

**В. Л. ЧУХЛІБ, А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, С. О. ГУБСЬКИЙ, О. В. ПЕТРОВ, О. М. ДУВАНСЬКИЙ,  
В. О. ПАЛІЄНКО, А. О. ОКУНЬ**

### **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ КУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ РЕЖИМУ ДЕФОРМУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ПОКОВОК**

Окреслені основні напрями досліджень, які полягають у застосуванні і створенні нових підходів щодо розробки і вдосконалення технологічних процесів кування з отриманням поковок прогнозованої якості, що засновані на визначенні нерівномірності деформації та поздовжньої кривизни при зміні напрямку деформування при виконанні операцій осаджування та протягування. Розроблений метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації в процесах гарячого деформування на основі теоретичного визначення зони максимальної нерівномірності деформації в перерізі поковки та пов'язаної з нею поздовжньої кривизни. Раніше вказаний підхід щодо прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу при куванні був невідомий. Це дає можливість оцінювати і визначати раціональні режими деформації при куванні для одержання необхідних властивостей виробів. З використанням розробленого методу можливо проведення дослідження нових схем кування валів та дисків і встановлені поля розподілу нерівномірності деформації в об'ємі заготовок, які дозволяють встановити раціональні режими кування і забезпечать підвищення рівномірності розподілу механічних властивостей виробів та зниження викривлення поковки. При застосуванні запропонованого методу розроблені нові технологічні процеси виготовлення поковок.

**Ключові слова:** кування, нерівномірність деформації, якість, поковка, осаджування, протягування, кривизна.

**В. Л. ЧУХЛЕБ, А. В. АШКЕЛЯНЕЦ, С. А. ГУБСКИЙ, А. В. ПЕТРОВ, А. Н. ДУВАНСКИЙ,  
В. А. ПАЛИЕНКО, А. А. ОКУНЬ**

### **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОКОВОК**

Очерчены основные направления исследований, которые заключаются в применении и создании новых подходов к разработке и совершенствованию технологических процессовковки с получением поковок прогнозируемого качества, основанные на определении неравномерности деформации и продольной кривизны при изменении направления деформирования при выполнении операций осадки и протяжки. Разработанный метод прогнозирования объемной неравномерности деформации в процессах горячего деформирования на основе теоретического определения зоны максимальной неравномерности деформации в сечении поковки и связанной с ней продольной кривизны. Ранее указанный подход к прогнозированию объемной неравномерности деформации металла при ковке был неизвестен. Это дает возможность оценивать и определять рациональные режимы деформации при ковке для получения необходимых свойств изделий. С использованием разработанного метода возможно проведение исследования новых схемковки валов и дисков и установлены поля распределения неравномерности деформации в объеме заготовок, которые позволяют установить оптимальные режимыковки и обеспечат повышение равномерности распределения механических свойств изделий и снижения искажения поковки. При применении предложенного метода разработаны новые технологические процессы изготовления поковок.

**Ключевые слова:** ковка, неравномерность деформации, качество, поковка, осадка, протяжка, кривизна.

### **V. CHUKHLIB, A. ASHKELIANETS, S. GUBSKII, O. PETROV, O. DUVANSKII, V. PALIENKO, A. OKUN DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL CONCEPT FOR DESIGNING FORGING PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE DEFORMATION MODE ON THE QUALITY OF FORGING PIECES**

The main directions of research are outlined, which consist in the application and creation of new approaches to the development and improvement of technological processes of forging with obtaining forged piece of a predicted quality, based on determining the unevenness of deformation and longitudinal curvature when changing the direction of deformation during upsetting and broaching operations. The developed method for predicting the volumetric non-uniformity of deformation in the processes of hot deformation based on the theoretical determination of the zone of maximum non-uniformity of deformation in the section of the forged piece and the associated longitudinal curvature. Previously, this approach to predicting the volumetric unevenness of metal deformation during forging was unknown. This makes it possible to evaluate and determine the rational modes of deformation during forging to obtain the required properties of products. Using the developed method, it is possible to study new schemes for forging shafts and disks and determine the distribution fields of non-uniformity of deformation in the volume of workpieces, which make it possible to establish optimal forging modes and ensure an increase in the uniformity of distribution of the mechanical properties of products and reduce the distortion of the forging. When applying the proposed method, new technological processes for the manufacture of forged piece have been developed.

**Keywords:** forging, uneven deformation, quality, forged piece, deposition, broaching, curvature.

**Вступ.** На заводах виробництво кованих заготовок у ковальських цехах носить одиничний і дрібносерійний характер. Для розробки нових виробів розробляють сотні технологічних процесів, проектують і виготовляють оснастку. Нерідко служби заводу настільки перевантажені обсягом технологічних розробок, що змушені обмежуватися лише короткою проробкою технологічних процесів кування. При цьому число величин, що

регламентують технологічний процес, скорочується до мінімуму. При такій постановці справи виконується лише вимога отримати поковку в задані терміни [1–22].

Одним із шляхів підвищення якості технологічної підготовки ковальського виробництва є розробка методів прогнозування якості поковок при куванні і подальша механізація праці інженера-технолога з застосуванням сучасної комп'ютерної

техніки [8, 16-21]. Такі методи розрахунків сприяють спрощенню технологічних розробок. Необхідність у приведенні конкретних розрахунків продиктована тією обставиною, що зазвичай при спробі повторити розрахунок технологічного процесу кування, в загальному вигляді висвітленого у літературі, інженери-технологи, як правило, не отримують очікуваного результату [13].

Останнє пояснюється відсутністю єдиного методу і достатньої кількості розрахункових даних, перевірених практикою, і тому в кожному технологічному процесі виявляється багато незрозумілих місць, де закладені індивідуальні міркування інженера-технолога, який створив технологію.

В основу угруповання поковок повинна бути покладена спільність форми поковок, ідентичність інструменту на основних операціях і спільність технологічних операцій.

**Інформаційний огляд.** Задача прогнозування і управління технологічністю металу при куванні і показниками якості поковок не є новою [2, 4, 7, 14, 15]. Вона виникла і розвивалася разом з процесами кування. Зі збільшенням обсягу виробництва поковок зростає обсяг браку і невиробничі втрати. Підвищуються вимоги до якості поковок. Якість продукції повинна відповідати вимогам міжнародних стандартів і рівня досягнень науки і техніки. Стає все очевидніше, що традиційний контроль якості технологічного процесу і поковок не відповідає сучасним вимогам. Завдання полягає в тому, щоб якість не тільки контролювати, але і управляти процесом її формування, забезпечувати технічні та економічні вимоги споживачів поковок.

