

В. Л. Калюжний¹ [0000-0002-4904-8879], В.М. Горностай¹ [0000-0001-5766-931X],
О.Є. Марков² [0000-0001-9377-9866], П.Б. Абхари² [0000-0003-0827-8149]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»¹ Донбаська державна машинобудівна академія м. Краматорськ²

ХОЛОДНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ІЗ САМОРЕГУЛЬОВАНИМ ПРОТИТИСКОМ ЗА ДОПОМОГОЮ РІДИНИ ПУАНСОНІВ ЗІ СТАЛІ AISI 52100 ДЛЯ КАРБУВАННЯ МОНЕТ

В умовах серійного і масового виробництва виробів процесами холодного об'ємного штампування стоїть задача підвищення стійкості пуансонів і виштовхувачів, яку можна вирішити шляхом заміни обробки різанням на холодне видавлювання при виготовленні такого інструмента. В роботі використано моделювання МСЕ із застосуванням пружно-пластичної моделі металу по визначенню параметрів холодного видавлювання із саморегульованим протитиском пуансонів зі сталі AISI 52100 для карбування монет та проведено експерименти по отриманню пуансонів. Для двох геометричних форм пуансонів моделюванням встановлено максимальні значення протитиску рідини 200 і 300 МПа, які забезпечили видавлювання пуансонів з ступенями деформації 40.8 і 50.6% відповідно. Визначено залежність зусиль видавлювання від переміщення деформуючого інструмента, зусиль виштовхування деформованих заготовок з контейнерів, а також розподіл питомих зусиль на поверхнях заготовки, що контактують з інструментом. Виявлено форму і розміри пуансонів після видавлювання, розподіли температури та компонент напружень і деформацій у деформованому металі. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією проаналізовано по розподілу інтенсивності деформації. Найбільше пропрацювання має місце в місці переходу циліндричної деформуючої поверхні пуансонів в кінцеву опорну поверхню, що необхідно для підвищення стійкості пуансонів при карбуванні. Проведено експериментальні роботи підтвердили результати розрахунків. Результати моделювання і експериментів по видавлюванню з протитиском для сталі AISI 52100 новими. Видавлювання з саморегульованим протитиском може бути використано при виготовленні деформуючого інструмента із малопластичних штампових і інструментальних сталей для процесів обробки металів тиском.

Ключові слова: Холодне видавлювання, саморегульований протитиск, пуансони для карбування, метод скінченних елементів, зусилля, питомі зусилля, напруження, деформації, ресурс пластичності.

V. Kaliuzhnyi, O. Markov, V. Gornostai, P. Abkhari

COLD STAMPING WITH SELF-REGULATING COUNTERPRESSURE USING LIQUID AISI 52100 STEEL PUNCHES FOR COIN MINTING

In the context of mass production of products using cold deep-drawing processes, the challenge is to improve the durability of punches and ejectors, which can be addressed by replacing machining with cold extrusion in the manufacture of such tools. This work employs FEM modeling using an elastic-plastic metal model to determine the parameters for cold extrusion with self-regulating counterpressure of AISI 52100 steel punches for coin minting, and experiments were conducted to produce the punches. For two geometric shapes of punches, the simulation established maximum fluid counterpressure values of 200 and 300 MPa, which ensured the extrusion of punches with deformation rates of 40.8% and 50.6%, respectively. The relationship between the extrusion force and the displacement of the forming tool, the force required to eject the formed blanks from the containers, and the distribution of specific forces on the surfaces of the blank in contact with the tool have been determined. The shape and dimensions of the punches after extrusion, as well as the distributions of temperature and the components of stresses and strains in the deformed metal, were identified. The work hardening of the metal structure due to cold plastic deformation was analyzed based on the distribution of strain intensity. The greatest work hardening occurs at the transition from the cylindrical deforming surface of the punches to the conical support surface, which is necessary to increase the stability of the punches during stamping. Experimental studies were conducted and confirmed the results of the calculations. The results of the modeling and experiments on extrusion with counterpressure for AISI 52100 steel are novel. Extrusion with self-regulating counterpressure can be used in the manufacture of forming tools from low-ductility die and tool steels for metal forming processes.

Keywords: Cold extrusion, self-regulating counterpressure, stamping punches, finite element method, force, specific force, stress, strain, plasticity limit.

Постановка проблеми. В процесах холодного об'ємного штампування (ХОШ) деформуючий інструмент, зокрема пуансони і виштовхувачі, витримують значні питомі зусилля. В умовах серійного і масового виробництва виробів із застосуванням процесів ХОШ має місце проблема стійкості інструменту, який виробляється із штампових і інструментальних сталей та суттєво впливає на собівартість виробів. Така проблема існує і в процесах карбування. На рис. 1 представлено приклади форми і розмірів пуансонів зі сталі AISI 52100 для карбування монет. Пуансони мають деформуючі частини циліндричної форми і опорні частини конічної форми. На рис. 1а показано форму плоского пуансона, а на рис. 1б – випуклого пуансона (торець циліндричної

© В. Л. Калюжний, В.М. Горностай, О.Є. Марков, П.Б. Абхари

частини має радіус для нанесення видавлюванням гравюри монети). В процесі експлуатації пуансонів після певної кількості навантажень відбувається руйнування в місці переходу деформуючої частини в опорну частину. Загально відомо, що для підвищення стійкості деформуючого інструменту при його виготовленні замість обробки різанням використовують процеси холодного видавлювання. Збільшення стійкості відбувається завдяки подрібненню зерен і карбідів наведених сталей та створенню сприятливої макроструктури в осьовому напрямку інструмента при видавлюванні. Видавлювання також забезпечує економію сталей. Традиційним холодним видавлюванням отримати такі пуанسونи неможливо по причині низької пластичності сталі AISI 52100 та наявності малих радіусів переходу циліндричних частин в конічні ($R=1.5$ і $R=2.0$ див. рис. 1). В такому випадку потрібно використовувати холодне видавлювання з прикладанням протитиску для

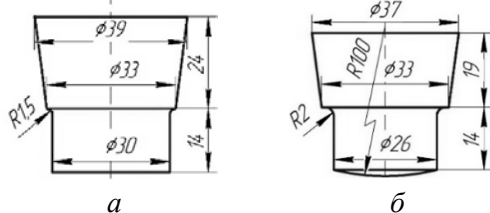


Рис. 1. Приклади форми і розмірів пуансонів для карбування монет : а – плоский пуансон, б – випуклий пуансон

підвищення пластичності та виконання формоутворення з малими радіусами R . Тому постає задача по встановленню параметрів для проектування технології виготовлення пуансонів шляхом видавлювання з протитиском.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив гідростатичної екструзії на мікроструктуру та деформуємість сплавів Al-Si-X розглянуто в роботі [1]. Зі збільшенням вмісту Si в сплавах Al-Si тиск екструзії лінійно зростає. Встановлено подрібнення частинок Si, а ступінь подрібнення мікроструктури збільшується зі збільшенням коефіцієнта екструзії. Авторами [2] теоретично і експериментально досліджуються методи холодної екструзії з протитиском для виготовлення виробів з високою розмірною точністю. Встановлено, що для підвищення точності розмірів необхідний протитиск величиною 50-60% від напруження текучості. Вплив тертя, протитиску та швидкості деформації на течію металу під час кутової екструзії з рівним каналом вивчено в джерелі [3]. Наявність протитиску позитивно впливає на таку екструзію. У статті [4] представлено результати чисельного з використанням МСЕ та експериментального аналізу холодної екструзії високоякісного алюмінію AA1100. Досліджено вплив кута нахилу матриці, коефіцієнта обтиснення на силу екструзії. Визначено тиск контакту матриці з заготовкою, ефективні напруження та деформації, а також швидкість деформації матеріалу. Обговорено кореляцію між теоретичними і експериментальними даними. У джерелі [5] експериментально досліджено зміни в мікроструктурі технічно чистого алюмінію при гідростатичній екструзії за три проходи до величини істинної деформації 3,8. Виявлено подрібнив зерна до 0.6 мкм за перший прохід, а при подальшій деформації середній розмір зерна залишається незмінним. В монографії [6] представлено результати досліджень по гідроекструзії кольорових металів і сплавів, профілів із важкодеформівних матеріалів і титанових та термостійких сплавів, а також виробів із композиційних матеріалів. Металоріжучий і штамповий інструмент, який виготовлений методами гідроекструзії, має підвищену стійкість завдяки пропрацюванню структури матеріалів холодною пластичною деформацією. У джерелі [7] розглянуто процес гідростатичної екструзії для виготовлення ультрадрібнозернистого об'ємного сплаву Al-Mg. Після гідростатичної екструзії також було отримано досить хорошу пластичність сплаву. Дослідження за допомогою МСЕ процесу холодної зворотної екструзії з протитиском 100-200 МПа сплаву AZ31B (Mg-3%Al-1%Zn) проведено авторами [8]. Завдяки зростанню пластичності критичний хід пуансона до початку руйнування збільшено на 20%. В роботі [9] відмічено, що гідростатична екструзія є ефективним методом подрібнення зерна до нанометрового масштабу та отримання середнього розміру зерна менше 100 нм в алюмінієвих сплавах, титані та залізі. Подрібнення зерна в металевих матеріалах має вплив на значне підвищення механічної міцності, покращення зносостійкості та корозійної стійкості при збереженні прийнятного рівня пластичності. Лінії течії були проаналізовані в алюмінієвому сплаві 6061 під час кутової екструзії з рівним каналом (ЕСАЕ) у матриці 90° з застосуванням та без застосування зворотного тиску під час екструзії в роботі [10]. Показано, що протитиск дещо знижує загальну деформацію, значно збільшує розмір пластичної зони та суттєво знижує швидкість пластичної деформації. Джерело [11] присвячено дослідженню впливу протитиску на накопичення пошкоджень на процес прямої екструзії. Застосування протитиску призводить до помітного зменшення накопичення пошкодження в центральній частині. Завдяки систематичному збільшенню протитиску розміри тріщин

