

УДК 621.7

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-34>

КУВАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ДЕФОРМУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ПОКОВОК

Палієнко Володимир Олексійович,

аспірант кафедри комп'ютерного моделювання
та інтегрованих технологій обробки тиском
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID ID: 0000-0003-2533-1300

Чухліб Віталій Леонідович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерного моделювання та
інтегрованих технологій обробки тиском
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID ID: 0000-0001-6176-0917

У роботі розглянуто підхід до вдосконалення технології вільного кування поковок колінчастих валів шляхом аналізу нерівномірності деформації в об'ємі заготовки. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення однорідності механічних властивостей деталей, мінімізації внутрішніх дефектів та зниження витрат металу й енергії. Одним із важливих етапів є передача металу в процесі вільного кування, яка часто супроводжується нерівномірним розподілом пластичної деформації, що призводить до внутрішніх напружень та викривлення заготовки.

За допомогою інструменту «перетискач» можна цілеспрямовано контролювати локальні напруження металу та направляти для подальшої операції передачу металу, що сприяє більш рівномірному розподілу пластичної деформації. Використання перетискача підвищує однорідність структури поковок, знижує ризик виникнення внутрішніх дефектів і викривлень, а також оптимізує енергетичні витрати процесу.

Для оцінювання характеру деформування застосовано метод визначення нерівномірності пластичної деформації на основі аналізу поперечних перерізів поковки. Методика передбачає визначення ділянки з максимальною інтенсивністю деформації, що дає змогу дослідити напружено-деформований стан.

Отримані результати дали змогу встановити зв'язок між геометрією інструменту, параметрами деформування (температура, ступінь деформації) та характером розподілу деформації. Такий підхід дає змогу прогнозувати критичні зони, обґрунтовувати вибір режимів кування та адаптувати технологію до особливостей конкретних виробів, що сприяє зменшенню кривизни поковок, підвищенню рівномірності структури та поліпшенню технологічної спадковості.

Результати дослідження можуть бути використані для проектування ефективних процесів вільного кування відповідальних деталей, зокрема колінчастих валів, із прогнозовано стабільними експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: кування, колінчастий вал, поковка, нерівномірність деформації.

Paliienko Volodymyr, Chukhlib Vitalii. Crankshaft forging, taking into account the impact of deformation modes on the quality of forgings

The study addresses an approach to improving the free forging technology of crankshaft forgings by analyzing the uneven distribution of deformation within the workpiece volume. The relevance of the research is driven by the need to enhance the uniformity of mechanical properties of parts, minimize internal defects, and reduce metal and energy consumption. One of the critical stages is the metal transfer process during free forging, which is often accompanied by an uneven distribution of plastic deformation, leading to internal stresses and distortion of the workpiece.

Using the “swage” tool, it is possible to purposefully control local metal stresses and direct metal flow for subsequent operations, contributing to a more uniform distribution of plastic deformation. The application of the swage increases the homogeneity of the forging structure, reduces the risk of internal defects and distortions, and optimizes the energy consumption of the process.

To evaluate the nature of deformation, a method for determining the unevenness of plastic deformation based on the analysis of cross-sections of the forging was applied. The methodology involves identifying areas with maximum deformation intensity, allowing the investigation of the stress-strain state.

The obtained results made it possible to establish the relationship between tool geometry, deformation parameters (temperature, degree of deformation), and the nature of deformation distribution. This approach allows for predicting critical zones, justifying the selection of forging modes, and adapting the technology to the specific features of individual parts, which contributes to reducing forging distortion, increasing structural uniformity, and improving technological heredity.

The research results can be used to design effective free forging processes for critical parts, particularly crankshafts, with predictably stable operational properties.

Keywords: *forging, crankshaft, forging, deformation unevenness.*

Вступ. Одним із перспективних напрямів удосконалення ковальського виробництва є впровадження підходів, що дають змогу передбачати якість кованих заготовок ще на етапі проєктування процесу. Це, зокрема, включає використання комп'ютерних засобів моделювання та автоматизованих систем підтримки інженерних рішень. Запровадження розрахункових методів значно полегшує процес створення нових технологічних маршрутів, водночас підвищуючи їх точність та ефективність.

