особливості процесу кування, що обумовлюють шляхи зменшення витрат металу;

2) вдосконалити метод визначення нерівномірності деформації для адекватної оцінки величини нерівномірності та призначення раціональних режимів деформування при куванні шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів;

3) теоретично дослідити закономірності зміни геометричних параметрів заготовки при вдавлюванні бойка в залежності від товщини інструменту в діапазоні 0,1..0,3 від діаметра заготовки та відносному ступені деформації в інтервалі 30..70%;

4) експериментально дослідити та перевірити теоретично отримані закономірності формозміни металу при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу у вказаних інтервалах параметрів;

5) теоретично дослідити формозміну металу при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу тонкими бойками в залежності від кількості обтиснень, кутів кантувань та ступеню обтиснення, а також дослідити нерівномірність розподілення деформацій в металі;

б) розробити рекомендації щодо удосконалення процесу кування поковок великогабаритних колінчастих валів, з урахуванням нерівномірності деформацій, при використанні раціональної кількості обтиснень, кутів кантувань та ступеню обтиснень для отримання поковок за формою наближених до готового виробу;

7) використати отримані результати у виробничих умовах та навчальному процесі.

**Об'єкт дослідження.** Технологічний процес виготовлення великогабаритних поковок колінчастих валів вільним куванням.

**Предмет дослідження.** Закономірності формозміни металу при використанні тонкого деформуючого інструменту в процесі кування великогабаритних поковок колінчастих валів.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану заготовки проводилися з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Перевірка достовірності отриманих теоретичних результатів здійснювалася експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах на основі принципів моделювання процесів гарячої пластичної формозміни металів. Обробка результатів досліджень проводилася з використанням удосконаленого методу визначення показника нерівномірності деформацій.

**Наукова новизна.** Наукову новизну мають перелічені нижче результати теоретичних і експериментальних досліджень.

**1. Одержав розвиток метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу в процесах вільного кування для визначення раціональних режимів деформування при отриманні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу.**

Розробка відрізняється урахуванням різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу. Це дозволяє узгодити рівень оцінюваної нерівномірності деформації по перерізам з її кількісним вираженням, а також адекватно оцінювати величину нерівномірності та визначати раціональні режими деформування при куванні.

**2. Вперше теоретично визначено та експериментально перевірено залежність зміни величини ефективного діаметра коліна валу від товщини деформуючого інструменту (в інтервалі 0,1..0,3 до діаметру заготовки) та ступеню одиничного обтиснення (в інтервалі 30..70%) при вільному куванні місць формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.**

Раніше такі дані для вказаних діапазонів були невідомі. Це дозволяє призначати, при певній товщині деформуючого інструменту, діаметр заготовки та рівень обтиснення для формування необхідного діаметра шатунної шийки та щок валу в місці розташування коліна великогабаритного колінчастого валу.

**3. Вперше при використанні деформуючого інструменту з відношенням товщини до діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3 при багаторазових обтисненнях теоретично з використанням вдосконаленого методу визначення нерівномірності деформації металу для певної довжини шатунної шийки визначено кількість обтиснень, рівнів ступеню деформації та кути кантувань.**

Раніше такі дані для вказаних діапазонів були невідомі. Це дозволяє обрати варіант схеми деформування із забезпеченням мінімальної нерівномірності деформацій в місці формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Дослідження процесу кування з використанням тонкого деформуючого інструменту при виготовленні поковок колінчастих валів дозволило:

- визначити геометричні параметри заготовки та ступінь обтиснення при використанні «тонких» бойків для формування необхідного діаметра шатунної шийки та шок валу в місці розташування коліна великогабаритного колінчастого валу;

- обґрунтувати раціональну кількість обтиснень, кути кантувань та ступінь обтиснення при куванні шатунної шийки великогабаритних поковок колінчастих валів;

- розробити технологічні рекомендації, які дозволяють при виробництві поковок великогабаритних колінчастих валів із використанням бойків з товщиною в інтервалі 0,1..0,3 від діаметра заготовки, зменшити витрати металу за рахунок мінімізації ковальського напуску;

- розробити та впровадити рекомендації у виробництво в ковальсько-термічному цеху ПрАТ «Дніпропрес Сталь» для виготовлення поковок колінчастих валів із злитків та заготовок масою більше 2 тон при використанні тонких бойків (акт від 22.01.2018 р.).

- використовувати в навчальному процесі результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, на кафедрі обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова при викладанні дисциплін «Конструкції та розрахунки машин та механізмів обробки тиском», «Моделювання та оптимізація процесів обробки металів тиском» і «Теоретичні та експериментальні дослідження процесів обробки металів» для бакалаврів спеціальності 6.050401 – металургія та магістрів спеціальності 8.136 – механічна інженерія, а також при виконанні студентами курсових проектів і випускних кваліфікаційних робіт. (довідка від 21.05.2018 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові результати досліджень отримані і узагальнені автором самостійно. При проведенні науково-дослідних робіт, результати яких опубліковані в співавторстві, автором виконані теоретичні дослідження, проведений аналіз результатів, сформульовані висновки і розроблені рекомендації щодо вдосконалення кування поковок. Автор брав участь у плануванні і проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих результатів, а також у впровадженні результатів роботи у виробництво та навчальний процес. Особистий внесок у спільних публікаціях (згідно з переліком опублікованих робіт): [1] комп'ютерне моделювання та аналіз отриманих даних, розробка раціональних параметрів кування; [2] обґрунтування раціональних параметрів кування та впровадження розробок у виробництво; [3] узагальнення та аналіз існуючих схем кування поковок колінчастих валів; [4] аналіз нерівномірності розподілення деформацій при осаджуванні заготовок; [5] аналіз шляхів зменшення витрат металу при куванні зливків із легованих сталей; [6] аналіз даних та оцінка можливості використання методу оцінки нерівномірності деформацій у виробничих умовах; [7] систематизація літературних даних та аналіз даних комп'ютерного моделювання; [8] аналіз формозміни заготовок при різних параметрах

осаджування та аналіз нерівномірності розподілення деформацій; [9] аналіз формозміни заготовки при теоретичному та експериментальному дослідженні; [10] планування, проведення та аналіз результатів математичного моделювання процесу отримання шатунної шийки колінчастого валу; [11] аналіз нерівномірності деформацій в шатунній шийці поковки колінчастого валу; [12] аналіз та узагальнення висновків за проведеним дослідженням; [13] проведення теоретичного дослідження та аналіз отриманих даних.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 9-11 листопада 2016 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 26-28 квітня 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Титан 2016: Виробництво та використання в авіабудуванні» (м. Запоріжжя, 3-4 листопада 2016 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 29 червня – 1 липня 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Пластична деформація металів» (м. Дніпро, 22-26 травня 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 22-24 листопада 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (м. Кременчук, 25-26 квітня 2018 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. залізний Порт, 29 травня - 02 червня 2018 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 19-22 червня 2018 р.), Придніпровському науковому семінарі «Обробка металів тиском» Національної металургійної академії України (м. Дніпро, 2015 – 2018 р.р.).

**Публікації.** Основні матеріали дисертації викладені в 13 публікаціях. Серед публікацій: 7 статей у спеціалізованих виданнях і тематичних збірниках згідно з переліком МОН України, 1 закордонне видання та 5 тез доповідей.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів і висновків, викладена на 154 сторінках; містить: таблиць - 13; рисунків - 97, список використаних джерел з 85 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність її теми, визначена мета, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, представлені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача і апробація результатів дисертації.