зменшуються; а при певному рівні протитиску можна повністю уникнути утворення шевронних тріщин. Вплив гідростатичної екструзії з протитиском на механічні властивості чавуну розглянуто авторами в дослідженні [12]. Було проведено холодну гідроекструзію з протитиском 700 МПа та без нього чавунів EN-GJL 250 та EN-GJS 500-7 зі ступенями деформації 1.77 та 2.12. Було отримано дуже високу міцність на стиск - понад 1000 МПа і ~2400 МПа при мікротвердості HV0.2 понад 3000 МПа та понад 3400 МПа. Подовженням зросло на 15% і 50% для наведених марок чавунів відповідно. Автори вважають, що чавуни з такими властивостями можна класифікувати як нові конструкційні матеріали на основі заліза. У роботі [13] високоміцний сплав C65500 був підданий інтенсивній пластичній деформації методом холодної гідростатичної екструзії для підвищення його міцності шляхом подрібнення зерен без зміни хімічного складу. Істинна деформація величиною 4,1 привела до збільшення межі міцності та межі текучості на 45% та 130% відповідно. У джерелі [14] розглянуто комбіноване видавлювання з протитиском. Прикладання протитиску покращує характеристики пластичності деформованого металу, запобігає виникненню тріщин і розривів, підвищує механічні властивості і точність виробів та приводить до скорочення кількості переходів видавлювання. Авторами [15] представлено результати дослідження гідростатичної екструзії крупнозернистого промислово чистого титану. Деформування призводить до утворення надтонкої мікроструктури пластинчастого типу з дуже міцною волокнистою текстурою, яка має анізотропію властивостей в поздовжньому і поперечному напрямках. В джерелі [16] запропоновано спосіб усунення трібологічних і технологічних проблем при гідростатичній екструзії титану (NC-Ti) завдяки нанесенню алюмінієвого покриття на заготовки. Накопичена деформація величиною 3 забезпечила подрібнення зерен титану та отримання прутків діаметром до 10 мм з нанокристалічною структурою. В роботі [17] проведено чисельні (МСЕ) і натурні експерименти по холодному видавлюванню із саморегульованим протитиском (змінним в процесі видавлювання) сферичних порожнин із інструментальної сталі Р6М5. Максимальна величина протитиску 500 МПа забезпечила деформування без руйнування. Порівняння даних теорії і експериментів по зусиллю видавлювання показало хорошу збіжність. Авторами [18] досліджено наноструктуру та механічні властивості феритно-аустенітної нержавіючої сталі, що деформувалася гідростатичною екструзією з деформаціями $\epsilon=1.4$ та $\epsilon=3.8$. Відмічено зменшення величини зерен з 4 мкм до 150 нм у фериті та 70 нм в аустеніті та значне збільшення межі міцності при випробуванні на розтяг. У роботі [19] досліджено холодну гідроекструзію з протитиском за допомогою рідини величиною від 400 МПа до 700 МПа. Деформуванню підлягали малопластичні і непластичні матеріали: магнієвий сплав ZW3, сірий чавун GJL250, чавун GJS500, вісмут чистотою 99.999% та молибден чистотою 99,9%. Отримано об'ємні вироби без дефектів діаметром від 4 до 7 мм. Механічні властивості і твердість матеріалів були суттєво підвищені, а подрібнення зерен призвело до збільшення пластичності. Авторами зроблено висновок, що гідростатична екструзія з протитиском має велике прикладне значення. Джерело [20] присвячено встановленню чисельним моделюванням раціонального значення протитиску при видавлюванні алюмінієвого сплаву для покращення заповнення форми штампів і якості виробів. Встановлено, що для цього та зменшення роботи деформації величина протитиску повинна бути змінною на протязі процесу деформування. В роботі [21] продемонстровано спосіб отримання ультра дрібнозернистої структури з розміром $d \sim 3$ мкм та з високою пластичністю у чистому магнії за допомогою холодної гідростатичної екструзії. Показано, що низькотемпературна обробка до 450°C призводить до деякого підвищення міцності та пластичності попередньо деформованого магнію. Авторами [22] визначено теоретично (МСЕ) і експериментально підтверджено застосування гідростатичного тиску при зворотній екструзії. Це дозволяє отримати ультра дрібнозернисті труби та виконувати формоутворення із важкодеформівних матеріалів. У джерелі [23] досліджено прогнозування центральних дефектів розриву в процесі екструзії стержнів через конічні матриці за допомогою аналізу МСЕ і верхньої оцінки. Представлено новий критерій для прогнозування виникнення центральних дефектів розриву, на які суттєво впливають ступінь деформації і коефіцієнт тертя. Зв'язок між структурою та фізико-механічними властивостями сталі У8А після холодної гідростатичної екструзії досліджено у широкому діапазоні ступенів деформації в роботі [24]. Зі збільшенням ступеню деформації границя міцності та умовна границя текучості сталі монотонно зростають у 2 та 3.6 рази відповідно. Для дрібнозернистого перетворення мікроструктури до нанорозмірів було застосовано гарячу (при 1000 °C) та холодну гідростатичну екструзію із загальною істинною деформацією 1.4 заготовок з нержавіючої сталі 316LVM авторами статті [25]. Холодна гідростатична екструзія дала матеріал

надвисокої міцності з обмеженою, але достатньою пластичністю. Гарячою екструзією отримано матеріал з дуже хорошим поєднанням міцності (приблизно 900 МПа) та пластичності (відносно подовження до руйнування вище 20%). Досліджено вплив гідростатичної екструзії в поєднанні зі штучним старінням на мікроструктуру, механічні та електричні властивості сплаву 6101 Al-Mg-Si у джерелі [26]. Таким способом отримано довгі дроти з ультра дрібнозернистою мікроструктурою (розмір зерна 300–400 нм), підвищеними межею міцності на розтяг (> 330 МПа) та електропровідністю (до 58% IACS). У дослідженні [26] було проведено гідростатичну екструзію нержавіючої сталі 1.4462 з використанням кількох стадій. Спочатку зі ступенем деформації $\epsilon=1.4$, а потім до $\epsilon=3.8$. Процес екструзії призвів до зміни мікроструктури та текстури досліджуваного матеріалу, які супроводжувалися покращенням механічних властивостей. За допомогою MCE у джерелі [28] досліджено поведінку пластичної деформації алюмінієвого зразка при гідростатичному циклічному екструзійному розширенні з різним зовнішнім протитиском. Збільшення стискаючого гідростатичного тиску призводить до мінімізації виникнення та поширення дефектів та покращення механічних властивостей. Авторами [29] досліджено деформаційну поведінку нетекстурованого полікристалічного сплаву (Fe83.4Ga16.6) 99.9NbC0.1 під час гідростатичної екструзії. Досягнуто холодним формоутворенням ступінь деформації 53% литого зразка без попередніх високотемпературних деформацій. Вплив ступеню деформації при гідроекструзії на твердість, мікроструктуру та анізотропію кристалічної текстури в чистих ніобієвих трубах досліджено в роботі [30]. Відмічено різке зменшення середніх розмірів зерен після екструзії, яке не пропорційне ступеню деформації. У джерелі [31] представлено вплив інтенсивної пластичної деформації методом холодної гідростатичної екструзії на механічні та структурні властивості поліаміду 6 (ПА6). В результаті пластичної деформації міцність на розтяг зросла майже на 500% до рівня 508 МПа, модуль пружності на розтяг збільшився приблизно на 65%. Також спостерігалася значна зміна структура ПА6. Роботу [32] присвячено дослідженню за допомогою MCE гідростатичного циклічного екструзійного стискання при виготовленні труб зі сплаву алюмінію 5052 за два проходи. В трубах отримано однорідну мікроструктуру, зменшення розміру зерен з 360 мкм до 636 нм, збільшення межі текучості в 2.6 рази, межі міцності - в 1.72 рази, мікротвердості - в 2.14 рази. Авторами [33] проведено чисельне з використанням MCE та експериментальне дослідження впливу процесу холодної екструзії на залишкові напруження та втомну довговічність внутрішньої різьби високоміцної сталі 42CrMo4. Встановлено покращення втомних характеристик внутрішньої різьби шатуна корабельного дизельного двигуна. У джерелі [34] розглянуто електрохімічну пластифікацію поверхневих шарів металів під час пластичної деформації та узагальнено результати лабораторних експериментів з холодного волочіння з протитиском різних сплавів. На пластифікацію впливають кількість проходів волочіння, швидкість волочіння та твердість металу. Контроль розвитку пошкоджень без зміни геометрії виготовленої деталі при холодній екструзії з протитиском продемонстровано в роботі [35]. Протитиск створюється за допомогою контрпуансона. Досягнуто покращення продуктивності виготовлення і якості виробів. Авторами [36] досліджено інтенсивну пластичну деформацію алюмінієвих сплавів 2024, армованих мікрочастинками глинозему (Al_2O_3). Деформування виконано холодною гідростатичною циклічною екструзією з протитиском. Проведено оцінку мікроструктури та механічних характеристик сплавів. Роботу [37] присвячено оптимізації параметрів холодної екструзії сплаву AA 2024, до яких належать кут нахилу матриці α , швидкість деформування V та коефіцієнт тертя μ . Використано моделювання MCE (DEFORM-3D). Встановлено оптимальні параметри: $\alpha=30^\circ$, $V=4,8$ мм/хв, $\mu=0,06$. Авторами джерела [38] показано, що холодне видавлювання евольвентних зубців дозволяє виконати інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією та забезпечити підвищення довговічності шестерень. У дослідженнях [39,40] розглянуто пряму екструзію із сталі 16MnCrS5 стержнів з прикладанням протитиску за допомогою контрпуансона та пряму екструзію порожнистих профілів. Виявлено посилення розвитку пошкоджень при параметру Лоді $L=0$ (без протитиску) порівняно з $L=-1$ (з протитиском).