Проблематика забезпечення якості поковок колінчастих валів та вдосконалення технології їх виготовлення на основі оптимізації режимів деформування активно досліджується як українськими, так і зарубіжними науковцями [1–4; 7; 8]. В умовах підвищених вимог до експлуатаційної надійності відповідальних деталей особливого значення набувають питання вибору раціональних параметрів термомеханічного впливу, які забезпечують однорідність структури та мінімізацію дефектів.

Вітчизняні дослідження [1; 2; 16] акцентують увагу на розробленні нових способів осадження крупних злитків і профільованих заготовок, що дає змогу поліпшити розподіл деформації та зменшити навантаження на інструмент. Запропоновані підходи забезпечують покращення металургійної якості осьової частини злитка без потреби в додатковому переосадженні. Подібні ресурсощадні рішення, орієнтовані на крупногабаритні вали, демонструють ефективність за умови правильної організації послідовності деформації [3; 4].

Є роботи [5; 6; 10], які присвячено аналізу впливу режимів кування на формування мікроструктури та властивостей сталей різних класів. Особлива увага надається умовам кування на гідропресах, ізотермічному деформуванню та можливостям управління рекристалізацією за допомогою апроксимації відповідних діаграм. Це дає змогу обґрунтовано підбирати параметри технологічного процесу з урахуванням властивостей вихідного матеріалу.

Сучасні підходи до прогнозування результатів кування базуються на чисельному моделюванні. У працях [7; 9; 11; 17–19] розглядається застосування програмного забезпечення

(зокрема, QForm) для моделювання розподілу температур, напружень і деформацій у поковах. Метод скінченних елементів (FEM) дає змогу проаналізувати динаміку формозміни, виявити потенційні зони утворення дефектів та оптимізувати конструкцію інструменту, включаючи використання бойків складної форми [11].

Результати виконаних досліджень [7; 9; 11; 12] підтверджують ефективність 3D-моделювання процесу вільного кування, зокрема під час формування довгомірних заготовок. Вони демонструють, що правильна геометрія інструменту й контроль асиметрії за деформування дають змогу знизити залишкові напруження та підвищити геометричну точність поковок.

Окрему групу становлять роботи, що стосуються автоматизації та цифровізації процесів виготовлення колінчастих валів [13; 15]. Зокрема, аналіз надійності виробничих ліній, контроль режимів деформування та впровадження верифікованих цифрових моделей сприяють переходу від емпіричних технологій до науково обґрунтованих рішень. Використання таких підходів дає змогу забезпечити стабільну якість поковок навіть за умов складного навантаження й варіативності матеріалу.

Таким чином, літературний аналіз свідчить про наявність чіткої тенденції до поєднання експериментальних даних із результатами моделювання для оптимізації процесів кування колінчастих валів. Особливе значення при цьому мають геометрія заготовки, спосіб формозміни, температурно-швидкісні режими та можливості комп'ютерного аналізу [14; 18; 19].

Сьогодні для кування колінчастих валів сформовано низку технологічних підходів, що дають змогу досягати заданого середнього рівня механічних властивостей поковок. Проте, як свідчить виробничий досвід, ці методи не гарантують просторової однорідності структури та властивостей, що особливо актуально для деталей складної форми.

Однією з основних причин такої нерівномірності у розподілі механічних характеристик є недостатнє теоретичне й практичне обґрунтування впливу ключових параметрів деформування на формування якості металу. Зокрема, йдеться про передачу металу в зоні деформації,

де оптимальні значення параметрів (ступінь деформації, кут технологічного інструменту «перетискач», величина подачі, температура, геометрія зони деформації тощо) часто визначаються емпірично або з використанням надмірних запасів. Це не лише ускладнює планування процесу, а й призводить до зростання енерговитрат і зниження ефективності виробництва.