Рішення задачі управління якістю вимагає системного підходу, врахування всіх етапів виробничого циклу, включаючи технологічну підготовку виробництва, контроль якості. Управління якістю передбачає на етапі конструкторської підготовки виробництва тісну взаємодію конструктора, технолога і матеріалознавця; на етапі виготовлення – взаємодію технолога, майстра та дослідника.

Можна говорити, що для цього є об'єктивні умови. Освоюються автоматизовані кувальні комплекси (АКК), управління яких здійснюється з допомогою ЕОМ.

Завдання підвищення якості поковок необхідно формулювати, виходячи з конкретних умов. Можна виділити дві постановки задачі:

- 1) Істотне підвищення якості поковки, що супроводжується зміною технічних вимог (стандарту).
- 2) Забезпечення якості, яка регламентується стандартом, при найкращих техніко-економічних показниках виробництва.

Якість не є самоціллю. У кінцевому рахунку потрібна не якість сама по собі, а підвищення ефективності виробництва. Таким чином, рішення проблеми якості поковок і ефективності виробництва пов'язане з реалізацією принципу «необхідну якість при найпростішій технології».

Управління якістю поковок має метою встановлення, забезпечення і підтримання якості поковок на рівні стандартів. Управління якістю вирішується на рівні підприємства і має своєю метою підвищення ефективності ковального виробництва, по-перше, внаслідок формування необхідних технологічних властивостей металу, по-друге, формування необхідної якості поковки при мінімальній її собівартості.

Під технологічними властивостями стали розуміють пластичність, опір деформуванню, твердість, теплопровідність, схильність до стійкого перегріву та ін. Під якістю металу розуміють щільність, механічні властивості, макро- і мікроструктуру.

Модель формування якості поковок і технологічних властивостей металу при куванні розробляють на етапі технологічного проектування [3, 6, 23–25]. Модель не може врахувати всіх випадкових факторів виробництва. Тому на етапі виготовлення поковки її коригують. У цьому й проявляється сутність управління. Ефективність управління оцінюють наслідками коригування моделі: відбувається зниження браку і собівартості, забезпечується при цьому якість при максимальному випуску поковок.

Провідним принципом є уніфікація і стандартизація методів прогнозування, контролю й оцінки показників якості. Необхідна уніфікація методів визначення технологічних властивостей і показників якості металу при контролі та дослідженні якості поковок. Необхідна суворе регламентація даних про процес виготовлення – від процесу виплавки до контролю якості деталей. Ця інформація є базою контролю, аналізу і вироблення керуючих впливів за якістю [12].

Якість поковки зумовлюється якістю вихідного (литого) металу і змінюється в процесі теплового і пластичного впливу на метал в залежності від зміни в часі головних технологічних факторів процесу обробки (температури, напруг, деформацій). Шляхів такого впливу може бути безліч. Однак обирають один з них – раціональний для фіксованої вихідної якості металу. Таким чином, головними факторами, що визначають якість поковки, є початкова якість металу і режим зміни температури, напруг та деформацій.

Традиційно формування якості при виготовленні поковки зводиться до підтримання якості злитка і зміни головних технологічних параметрів у заданому (проектному) діапазоні. Раціональну розробку проектного технологічного процесу будують за принципом гарантування необхідної якості при найбільш несприятливих поєднаннях головних факторів [23, 26–30]. Як правило, оцінку відповідності фактичних показників якості поковки технологічним вимогам здійснюють на фініші. На ранніх стадіях виготовлення браку виявляється лише при явному руйнуванні металу. Прихований брак проходить весь цикл виробництва.

Управління якістю поковок має новизну в тому,

що з усіх можливих шляхів теплового і пластичного впливу на метал в якості раціонального обирається той, який забезпечує необхідну технологічність металу і якість поковок при більш строгому фіксованому діапазоні зміни головних чинників якості. У процесі виготовлення поковки ведуть контроль цих головних чинників. У разі відхилення їх від норми технологічний процес на наступних стадіях обробки коригують, щоб уникнути отримання браку в межах дотримання теплового і пластичного впливу. Саме в цьому підході реалізується принцип «необхідну якість при найпростішій технології».

Якість оцінюють відповідністю фактичних показників процесу проектним на кожній стадії виготовлення. За цією оцінкою виробляють заходи впливу на якість через керовані фактори на наступних стадіях виробництва.

Найважливіші керовані технологічні фактори на всіх стадіях обробки – температура, ступінь і швидкість деформації металу. Ці фактори найбільшою мірою впливають на формування технологічних властивостей і якість поковок. Вони досить легко фіксуються і гнучкі в управлінні [5, 9, 11, 24].

Важливим фактором формування якості поковки є ступінь деформації. По-перше, деформація призводить до заковування усадочних дефектів і підвищення щільності металу; для отримання щільного металу необхідна деяка мінімальна величина деформації. Роль теплової обробки в цьому невелика. По-друге, деформація сприяє руйнуванню литої структури, подрібненню крупного зерна перегріву. Але на ці процеси впливає також і температура. Тому необхідно оцінювати вплив обох факторів та з їх урахуванням розробляти процес і управляти якістю поковки.

Роль напруг у формуванні якості поковок проявляється меншою мірою. Лише при куванні малопластичної сталі цей чинник набуває вирішального значення. Однак його можна врахувати при проектуванні технології шляхом вибору раціонального ковальського інструменту і режиму кування. Керувати напругою в процесі виготовлення поковки важче, ніж температурою та деформацією.

Можна зробити висновок про те, що наукова основа управління базується на методах прогнозування якості, які, як складова частина, пов'язані з використанням математичних моделей, що описують деформації і температуру оброблюваного металу і зв'язок з ним і властивостей і структури металу. Ці методи можуть бути використані для проведення обчислювального експерименту як засіб для розробки науково обґрунтованих рекомендацій.

**Постановка задачі.** Продукція, що отримується вільним куванням, у більшості випадків, належить до виробів відповідального призначення, які повинні мати унікальний набір механічних характеристик. Такими виробами є, наприклад, довгомірні вали і диски різних типорозмірів, що виготовляються як зі сталей (вуглецевих і спеціальних), так і з титанових сплавів. Водночас для їх отримання при куванні, зазвичай, використовується комбінування основних

ковальських операцій: протягування і осаджування.