З аналізу літературних джерел встановлено, що традиційне холодне видавлювання і холодне видавлювання з протитиском забезпечують суттєве подрібнення зерен у деформованому металі, а наявність протитиску приводить до підвищення пластичності металу. Отримані такими методами вироби мають підвищену надійність і довговічність. В існуючих джерелах відсутні дані по видавлюванню з протитиском виробів із сталі AISI 52100 та практично немає відомостей по зусиллях виштовхування виробів після такого видавлювання.

Постановка завдань. Метою роботи є використання МСЕ для визначення параметрів холодногoviдавлювання із саморегульованим протитиском за допомогою рідини двох форм пуансонів із сталі AISI 52100 для карбування монет та проведення експериментальних робіт по видавлюванню з протитиском.

Завданнями дослідження було визначення максимальної величини тиску рідини на нижній торець заготовки для забезпечення видавлювання пуансонів без руйнування; встановлення зусиль видавлювання та виштовхування деформованих заготовок; виявлення розподілів питомих зусиль на деформуючому інструменті; визначення кінцевих форм і розмірів отриманих пуансонів та розподілів компонент напружено-деформованого стану і температури у деформованому металі; здійснення оцінки пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією; проведення експериментальних досліджень по видавлюванню із саморегульованим протитиском.

Для проведення моделювання МСЕ і експериментальних випробувань було використано схему прямого видавлювання в умовах дії протитиску рідини, величина якого визначається зусиллям деформування та саморегулюється пропорційно цьому зусиллю на протязі процесу видавлювання. Такий спосіб був розроблений на кафедрі обробки металів тиском Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» та успішно використаний для холодногo пластичного формоутворення порожнин із малопластичних сталей [17]. Положення інструменту і заготовки на різних етапах видавлювання із саморегульованим протитиском показано на рис. 2. На рис. 2а зображено положення у вихідному стані. Рухомий контейнер 1, який має верхню камеру 2 з циліндричною частиною діаметром d і профільною частиною з потрібними розмірами для формоутворення пуансонів та нижню камеру 3, що має діаметр D . На верхньому торці контейнера 1 виконано резервуар 4 для робочої рідини. В камері 3 встановлено плунжер 5 з ущільненням 6. За допомогою гвинта 7 плунжер 5 з контейнером 1 закріплено до нижньої плити 8. Контейнер 1 може переміщуватися по плунжеру 5. В камери 2 і 3 заливають робочу рідину для створення протитиску на нижній торець заготовки під час видавлювання. На верхньому торці контейнера 1 встановлено направляюче кільце 9 з отворами 10. Між контейнером 1 і плитою 8 розміщено кільце із поліуретану 11, яке необхідне для повертання контейнера у вихідний стан після виштовхування отриманого пуансона. Вихідну заготовку 12 діаметром d_0 і висотою h_0 встановлюють в кільце 10, яке забезпечує її центрування. Діаметр d_0 дещо більший від діаметра d контейнера 1 для запобігання витрат рідини при видавлюванні. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 13. При дії зусилля P пуансон 13 із заготовкою 12 переміщується вниз зі швидкістю V рідина із камери 2 витискується в камеру 3 (рис. 2б). При цьому контейнер 1 переміщується вгору по плунжеру 5. Після досягнення нижнім торцем заготовки 12 конусної поверхні камери 2 контейнера 1 починається процес видавлювання. Зусилля P починає зростати і в рідині у камерах 2 і 3 виникає тиск величиною q , який прикладається до нижнього торця заготовки, що деформується. Величина тиску q залежить від діаметра D і змінюється пропорційно зусиллю P на протязі процесу формоутворення. Дія тиску q приводить до зростання тискаючих напружень в осередку деформації і підвищення пластичності металу деформованої заготовки та запобігає утворенню мікротріщин і пустот. На рис. 2в показано положення в кінці видавлювання з позначенням розмірів деформованої заготовки. Виштовхування деформованої заготовки здійснюється наступним переміщенням повзуна преса шляхом прикладання зусилля $P_в$ пуансоном 13 до плити 14, яку встановлено на кільце 9 (рис. 2г). Контейнер 1 рухається вниз і рідина виштовхує заготовку із камери 2. При цьому стискається кільце 11, яке після зняття дії зусилля $P_в$ повертає контейнер 1 у вихідне положення для наступного видавлювання. Таким чином, наведена схема видавлювання забезпечує: створення протитиску за рахунок зусилля деформування; саморегулювання величини протитиску і саморегулювання об'єму рідини на протязі видавлювання; виштовхування деформованої заготовки за допомогою рідини.

Скінченно-елементне моделювання видавлювання виконано в середовищі Deform 2D з використанням циліндричних координат r , z і θ та пружно-пластичної моделі металу, що дозволяє крім зусилля деформування встановлювати зусилля виштовхування деформованих заготовок із контейнера. Швидкість деформування була $V=0.14$ мм/сек, що давало можливість реалізації видавлювання на гідравлічному пресі. Вплив тертя на контактуючих поверхнях визначалося по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu=0.08$. Дію саморегульованого протитиску при видавлюванні враховано шляхом прикладання розподіленого навантаження на нижній торець заготовки. При

цьому величина протитиску змінювалася пропорційно зусиллю видавлювання та досягала максимального значення при найбільшому зусиллі видавлювання.

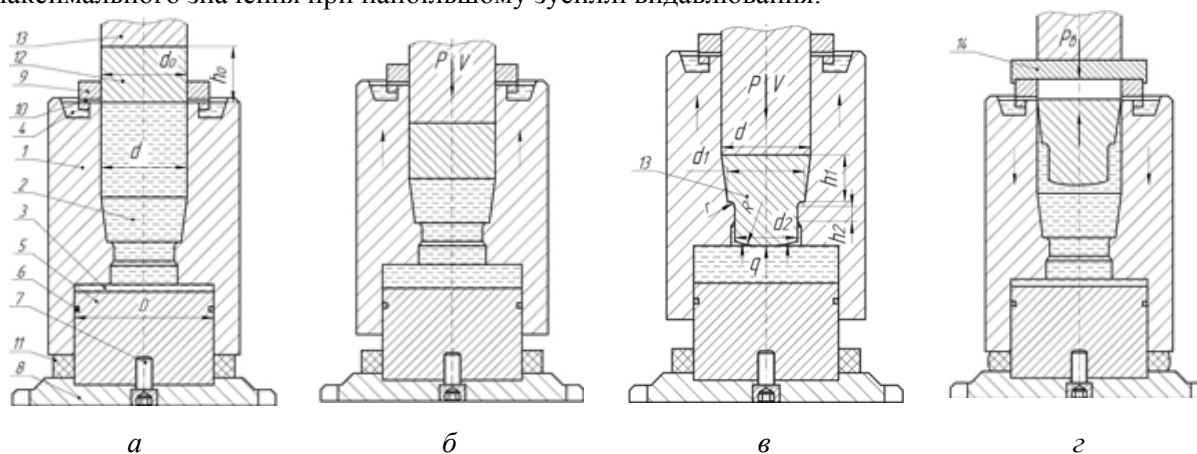


Рис. 2. Положення інструмента і заготовки на різних етапах видавлювання: а – положення вихідному стані (1 – контейнер, 2 – верхня камера, 3 – нижня камера, 4 – резервуар для рідини, 5 – плунжер, 6 – ущільнення, 7 – гвинт, 8 – нижня плита, 9 – кільце, 10 – отвір, 11 – кільце із поліуретану, 12 – заготовка, 13 – пуансон), б – положення на початку видавлювання, в – положення в кінці видавлювання з позначенням розмірів деформованої заготовки, г – положення в кінці виштовхування деформованої заготовки (14 – плита)

Для моделювання отримання заготовок пуансонів були використані циліндричні заготовки із сталі AISI 52100 з наступними розмірами: для плоского пуансона – $d_0=39.2$ мм і $h_0=31$ мм; для випуклого пуансона – $d_0=37.2$ мм і $h_0=26$ мм. Розміри деформуючого інструмента (див. рис. 1 і рис. 2в): для видавлювання плоского пуансона – $d=39$ мм і $h_1=24$ мм; $h_2=5$ мм, $d_2=30$ мм, $r=1.5$ мм; для видавлювання випуклого пуансона – $d=37$ мм і $h_1=19$ мм; $h_2=5$ мм, $d_2=26$ мм, $r=2$ мм. Середній ступінь деформації при видавлюванні плоского пуансона 1 дорівнює $\varepsilon=(1-d_2^2/d^2)100=(1-30^2/39^2)100=40.8\%$. Для випуклого пуансона – $\varepsilon=(1-26^2/37^2)100=50.6\%$.