Окрім того, у разі нерівномірного пластичного потоку зростає ризик перерізання волокон металу під час операції передачі під час кування колінчастих валів. Це явище спричинює формування внутрішніх напружень, що знижують експлуатаційні характеристики виробу та можуть ініціювати дефекти, зокрема тріщиноутворення на поверхні.

Сьогодні відсутня узагальнена методика для розрахунку раціональних параметрів ковальського процесу, яка б спиралася на прогнозування просторового розподілу механічних властивостей у готовій поковці. Через це на етапі проектування часто застосовуються завищені коефіцієнти деформації, що не завжди є обґрунтованими з позиції якості й економії процесу.

Окремою проблемою залишається відсутність підходу до оцінки оптимального співвідношення формоутворювальних характеристик за зміни напрямку деформації у процесі кування колінчастих валів. Також недостатньо вивченим залишається вплив ковальського інструменту типу «перетискач» на просторову структуру пластичного потоку та на формування властивостей металу в зонах концентрації напружень.

Відсутність систематизованих даних щодо зазначених процесів ускладнює можливість моделювання, прогнозування та оптимізації кування колінчастих валів з урахуванням конкретних умов формоутворення. Отже, поглиблене дослідження механізмів формування якості поковок на основі застосування методів прогнозування розподілу деформації та властивостей матеріалу є актуальним напрямом у галузі обробки металів тиском.

Аналіз нерівномірності деформації під час кування колінчастих валів. У процесі виготовлення поковок колінчастих валів одним із вирішальних чинників, що впливають на їхню якість, є рівномірність деформування металу в об'ємі заготовки. Відомо, що механічні властивості, щільність та макроструктура матеріалу формуються під дією локальних напружень і залежать від характеру та інтенсивності деформацій на кожному етапі технологічного процесу.

У традиційній практиці кування для оцінки ступеня пластичної деформації використовують

поняття укова: за операцію, за винос, а також сумарного укова за весь технологічний цикл. Проте, як засвідчено у наукових публікаціях, за поєднання різних видів деформацій (наприклад, осаджування та протягування) сумарне значення укова не дає об'єктивної картини внутрішнього стану матеріалу. Особливо це актуально у випадках комбінованих технологічних схем, де зміни структури і властивостей суттєво залежать від локальних умов деформування.

Згідно з даними попередніх досліджень, недостатня рівномірність деформації спричиняє утворення зон із неоднаковою щільністю, що в подальшому може призвести до появи внутрішніх дефектів: тріщин або порожнин. У зв'язку із цим важливо не лише враховувати середні значення деформації, а й аналізувати розподіл деформаційного навантаження в критичних зонах, зокрема у щоках колінчастих валів.

У роботі використано метод оцінки об'ємної нерівномірності деформації, що ґрунтується на виявленні зон із найбільш вираженими відхиленнями в поперечному перерізі поковки та визначенні пов'язаних із цим деформаційних аномалій, зокрема поздовжньої викривленості. Такий підхід, запропонований у раніше опублікованих роботах [20], дає змогу формалізовано оцінювати ступінь нерівномірності та прогнозувати поведінку металу на завершальних стадіях формування.

Окрім інтенсивності деформації, важливу роль у кінцевій якості поковки відіграє термомеханічний режим: температура нагріву, швидкість деформації та швидкість охолодження. Залежно від матеріалу й наявності термообробки після кування структурні зміни можуть або зберігати відбиток останніх деформаційних впливів, або повністю нівелюватися.

Якість поковок також визначається конструктивними особливостями інструменту (формою бойків), вибором типу заготовки (злиток або попередньо кована) і точністю дотримання температурних параметрів. У виробничих умовах відсутність узагальнених об'єктивних критеріїв часто призводить до того, що проектування технології спирається переважно на практичний досвід. Це знижує передбачуваність результатів та ускладнює керування якістю.