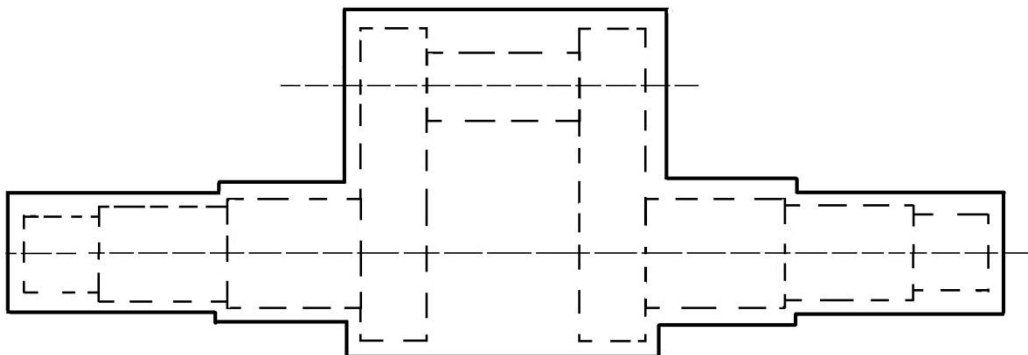
У **першому розділі** розглянуто будову колінчастого валу, який є найбільш трудомістким у виробництві, у порівнянні з іншими деталями, так як при виготовленні необхідно забезпечити не лише високу точність геометрії, але

також високі показники механічних властивостей за рахунок раціональних параметрів кування.

Відмічено, що найбільший вклад у розвиток теорії і технології кування поковок зробили такі провідні вітчизняні та закордонні вчені як Охрименко Я.М., Тюрін В.О., Соколов Л.М., Алієв І.С., Златкін М.Г., Дорохов М.М., Кухар В.В., Марков О.Є., Унксов Є.П., Гринкевич В.О., Коган М.А., Тумко О.М., Жбанков Я.Г., Семенов Є.І., Сторожев М.В., Петшик М. (Pietrzyk M.), Вальчик В. (Walczyk W.), Рут Т. (Rut T.), Машек Б. (Mašek B.), Кристіансен П. (Christiansen P.), а також ще цілий ряд науковців.

Колінчастий вал є важко навантаженою деталлю машини, що працює в умовах знакозмінних навантажень, а також в умовах температури близької до рекристалізації. У зв'язку з такими умовами праці колінчастий вал повинен мати високі механічні та спеціальні фізичні властивості, тобто мати високу якість. Ці умови забезпечує використання в якості матеріалу поковки легованих марок сталей, які забезпечують високі показники міцності, витривалості матеріалу при знакозмінному навантаженні та жаростійкість. До таких марок сталей відносять: 45Г2, 50Г, 18ХНМА, 18ХНВА, 40ХН2МА.

Спосіб виготовлення поковки колінчастого валу визначається її формою (типом), розмірами, масою та серійністю. Поковки великогабаритних колінчастих валів виготовляються лише в одному або декількох екземплярах. Такі методи виробництва, як штампування або висаджування-гнуття (TR-метод), мають жорсткі обмеження по масі та габаритам поковок, тому зазвичай великогабаритні колінчасті вали виготовляють вільним куванням на гідравлічних пресах зі злиwkів масою більше 2 тонн. На даний час не існує спеціалізованих технічних стандартів, які б визначали величину припусків, допусків та напусків при виготовленні вільним куванням поковок колінчастих валів. За існуючою технологією, для цього застосовують методикау призначення припусків та напусків на виготовлення гладких валів за стандартом ГОСТ 7062-90 «Поковки з вуглецевих та легованих сталей, які виготовляють куванням на пресах». На рисунку 1 зображено ескіз поковки колінчастого валу, яка виготовляється за існуючою технологією. Штриховими лініями зображено контур готової деталі, яку закрито припуском та напуском.



Рисунку 1 – Ескіз поковки колінчастого валу за існуючою технологією



Такий підхід не є раціональним з точки зору економії металу, так як при масі поковки 4,5 т маса металу у місці шатунної шийки, що буде видалена механічною обробкою, може складати до 500 кг, що приблизно дорівнює 15% від маси поковки.

Виходячи з аналізу результатів, отриманих вітчизняними та закордонними вченими, видно, що дослідження в області кування колінчастих валів не є розробленими повною мірою. В існуючих розробках не враховується повною мірою кінцева форма деталі, що спричиняє додаткові витрати металу при наступній механічній обробці. Це викликано тим, що на даний час при проектуванні поковки корінна частина валу закривається технологічним напуском.

Мінімальна товщина бойків, які використовуються на підприємствах при куванні злитків масою 6,5 т, по відношенню до діаметра заготовки 700 мм, може складати від 0,5 і більше. В сучасних розробках відсутні дані по використанню бойків, з товщиною 0,1..0,3 від діаметра заготовки, при куванні шатунної шийки колінчастого валу. Такі бойки є «тонкими», так як мають меншу товщину, ніж ті, що використовують на підприємствах. При цьому, аналіз технологічних карт виробництва показав, що форма коліна готового виробу може знаходитися в інтервалах співвідношень діаметра шатунної шийки в діапазоні 0,35..0,8 та довжини шатунної шийки у діапазоні 0,2..1,2 до діаметра коліна валу. Тому одним із рішень, яке дозволить наблизити форму поковки до форми готового виробу, є застосування тонкого деформуючого інструменту для отримання шатунної шийки вільним куванням.

Існує метод оцінки нерівномірності розподілення деформацій (за Чухлібом В.Л.), який дозволяє оцінювати об'ємну нерівномірність розподілення деформацій в металі по поперечних перерізах поковки. Цей метод базується на розрахунку коефіцієнта нерівномірності деформацій, який є відношенням показників еквівалентної (накопиченої) деформації в контрольних точках перерізу до максимального значення еквівалентної деформації в перерізі.

На рисунку 2 зображено схему розташування контрольних точок по перерізу. На рисунку:  $\varepsilon_{\max}$  – точка з максимальним значенням еквівалентної деформації;  $\varepsilon_i$  – контрольні точки.

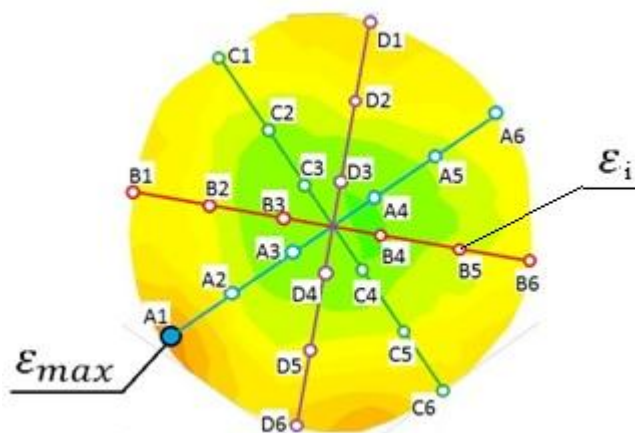


Рисунок 2 – Розташування ліній та контрольних точок в перерізі

Таким чином, в перерізі знаходиться точка з максимальним значенням еквівалентної деформації і відносно неї будуються 4 лінії, які розташовані під кутом  $45^\circ$  одна до одної та перетинаються в центрі перерізу. Далі на кожному лінії наноситься 6 контрольних точок симетрично до точки з максимальним значенням та симетрично до центру перерізу. Перевагою даного методу є те, що при його застосуванні визначається об'ємна нерівномірність розподілення деформацій, яка відображає сукупний вплив схеми деформування на рівномірність та ступінь проробки металу. Вадюю даного методу є те, що максимальна рівномірність при розрахунку коефіцієнта буде спостерігатися лише в одній точці, а усі інші точки відображатимуть нерівномірність.

Виходячи із усього вищесказаного, робота яка спрямована на визначення закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки колінчастого валу при співвідношенні товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, а також визначення умов максимального наближення форми та розмірів поковки до готового виробу для зменшення витрат металу при виготовленні великогабаритних колінчастих валів, актуальна.