Викладення основного матеріалу. Розрахункові положення заготовки і деформуючого інструмента в розрізі із програми Deform та прикладі видавлювання плоского пуансона показано на рис. 3. Стрілками зображено напрямки руху інструмента. На рис. 3а представлено положення на початку видавлювання. Заготовку 1 розміщено в направляючому кільці 2, яке встановлено на контейнері 3. Деформування здійснюється пуансоном 4. При переміщенні пуансона 4 заготовка 1 зміщується вниз до дотику з конусною поверхнею контейнера 3. При подальшому переміщенні пуансона 4 відбувається деформування заготовки. Положення в кінці видавлювання з отриманням деформованої заготовки 5 наведено на рис. 3б. Виштовхування цієї заготовки 5 із контейнера 3 здійснюється наступним переміщенням повзуна преса. При цьому кільце 2 і контейнер 3 рухаються вниз. Положення на проміжній стадії виштовхування приведено на рис. 3в. Положення в кінці виштовхування зображено на рис. 3г.

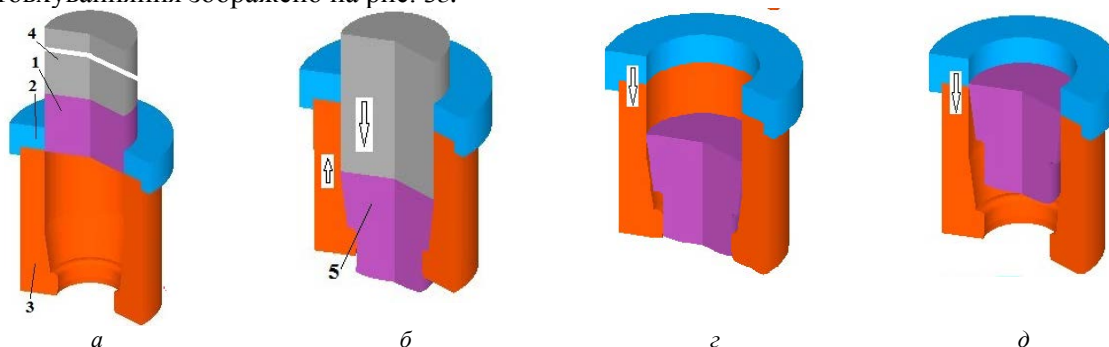


Рис. 3. Розрахункові положення заготовки і деформуючого інструмента при видавлюванні: а – після встановлення заготовки (1 – заготовка, 2 – направляюче кільце, 3 – контейнер, 4 – пуансон), б – в кінці видавлювання (5 – деформована заготовка), в – на проміжній стадії виштовхування деформованої заготовки, г – в кінці виштовхування

Спочатку продемонструємо, що відбувається при моделюванні і проведенні експериментів по видавлюванню без протитиску ($q=0$ МПа). На рис. 4 показано розподіли використаного ресурсу пластичності ψ деформованого металу і фотографії пуансонів після видавлювання із $q=0$ МПа. Тут і далі розподіли наведено для половин деформованих заготовок, тонкими лініями зображено деформуючий інструмент, а розміри по вісях r і z показано в міліметрах. Для плоского пуансона ресурс пластичності металу вичерпано на зовнішній поверхні циліндричної частини (рис. 4а). У цьому місці отримано $\psi=1.1$ (при $\psi=1.0$ починається руйнування. Практично повністю вичерпується ресурс пластичності ($\psi=0.96$) і в області біля торця циліндричної частини. Руйнування підтверджено експериментально – на боковій поверхні циліндричної частини при видавлюванні виникають тріщини (рис. 4б). Аналогічні результати отримано для випуклого пуансона. В шарах металу на поверхні циліндричної частини ресурс пластичності досягає значення $\psi=1.1$, а в області

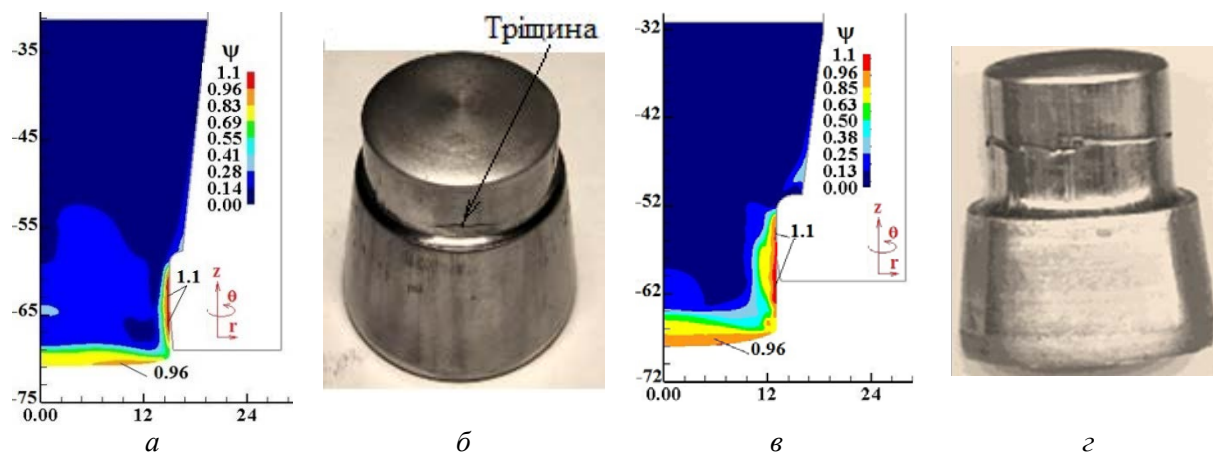


Рис. 4. Результати моделювання по використаному ресурсу пластичності ψ деформованого металу і фотографії пуансона при видавлюванні без протитиску ($q=0$ МПа): а і б – для плоского пуансона, в і з – для випуклого пуансона

торця - $\psi=0.96$ (рис. 4в). Для цього пуансона середній ступінь деформації ε приблизно на 10% більший від випуклого пуансона, тому при видавлюванні на боковій поверхні циліндричної частини виникає тріщина по всьому периметру (рис. 4з).

За допомогою моделювання визначено зусилля деформування, величини саморегульованого протитиску, які забезпечили холодне формоутворення пуансонів без руйнування. На рис. 5 зображено залежності зусиль видавлювання та графіки зміни величин протитиску від переміщень пуансонів. Для видавлювання плоского пуансона графік залежності зусилля від переміщення деформуючого пуансона показано на рис. 5а. Тут і на інших графіках відмічено величини переміщень в міліметрах і максимальні значення зусиль. Спочатку зусилля зростає повільно при деформуванні заготовки по конусній поверхні контейнера. Далі іде інтенсивне збільшення зусиль при деформуванні заготовки на радіусі заокруглення циліндричної частини контейнера в кінцеву частину. При переміщенні пуансона 25 мм зусилля видавлювання досягає максимального значення $P=2180$ кН. Після цього зусилля знижується і досягає $P=2120$ кН в кінці процесу завдяки поступовому зменшенню висоти деформованої заготовки. Як видно із графіка зміни протитиску на протязі процесу видавлювання (рис. 5б), величина протитиску при максимальному зусиллі склала $q=-200$ МПа. Протитиск змінюється пропорційно зусиллю видавлювання. Для видавлювання випуклого пуансона зусилля має найбільше значення $P=2340$ кН при переміщенні деформуючого пуансона 19 мм (рис. 5в). Для формоутворення випуклого пуансона без руйнування потрібно створити протитиск з найбільшою величиною $q=-300$ МПа (рис. 5з). Для забезпечення зміни протитиску з досягненням значень 200 і 300 МПа діаметри нижньої камери контейнера повинні бути $D=120$ мм і $D=104$ мм при видавлюванні плоского і випуклого пуансона відповідно (див рис. 2а).

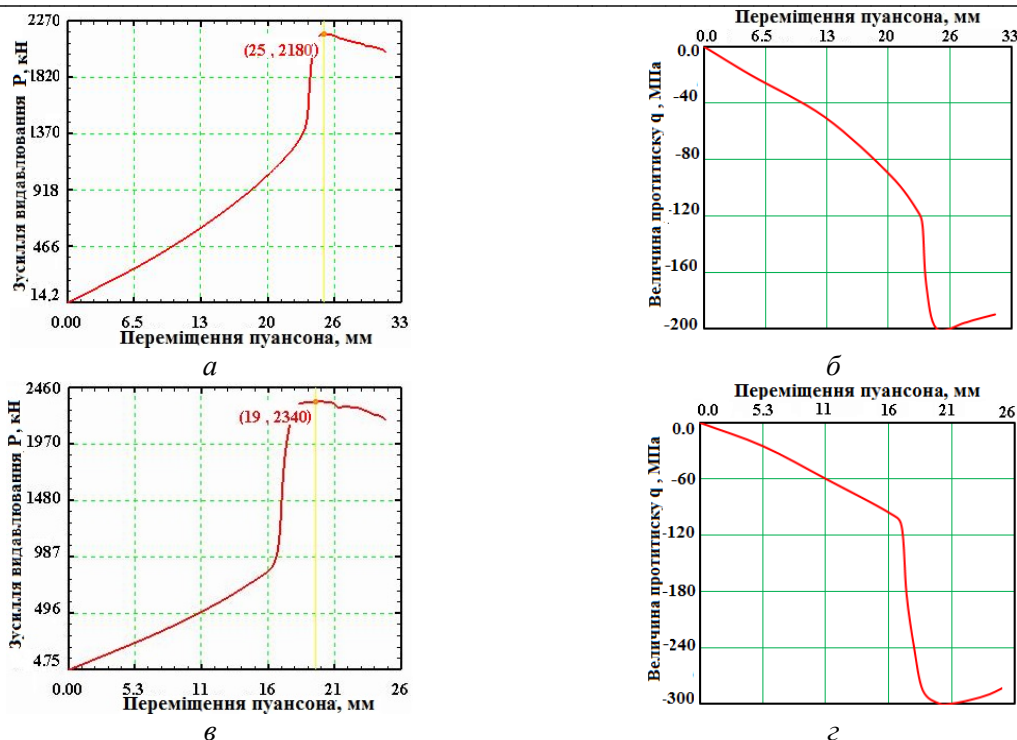


Рис. 5. Залежності зусиль видавлювання P та зміни величини протитиску q від переміщень пуансонів: а і б – для видавлювання плоского пуансона, в і г – для видавлювання випуклого пуансона

На рис. 6 представлено залежності зусиль виштовхування отриманих пуансонів від переміщень контейнерів. Найбільші зусилля виникають на початку виштовхування деформованих заготовок та складають $P_v = 32.8$ кН для плоского пуансона (рис. 6а) і $P_v = 87.2$ кН для випуклого пуансона (рис. 6б). Далі в обох випадках зусилля зменшуються до тих пір, поки деформовані заготовки не вийдуть із калібруючих поясків контейнерів висотою $h_2 = 5$ мм (див. рис. 2в). В подальшому зусилля залишаються постійними при переміщенні деформованих заготовок по циліндричних поверхнях контейнерів.