Недоліки у структурі та властивостях часто зумовлені не матеріалом, а невдалим вибором режимів деформації чи конструкцією інструменту. Тому особливої актуальності набуває завдання підвищення рівномірності деформації шляхом раціонального керування технологічними параметрами. Серед можливих

засобів – оптимізація операцій передачі металу під час кування, застосування спеціального інструменту типу «перетискач», а також регулювання температурно-швидкісних режимів відповідно до поточного стану заготовки.

Застосування методики оцінки нерівномірності деформації дає змогу підвищити обґрунтованість прийняття технологічних рішень, зменшити ймовірність дефектів та забезпечити стабільну якість поковок. Це, своєю чергою, сприяє вдосконаленню технології кування під час виготовлення відповідальних деталей, зокрема колінчастих валів.

Для визначення ступеня нерівномірності деформування в об'ємі поковки, а також пов'язаного із цим розподілу механічних властивостей у даному дослідженні використано відомий алгоритм прогнозування, заснований на аналізі накопиченої деформації в характерних точках поперечного перерізу.

Метод передбачає визначення точки з максимальним значенням накопиченої деформації у кожному окремому поперечному перерізі. Від цієї точки через геометричний центр перерізу проводиться основна напрямна лінія. Додатково будуються ще три напрямні, розташовані під кутами 45° відносно основної, таким чином формуючи чотирипроменеву систему, яка забезпечує симетричне охоплення площини перерізу.

На кожній із побудованих напрямних рівномірно розміщуються контрольні точки – по шість на кожній лінії, симетрично відносно центру перерізу та точки максимуму. Ці точки використовуються для кількісного аналізу накопиченої деформації у вибраних напрямках. Для зручності інтерпретації результатів застосовується візуалізація за допомогою кольорової шкали, яка демонструє інтенсивність деформування у межах перерізу (рис. 1).

Досягнення рівномірності механічних властивостей у різних зонах поковки є критично важливою умовою забезпечення надійності готового виробу. Оскільки структурні характеристики матеріалу безпосередньо залежать від ступеня пластичної деформації, доцільно орієнтуватися не на пікові (максимальні) значення, а на середній рівень накопиченої деформації у межах аналізованого перерізу. Такий підхід дає змогу більш об'єктивно оцінити якість деформування та спрогнозувати поведінку матеріалу в умовах експлуатаційних навантажень.

Для кількісної характеристики однорідності деформування в поперечному перерізі поковки в даній роботі було застосовано підхід, описаний у [20], що передбачає використання середнього

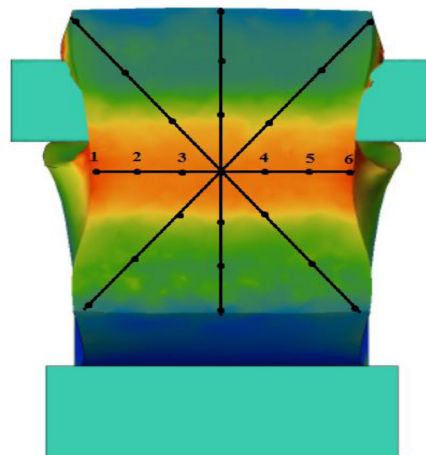


Рис. 1. Розташування ліній та точок у перерізі за передачі металу під час кування колінчастих валів

значення локальних коефіцієнтів деформації як базового критерію. Такий підхід дає змогу більш об'єктивно оцінити ступінь рівномірності впливу навантаження на структуру металу.

На наступному етапі обчислюється показник нерівномірності. Розрахунки виконуються для кожної точки. У подальшому можлива побудова інтегральної оцінки нерівномірності для всього перерізу.

Застосування цього методу на практиці передбачає обчислення відповідних значень у декількох поперечних перерізах поковки на ключових етапах технологічного процесу, зокрема під час формування щоби колінчастого валу. Для підвищення точності аналізу доцільно проводити розрахунки щонайменше у трьох характерних перетинах уздовж осі заготовки на кожному технологічному етапі. Просторове розташування цих перерізів наведено на рис. 2

Такий підхід забезпечує зв'язок між локальними умовами деформування та напружено-деформованим станом матеріалу, даючи змогу обґрунтовано вибирати раціональні параметри технологічного процесу з урахуванням впливу нерівномірності на кінцеві характеристики поковки.