**У другому розділі**, наведено вдосконалення методу оцінки об'ємної нерівномірності деформації на основі розробленого у співавторстві із Чухлібом В.Л. методу. Вдосконалений метод відрізняється урахуванням різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу, що дозволяє узгодити рівень оцінюваної нерівномірності деформації по перерізах з її кількісним вираженням. Розрахунок показника нерівномірності розподілення деформацій здійснюється за наступними формулами:

$$K_{H \text{ ср}} = \frac{\sum \varepsilon_i}{i} \quad (1)$$

де  $K_{H \text{ ср}}$  – середнє значення коефіцієнта нерівномірності

$$P_H = \left[ K_{H \text{ ср}} - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{max}} \right] \quad (2)$$

де  $P_H$  – показник нерівномірності

В даній дисертаційній роботі використано програму QForm для комп'ютерного моделювання процесів обробки металів тиском на основі скінченно-елементного методу. За допомогою моделювання визначено розподілення деформацій в металі, напруження під час деформування, температуру. Для дослідження формозміни заготовки було побудовано план експерименту з варіюванням двох факторів на трьох рівнях. Дослідження процесу вдавлення тонкого бойка та подальше кування шатунної шийки проводилося за допомогою комп'ютерного моделювання.

Першим фактором експерименту прийнято товщину деформуючого інструменту ( $b_{\text{інс}}$ ), яка знаходиться в інтервалі 4..12 мм ( $0,1..0,3 D_{\text{заг}}$ ). Другим фактором експерименту прийнято глибину вдавлювання деформуючого інструменту в заготовку ( $h_{\text{вд}}$ ), яка знаходилася в інтервалі 12..28 мм ( $0,3..0,7 D_{\text{заг}}$ ) (відносний ступінь деформації складав 30..70%). Для отримання шатунної шийки була розроблена схема кування, яка дозволяє отримати в перерізі шатунної шийки коло. Така схема складається із послідовних обтиснень та кантувань заготовки на  $90^\circ$  для отримання квадрата в перерізі. Кількість обтиснень та кантувань варіюється від 2 до 6, в залежності від ступеня обтиснення при вдавлюванні бойка. Це пов'язано з більшим поширенням металу в області формування шатунної шийки при більших ступенях деформації та необхідністю більшої кількості обтиснень та кантувань для отримання при подальшому куванні необхідного діаметра шатунної шийки та її форми в поперечному перерізі. Після цього здійснювалися два обтиснення з кантування на  $45^\circ$  та на  $90^\circ$  для отримання в перерізі шатунної шийки восьмикутника. Далі здійснювалися десять обтиснень з кантуванням на малий кут до  $15^\circ$  для отримання в перерізі кола. В даному випадку застосовувати більше ніж десять обтиснень не раціонально, так як цієї кількості обтиснень та кантувань достатньо для отримання форми кола в поперечному перерізі шатунної шийки.

Як вхідні дані для комп'ютерного моделювання були обрані такі показники: температура нагрівання заготовки  $T=1250^\circ\text{C}$ ; температура інструменту  $t_{\text{інс}}=300^\circ\text{C}$ ; розміри заготовки:  $D_{\text{заг}} = 40$  мм,  $L_{\text{заг}} = 80$  мм; швидкість руху інструменту  $V = 15$  мм/с; матеріал заготовки – сталь 40ХН2МА.

Розглянуто залежність впливу параметрів процесу на геометрію отримуваної заготовки. Геометричними параметрами заготовки є діаметр шатунної шийки ( $d_{\text{ш}}$ ), ефективний діаметр коліна валу ( $H$ ), довжина шатунної шийки ( $B$ ).

Були проведені дослідження по кожній операції кування, а саме при вдавлюванні бойка, куванні шатунної шийки тонким деформуючим інструментом та при куванні опорних шийок.

При куванні шатунної шийки розглянуто вплив товщини деформуючого інструменту та ступеня деформації при багаторазових обтисненнях на видовження шатунної шийки в процесі кування та побудовано графічні залежності зміни геометричних параметрів заготовки від вказаних параметрів кування. В даному дослідженні також розглянуто нерівномірність розподілення деформацій в шатунній шийці для визначення більш раціональних схем кування (по вдосконаленому методу визначення показника нерівномірності деформації). На рисунку 3-а, представлено розподілення деформацій в шатунній шийці при куванні за схемою:  $b_{\text{інс}} = 0,2 D_{\text{заг}}$ ;  $h_{\text{вд}} = 0,5 D_{\text{заг}}$ . На рисунку 3-б представлено показник нерівномірності деформації, який розраховано за вдосконаленим методом.

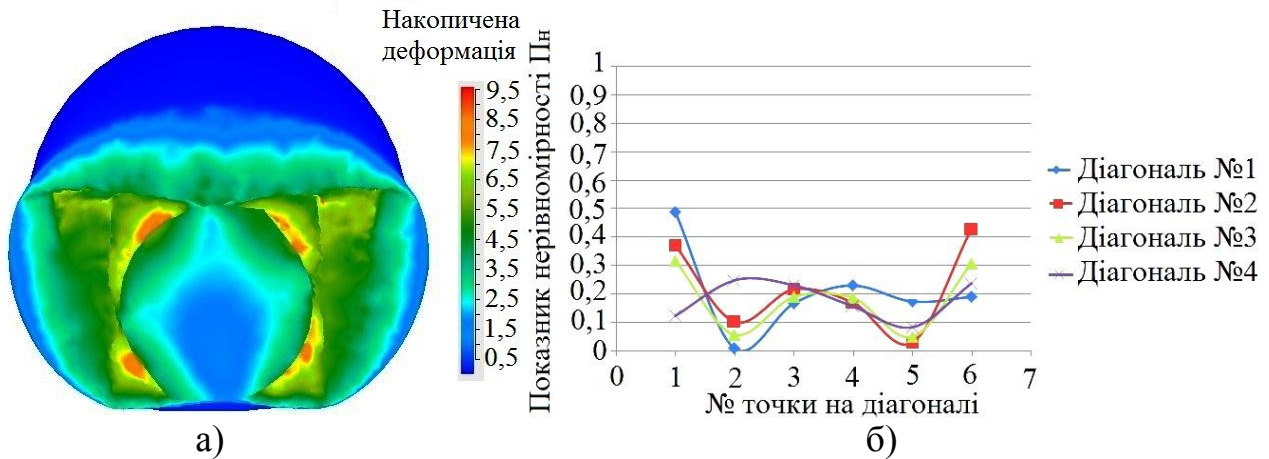


Рисунок 3 – Розподілення деформацій в шатунній шийці (а) та показник нерівномірності деформації (б) при куванні за схемою:  $b_{\text{інс}} = 0,2 D_{\text{заг}}$ ;  $h_{\text{вд}} = 0,5 D_{\text{заг}}$

При куванні опорних шийок застосовано схему кантувань, розроблену у співавторстві, яка призначена для кування поковок типу «гладкий вал». Це зумовлено тим, що кування опорних шийок здійснюється за тим же принципом, що і кування гладких валів, тобто в процесі використовуються звичайні комбіновані бойки. Така схема складається з трьох обтиснень з кантуваннями на  $120^\circ$ , потім трьох обтиснень з кантуванням на  $60^\circ$  та десяти обтиснень з кантуваннями на  $15^\circ$ . Така схема кантувань дозволяє отримувати більшу рівномірність розподілення деформацій та менше викривлення поковки в процесі деформування, у порівнянні із схемою кантувань, яка застосовується на підприємстві.

За отриманими закономірностями формозміни можливе проектування технологічного процесу вільного кування поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки та вибором раціональної схеми кування на основі аналізу нерівномірності деформації, що, у цілому, забезпечує наближення форми поковки до форми готового виробу.

**У третьому розділі** проведено аналіз результатів експериментальних досліджень формозміни металу при куванні шатунної шийки з використанням тонкого деформуючого інструменту.