Відомі основні підходи до виконання цих операцій з одержанням необхідного середнього рівня механічних характеристик поковок, але це супроводжується нерівномірним розподілом властивостей в об'ємі металу. Це зумовлене, зокрема, нестачею знань щодо закономірностей впливу комбінування осаджування та протягування при невизначеності доцільних умов деформування (ступеня деформації, схеми кантувань, відносної подачі, температури обробки, геометрії зони формозмінення, міждеформаційних пауз тощо). Також необхідно враховувати ймовірність поздовжнього викривлення поковки при протягуванні, що істотно впливає на якість продукції і пов'язане з нерівномірністю деформації. Отже, практично не розвинутий метод розрахунку раціональних параметрів процесу кування прогнозуванням рівня і розподілу механічних властивостей поковок. Усе це призводить вже на етапі проектування процесу кування до призначення завищених показників деформаційного перероблення, підвищення енергоємності та трудомісткості отриманої продукції.

Дотепер не існує методу оцінки раціонального співвідношення характеристик формозміни металу при варіації напрямку деформування шляхом комбінування осаджування та протягування, а також виникаючої при цьому нерівномірності розподілу деформації, що також може призводити до поверхневого тріщиноутворення поковок. Особливо це стосується титанових сплавів, оскільки для них температурно-деформаційні параметри кування істотно пов'язані з температурою поліморфних перетворень у процесі деформування.

Відсутність цих даних призводить до того, що при деформації металу куванням з використанням комбінування різноспрямованих операцій протягування і осаджування неможливо спрогнозувати нерівномірність деформації та забезпечення її зниження. Тому робота, що присвячена дослідженню закономірностей формування характеристик якості поковок шляхом розробки методів отримання поковок прогнозованої якості, є актуальною.

**Розробка методу прогнозування нерівномірності деформації металу в процесах кування.** При куванні поковок якість металу, його макроструктура, суцільність і механічні властивості змінюються в залежності від ступеня деформації.

При вивченні впливу ступеня деформації на властивості поковки користуються поняттями: уков за операцію, уков за винос і загальна величина укова за весь процес виготовлення поковки.

Поняття загального укова має фізичний сенс лише при послідовному виконанні ряду однорідних операцій, наприклад при виконанні протягування за кілька виносів. Якщо при виготовленні поковки застосовуються різноманітні операції, наприклад, осаджування і протягування, то між результуючою (загальною) деформацією і механічними властивостями металу немає однозначного зв'язку, як

при куванні з застосуванням тільки протягування або тільки осаджування. У цьому випадку немає сенсу розраховувати загальну величину укова, що характеризує сумарну деформацію при протягуванні і осаджуванні. Між тим у заводській практиці в таких випадках нерідко роблять розрахунок загального укова. В одних випадках загальний уков визначається як добуток величин укову при протягуванні і осаджуванні, в інших – як їх сума. В обох випадках величина загального укова не може дати уявлення про якість кованиго металу, зокрема про його механічні властивості.

Для оцінки якості поковки в залежності від ступеня деформації при різномірних операціях кування (осаджування та протягування) необхідно знати послідовність виконання цих операцій і величину деформацій в кожній з них.

У результаті нерівномірності деформації при протягуванні, так і при осаджуванні величина місцевої деформації по перетину та довжині поковки може бути різною, в той час як відношення площ поперечних перерізів заготовки і поковки дає лише поняття про середню деформацію (уков).

Якщо поковка достатньою мірою продеформована при заготівельних операціях, то вплив величини укову на макроструктуру і механічні властивості металу за останній винос (тобто при оздоблювальних операціях) різко зменшується. У цьому випадку термомеханічний режим кування за останній винос, зокрема величина укову і температурний інтервал кування, визначають головним чином мікроструктуру і пов'язані з нею механічні властивості металу. Однак подальша термообробка може повністю зняти ефект впливу кування на мікроструктуру металу.

Величина укову за останній винос з урахуванням температурного інтервалу кування робить істотний вплив на якість поковки в тому випадку, коли:

1. Поковка не піддавалася термообробці з перекристалізацією структури.
2. Поковка виготовляється з інструментальної заевтектоїдної і ледібуритної сталі.
3. Поковка виготовляється зі сталі, яка не має фазових перетворень.

Вплив загальної величини деформації на якість металу значною мірою залежить від умов кування. Під умовами кування слід розуміти сукупність основних технологічних параметрів (відносна подача, форма бойків і заготовки, ступінь одиничного обтиснення і т. ін.), що визначають схему напруг і деформацій в металі.

При розробці технологічного процесу кування перед технологом постає завдання отримати поковку високої якості за мінімальною трудомісткістю. Для цього необхідно встановити мінімальну величину деформації, при якій забезпечуються високі механічні властивості металу і заварювання дефектів усадочного походження.

Тепер технолог не має в своєму розпорядженні усіх необхідних даних для найкращого рішення цієї задачі з урахуванням максимальних робочих напруг,

яким піддається деталь і призначення поковки.

У технічних умовах на поковки зазвичай задаються механічні властивості, які визначаються на зразках, вирізаних з певних ділянок поковки. Стандарт встановлює групи поковок і основні технічні вимоги до приймання і постачання їх. Вихідним матеріалом для виготовлення поковок можуть бути злитки, ковани або катані заготовки, а також безпереволиті заготовки.

Наявність поверхневих дефектів не є єдиною причиною незадовільної якості поковок. Аналіз заводської документації показує, що при ультразвуковому контролі в поковках іноді виявляються і внутрішні дефекти – поздовжні або поперечні тріщини. З цієї причини на підприємствах бракується значна кількість поковок.

Встановлено, що в більшості випадків причиною руйнування поковок поряд з незадовільною якістю поверхні вихідних злитків є недосконалість технології кування, недосконалість існуючого інструменту та устаткування, а також нераціональні режими виконання основних ковальських операцій (осаджування, протягування).

Все це свідчить про важливість заходів, спрямованих на поліпшення якості поковок, що виготовляються методами вільного кування.

При підборі відповідних умов гарячої пластичної деформації метал може володіти найбільшою технологічною пластичністю і заданими механічними властивостями. Усі процеси і явища, що супроводжують пластичну деформацію, від яких залежить пластичність та інші механічні властивості деформованого металу, можна змінювати в бажаному напрямку, змінюючи термомеханічні фактори: напружений стан, схему деформації, температуру, ступінь і швидкість деформації.