Якість поковки визначається двома ключовими аспектами: геометричними параметрами, зокрема кривизною, та механічними властивостями. Ці характеристики мають відповідати вимогам нормативної документації, яка регламентує як рівень механічних властивостей, так і допустимі геометричні відхилення. Геометричні допуски, зокрема припуски на механічну обробку, передбачають наявність додаткового шару металу, який компенсує відхилення форми й розмірів, у тому числі кривизну. Проте надмірний припуск збільшує витрати металу,

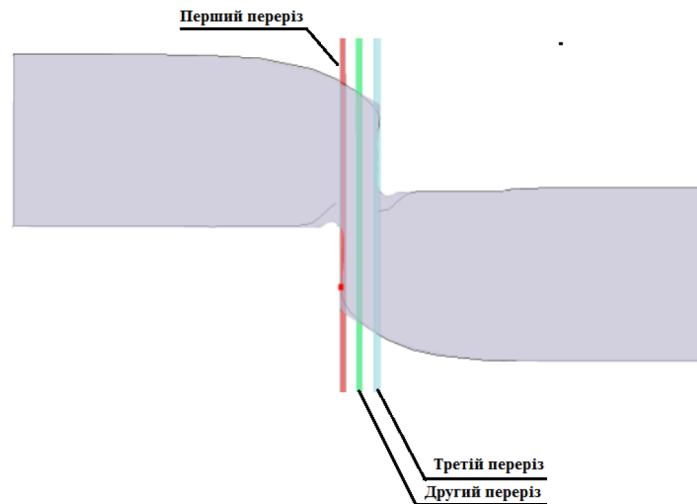


Рис. 2. Розташування перерізів у процесі визначення нерівномірності деформації для операції «передача металу» під час кування щоки колінчастого валу

що веде до підвищення собівартості деталі та зменшення коефіцієнта використання металу.

Як показано на рис. 3, вигин заготовки, що виникає унаслідок нерівномірного деформування металу, спричиняє додаткові витрати металу та енергії на правлення поковки. Тому оптимізація параметрів кування дає змогу досягти високої точності геометрії поковки, зменшити кривизну і, відповідно, поліпшити економічні показники виробництва.

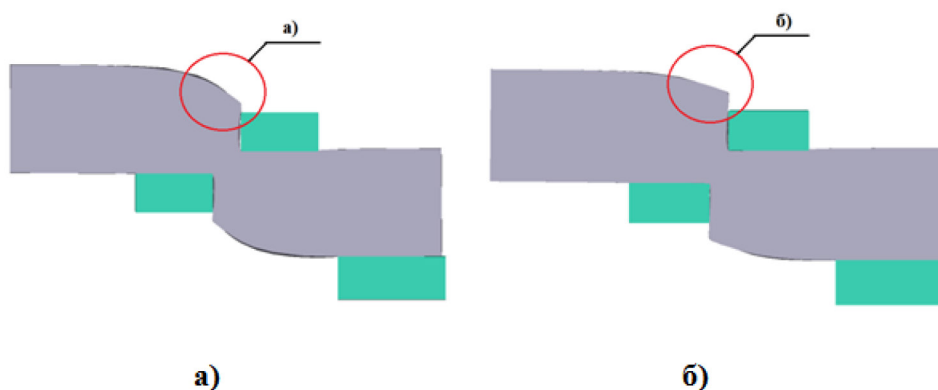
Якість поковки оцінюється за двома основними критеріями: геометричними параметрами, передусім кривизною, та механічними властивостями матеріалу. Обидва аспекти мають відповідати встановленим нормативним вимогам, які регламентують допустимі відхилення форми, розмірів і рівень механічних характеристик.

У нормативній документації передбачено надання припусків на механічну обробку, що враховують можливі геометричні відхилення,

зокрема вигин або викривлення заготовки. Ці припуски формують додатковий шар металу, який підлягає видаленню під час остаточної обробки. Водночас надмірні припуски призводять до збільшення витрат металу, що негативно позначається на економічній доцільності процесу та знижує коефіцієнт використання матеріалу.