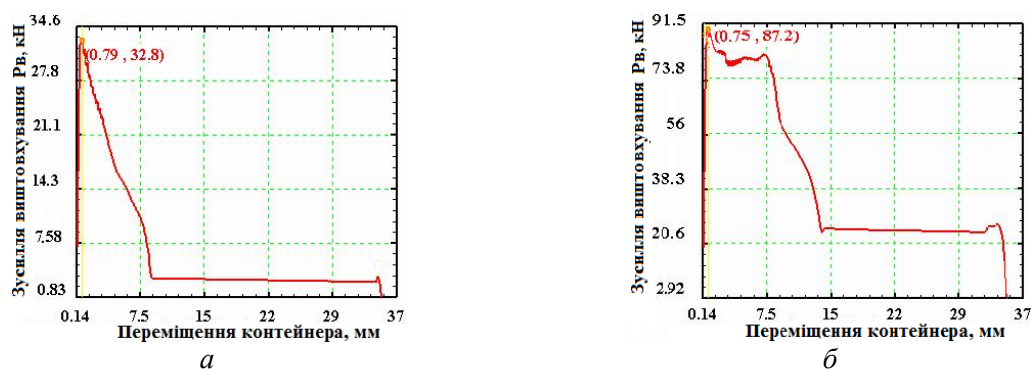


Рис. 6. Залежності зусиль виштовхування деформованих заготовок від переміщень контейнерів: а – для плоского пуансона, б – для випуклого пуансона

Для проектування штампового оснащення, вибору матеріалу для деформуючого інструмента та визначення кількості бандажів для контейнера (матриці) потрібно знати розподіли питомих зусиль на контактуючих поверхнях деформованих заготовок з інструментом. Питомі зусилля можна оцінити по розподілах нормальних напружень σ_n на таких поверхнях, які дозволяє виявити програма Deform. На рис. 7 наведено розподіли напружень σ_n на поверхнях половин деформованих заготовок, що розділені на скінченні елементи, з інструментом.

На рис. 7а показано розподіли для заготовки плоского пуансона. На поверхні верхнього торця заготовки з пуансоном отримано найбільшу величину $\sigma_n=2150$ МПа. На конусній поверхні з контейнером ці напруження знаходяться у межах $\sigma_n=1700\dots2200$ МПа, на радіусі заокруглення напруження досягають максимальної величини $\sigma_n=2400$ МПа. На циліндричній поверхні з калібруючим пояском контейнера отримано $\sigma_n=300\dots620$ МПа.

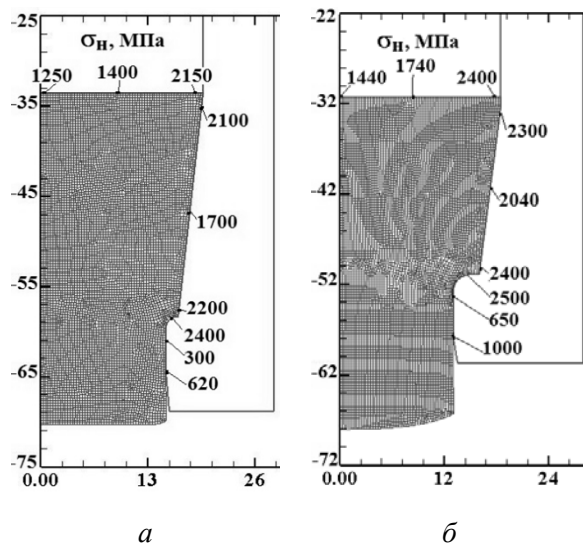


Рис. 7. Розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях деформованих заготовок з інструментом: а – для плоского пуансону, б – для випуклого пуансону

Розподіли напружень σ_n для деформованої заготовки випуклого пуансона представлено на рис. 7б. На верхньому торці заготовки отримано ці напруження у межах $\sigma_n=1440\dots2400$ МПа, на конусній поверхні – $\sigma_n=2040\dots2400$ МПа. На радіусі заокруглення ці напруження досягають найбільшого значення $\sigma_n=2500$ МПа, а на контактуючій поверхні циліндричної частини – $\sigma_n=650\dots1000$ МПа. Для таких значень питомих отриманих зусиль на конусній поверхні контейнер повинен складатися із внутрішньої втулки і двох бандажів.

На рис. 8 приведено розподіли ступеню використання ресурсу пластичності ψ і температури $T, ^\circ\text{C}$ по половині деформованих

заготовок пуансонів при видавлюванні з протитиском. Для випуклого пуансона прикладання протитиску з максимальним значенням $q=-200$ МПа забезпечило отримання найбільшої величини використаного ресурсу $\psi=0.8$ в шарах металу біля зовнішньої поверхні циліндричної частини та $\psi=0.7$ в області нижнього торця пуансона (рис. 8а). При видавлюванні випуклого пуансона зі збільшеною величиною протитиску $q=-300$ МПа у таких місцях відповідно отримано $\psi=0.7$ і $\psi=0.61$.

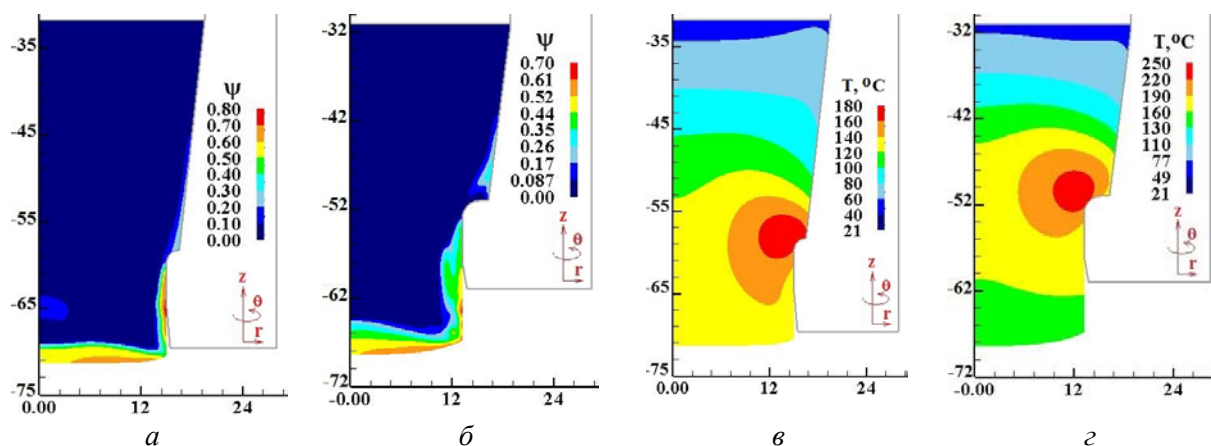


Рис. 8. Розподіли ступеню використання ресурсу пластичності ψ та температури у деформованих заготовках: а і в – для плоского пуансона, б і г – для випуклого пуансона

При холодному пластичному формоутворенні з протитиском підвищується температура металу. Найбільші значення температури в обох випадках виникають в зонах біля радіусів заокруглення циліндричних частин в конусні. Для плоского пуансону температура у такому місці досягає величин у межах $T=160\dots180^\circ\text{C}$ (рис. 8в), а для випуклого пуансону отримано $T=220\dots250^\circ\text{C}$ (рис. 8г).

Розподіли радіальних σ_r , осьових σ_z , тангенціальних σ_θ і інтенсивності σ_i напружень у половині деформованих заготовок в кінці видавлювання з протитиском пуансонів двох типів представлено на рис. 9. Практично по всьому об'єму деформованої заготовки плоского пуансона, що отримана з протитиском $q=-200$ МПа, виникають стискаючі радіальні напруження σ_r , які

змінюються у межах від $\sigma_r = -100$ до $\sigma_r = -2200$ МПа (рис. 9а). Тільки в області нижнього торця отримано розтягувальні напруження $\sigma_r = 500$ МПа. Також по всьому об'єму діють стискаючі осеві напруження σ_z (рис. 9б) і тангенціальні напруження σ_θ (рис. 9в). Розтягувальні напруження у межах $\sigma_z = 220 \dots 600$ МПа виникають в зовнішніх шарах металу циліндричної поверхні, а напруження σ_θ у таких межах отримано в зоні торця циліндричної частини заготовки. Максимальні значення інтенсивності напружень у межах $\sigma_i = 880 \dots 1000$ МПа отримано в області переходу циліндричної частини в конусну (рис. 9г).