У цілому механічні властивості поковки забезпечуються:

1. Вибором відповідної марки сталі.
2. Вихідною якістю злитка, що залежать від методу виплавлення, умов кристалізації і т. ін.
3. Умовами нагріву і температурним інтервалом кування.
4. Термомеханічним режимом кування.
5. Термічною обробкою поковок.

Таким чином, якість поковок обумовлюється всім технологічним процесом їх виготовлення.

Для області обробки металів тиском найбільш істотним є термомеханічний режим кування. При пластичній деформації злитка відбувається зміна щільності металу, його макроструктури та механічних властивостей. У виробничих умовах основним показником, що дозволяє технологам якоюсь мірою судити про отримання необхідних властивостей металу в результаті кування, є величина укову. Проте дослідження показують, що при одній і тій же мірі укову механічні властивості поковки змінюються в залежності від механічного режиму кування. Але в заводській практиці зазвичай це не враховується, оскільки режим кування вивчений недостатньо.

Розроблений технологічний процес кування повинен відповідати вимогам технологічності та

раціональності стосовно до конкретних умов ковальського виробництва.

Проектування технологічного процесу кування повинне включати наступні операції:

- вибір схеми кування та визначення переходів з урахуванням вимог до якості поковки; при цьому розглядаються всі технологічно можливі варіанти;
- вибір інструменту або конструювання нового;
- визначення розмірів заготовки і вибір пріоритетного виду заготовки (злиток, прокат, кована заготовка) з урахуванням заводського сортаменту;
- вибір основного технологічного устаткування (прес, молот);
- призначення температурного інтервалу кування;
- призначення режиму охолодження (термообробки) поковки.

Процес проектування технології ускладнюється тим, що на більшості заводів тією чи іншою мірою відсутні знання, що встановлюють правила раціонального виконання окремих технологічних операцій. Це призводить до суб'єктивізму у вирішенні багатьох технологічних питань і знижує якість технологічних розробок і відповідно техніко-економічні показники ковальського виробництва.

Отже, необхідна розробка науково обґрунтованого методу проектування технології кування з урахуванням узагальненого виробничого досвіду і подальше впровадження цього методу на реальних промислових умовах.

Якість продукції повинна відповідати вимогам стандартів, тобто важливим є не тільки отримання необхідної геометрії поковки, але і досягнення необхідного рівня механічних властивостей. Зазвичай виробник продукції звертає увагу лише на дотримання високого рівня механічних властивостей та високої точності геометричних параметрів, однак, неврахованим фактором є рівномірність розподілення деформації і, як наслідок, механічних властивостей виробів. Рівномірність напружено-деформованого стану в процесі деформації, і як наслідок – рівномірність розподілення механічних властивостей в металі, залежить від способу обробки тиском, а саме – вільним куванням. Набути рівномірності напружено-деформованого стану в даному процесі обробки тиском складно, але зменшити нерівномірність у процесі кування можливо за допомогою варіювання параметрів процесу як осаджування, так і протягування. Для цього необхідно спрогнозувати нерівномірність деформації при виконанні ковальських операцій.

На основі теоретичного визначення зони максимальної нерівномірності деформації в перерізі поковки та пов'язаної з нею поздовжньої кривизни розроблено метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу в процесах кування, який дає можливість оцінювати і визначати раціональні режими деформації при куванні для одержання необхідних властивостей виробів.

Для прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу в процесах кування і, відповідно, прогнозування нерівномірності розподілу механічних

властивостей був розроблений метод, згідно з яким у кожному перерізі, що піддається аналізу на нерівномірність деформації, знаходиться точка з максимальним значенням деформації (рис. 1). Далі відносно неї через центр перетину проводиться лінія. У цілому по перетину проводяться чотири лінії (включаючи лінію з точкою з максимальним значенням деформації), які розташовані під кутом 45° одна до одної. Далі на кожен лінійку наносяться 6 контрольних точок симетрично до точки з максимальним значенням та симетрично до центру перерізу, як показано на рис. 1 (густина кольору в цьому перерізі відповідає величині інтенсивності деформації).

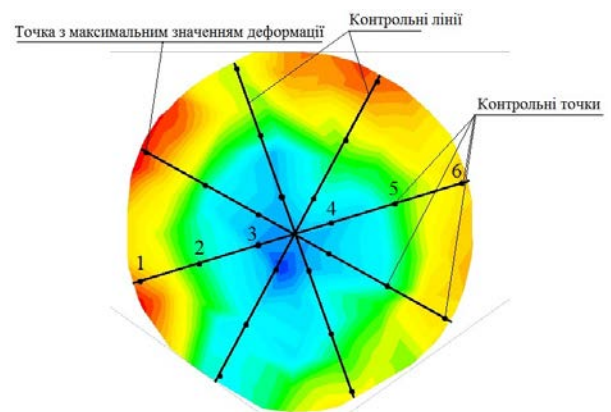


Рис. 1. Схема розташування ліній та контрольних точок у перерізі при осаджуванні та протягуванні заготовок при використанні розробленого методу прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу

Для оцінки рівномірності розподілення деформацій, яка представляє собою найменше відхилення показників деформації між собою в перерізі, на основі розробленого методу розраховується показник нерівномірності деформації  $K_n$  за формулою (1):

$$K_n = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\max}}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_i$  – величина деформації в контрольній точці;  $\varepsilon_{\max}$  – максимальна величина деформації в перерізі.

Показник  $K_n$  може приймати значення не більше одиниці, оскільки є відношенням показників деформації в контрольних точках перерізу до максимального значення деформації в перерізі. При цьому необхідно враховувати той факт, що коли значення показника нерівномірності деформації  $K_n$  приймає своє максимальне значення, яке дорівнює 1, то це відповідає рівномірній деформації (в цьому випадку відносяться між собою різні точки тіла, які мають однакове значення деформації – тобто ми маємо рівномірну деформацію). Чим менше значення показника нерівномірності деформації  $K_n$  від одиниці, тим більша нерівномірність деформації. Коли якась ділянка металу не підлягає деформації, але попадає в перетин, що розглядається, то  $K_n$  приймає своє мінімальне значення –  $K_n = 0$ .