Як показано на рис. 3, викривлення заготовки, спричинене нерівномірним розподілом деформації в об'ємі металу, стає однією з основних причин підвищених втрат. У такому разі зростає потреба у додаткових операціях правлення, що тягне за собою збільшення енергетичних і трудових витрат.

У зв'язку із цим оптимізація технологічних параметрів процесу кування набуває особливої важливості. Контрольована передача металу, раціональні температурно-деформаційні режими та застосування раціонального інструменту дають змогу мінімізувати кривизну



**Рис. 3. Вплив нерівномірного деформування на вигин поковки:
а) зона локального ущільнення металу та вигин поковки;
б) усунення вигину шляхом рівномірного деформування**

поковки, що, своєю чергою, сприяє зниженню обсягів додаткової обробки, економії металу, підвищенню загальної ефективності виробничого процесу.

Таким чином, забезпечення високої геометричної точності є не лише технологічним завданням, а й важливим чинником зниження собівартості готової деталі.

Висновки. Одним із визначальних чинників, що впливає на якість поковок під час кування, є рівномірність напружено-деформованого стану (НДС) в об'ємі заготовки. Саме рівномірність пластичної деформації визначає ступінь однорідності механічних властивостей по всьому об'єму деталі.

У ході дослідження використано підхід, заснований на визначенні розподілу деформації під час процесу вільного кування, що дає змогу виявляти зони з потенційною нерівномірністю НДС. Такий аналіз дає змогу цілеспрямовано коригувати параметри кування, зокрема схему деформування, з метою зменшення геометричних відхилень, зниження кривизни поковки та поліпшення мікроструктури матеріалу.

Одним із поширених негативних наслідків нерівномірного протікання деформаційного

процесу є вигин заготовки, який знижує геометричну точність і створює зони локального структурного ослаблення. Для усунення кривизни зазвичай застосовується операція правлення за допомогою пресів або спеціального обладнання. Проте така технологічна процедура не лише збільшує енергетичні витрати, а й формує додаткові згинальні напруження, що можуть зумовити вторинну нерівномірність у розподілі деформації.

У роботі реалізовано підхід до визначення технологічної схеми кування, що враховує геометричні особливості деталей, таких як колінчасті вали, та дає змогу забезпечити рівномірний розподіл властивостей по перерізу й довжині поковки. Така стратегія сприяє зменшенню обсягів правлення, скороченню втрат металу, підвищенню точності геометрії та загальної ефективності виробництва.

Результати дослідження підтверджують, що впровадження розглянутого у роботі підходу до аналізу процесу формозміни дає змогу значно підвищити якість поковок: знизити вигин, стабілізувати структуру металу, зменшити енерговитрати та підвищити ресурс готових деталей без застосування додаткових операцій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Удосконалення технології виготовлення крупних поковок на основі використання нового способу осадження / О. Є. Марков та ін. *Обробка металів тиском*. 2020. № 1(50). С. 91–97.
2. Розроблення нового способу осадження крупних злитків / О. Є. Марков та ін. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». 2018. № 31(1306). С. 56–60.
3. Kargin S. B. Development and investigation of resources-saving process of shafts forging. *Die Forging. Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 1. P. 33–36.
4. Markov O. E., Oleshko M. V., Mishina V. I. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighing More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. Vol. 3, № 7. P. 87–90.
5. Матюхін А. Ю., Альфьоров І. А., Стефаненко Т. А., Стефаненко О. В. Способи підвищення якості кування поковок високолегованих марок сталей та сплавів на гідропресах. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». 2019. № 12(1337). С. 36–40.
6. Sharma S., Sharma M., Gupta V., Singh J. A systematic review of factors affecting the process parameters and various measurement techniques in forging process. *Steel Research International*. 2023. Vol. 94, Issue 5. P. 352.
7. Dyja H., Banaszek G., Berski S., Mroz S. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forged products. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158. P. 496–501.
8. Rao V. D. Metallurgical integrity for economic production of quality steel forgings for advanced applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39, Part 4. P. 1434–1439.
9. Dyja H., Mroz S., Milenin A. FEM modeling of hot forging with shape dies. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2006. Vol. 6, No. 4. P. 101–111.
10. Розроблення автоматизованої методики апроксимації діаграм рекристалізації для вибору термомеханічних режимів кування, що підвищують експлуатаційні властивості поковок валів / В. В. Кухар та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 2. С. 123–130.
11. Dyja H., Banaszek G., Mroz S., Berski S. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158. P. 131–137.