За визначеними в попередньому розділі параметрами кування проведено експериментальне дослідження першого етапу отримання шатунної шийки колінчастого валу, а саме – вдавлювання тонкого деформуючого інструменту в заготовку в умовах лабораторії кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Національної металургійної академії України (м. Дніпро). Для фізичного моделювання процесу гарячого деформування сталі 40ХН2МА підходящим матеріалом є свинець, що обґрунтовано реологічними характеристиками цих матеріалів, а також тим, що свинець має властивість рекристалізуватися при кімнатній температурі і може бути використаний для цілей моделювання. Тому для фізичного моделювання виготовлено зразки зі свинцю марки С1. Форма зразків після деформування (вид зверху), отриманих

при вдавлюванні тонкого бойка при різних параметрах геометрії інструменту та глибини вдавлювання, наведено на рис. 4.



Рисунок 4 – Форма отриманих зразків

Вимірювання геометричних параметрів зразків виконувалося по розмірах, які наведені на рис. 5.

Отримані дані було проаналізовано та побудовано графіки залежності зміни визначених геометричних параметрів заготовки від товщини використаного інструменту та глибини вдавлювання.

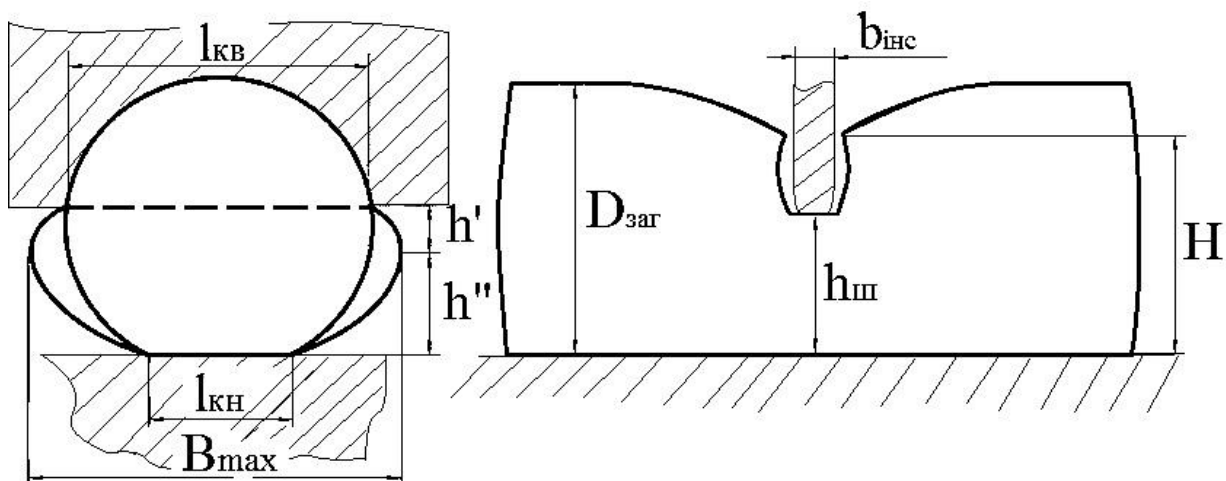


Рисунок 5 – Геометричні параметри отриманих зразків

Ці графіки було співставлено з графіками залежності, які одержано при комп'ютерному моделюванні. На рисунках 6...9 зображено залежності зміни геометричних параметрів, відповідно до рисунку 5, зразків при натурному

експерименті та при комп'ютерному моделюванні. На графіках суцільною лінією зображено результати аналізу даних після комп'ютерного моделювання, а штриховою лінією – результати аналізу даних після натурного експерименту.

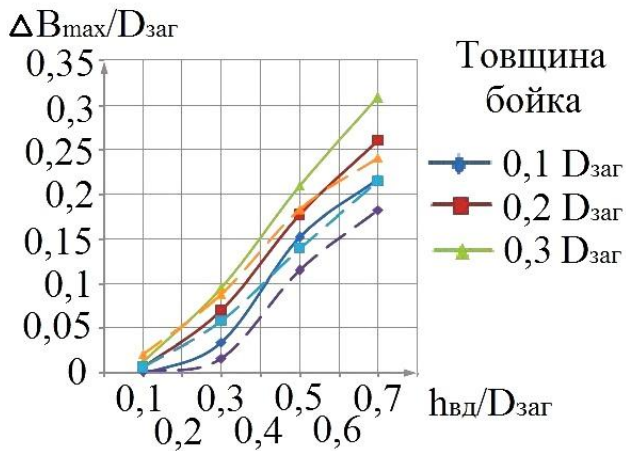


Рисунок 6 - Залежність зміни поширення металу в зоні деформації ( $\Delta V_{max}$ ) від глибини вдавлювання інструменту ( $h_{вд}$ )

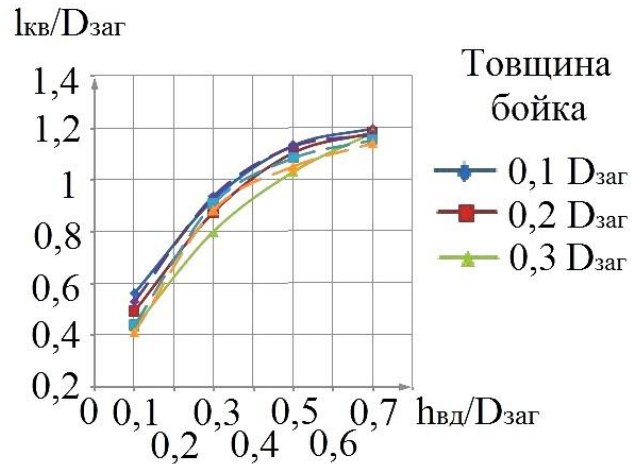


Рисунок 7 – Залежність зміни довжини контакту верхнього деформуючого інструменту з заготовкою ( $l_{кв}$ ) від глибини вдавлювання бойка ( $h_{вд}$ )

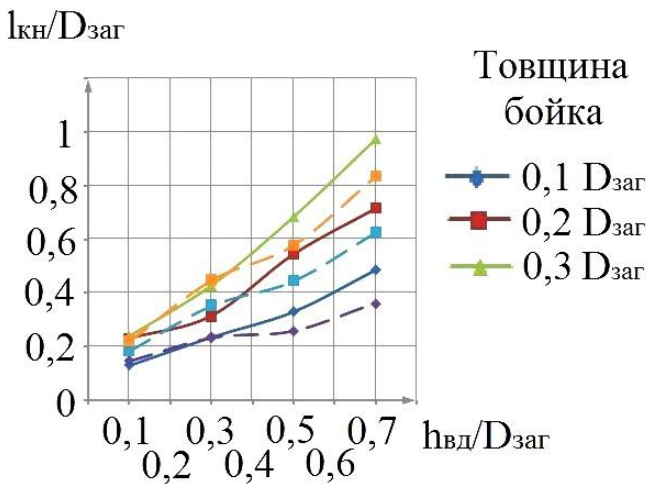


Рисунок 8 - Залежність зміни довжини контакту нижнього деформуючого інструменту з заготовкою ( $l_{кн}$ ) від глибини вдавлювання бойка ( $h_{вд}$ )

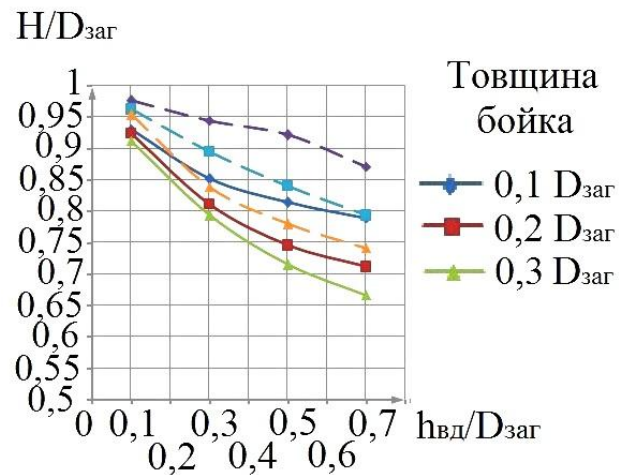


Рисунок 9 - Залежність зміни ефективного діаметру коліна ( $H$ ) від глибини вдавлювання бойка ( $h_{вд}$ )

Відносно експериментальних даних середня похибка досліджуваних геометричних параметрів при комп'ютерному моделюванні не перевищує 10%, що є задовільною точністю для вирішення технічної задачі.