Для деформованої заготовки випуклого пуансона, видавлювання якої здійснено з протитиском $q = -300$ МПа, зменшується область з розтягувальними радіальними напруженнями σ_r в області нижнього торця заготовки (рис. 9д), а розтягувальні осеві напруження в зовнішніх шарах металу циліндричної поверхні залишилися без зміни (рис. 9е). Знижуються розтягувальні тангенціальні напруження σ_θ в області нижнього торця (рис. 9ж). Область зі значеннями інтенсивності напружень у межах $\sigma_i = 880 \dots 1000$ МПа зміщується у конусну частину деформованої заготовки (рис. 9з).

На рис. 10 представлено розподіли радіальних ε_r , осевих ε_z , тангенціальних ε_θ і інтенсивності ε_i деформацій у половинах деформованих заготовок в кінці видавлювання з протитиском. Практично у всьому об'ємі для заготовки плоского пуансона виникають стискаючі радіальні деформації та досягають значень $\varepsilon_r = -0.25 \dots -0.6$ в зоні біля зовнішньої поверхні циліндричної частини, а в конусній частині в зоні біля радіуса заокруглення отримано розтягувальні деформації у межах $\varepsilon_r = 0.1 \dots 0.8$ (рис. 10а). У більшій частині об'єму для цього пуансону виникають розтягувальні осеві деформації ε_z та досягають максимальних величин у межах $\varepsilon_z = 0.1 \dots 0.8$, які досягають максимальних величин в області біля зовнішньої поверхні циліндричної частини (рис. 10б). Практично у всьому об'ємі отримано стискаючі тангенціальні деформації з найбільшими величинами $\varepsilon_\theta = -0.18 \dots -0.25$ в області біля радіуса заокруглення (рис. 10в).

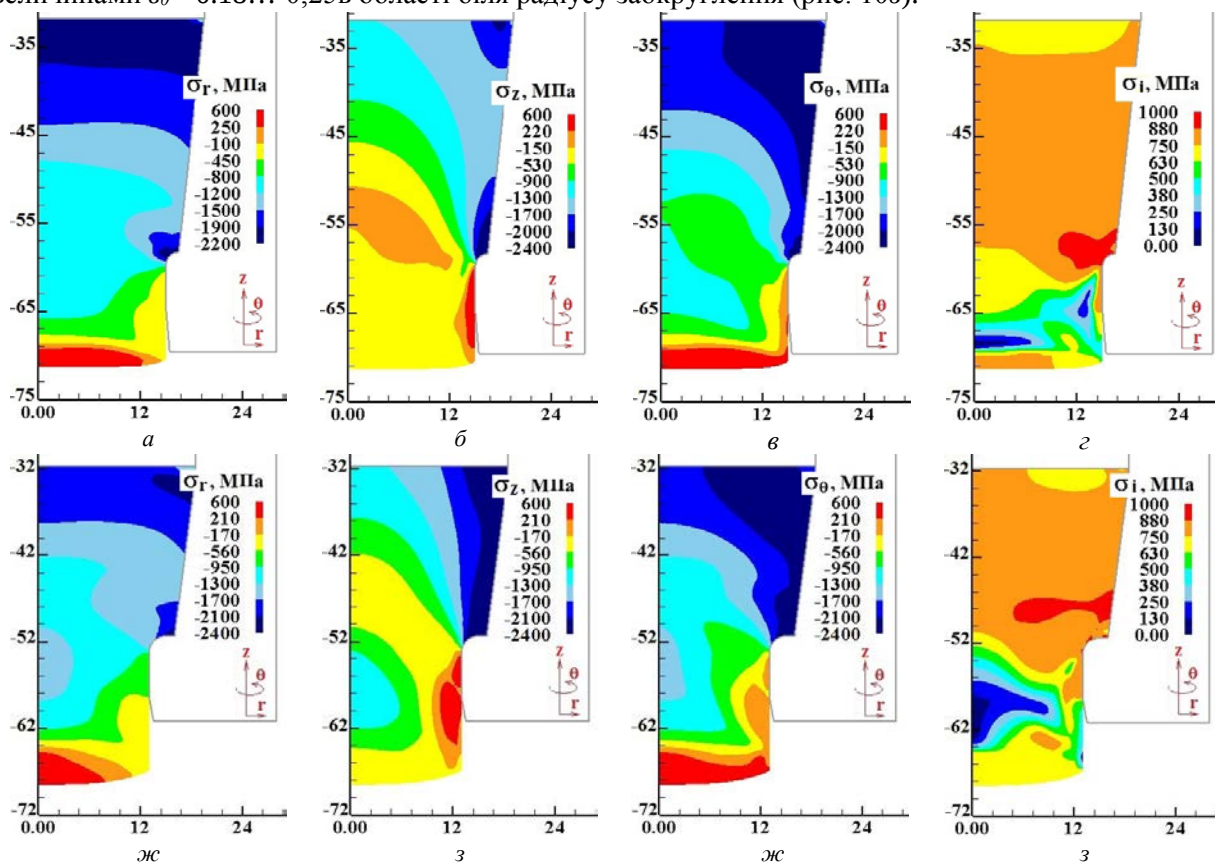


Рис. 9. Розподіли напружень σ_r , σ_z , σ_θ і σ_i у половинах деформованих заготовок в кінці видавлювання: а – г – для плоского пуансона при $q = -200$ МПа, д – з – для випуклого пуансона при $q = -300$ МПа

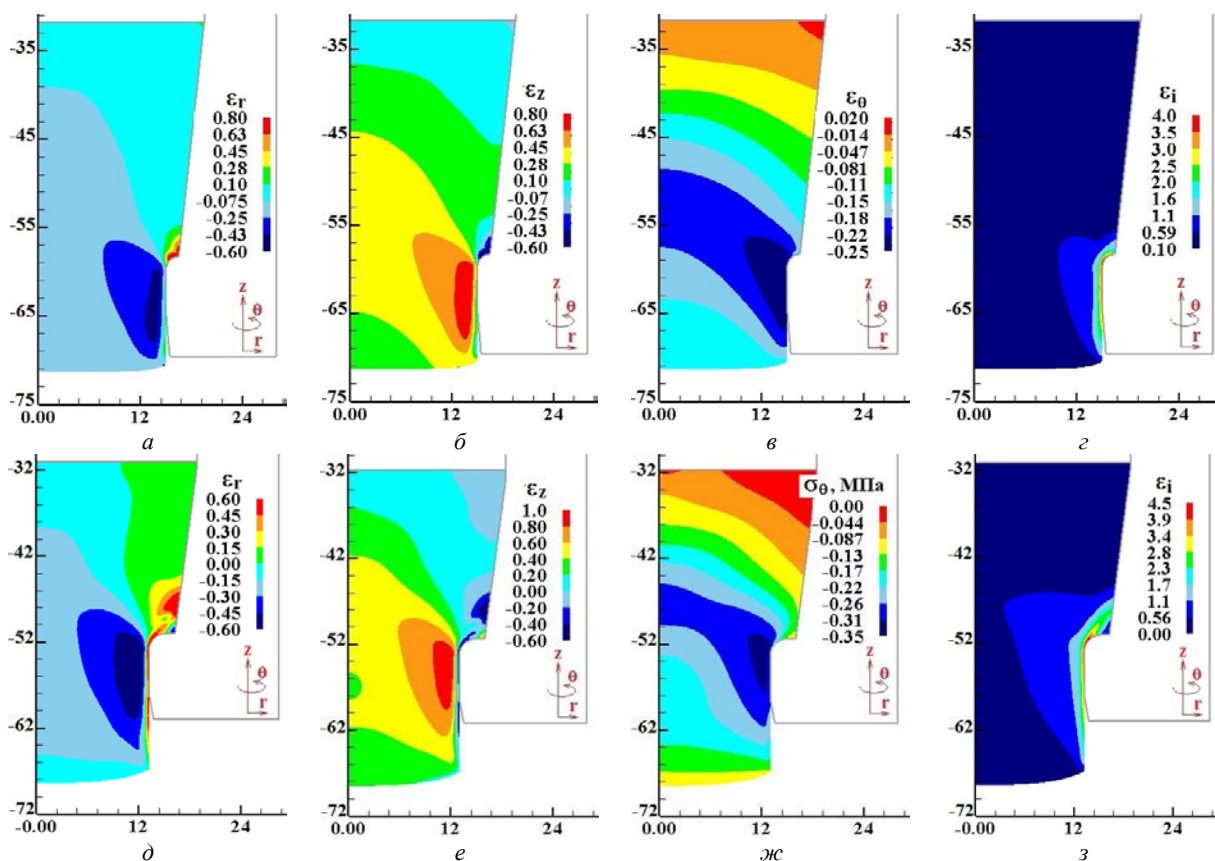


Рис. 10. Розподіли деформацій ε_r , ε_z , ε_θ і ε_i у половиних деформованих заготовок в кінці видавлювання: а – г – для плоского пуансона, д – з – для випуклого пуансона

Результуюче пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i , який для заготовки плоского пуансона наведено на рис. 10г. Найбільш інтенсивне пропрацювання має місце в зоні радіусу заокруглення циліндричної частини в конусну з отриманням величин інтенсивності деформацій у межах $\varepsilon_i=1.6\dots4.0$.