12. Torims T., Pikurs G., Ratkus A., Logins A., Valcans J., Sklariks S. Development of technological equipment to laboratory test in-situ laser cladding for marine engine. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 559–568.
13. Forging Technology and Improvement of Passenger Car Crankshaft. – URL: <https://www.linkedin.com/pulse/forging-technologyimprovement-passenger-car-crankshaft> (дата звернення: 20.06.2025).
14. Enzi A., Khan S. A. Automated Production Line Reliability Analysis of the Crankshaft Manufacturing Process. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16, No. 1. P. 15–27.
15. Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження профільованих заготовок / О. Марков та ін. *Технічні науки та технології*. 2022. № 1(27). С. 47–48.
16. Mašek B., Nový Z., Kešner D., Meyer L. Computer simulation of technological chain by free forging. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/268432694/download>
17. Mašek B., Nový Z., Kešner D. 3D simulace pēchování a prodlužování kovářského ingotu I 45. URL: <https://docplayer.cz/16519172-3d-simulace-pechovani-a-prodluzovani-kovarskeho-ingotu-i-45.html>
18. Markov O. New Technological Process of Shafts Forging. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering*. Czestochowa: Quick-druk, 2012. P. 414–418. ISBN 978-83-87745-74-5.
19. QForm UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (дата звернення: 21.06.2025).
20. Розроблення технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок / В. Л. Чухліб та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Гідравлічні машини та гідроагрегати». 2021. № 1. С. 95–103.

REFERENCES:

1. Markov, O. Ye., Zlyhoriev, V. M., Ivanova, Yu. O., Lager, O. O., & Dorofiev, V. O. (2020). Udoskonalennia tekhnologii vyhotovlennia krupnykh pokovok na osnovi vykorystannia novoho sposobu osadzhennia [Improvement of the technology for producing large forgings based on the use of a new upsetting method]. *Obrabka metaliv tsyskom – Metal Forming by Pressure, (1 [50])*, 91–97. [in Ukrainian].
2. Markov, O. Ye., Zlyhoriev, V. M., Herasymenko, O. V., Aliieva, L. I., Zhytnikov, R. Yu., & Inchakov, Ye. V. (2018). Rozrobka novoho sposobu osadzhennia krupnykh zlytkiv [Development of a new upsetting method for large ingots]. *Visnyk NTU “KhPI”. Seria: Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii – NTU “KhPI” Bulletin. Series: Innovative Technologies & Material Processing Equipment in Mechanical Engineering and Metallurgy, (31 [1306])*, 56–60. [in Ukrainian].
3. Kargin, S. B. (2015). Development and investigation of resourcessaving process of shafts forging. *Die Forging. Metallurgical and Mining Industry, (1)*, 33–36.
4. Markov, O. E., Oleshko, M. V., & Mishina, V. I. (2011). Development of energysaving technological process of shafts forging weighing more than 100 tons without ingot upsetting. *Metallurgical and Mining Industry, 3(7)*, 87–90.
5. Matiukhin, A. Yu., Alfiorov, I. A., Stefanenko, T. A., & Stefanenko, O. V. (2019). Sposoby pidvyshchennia yakosti kuvannia pokovok vysokolehovanykh marok stalei ta splaviv na hidropsakh [Methods of improving the quality of forging highalloy steel and alloy forgings on hydraulic presses]. *Visnyk NTU “KhPI”. Seria: Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia... – NTU “KhPI” Bulletin. Series: Innovative Technologies & Material Processing Equipment... (12 [1337])*, 36–40. [in Ukrainian].
6. Sharma, S., Sharma, M., Gupta, V., & Singh, J. (2023). A systematic review of factors affecting the process parameters and various measurement techniques in forging process. *Steel Research International, 94(5)*, 352.
7. Dyja, H., Banaszek, G., Berski, S., & Mroz, S. (2004). Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forged products. *Journal of Materials Processing Technology, 157–158*, 496–501.
8. Rao, V. D. (2021). Metallurgical integrity for economic production of quality steel forgings for advanced applications. *Materials Today: Proceedings, 39(part 4)*, 1434–1439.
9. Dyja, H., Mroz, S., & Milenin, A. (2006). FEM modeling of hot forging with shape dies. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 6(4)*, 101–111.
10. Kukhari, V. V., Tuzenko, O. O., Balalaieva, O. Yu., et al. (2015). Rozrobka avtomatyzovanoi metodiky aproximatsii diagram rekristalizatsii dlia vyboru termomekhanichnykh rezhymiv kuvannia, shcho pidvyshchuiet' ekspluatatsiini vlastyvoli pokovok valiv [Development of automated methodology for approximation of recrystallization diagrams to select thermomechanical forging regimes that enhance the service properties of shaft forgings]. *Visnyk Vynitskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, (2)*, 123–130. [in Ukrainian].
11. Dyja, H., Banaszek, G., Mroz, S., & Berski, S. (2004). Modelling of shape anvils in free hot forging of long products. *Journal of Materials Processing Technology, 157–158*, 131–137.