Ці дані дають змогу зробити висновок про адекватність комп'ютерної моделі, тобто про те, що комп'ютерна модель із задовільною точністю описує реальний фізичний процес і таким чином можливе її застосування для подальшого дослідження процесу кування шатунної шийки тонкими бойками.

У четвертому розділі розроблено вдосконалену технологічну схему переходів кування при виготовленні поковок великогабаритних колінчастих валів, на основі недоліків існуючої технологічної схеми та з урахуванням розробок, отриманих у результаті дисертаційної роботи. На рисунку 10 зображено розроблену технологічну схему переходів кування.

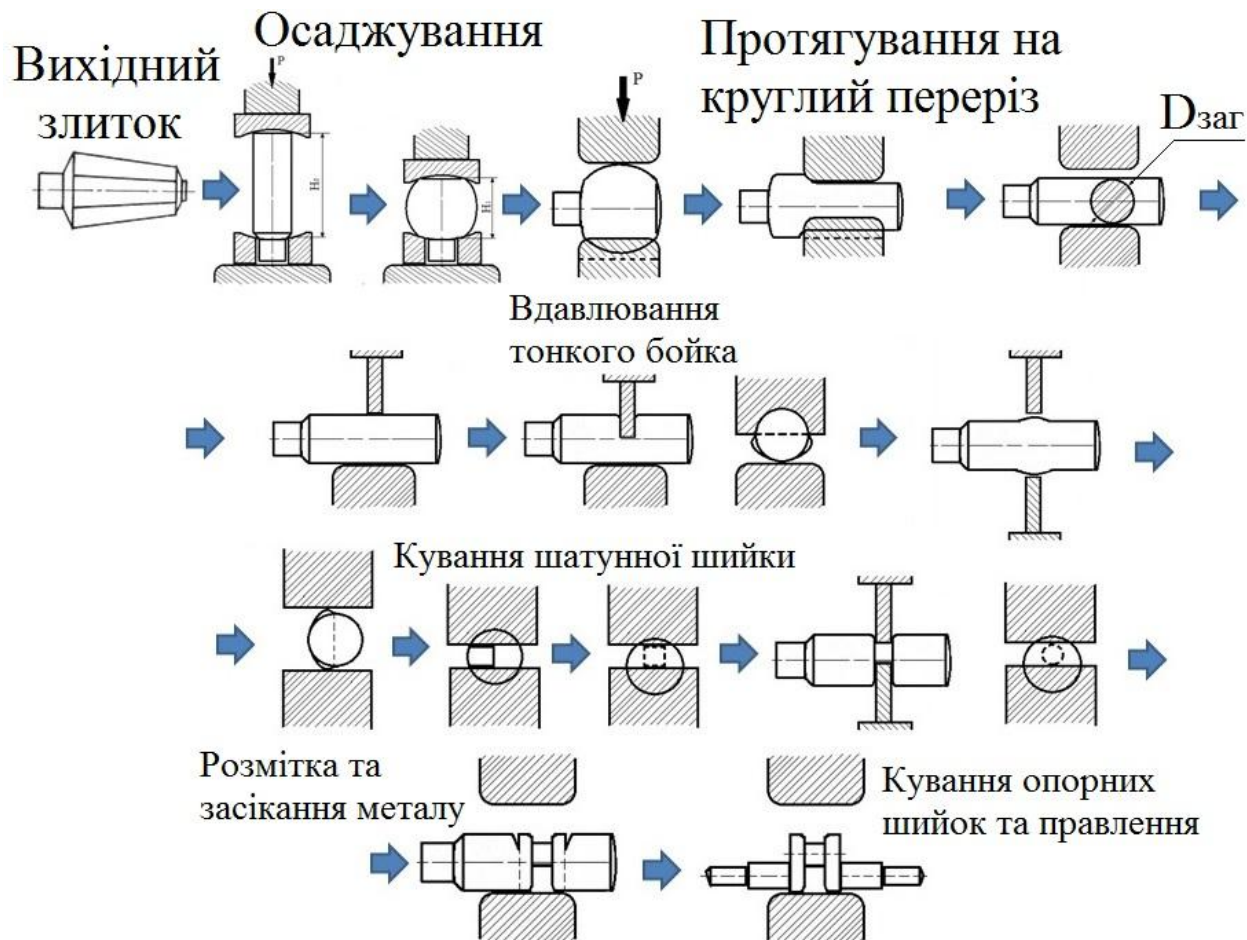


Рисунок 10 – Розроблена технологічна схема виготовлення поковок великогабаритних колінчастих валів

Розроблена технологічна схема повторює деякі частини існуючої технологічної схеми, а саме – білетування зливка, осаджування та протягування зливка до діаметра заготовки. Після цього слідує операція, результати досліджень яких представлено в даній дисертаційній роботі, а саме – вдавлювання тонкого бойка в заготовку та кування шатунної шийки парою тонких бойків. Після цих операцій кування, коли вже отримана шатунна шийка колінчастого валу, технологічна схема знову повторює існуючу, тобто відбувається розмітка та засікання металу і після цього – кування опорних шийок. Відмінність даної технологічної схеми полягає у тому, що замість призначення напуску на шатунну шийку колінчастого валу, її отримують вільним куванням, при цьому заощаджується деякий об'єм металу, який залежить від конфігурації геометричних параметрів коліна валу готової деталі.

Розглянуто можливість використання розробленої технологічної схеми на підприємстві та розроблено пояснення до практичного використання отриманих в дисертаційній роботі результатів досліджень.

Згідно проведених досліджень по визначенню закономірностей формозміни заготовки, було встановлено, що при співвідношеннях товщини деформуючого інструменту  $b_{\text{інст}}/D_{\text{заг}} = 0,1..0,3$  та сумарному відносному ступені деформації 30..70% можливе отримання геометричних параметрів поковки, яка буде наближена за формою до готового виробу, із співвідношенням діаметру шатунної шийки 0,35..0,82 та довжини шатунної шийки у діапазоні 0,2..1,18 до діаметру коліна.

Таким чином, знаючи основні геометричні параметри готової деталі, тобто діаметр шатунної шийки ( $d_{\text{ш}}$ ) та діаметр коліна ( $H$ ), можна визначити зміну форми поковки (основних розмірів коліна валу) та вирахувати необхідні кінцеві розміри а також параметри процесу.

На рисунку 11 зображено форму поковки після кування шатунної шийки, та її основні геометричні параметри.

Для визначення характерних геометричних параметрів поковки застосовуються графічні залежності формозміни металу при куванні шатунної шийки, які зображено на рисунках 12...15.

На основі отриманих в дисертаційній роботі результатів досліджень були розроблені технологічні рекомендації до практичного використання розробленої схеми на виробництві. В рекомендаціях приведено опис удосконаленого технологічного процесу кування поковок колінчастих валів, в якому немає необхідності закриття коліна валу напуском, а також застосування тонких бойків для отримання шатунної шийки колінчастого валу.