Аналіз результатів дослідження формозміни металу за розробленим методом при визначенні нерівномірності деформації при куванні необхідно проводити в поперечних перерізах поковки на етапі осаджування та на етапі протягування. На кожному етапі необхідно розраховувати показник нерівномірності деформації  $K_n$ , як мінімум, у трьох перерізах по висоті для осаджування та у трьох перерізах по довжині для протягування, як зображено на рис. 2 та 3.

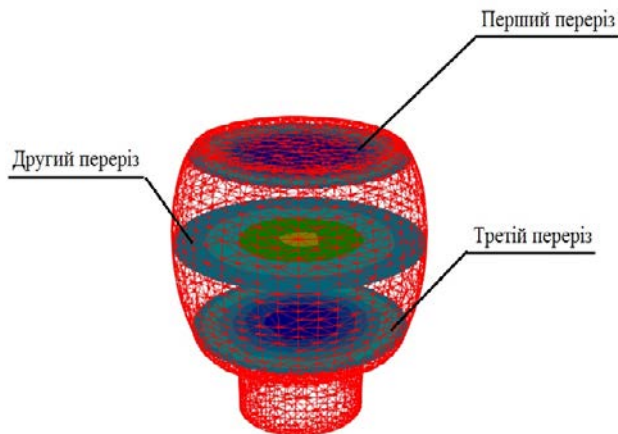


Рис. 2. Схема розташування перерізів при використанні розробленого методу визначення нерівномірності деформації для операції осаджування

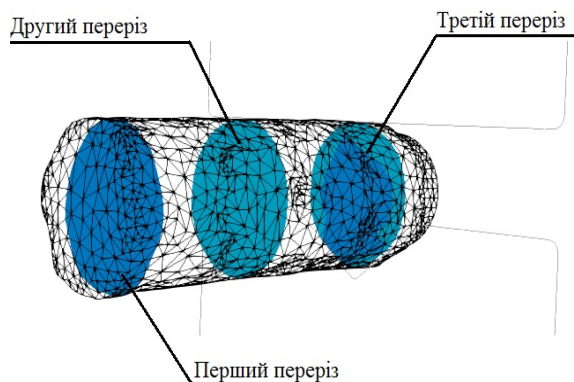


Рис. 3. Схема розташування перерізів при використанні розробленого методу визначення нерівномірності деформації для операції протягування

**Розробка методу визначення викривлення поковки в процесі протягування при куванні.** Якість продукції складається з двох загальних засад – це геометричні показники поковки, куди входить поздовжня кривизна, а так само – високий рівень механічних властивостей. Ці складові якості повинні відповідати вимогам стандартів, що регулюють показники рівня механічних властивостей, так і показники геометричних розмірів. Останнє звичайно представлено в стандартах у вигляді допустимих відхилень розмірів поковки, а так само – величин припусків, які в свою чергу закривають неточності розмірів і кривизни поковки шаром додаткового металу, який буде видалений при подальшій механічній обробці. Збільшення цього шару металу призводить до підвищених витрат металу при

виготовленні деталі, і як наслідок – до більшої собівартості деталі та зменшення коефіцієнта використання металу.

Поздовжнє викривлення заготовки також зумовлене нерівномірністю деформації і може призвести до небажаних витрат металу і особливо енергетичних витрат на правлення поковки. Регулюванням параметрів процесу можливе досягнення високої точності геометрії поковки, зокрема, її прямолінійності, і відповідно – досягнення позитивних результатів в економічному плані. Тому для дослідження впливу параметрів кування на викривлення поковки був розроблений метод визначення викривлення поковки. Даний метод полягає в порівнянні абсолютних величин відхилення центру в контрольних перетинах поковки від центру «основного» перерізу поковки, розташованого на середині ширини бойка.

Коефіцієнт, який показує ступінь кривизни поковки по горизонтальній і вертикальній складових, був названий «коефіцієнт викривлення» ( $K_{\text{викр}}$ ). Він може приймати значення від  $-1$  до  $+1$ , оскільки є відношенням величини відхилення в поточному перерізі до максимальної величини відхилення від центральної осі поковки. Позитивний чи негативний знак показника визначається зміщенням центру контрольного перерізу вздовж осі в позитивну або негативну область, відносно «основного» перерізу.

На рис. 4 зображена схема визначення зміщення центру контрольного перерізу по горизонталі (по осі  $Y$ ) й вертикалі (по осі  $Z$ ), від центральної осі поковки, яка проходить через центр «основного» перетину.

Викривлення заготовки призводить до збільшення енергетичних витрат і витрат металу при фінальних операціях кування, тобто правлення на спеціальному обладнанні, а також механічної обробки поковки. Тому дослідження впливу параметрів операцій кування при ковальській витяжці на ступінь викривлення поковки є важливим і розроблений метод визначення викривлення в процесі кування дозволяє оцінити ступінь кривизни поковки від застосованої схеми кантовок, не вдаючись до абсолютних величин, які можуть змінюватись у залежності від типорозміру поковки.

Коефіцієнт  $K_{\text{викр}}$  розраховується за формулою (2) для осі  $Z$ :

$$K_{\text{викр}} = \frac{h_{\text{викр}i}}{h_{\text{викр} \max}}, \quad (2)$$

де  $h_{\text{викр}i}$  – поточна величина викривлення в даному перерізі по осі  $Z$ ;  $h_{\text{викр} \max}$  – максимальна величина викривлення поковки по осі  $Z$ .

І за формулою (3) для осі  $Y$ :

$$K_{\text{викр}} = \frac{b_{\text{викр}i}}{b_{\text{викр} \max}}, \quad (3)$$

де  $b_{\text{викр}i}$  – поточна величина викривлення в даному перерізі по осі  $Y$ ;  $b_{\text{викр} \max}$  – максимальна величина викривлення поковки по осі  $Y$ .