Збільшення середнього ступеню деформації при видавлюванні з протитиском заготовки випуклого пуансону приводить до зростання компонент деформацій. Область із стискаючими радіальними деформаціями у межах $\varepsilon_r=-0.15\dots-0.6$ значно розширюється та досягає вісі деформованої заготовки пуансона (рис. 10д). Зростають також величини розтягувальних осевих деформацій з отриманням максимальних величин $\varepsilon_z=0.8\dots1.0$ у шарах металу біля зовнішньої поверхні циліндричної частини (рис. 10е). Суттєво розширюються області з підвищеними значеннями стискаючих тангенціальних деформацій ε_θ (рис. 10ж). Посилюється і результуюче пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією згідно з розподілом інтенсивності деформацій ε_i (рис. 10з). В шарах металу біля радіусу заокруглення отримано величини у межах $\varepsilon_i=3.4\dots4.5$, а область зі значеннями $\varepsilon_i=0.5\dots1.1$ розширюється до вісі випуклого пуансона.

Таким чином, для двох форм пуансонів в областях переходу циліндричних частини в конусні отримано інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією. Це забезпечує усунення підрізання волокон макроструктури, яке має місце при виготовленні обробкою різанням, та дозволяє прогнозувати підвищення стійкості пуансонів при карбуванні.

На основі результатів моделювання було спроектовано та виготовлено штамп для холодного видавлювання із саморегульованим протитиском рідини та проведено експериментальні роботи на гідравлічному пресі ПО 443 зі швидкістю деформування $V=0,14$ мм/сек по формоутворенню пуансонів двох типів.

Положення штампа в кінці видавлювання показано на рис. 11. Штмп має нижню плиту 1 з пазами для кріплення на рухомому столі преса, на якій встановлено плунжер 2 з ущільненням 3 і стопорним кільцем 4 та кільцем із поліуретану 5.

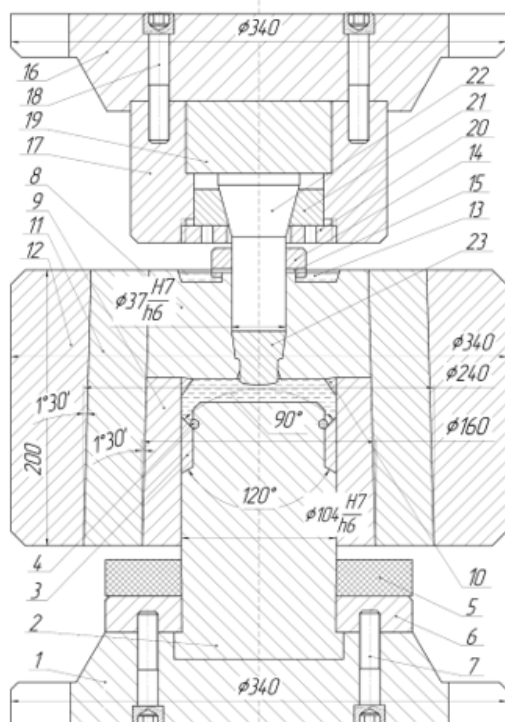


Рис. 11. Схема штампа для положення в кінці видавлювання

Плунжер 2 зафіксовано до плити 1 за допомогою кільця 6 і шести гвинтів 7. З можливістю переміщення на плунжері 2 встановлено матрицю, що має роз'ємну внутрішню втулку, яка складається з верхньої частини 8 і нижньої частини 9 та ущільнення 10, а також два бандажі 11 і 12. На верхній частині 8 виконано резервуар 13 для робочої рідини і розміщено направляюче кільце 14 з отворами 15 для встановлення заготовки. До верхньої плити штампу 16 з пазами для кріплення до нерухомої траверси преса прикріплено пуансонотримач 17 за допомогою чотирьох гвинтів 18, в якому розміщено опорну плиту 19. За допомогою гайки 20 і кільця 21 до опорної плити 19 зафіксовано пуансон 22. У внутрішню втулку заливають робочу рідину, яка частково заповнює резервуар 13, і встановлюють заготовку в направляюче кільце 14. При переміщенні стола пресу здійснюється процес видавлювання з отриманням деформованої заготовки пуансона 23.

Матеріали, які використано для основних деталей штампу та їх термообробка. Плити 1 і 16 штампу виготовлено із сталі 45 із загартуванням до твердості HRC 38...42. Для плунжеру 2 використано сталь X12M загартовану до HRC 54...58. Ущільнення 3 і 10 зроблено із бронзи. Частини 8 і 9 з яких складається внутрішня втулка, виготовлено із сталі X12M із загартуванням до твердості HRC 58...62 і прошліфовано разом по зовнішній поверхні. Бандаж 11 виготовлено із сталі 5XHM із загартуванням до HRC 46...50. Бандаж 12 виконано із сталі 45X з термообробкою до HRC 58...62. Пуансонотримач із сталі 45 має HRC 40...44. Опорну плиту 19 (HRC 52...56) і кільце 20 (HRC 46...50) зроблено із сталі У10А. Пуансон 23 виготовлено із сталі X12M і загартовано до HRC 58...62.

На вихідні фосфатовані циліндричні заготовки наносили змащення ВНІНП-232. В якості робочої рідини для створення протитиску використовували масло індустріальне І20. На рис. 12 представлено фотографії пуансонів, які отримані холодним видавлюванням з протитиском. Прикладання протитиску забезпечило отримання без руйнування плоский пуансон (рис. 12а) і випуклий пуансон (рис. 12б). Після видавлювання пуансони підлягали відпуску для зняття залишкових напружень.



а



б

Рис. 12. Фотографії пуансонів, які отримані видавлюванням з протитиском: а – плоский пуансон, б – випуклий пуансон

При проведенні експериментів було встановлено залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів. На рис. 13 зображено порівняння графіків зусиль, які отримано моделюванням МСЕ, з експериментальними величинами. Маркерами відмічено точки, в яких поведено порівняння величин зусиль. Для видавлювання плоского пуансона максимальне значення зусилля по МСЕ склало 2180 кН, а згідно експерименту – 2220 кН (рис. 13а). Для випуклого пуансона отримано по МСЕ 2340 кН, а в експерименті – 2380 кН (рис. 13б). Максимальна відмінність в зусиллях склала до 4%.

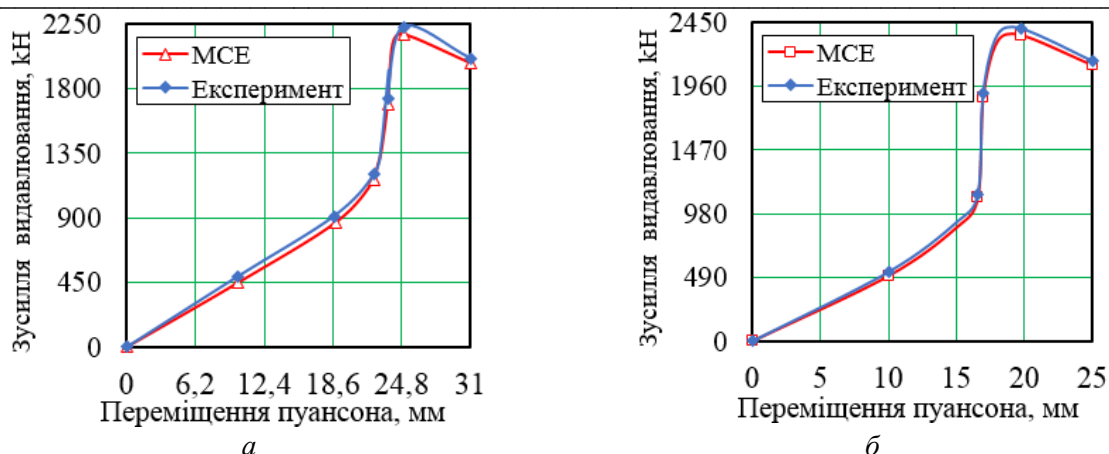


Рис. 13. Порівняння графіків «зусилля видавлювання-переміщення пуансона», які отримані МСЕ з експериментальними даними: а – для плоского пуансона, б – для випуклого пуансона

Висновки

1. В роботі моделюванням МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі металу та експериментальним шляхом проведено дослідження холодногoviдавлювання із саморегульованим протитиском пуансонів двох геометричних форм із сталі AISI 52100, які використовуються для карбування монет.

2. Моделюванням встановлено і експериментально підтверджено, що видавлювання без протитиску не дозволяє отримати заготовки пуансонів по причині руйнування при холодному формоутворенні. Також моделюванням визначено найбільші величини протитиску 200 і 300 МПа, які забезпечили видавлювання пуансонів зі ступенями деформації 40.8 і 50.6% відповідно.

3. Розрахунком виявлено залежності зусиль видавлювання і зусиль видалення деформованих заготовок із контейнера, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті, розподіли ступеня використання ресурсу пластичності, температури, компонент напружень та деформацій у деформованому металі. Встановлено форми і розміри пуансонів після видавлювання. По розподілах інтенсивності деформацій проведено оцінку пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією.

4. На основі результатів моделювання спроектовано і виготовлено штамп для видавлювання та проведено експериментальні випробування з отриманням двох форм пуансонів. Порівняння даних моделювання і експериментів по зусиллях видавлювання показали хорошу збіжність.

5. Результати проведених досліджень по видавлюванню із саморегульованим протитиском можуть бути використані для виготовлення деформуючого інструменту із інших марок штампових і інструментальних сталей для процесів обробки металів тиском з метою підвищення стійкості і економії сталей.

Список використаних джерел.