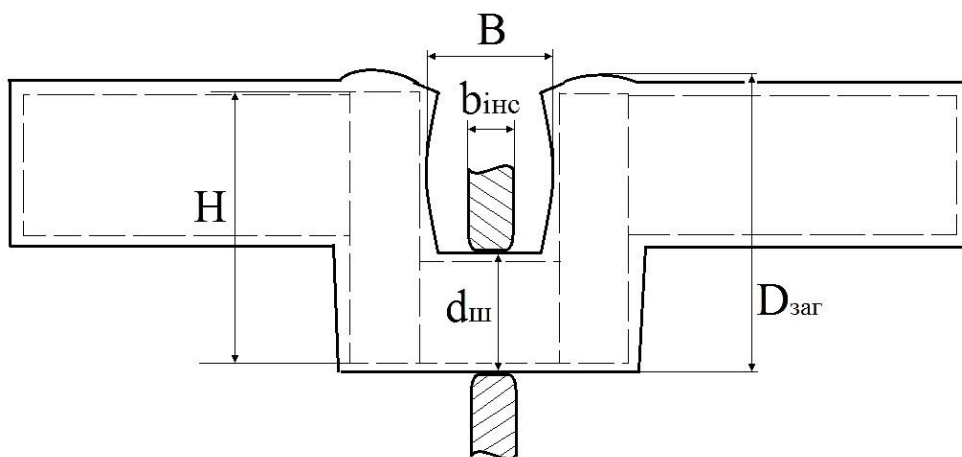


Рисунок 11 – Форма поковки та її основні геометричні параметри за розробленим методом кування



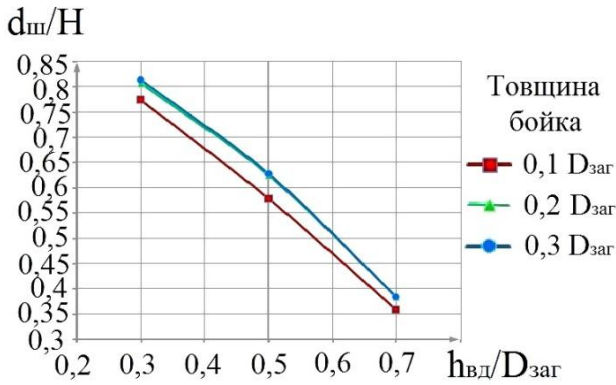


Рисунок 12 – Залежність співвідношення діаметру шатунної шийки ( $d_{ш}$ ) та ефективного діаметру коліна ( $H$ ) від параметрів кування

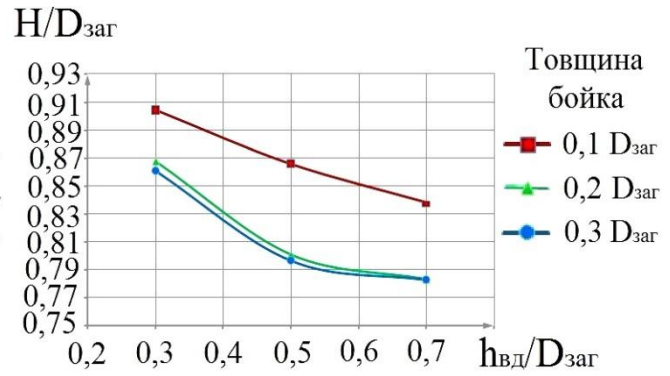


Рисунок 13 – Залежність ефективного діаметру коліна ( $H$ ) від параметрів кування

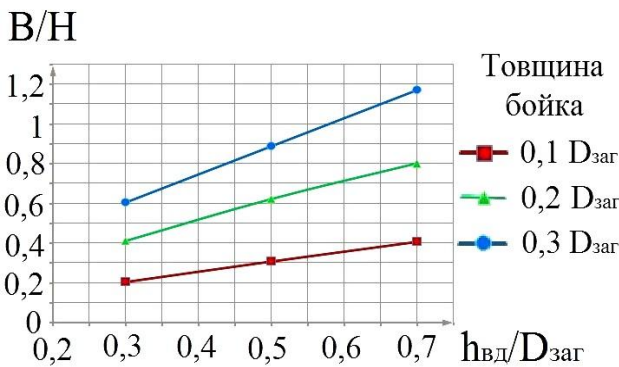


Рисунок 14 – Залежність співвідношення довжини шатунної шийки ( $V$ ) та ефективного діаметру коліна ( $H$ ) від параметрів кування

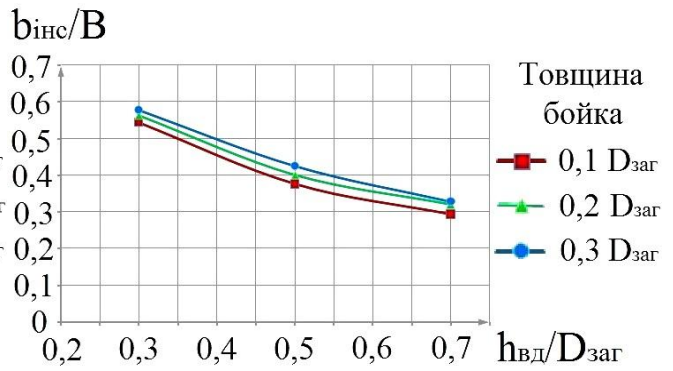


Рисунок 15 – Залежність співвідношення товщини бойка ( $b_{інс}$ ) та довжини шатунної шийки ( $V$ ) від параметрів кування

При застосуванні тонкого деформуючого інструменту з товщиною в інтервалі  $(0,1..0,3) D_{заг}$  та при глибині його вдавлення в інтервалі  $(0,3..0,7) D_{заг}$ , можливо отримати необхідні кінцеві розміри поковки ( $V$ ,  $H$ ,  $d_{ш}$ ). На рисунках 16 та 17 зображено схему послідовності дій, у вигляді блок-схеми, при складанні технологічного процесу кування колінчастого валу.

Для цього необхідно на основі кінцевих розмірів поковки ( $H$  та  $d_{ш}$ ), з урахуванням величини припуску, визначити по графіках, на рисунках 10...13, необхідний початковий діаметр заготовки ( $D_{заг}$ ), товщину деформуючого інструменту ( $b_{інс}$ ) та довжину отримуваної шатунної шийки ( $V$ ). На прикладі колінчастого валу, який найчастіше виготовляють на підприємстві «Дніпропрес Сталь», розглянемо складання технологічного процесу та розрахунок параметрів кування для отримання шатунної шийки вільним куванням. Для отримання деталі, з урахуванням припуску, з розмірами  $H = 710$  мм та  $d_{ш} = 440$  мм, отримуємо співвідношення  $d_{ш}/H = 0,62$ . Далі визначаються величини відношення  $h_{вд}/D_{заг}$ ,  $H/D_{заг}$ ,  $V/H$ ,  $b_{інс}/V$ . В даному випадку їх буде три для різних співвідношень  $b_{інс}/D_{заг}$ . За допомогою графічних залежностей визначаються

необхідні параметри процесу кування для отримання заданих геометричних параметрів поковки.



Рисунок 16 – Перша частина блок-схеми складання технологічного процесу кування

Таким чином, для отримання поковки колінчастого валу із діаметром коліна  $H = 710$  мм, діаметром шатунної шийки  $d_{ш} = 440$  мм, та довжиною шатунної шийки  $V_{д} = 240$  мм, необхідно взяти заготовку з діаметром  $D_{заг} = 812$  мм, бойок з товщиною  $b_{інс} = 90$  мм, та вдавлювати бойок в заготовку на першому етапі кування на глибину  $h_{вд} = 372$  мм. При куванні шатунної шийки використовується розроблена схема кантувань, тобто після вдавлювання бойка необхідно чотири обтиснення з кантуваннями на  $90^{\circ}$  для отримання шатунної шийки квадратного перерізу з необхідними розмірами, потім два обтиснення з кантуваннями на  $45^{\circ}$  та  $90^{\circ}$  для отримання в перерізі шатунної шийки восьмикутника та після цього десять малих обтиснень з кантуваннями на  $15^{\circ}$  для отримання шатунної шийки круглого перерізу. На цьому етапі необхідно точно дотримувати кількість обтиснень та кантувань при куванні, тому що саме на цьому етапі формується необхідна довжина шатунної шийки колінчастого валу.