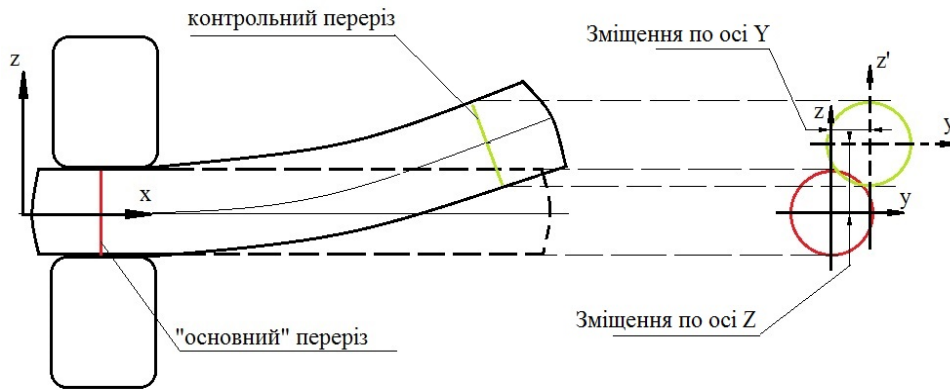


Рис. 4. Схема визначення зміщення центру контрольного перерізу при протягуванні відносно центру «основного» перерізу за розробленим методом визначення викривлення поковки

Аналіз розроблених методів показав, що вони придатні для розробки технологій виробництва поковок шляхом визначення раціональних параметрів процесу кування.

**Висновки.** Рівномірність напружено-деформованого стану в процесі деформації, і як наслідок – рівномірність розподілення механічних властивостей в металі, залежить від схеми деформації при вільному куванні. А саме можливість прогнозувати нерівномірність деформації дає можливість досягнення рівномірного напружено-деформованого стану металу і тому дослідження впливу параметрів операцій кування на напружено-деформований стан є важливою. Окрім цього викривлення поковки призводить до зниження точності геометричних розмірів та якості металу, у зв'язку з подальшим правлінням на спеціальному обладнанні або пресі, яке призводить до наведення додаткової нерівномірності деформації в об'ємі поковки, а також створює додаткові згинальні напруги, небажані для готового виробу. Також, подальше правління непрямолінійності поковки призводить до збільшення енергетичних витрат, а також витрат металу при фінальній механічній обробці. У відповідності з вищесказаним, був розроблений метод оцінки кривизни поковки в процесі кування. Даний метод дозволяє оцінити ступінь викривлення поковки від застосованої схеми кантувань, не вдаючись до абсолютних величин, які можуть змінюватись в залежності від типорозміру поковки. Аналіз та оцінка кривизни поковки показали, що розроблений метод надає високої точності результати і придатний для раціонального проектування виробництва поковок, шляхом визначення раціональних параметрів схем кантувань для усунення необхідності застосування правління поковки, яке створює небажані залишкові згинальні напруги, а також наводить додаткову нерівномірність деформації металу.

У результаті був розроблений метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації в процесах гарячого деформування на основі теоретичного визначення зони максимальної нерівномірності деформації в перерізі поковки та пов'язаної з нею поздовжньої кривизни. З

використанням розробленого методу можуть бути проведені дослідження нових схем кування валів та дисків і встановлені поля розподілу нерівномірності деформації в об'ємі заготовок, які дозволять встановити раціональні режими кування і забезпечити підвищення рівномірності розподілу механічних властивостей виробів та зниження викривлення поковки. При застосуванні запропонованого методу можуть бути розроблені нові технологічні процеси виготовлення поковок на основі проведених досліджень з урахуванням технологічних особливостей кожної з поковок.

#### Список літератури

1. Титов Ю. А., Титов А. Ю. *Свободная ковка. Основные операции и технологии*. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 73 с.
2. Тюрин В. А., Савонькин М. Б. Стадийность процесса и потокораспределение при осадке плитам с осевым отверстием. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2009. № 3. С. 17–20.
3. Алиев И. С., Марков О. Е., Олешко М. В., Злыгорев В. Н. Применение способов осадки слитков кольцами в процессахковки валов. *Обработка металлов давлением: сб. науч. тр.* Краматорск: ДГМА. 2010. № 2. С. 94–98.
4. Олешко В. М., Станков Ю. Н., Кальченко П. П., Грачев И. А., Савчинский И. Г. Усовершенствование технологического процесса изготовления поковок типа пластин. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії*. Краматорськ: ДДМА. 2003. С. 312–315.
5. Зильберг Ю. В. *Теория обработки металлов давлением*. Днепропетровськ: Пороги, 2009. 434 с.
6. Клименко П. Л. *Упрочнение стали при горячей деформации*. Днепропетровськ: Пороги, 2009. 103 с.
7. Соколов Л. Н., Марков О. Е., Протеняк М. В., Олешко В. М. Сравнительный анализ вариантов изготовления поковок типа пластин. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії*. Краматорськ: ДДМА. 2002. № 3. С. 75–80.
8. Кухар В. В. Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитам. *Вестник Хмельницкого Нац. ун-та*. Хмельницкий: ХНУ. 2008. № 5. С. 204–208.
9. Онищенко А. К., Беклемишев Н. Н. *Теория промышленнойковки стали и сплавов*. Москва: Спутник, 2011. 244 с.
10. Гринкевич В. А., Чухлеб В. Л., Банашек Г. Математическое моделирование и оптимизация операций прошивки при изготовлении колец и бандажей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2002. № 2. С. 44–46.
11. Данченко В. М., Гринкевич В. О., Головки О. М. *Теория процесів обробки металів тиском*. Днепропетровськ: Пороги, 2008. 370 с.
12. Шейнман Е. Л. Современная классификация и тенденция развития ОМД в США. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2007. № 4. С. 28–34.