1. Jeong H.G., Yoon D.J., Kim E.Z. et al. The influence by hydrostatic extrusion on the microstructure and extrudability of the IM processed hypereutectic Al-Si-X alloys. *J Mater Process Technol.* Vol. 130–131, 2002. Pp. 438–443. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00714-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00714-8).
2. Osakada K., Matsumoto R., Otsu M., Hanami S. Precision extrusion methods with double axis servo-press using counter pressure. *Manufacturing technology.* Vol. 54, Issue 1, 2005. Pp. 245–248. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60094-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60094-8).
3. Oruganti R.K., Subramanian P.R., Marte J.S. et al. Effect of friction, backpressure and strain rate sensitivity on material flow during equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering.* Vol. 406, 2005. Pp. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.031>.
4. Tiernan P., Hillery M.T., Draganescu B. et al. Modelling of cold extrusion with experimental verification. *J Mater Process Technol.* Vol. 168, Issue 2, 2005. Pp. 360–366. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.249>.
5. Lewandowska M. Mechanism of grain refinement in aluminium in the process of hydrostatic extrusion. *Solid State Phenom.* Vol. 114, 2006. Pp. 109–116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.114109>.

6. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Спусканюк В.З. Теория и практика гидроэкструзии. Киев: Наукова думка., 2007. 248 с.
7. Lee S., Yoon C.Y., Park H.J. et al. A study of hydrostatic extrusion as a consolidation process for fabricating ultrafine-grained bulk Al–Mg alloy. *J Mater Process Technol.* Vol. 191, 2007. Pp. 396–399. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.085>.
8. Matsumoto R., Kubo T., Osakada K. Improvement of forgeability of a commercial AZ31B magnesium alloy in cold backward extrusion with counter pressure. *Materials transactions.* Vol. 49, Issue 5, 2008. Pp. 1000–1005. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MC200710>.
9. Lewandowska M., Kurzydowski K.J. Recent development in grain refinement by hydrostatic extrusion. *J Mater Sci.* Vol. 43, 2008. Pp. 7299–7306. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2810-z>.
10. Hasani A., Lapovok R., Laszlo S. et al. Deformation field variations in equal channel angular extrusion due to back pressure. *Scripta Materialia.* Vol. 58, 2008. Pp. 771–774. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.12>.
11. Soyarslan C., Tekkaya A. E. Prevention of internal cracks in forward extrusion by means of counter pressure: A numerical treatise. *Steel research international.* Vol. 80, Issue 9, 2009. Pp. 671–679. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP170>.
12. Pachla W., Mazur A., Skiba J. et al. Effect of hydrostatic extrusion with back pressure on mechanical properties of grey and nodular cast irons. *Arch. Metal. Mater.* Vol. 56, Issue 4, 2011. Pp. 945–953. <https://doi.org/10.2478/v10172-011-0104-y>.
13. Kulczyk M., Skiba J., Przybysz S. et al. High strength silicon bronze (c65500) obtained by hydrostatic extrusion. *Arch. Metal. Mater.* Vol. 57, Issue 3, 2012. Pp. 859–862. <https://doi.org/10.2478/v10172-012-0094-4>.
14. Евдокимов А.К., Антохина К.А. Комбинированное выдавливание с противодавлением. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением.* № 12, 2012. С. 6–12.
15. Moreno-Valle E.C., Pachla W., Kulczyk M. et al. Anisotropy of uni-axial and bi-axial deformation behavior of pure Titanium after hydrostatic extrusion. *Mater Sci Eng A.* Vol. 588, 2013. Pp. 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.08.044>.
16. Topolski K., Pachla W., Garbacz H. Progress in hydrostatic extrusion of titanium. *J Mater Sci.* Vol. 48, 2013. Pp. 4543–4548. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7086-7>.
17. Калюжный В.Л., Пиманов В.В. Холодное выдавливание с дифференцированным противодавлением полостей штампов. *Известия МГТУ «МАМИ».* Серия 2. Технология машиностроения и материалы. № 2(16), 2013. С. 32–37.
18. Maj P., Adamczyk-Cieślak B., Mizera J. et al. Microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel subjected to hydrostatic extrusion. *Mater Charact.* Vol. 93, 2014. Pp. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.03.017>.
19. Skiba J., Pachla W., Mazur A. et al. Press for hydrostatic extrusion with back-pressure and the properties of thus extruded materials. *J Mater Process Technol.* Vol. 214, 2014. Pp. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.07.014>.
20. Okada M., Kitayama S., Kiichiro K. et al. Determination of back-pressure profile for forward extrusion using sequential approximate optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization.* Vol. 51, Issue 1, 2015. Pp. 225–237. <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1124-9>.
21. Volkov A.Yu., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Materials Science and Engineering.* Vol. 627, 2015. Pp. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.104>.
22. Manafi B., Shatermashhadi V., Abrinia K. et al. Development of a novel bulk plastic deformation method: hydrostatic backward extrusion. *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 82, 2016. Pp. 1823–1830. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7517-0>.
23. Parghazeh A., Haghighat H. Prediction of central bursting defects in rod extrusion process with upper bound analysis method. *Trans. Nonferrous Met. Soc.* Vol. 26, 2016. Pp. 2892–2899. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)644-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)644-7).
24. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S. Relationship between the structure and physical-mechanical properties of U8A steel subjected to cold plastic deformation by hydrostatic extrusion. *Russ J Nondestruct Test.* Vol. 53, 2017. Pp. 700–706. <https://doi.org/10.1134/S1061830917100059>.
25. Krawczynska A.T., Chrominski W., Ura-inczyk E. et al. Mechanical properties and corrosion resistance of ultrafine grained austenitic stainless steel processed by hydrostatic extrusion. *Materials & Design.* Vol. 136, 2017. Pp. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.050>.
26. Majchrowicz K., Pakielą Z., Chrominski W. et al. Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al–Mg–Si alloy processed by hydrostatic extrusion. *Mater Charact.* Vol. 135, 2018. Pp. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.023>.

27. Zdunek, J., Maj, P., Kulczyk, M. et al. Texture, residual stresses and mechanical properties analysis in the commercial 1.4462 duplex stainless steel subjected to hydrostatic extrusion. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* Vol. 19, 2019. Pp. 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.12.008>.
28. Samadpour F., Siah Sarani A., Faraji G., Bahrami M. Experimental and finite element analyses of the hydrostatic cyclic expansion extrusion (HCEE) process with back-pressure. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*. Vol. 52, No.1, 2019. Pp. 25–31. <https://doi.org/10.22059/JUFGNSM.2019.01.03>.
29. Milyutin V.A., Gervasyeva I.V., Volkova E.G. et al. Texture formation in FeGa alloy at cold hydrostatic extrusion and primary recrystallization. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 816, 2020. 153283. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153283>.
30. Lee J., Jeong H., Park S. Effect of extrusion ratios on hardness, microstructure, and crystal texture anisotropy in pure niobium tubes subjected to hydrostatic extrusion. *Trans Nonferrous Met Soc China*. Vol. 31, 2021. Pp.1689–1699. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65608-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65608-X).
31. Skorupska M., Kulczyk M., Przybysz S. et al. Mechanical Reinforcement of Polyamide 6 by Cold Hydrostatic Extrusion *Materials*. Vol. 14(20), 2021. 6045. <https://doi.org/10.3390/ma14206045>.
32. Eftekhari M., Faraji G., Bahrami M. et al. Hydrostatic tube cyclic extrusion compression as a novel severe plastic deformation method for fabricating long nanostructured tubes. *Met. Mater. Int.* Vol. 28, 2022. Pp.1725–1740. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01034-2>.
33. Wan N., He Q., Jing X. et al. Numerical and experimental investigation of the effect of cold extrusion process on residual stress and fatigue life of internal thread of high-strength steel. *Int J Adv Manuf Technol*. Vol. 127, 2023. Pp. 4713–4726. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11765-8>.
34. Gutman E.M., Unigovski Y.B., Chen T. et al. Application of the Chemomechanical Effect in Drawing Alloys with Low Plasticity. *J. of Mater Eng and Perform.* Vol. 32, 2023. Pp.10487–10502. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08373-8>.
35. Schulze A., Tekkaya A. E. Controlling damage evolution in geometrically identical cold forged parts by counterpressure. *J. Manuf. Sci. Eng.* Vol. 145(1), 2023. 011011. <https://doi.org/10.1115/1.4056266>.
36. Basem A., Alghassab M.A., Al-Asadi H.A. et al. Evaluation of microstructure and mechanical characteristics of 2024 aluminum alloys with μ -Al₂O₃ additives produced via hydrostatic cyclic expansion extrusion with back-pressure. *Results in Engineering*. Vol. 23, 2024. 102403. Pp.1–9. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102403>.
37. Francy K.A., Rao C.S. Multi Response Optimization of Cold Extrusion Parameters on AA 2024 Alloy Using TOPSIS. *J. Inst. Eng. India Ser.* Vol. 106, 2025. Pp 1061–1075. <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00700-0>.
38. Ezefili V., Batako A.D.L., Antosz K. et al. In book: *Advances in Lean Manufacturing*. Vol. 2, 2025. Pp.343–354. https://doi.org/10.1007/978-3-032-10111-2_28.
39. Gitschel R., Gebhard J., Korkolis Y.P., A. et al. Isolating the effects of deviatoric and hydrostatic stress on damage evolution using cold extrusion experiments. *Int. J. Solids Struct.* Vol. 310, 2025. 113205. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.113205>.
40. Gitschel R., Tekkaya A. E., Korkolis Y.P. Calibrating a Lode-parameter-dependent damage evolution equation to cold extrusion experiments. *Key Engineering Materials*. Vol.1048, 2026. Pp. 63–71. <https://doi.org/10.4028/p-Hm69aW>.

Рецензент: Луговський Олександр Федорович професор, д.т.н., професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дата надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026