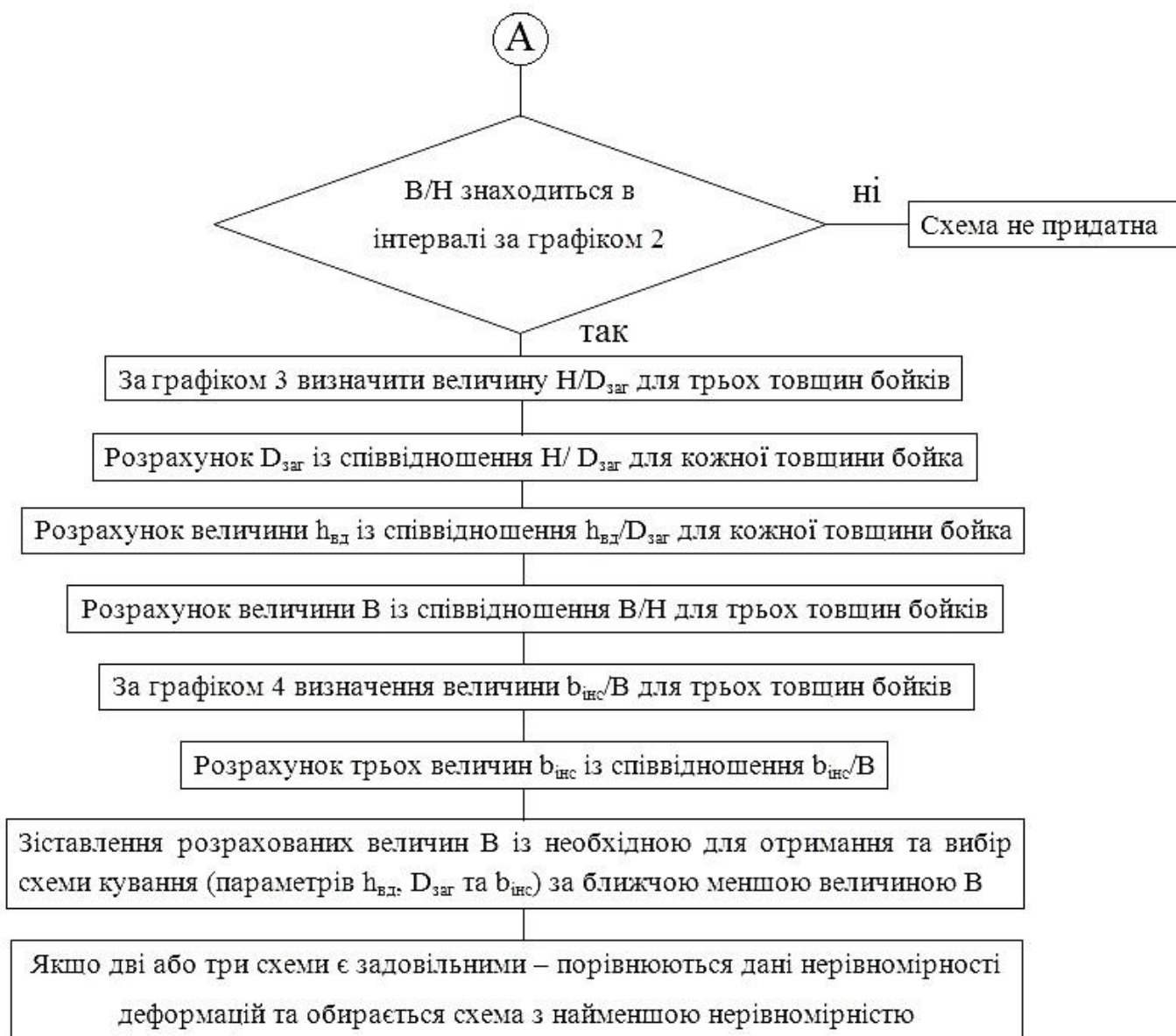


Рисунок 17 – Друга частина блок-схеми складання технологічного процесу кування

Розроблені технологічні рекомендації були запропоновані та впроваджені у виробництво на підприємстві ПрАТ «Дніпропрес Сталь» (м. Дніпро), де на даний час використовується для проектування технологічних процесів кування визначених типорозмірів поковок одноколінчастих валів з отриманням шатунної шийки (акт від 22.01.2018 р.).

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі приведено узагальнення та нове рішення науково-технічної задачі, яке міститься у визначенні основних закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів при співвідношенні товщини деформуючого інструменту до діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, та отриманні шатунної шийки вільним куванням при співвідношенні її діаметра до діаметра заготовки в інтервалі

0,3..0,7 на основі визначення деформаційних умов максимального наближення геометричних параметрів поковки до готового виробу. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні технологічної схеми виготовлення поковок колінчастих валів, за формою наближених до готової деталі, що дозволяє знизити витрати металу при виробництві.

1. З огляду літературних джерел виходить, що сучасна технологія виготовлення поковок колінчастих валів вільним куванням складається, в основному, з операцій протягування. Отримання шатунної шийки вільним куванням за існуючою технологічною схемою неможливе, тому зазвичай шатунну шийку закривають ковальським напуском, і таким чином збільшують металоємність виготовлення однієї поковки. При виготовленні поковок зазвичай використовують бойки з товщиною, яка перевищує 0,5 від діаметра заготовки, однак це співвідношення досі не було вивчено в інтервалі 0,1..0,3. Таким чином, виконаний в дисертаційній роботі розвиток елементів теорії ковальського виробництва відносно визначення основних закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу із співвідношенням товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, а також визначення деформаційних умов максимального наближення форми поковки до форми готового виробу з метою зменшення витрат металу на виготовлення поковок, актуальний.

2. Вдосконалено метод визначення об'ємної нерівномірності деформації (за Чухлібом В.Л.) для більш точного відображення нерівномірності з урахуванням різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу. Вперше при використанні деформуючого інструменту з відношенням товщини до діаметру заготовки в інтервалі 0,1..0,3, при багаторазових обтисненнях теоретично з використанням вдосконаленого методу визначення нерівномірності деформації металу, для певної довжини шатунної шийки визначено кількість обтиснень, кантувань та рівнів ступеню деформації. Методом комп'ютерного моделювання отримано розподілення деформацій, напружень та температур в металі в місці формування шатунної шийки колінчастого валу при вільному куванні. Зокрема, проведено теоретичний аналіз деформованого стану металу та визначено закономірності формозміни металу при вдавлюванні «тонкого» деформуючого інструменту в заготовку, а також при подальшому куванні шатунної шийки, що дозволяє обрати варіант схеми деформування з мінімальною нерівномірністю деформацій в місці формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

3. В роботі вперше теоретично визначено та експериментально перевірено залежність зміни величини ефективного діаметру коліна від товщини деформуючого інструменту (в інтервалі 0,1..0,3 до діаметру заготовки) та ступеню одиничної обтиснення (в інтервалі 30..70%) при вільному куванні місць формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів. Побудовані графічні залежності впливу досліджуваних параметрів кування на формозміну металу, при виготовленні поковки колінчастого валу з отриманням шатунної шийки, які допомагають прогнозувати розміри отримуваної поковки.

Проведений порівняльний аналіз теоретично побудованої (комп'ютерної) моделі та лабораторного експерименту, який довів, що геометричні параметри заготовки при комп'ютерному моделюванні відрізняються від фізичного моделювання не більше, ніж на 10%, що є достатнім для вирішення технічної задачі та свідчить про адекватність побудованої комп'ютерної моделі.

4. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень була розроблена вдосконалена технологічна схема виготовлення поковок великогабаритних колінчастих валів, а також розроблені технологічні рекомендації по застосуванню тонкого деформуючого інструменту для отримання шатунної шийки колінчастого валу за дослідженими схемами кування. Перевірено придатність розробок на підприємстві. Розроблені технологічні рекомендації впроваджено у виробництво на підприємстві ПрАТ «Дніпропрес Сталь», та використовуються для виготовлення поковок колінчастих валів із зливків та заготовок масою більше 2 тон, при використанні тонких бойків (акт від 22.01.2018 р.). Також отримані в роботі дані використовуються у навчальному процесі а також при виконанні студентами курсових проектів і випускних кваліфікаційних робіт на кафедрі обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова (НМетАУ) (довідка від 21.05.2018 р.).

#### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНО У РОБОТАХ:**

1. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессековки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ. - 2017. - №35. - С. 21-24.