13. Кобелев А. Г., Тюрин В. А., Шаронов М. А., Антощенко Ю. М. *Теория и технология процессовковки и прессования: составление чертежа поковки и разработка технологииковки*. Москва: МИСиС. 2002. 64 с.
14. Кухар В. В., Тузенко О. О., Балаласва О. Ю., Василевский О. В. Розробка автоматизованої методики апроксимації діаграм рекристалізації для вибору термомеханічних режимів кування, що підвищують експлуатаційні властивості поковок валів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВВІП. 2015. № 2. С. 123–130.
15. Шелаев И. П. Совершенствование термомеханических режимовковки. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2007. № 9. С. 31–33.
16. Дья Х. FORGE 3 в моделировании процессов обработки давлением. *Современные проблемы металлургии*. 2002. Т. 5. С. 27–33.
17. Duja H., Szota P., Mroz S. 3D Fem modeling and its experimental verification of the rolling of reinforcement rod. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 153–154. P. 115–121.
18. Duja 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.
19. Данченко В. Н., Миленин А. А., Кузьменко В. И., Гринкевич В. А. *Компьютерное моделирование процессов ОМД. Численные методы*. Днепропетровск: Системные технологии, 2005. 448 с.
20. Berski S., Duja H., Milenin A., Janik M. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods. *Наукові вісті. Сучасні проблеми металлургии. Пластична деформація металів*. 2002. Т. 5. С. 250–254.
21. Фомичев А. Ф., Панин С. Ю. Выбор оптимального способа изготовления поковок с использованием компьютерных программ. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2014. № 8. С. 31–34.
22. Соколов Л. М., Алієв І. С., Марков О. Є., Алієва Л. І. *Технологія кування*. Краматорськ: ДДМА, 2011. 268 с.
23. Кальченко П. П., Марков О. Е. *Новые технологические процессыковки крупных прессовых поковок*. Краматорск: ДГМА, 2014. 100 с.
24. Стасовский Ю. Н., Чухлеб В. Л. Ресурсосбережение в процессах обработки металлов давлением: состояние, проблемы, перспективы. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2009. № 1. С. 93–102.
25. Чухлеб В. Л., Тумко А. Н., Ашкелянец А. В. Основы разработки технологических процессов обработки давлением сталей и сплавов с прогнозируемым уровнем качества металлопродукции. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. № 1. С. 110–120.
26. Гринкевич В. А., Чухлеб В. Л., Банашек Г., Ашкелянец А. В. Теоретические исследования кузнечной операции протяжки при использовании схемы деформации «проходами». *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. № 44. С. 28–34.
27. Гринкевич В. А., Чухлеб В. Л., Сальников А. С., Тумко А. Н., Ашкелянец А. В., Банашек Г. Исследование различных схем осадки на прессе заготовки сплава ЭИ698-ВД путем математического моделирования. *Обработка металлов давлением: сб. науч. тр.* Краматорськ: ДДМА. 2013. № 4 (37). С. 3–8.
28. Чухлеб В. Л., Клемешов С. С., Гринкевич В. О., Дня Х. Дослідження напружено-деформованого стану при протягуванні титанового сплаву з метою оптимізації параметрів кування. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. № 24. С. 159–166.
29. Коган М. А. Совершенствование технологииковки валов на ковочном гидравлическом прессе усилием 20 МН. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 8–9. С. 494–495.
30. Марков О. Е. Решение задач пластического деформирования МКЭ. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 8–9. С. 563–566.
- Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2011. 73 p.
2. Tyurin V. A., Savon'kin M. V. Stadiynost' protsessa i potokoraspredelenie pri osadke plitami s osevim otverstiem [Staging of the process and flow distribution during upsetting slabs with an axial hole. Forging and stamping production]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2009. no. 3, pp. 17–20.
3. Aliev I. S., Markov O. E., Oleshko M. V., Zlygorev V. N. Primenenie sposobov osadki slitkov kol'tsami v protsessakh kovki valov [Application of methods of upsetting ingots in rings in the processes of forging shafts]. *Obrabotka metallov davleniem: sb. nauch. tr.* [Metal forming: a collection of scientific papers]. Kramatorsk, DGMA Publ., 2010, no. 2, pp. 94–98.
4. Oleshko V. M., Stankov Yu. N., Kal'chenko P. P., Grachev I. A., Savchinskiy I. G. Usovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya pokovok tipa plastin [Improvement of the technological process for the manufacture of plate-type forgings]. *Udoskonalennyya protsesiv ta obladnannya obrobky tyskom v mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Highly detailed processes and possession of processing with a vice in a machine for production and metallurgy]. Kramatorsk, DDMA Publ., 2003, pp. 312–315.
5. Zil'berg Yu. V. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Dnipropetrovsk, Porohy Publ., 2009. 434 p.
6. Klimenko P. L. *Uprochnenie stali pri goryachey deformatsii* [Strengthening of steel during hot deformation]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2009. 103 p.
7. Sokolov L. N., Markov O. E., Protenyak M. V., Oleshko V. M. Sravnitel'nyy analiz variantov izgotovleniya pokovok tipa plastin [Comparative analysis of options for the manufacture of forgings of the plate type]. *Udoskonalennyya protsesiv ta obladnannya obrobky tyskom v mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Highly detailed processes and possession of processing with a vice in a machine for production and metallurgy]. Kramatorsk, DDMA Publ., 2002, no. 3, pp. 75–80.
8. Kukhar V. V. Modelirovanie formoizmeneniya metalla pri osadke tsilindricheskikh zagotovok vypuklymi prodolgovatyimi plitami [Modeling of metal shape change during upsetting of cylindrical blanks with convex elongated plates]. *Vestnik Khmel'nytskogo Nats. un-ta* [Bulletin of Khmelnytsky National University]. Khmelnytsky, KhNU Publ., 2008, no. 5, pp. 204–208.
9. Onishchenko A. K., Beklemishev N. N. *Teoriya promyshlennoy kovki stali i splavov* [Theory of industrial forging of steel and alloys]. Moscow, Sputnik Publ., 2011. 244 p.
10. Grinkevich V. A., Chukhleb V. L., Banashek G. Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya operatsiy proshivki pri izgotovlenii kolets i bandazhey [Mathematical modeling and optimization of piercing operations in the manufacture of rings and bandages]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2002. № 2. P. 44–46.
11. Danchenko V. M., Hrynkevych V. O., Holovko O. M. *Teoriya protsesiv obrobky metaliv tyskom* [Theory of metal forming processing]. Dnipropetrovsk, Porohy Publ., 2008. 370 p.
12. Sheynman E. L. Sovremennaya klassifikatsiya i tendentsiya razvitiya OMD v SShA [Modern classification and development trend of metal forming in the USA]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2007, no. 4, pp. 28–34.
13. Koblelev A. G., Tyurin V. A., Sharonov M. A., Antoshchenkov Yu. M. *Teoriya i tekhnologiya protsessov kovki i pressovaniya: sostavlenie chertezha pokovki i razrabotka tekhnologii kovki* [Theory and technology of forging and pressing processes: Drawing up a forging drawing and developing a forging technology]. Moscow, MISiS Publ., 2002. 64 p.
14. Kukhar V. V., Tuzenko O. O., Balalayeva O. Yu., Vasylevskyy O. V. Rozrobka avtomatyzovanoj metodyky aproksymatsiyi diahram rekrystalizatsiyi dlya vyboru termomekhanichnykh rezhimiv kuvannya, shcho pidvyshchuyut' ekspluatatsiyi vlastyivosti pokovok valiv [Development of an automated technique for approximating diagrams of recrystallization for the vibration of thermo-mechanical modes of a kuvannya, so that the exploitation of the power of forgings of rollers is improved]. *Visnyk Vinnits'koho politekhnichnogo instytutu* [Visnyk of Vinnitsia Polytechnical Institute]. Vinnitsa, VVPI Publ., 2015, no. 2, pp. 123–130.
15. Shelaev I. P. Sovershenstvovanie termodeformatsionnykh rezhimov kovki [Improvement of thermal deformation modes of forging]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2007, no. 9, pp. 31–33.
16. Dyya Kh. FORGE 3 v modelirovanii protsessov obrabotki davleniem [FORGE 3 in the modeling of pressure treatment

## References (transliterated)

1. Titov Yu. A., Titov A. Yu. *Svobodnaya kovka. Osnovnye operatsii i tekhnologii* [Free forging. Basic operations and technologies].