12. Torims, T., Pikurs, G., Ratkus, A., Logins, A., Valcans, J., & Sklariks, S. (2015). Development of technological equipment to laboratory test insitu laser cladding for marine engine. *Procedia Engineering*, 100, 559–568.
13. Forging Technology and Improvement of Passenger Car Crankshaft. (n.d.). Retrieved June 20, 2025, from <https://www.linkedin.com/pulse/forging-technologyimprovement-passenger-car-crankshaft>
14. Enzi, A., & Khan, S. A. (2022). Automated production line reliability analysis of the crankshaft manufacturing process. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(1), 15–27.
15. Markov, O., Khvashchynskyi, A., Musorin, A., Markova, M., & Lysenko, A. (2022). Doslidzhennia novoho sposobu kuvannia velykykh zlytkiv na osnovi osadzhennia profilovanykh zahotovok [Study of a new forging method for large ingots based on upsetting profiled billets]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (1 [27]), 47–48. [in Ukrainian].
16. Mašek, B., Nový, Z., Kešner, D., & Meyer, L. (2015). Computer simulation of technological chain by free forging. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/268432694/download>
17. Mašek, B., Nový, Z., & Kešner, D. (n.d.). 3D simulace pěchování a prodlužování kovářského ingotu I 45. Retrieved from <https://docplayer.cz/16519172-3d-simulacepechovaniaproduzovanikovarskehoingotui45.html>
18. Markov, O. (2012). New technological process of shafts forging. In *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering* (pp. 414–418). Czestochowa: Quickdruk. ISBN 9788387745745.
19. QForm UK. (n.d.). Retrieved June 21, 2025, from <https://www.qform3d.com/>
20. Chukhlib, V. L., Ashkelianets, A. V., Hubsnyi, S. O., Petrov, O. V., Duvanskyi, O. M., Palienko, V. O., & Okun', A. O. (2021). Rozrobka tekhnolohichnoi kontseptsii proektuvannia protsesiv kuvannia z urakhuvanniam vplyvu rezhymu deformuvannia na yakist' pokovok [Development of technological concept for designing forging processes considering the influence of deformation regime on forging quality]. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Hidravični mashyny ta hidroahragaty – Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Hydraulic Machines and Hydraulic Units*, (1), 95–103. [in Ukrainian].