2. Клемешов Е.С. Дослідження впливу параметрів кування на форму поковки колінчастого валу та впровадження розробок на ПрАТ «Дніпропрес Сталь» / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухліб, Є.І. Шифрін // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2017. - №. 2 (45) - С. 54 - 63.

3. Клемешов Е.С. Анализ путей повышения качества поковок коленчатых валов с применением осадки-протяжки слитка / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2016. - №1 (42). - С. 84 - 91.

4. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при осадці сталей та сплавів / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2015. - №5. - С. 34-40.

5. Чухлеб В.Л. Промышленное внедрение ресурсосберегающего процессаковки с рациональным режимом формоизменения уменьшенной прибыльной части слитков из коррозионностойких сталей / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, А.А. Фролов, Х. Дья // Обработка материалов давлением. 2017. №1 (44). С. 123-130.

6. Чухлеб В.Л. Исследованиековки титановых сплавов на гидравлических прессах в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дья // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении.- Запоріжжя: ЗНТУ. - 2016. - №2. С. 18-22.

7. Чухлеб В.Л. Оптимизация технологииковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С.

Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дья // Вестник НТУ «ХПИ». Харків: НТУ. - 2016. - №31. - С. 75 - 81.

8. Чухлеб В.Л. Исследование неравномерности распределения деформаций при протяжке заготовок из сплава ЭИ698 при переменных параметрах предварительной осадки / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, Х. Дья // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. Collective monograph. – Czestochowa, Polska. - 2016. - №56. - S. 232-238.

9. Клемешов Є.С. Дослідження формозміни заготовки при вдавлюванні вузького бойка / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня – 1 липня 2017 р. Матеріали конференції. – Київ, КП:2017. – С. 106 – 107.

10. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессековки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // IX Международная научно-техническая конференция «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», 22-24 листопада 2017 р. Матеріали конференції. – Харків, ХП:2017.

11. Клемешов Е.С. Анализ неравномерности распределения деформаций при ковке шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25-26 квітня 2018 р. Матеріали конференції. – Кременчук, КрНУ:2018.

12. Клемешов Є.С. Дослідження видовження шатунної шийки при куванні тонкими бойками / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 29 травня - 02 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Залізний Порт.

13. Клемешов Є.С. Дослідження процесу кування опорних шийок та його впливу на форму коліна / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 19-22 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Київ, НТУУ КП:2018.

## АНОТАЦІЯ

**Клемешов Є.С. Розвиток теоретичних та технологічних основ металоаощаджувального процесу кування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена визначенню основних закономірностей формозміни металу при використанні тонкого деформуючого інструменту, а також визначенню деформаційних умов максимального наближення форми і

розмірів поковки до готового виробу та створенню удосконаленої технології одержання поковок деталей типу «колінчастий вал».

Отримав подальший розвиток метод оцінювання нерівномірності деформації. Виконано аналіз і порівняння одержаних результатів експериментальних досліджень при використанні тонкого деформуючого інструменту та даних, одержаних шляхом комп'ютерного моделювання із використанням програмного забезпечення «QForm».

За результатами експериментальних та теоретичних досліджень були розроблені технологічні рекомендації по застосуванню вдосконаленого способу кування поковок колінчастих валів із застосуванням тонких бойків для одержання шатунної шийки колінчастого валу вільним куванням.

Ключові слова: ВІЛЬНЕ КУВАННЯ, ВЕЛИКОГАБАРИТНИЙ КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, ШАТУННА ШИЙКА, ТОНКИЙ БОЙОК, ФОРМОЗМІНА, НЕРІВНОМІРНІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ

### АННОТАЦИЯ

**Клемешов Е.С. Развитие теоретических и технологических основ металосберегающего процессаковки шатунной шейки крупногабаритных коленчатых валов. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением. - Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, 2019.

Диссертация посвящена определению основных закономерностей формоизменения металла при использовании тонкого деформирующего инструмента, а также определению деформационных условий максимального приближения формы и размеров поковки к готовому изделию и созданию усовершенствованной технологии получения поковок деталей типа «коленчатый вал».

Получил дальнейшее развитие метод оценки неравномерности деформации. Выполнен анализ и сравнение полученных результатов экспериментальных исследований при использовании тонкого деформирующего инструмента и данных, полученных путем компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения «QForm».

По результатам экспериментальных и теоретических исследований были разработаны технологические рекомендации по применению усовершенствованного способаковки поковок коленчатых валов с применением тонких бойков для получения шатунной шейки коленчатого вала свободной ковкой.

Ключевые слова: СВОБОДНАЯ КОВКА, КРУПНОГАБАРИТНИЙ КОЛЕНЧАТЫЙ ВАЛ, ШАТУННАЯ ШЕЙКА, ТОНКИЙ БОЁК, ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ, НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ

**ABSTRACT****Klemeshov Y. S. Development of theoretical and technological metal-saving forging process of large-sized crankshaft`s crank pin. - Manuscript.**

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.03.05 "Processes and machines of pressure treatment". - National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to the determination of the basic regularities of metal forming when using a thin deforming tool, as well as to determine the deformation conditions of the maximum approximation of the shape and size of forging to the finished product and to create an advanced technology for the production of forgings of parts the type of "crankshaft"

On the basis of a literary review of the current state of developments in the field of manufacturing forgings of crankshafts, it has been found that forgings impose requirements for quality, which include the accuracy of geometry and the required level of mechanical properties. Closed-die forging and upsetting-bending method (TR-method) are used for serial production and have limitations on forging masses. The method of free forging is used mostly in single production and allows obtaining large-sized forgings. This achieved at the expense of significant metal costs. When applying a more "thin" deforming tool, it is possible to forge a crank pin, which will save metal due to the approaching form of forging to the finished part.

An improved method for estimating strain unevenness is also used in the work. This method is developed in co-authorship, and further development of the method is given in this paper. The essence of the improvement lies in a different method of data processing, namely, taking into account the difference between the mean values of the unevenness factor and the values of this parameter at certain points of the cross-section of forging. On the basis of the technology analysis, an experiment plan, consisting of nine experiments, was developed. As factors of influence, two parameters are chosen, namely the thickness of the deforming tool and the depth of its indentation. The form of the samples obtained after deformation has been analyzed, and the dependences of changes in geometric parameters in the zone of the formation of the crank pin from studied forging process parameters has been considered. The dependence of the change in the value of the effective diameter of the knee on the given forging parameters in the places of formation of the crank pin of the crankshaft was obtained. This allows assigning, with a certain thickness of the deforming tool, the level of compression to form the required diameter of the crank pin and the shaft cheek at the location of the knee. According to the experiment plan, a computer model, in program "QForm", was constructed and a calculation was made. The estimation of the discrepancy of data between experiment and modeling showed that the error is not more than 10%. Were developed a scheme of cantings, that allows obtaining a crank pin with a round cross-section.

On the basis of the conducted researches results, the advanced technology of large crankshafts forgings production was developed. On the basis of the received regularities of metal shaping, recommendations on the application of a "thin" deforming tool were developed, and, using an improved method for determining the unevenness of deformation for a certain length of a crank pin, the number of



coggings, rotation degrees and levels of deformation was determined. This allows to choose the variant of deformation (forging scheme) with minimal deformations unevenness of metal at the place of large crankshafts crank pin formation.

Keywords: FREE FORGING, LARGE CRANKSHAFT, CRANK PIN, THIN FORGING DIE, FORMING, UNEVEN DEFORMATION

Підписано до друку 10.01.2019. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір друкарський.  
Друк цифровий. Гарнітура Times Roman. Умовн. друк. арк. 1,85. Обл.-видавн.арк. 1,9.  
Замовлення №\_\_\_\_. Наклад 100 примірників.

49050, м. Дніпропетровськ, пл. Академіка Стародубова, 1. Друкарня „Візіон”  
Свідоцтво про держреєстрацію № 04052442 Ю 0021076  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДП № 60-р від 20.03.2001 р.