- processes]. *Suchasni problemy metalurhii*. 2002, vol. 5, pp. 27–33.
17. Dyja H., Szota P., Mroz S. 3D Fem modeling and its experimental verification of the rolling of reinforcement rod. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, vol. 153–154, pp. 115–121.
  18. 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, pp. 131–137.
  19. Danchenko V. N., Milenin A. A., Kuz'menko V. I., Grinkevich V. A. *Komp'yuternoe modelirovanie protsessov OMD. Chislennye metody* [Computer modeling of metal forming processes. Numerical methods]. Dnepropetrovsk, Sistemnye tekhnologii Publ., 2005. 448 p.
  20. Berski S., Dyja H., Milenin A., Janik M. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods. *Naukovi visti. Suchasni problemy metalurhii. Plastychna deformatsiya metaliv*. 2002, vol. 5, pp. 250–254.
  21. Fomichev A. F., Panin S. Yu. Vybora optimal'nogo sposoba izgotovleniya pokovok s ispol'zovaniem komp'yuternykh programm [Selection of the optimal method for manufacturing forgings using computer programs]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2014, no. 8, pp. 31–34.
  22. Sokolov L. M., Aliyev I. S., Markov O. Ye., Aliyeva L. I. *Tekhnolohiya kuvannya* [Forging technology]. Kramatorsk, DDMA Publ., 2011. 268 p.
  23. Kal'chenko P. P., Markov O. E. *Novye tekhnologicheskie protsessy kovki krupnykh pressovykh pokovok* [New technological processes for forging large press forgings]. Kramatorsk, DGMA Publ., 2014. 100 p.
  24. Stasovskiy Yu. N., Chukhleb V. L. Resursoberezhenie v protsessakh obrabotki metallov davleniem: sostoyanie, problemy, perspektivy [Resource saving in the processes of metal processing by pressure: state, problems, prospects]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2009, no. 1, pp. 93–102.
  25. Chukhleb V. L., Tumko A. N., Ashkelyanets A. V. Osnovy razrabotki tekhnologicheskikh protsessov obrabotki davleniem staley i splavov s prognoziruемым urovnem kachestva metalloproduktii [Fundamentals of the development of technological processes for forming steels and alloys with a predicted level of quality of metal products]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2011, no. 1, pp. 110–120.
  26. Grinkevich V. A., Chukhleb V. L., Banashek G., Ashkelyanets A. V. Teoreticheskie issledovaniya kuznechnoy operatsii protyazhki pri ispol'zovanii skhemy deformatsii "prokhodami" [Theoretical studies of the forging operation of broaching when using the "passes" deformation scheme]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 44, pp. 28–34.
  27. Grinkevich V. A., Chukhleb V. L., Sal'nikov A. S., Tumko A. N., Ashkelyanets A. V., Banashek G. Issledovanie razlichnykh skhem osadki na presse zagotovki splava EI698-VD putem matematicheskogo modelirovaniya [Investigation of various upsetting schemes on a press for an EI698-VD alloy billet by means of mathematical modeling]. *Obrabotka metallov davleniem: sb. nauch. tr.* [Metal forming: a collection of scientific papers]. Kramatorsk, DDMA Publ., 2013, no. 4 (37), pp. 3–8.
  28. Chukhleb V. L., Klemeshov Ye. S., Hrynkevych V. O., Dyya Kh. Doslidzhennya napruzhenno-deformovanoho stanu pry protyahuvanni tytanovoho splavu z metoyu optymizatsiyi parametriv kuvannya [Investigation of the stress-strain state during drawing of titanium alloy in order to optimize the forging parameters]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 24, pp. 159–166.
  29. Kogan M. A. Sovershenstvovanie tekhnologii kovki valov na kovochnom gidravlicheskom presse usiliem 20 MN [Improvement of the technology of forging shafts on a hydraulic forging press with a force of 20 MN]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002, no. 8–9, pp. 494–495.
  30. Markov O. E. Reshenie zadach plasticheskogo deformirovaniya MKE [Solving problems of plastic deformation of FEM]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002, no. 8–9, pp. 563–566.

*Надійшла (received) 19.05.2021*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chukhlib Vitalii)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; e-mail: [profdnepro@gmail.com](mailto:profdnepro@gmail.com)

**Ашкелянець Антон Володимирович (Ашкелянец Антон Владимирович, Ashkelianets Anton)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7935-3834>; e-mail: [ashkelianets@gmail.com](mailto:ashkelianets@gmail.com)

**Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Gubskii Serhii)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: [gubskiyso@gmail.com](mailto:gubskiyso@gmail.com)

**Петров Олександр Васильович (Петров Александр Васильевич, Petrov Oleksandr)** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, проректор з науково-педагогічної роботи та організації освітнього процесу; м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0487-6240>; e-mail: [petrovov@vntu.edu.ua](mailto:petrovov@vntu.edu.ua)

**Дуванський Олександр Миколайович (Дуванский Александр Николаевич, Duvanskii Oleksandr)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4967-0940>; e-mail: [duvansky.alex@ukr.net](mailto:duvansky.alex@ukr.net)

**Палиєнко Володимир Олексійович (Палиенко Владимир Алексеевич, Palienko Volodymyr)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-1300>; e-mail: [mustmix13@gmail.com](mailto:mustmix13@gmail.com)

**Окунь Антон Олександрович (Окунь Антон Александрович, Okun Anton)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6467-4229>; e-mail: [okunanton@gmail.com](mailto:okunanton@gmail.com)