

О. В. Калюжний¹, В. Л. Калюжний², С. В. Ситник²

¹Кременчуцький національний технічний університет імені Михайла Остроградського

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ТЕРТЯ ПРИ ГАРЯЧОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ ПОРОЖНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ІЗ ЗАГОТОВОК КРУГЛОГО І КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ

Методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM-3D створені математичні моделі та проведено розрахунковий аналіз процесів гарячого зворотного видавлювання порожнистих напівфабрикатів з низьковуглецевої сталі із заготовок циліндричного і квадратного перерізів. Досліджено вплив коефіцієнтів тертя величиною $\mu=0,15; 0,25$ і $0,35$ при видавлюванні зі швидкостями деформування $V=20, 40, 60$ і 80 мм/сек. Встановлено залежності зусиль видавлювання напівфабрикатів від переміщення деформуючого інструменту. Зусилля видавлювання із заготовок круглого перерізу менше від зусилля видавлювання із заготовок квадратного перерізу. Проведено аналіз розподілу питомих зусиль на деформуючому інструменті по нормальних напруженнях на контактуючих поверхнях. Визначено форми і розміри напівфабрикатів з розподілами температури, напружень і деформацій у zdeформованому металі в кінці видавлювання. Виявлено охолодження шарів металу напівфабрикатів біля поверхонь з деформуючим інструментом. Пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією оцінено по розподілах інтенсивності деформацій в об'ємах отриманих напівфабрикатів. Використання заготовок квадратного перерізу при видавлюванні приводить до збільшення пропрацювання структури металу по висоті стінок і у донних частинах напівфабрикатів.

Ключові слова: гаряче видавлювання; порожнистий напівфабрикат; метод скінченних елементів; заготовки круглого і квадратного перерізу, зусилля видавлювання; розподіли напружень і деформацій; форма і розміри напівфабрикатів.

O. Kaliuzhnyi, V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk

FRICION EFFECT DURING HOT REVERSE EXTRUSION OF HOLLOW SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM ROUND AND SQUARE BLANKS

Mathematical models have been created by the finite element method using the DEFORM-3D program and a computational analysis of the processes of hot reverse extrusion of hollow semi-finished products made of low-carbon steel from cylindrical and square blanks has been carried out. The effect of friction coefficients of $\mu=0.15, 0.25,$ and 0.35 during extrusion at deformation rates of $V=20, 40, 60,$ and 80 mm/sec was analyzed. The dependence of the extrusion forces of semi-finished products on the displacement of the deforming tool was determined. The extrusion force from the round cross-sectional workpieces is less than the extrusion force from the square cross-sectional workpieces. An analysis of the distribution of specific forces on the deforming tool in terms of normal stresses on the contacting surfaces was performed. The shapes and sizes of semi-finished products with distributions of temperature, stresses, and strains in the deformed metal at the end of extrusion were determined. The cooling of metal layers of semi-finished products near the surfaces with a deforming tool was revealed. The development of the metal structure by hot plastic deformation was evaluated by the distributions of strain intensity in the volumes of the semi-finished products. The use of square-section billets during extrusion leads to an increase in the development of the metal structure along the height of the walls and bottom parts of semi-finished products.

Keywords: hot extrusion; hollow semi-finished product; finite element method; round and square blanks, extrusion forces; stress and strain distributions; shape and dimensions of semi-finished products.

Постановка проблеми. Для виготовлення порожнистих виробів великих розмірів із різноманітних марок сталей і кольорових металів використовують процеси гарячого зворотного видавлювання. Рекомендації по проектуванню технологій та штампового оснащення достатньо добре описано в джерелі [1]. При виробництві виробів спеціального призначення певного калібру гаряче зворотне видавлювання порожнистих напівфабрикатів є першим переходом штампування, при якому відбувається пропрацювання структури металу пластичною деформацією донної частини напівфабрикатів для досягнення відповідних механічних властивостей у zdeформованому металі. Пропрацювання структури металу стінки відбувається на подальших переходах витягування з потоншенням та кінцевій операції обтиску.

Традиційно для видавлювання порожнистих напівфабрикатів використовують заготовки круглого перерізу, які встановлюють з центруванням по матриці. При видавлюванні осередок деформації охоплює всю донну частину заготовок, але пропрацювання структури металу пластичною деформацією може бути недостатнє для досягнення заданих механічних властивостей у цьому місці. Для збільшення такого пропрацювання застосовують заготовки квадратного перерізу, отримання яких із гарячекатаного прокату приводить до зменшення витрат металу.

Відомо, що на силові режими процесів гарячого пластичного формоутворення і формозміну металу суттєвий вплив має тертя на контактуючих поверхнях між металом і деформуючим інструментом. Тому актуальними є дослідження, які спрямовані на вивчення впливу тертя при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих напівфабрикатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В монографії [1] викладено рекомендації із виробничого досвіду по проектуванню технології і штампового оснащення для гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із заготовок круглого перерізу з різних марок сталей.

Використання методу скінченних елементів (МСЕ) для удосконалення існуючих і розробки нових технологій по гарячому пластичному формоутворенню різноманітних виробів із кольорових металів наведено в роботі [2].

В джерелі [3] шляхом моделювання МСЕ встановлені параметри гарячого штампування порожнистого виробу із високоміцного алюмінієвого сплаву В95 з інтенсивним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією у донній частині і стінці виробу. Проведені експериментальні дослідження підтвердили результати розрахунків.

В роботі [4] авторами виконано чисельне моделювання отримання порожнистої деталі з матеріалу In718 за допомогою способу гарячого зворотного видавлювання. В різних частинах отриманої деталі досліджено структуру зерна. Встановлено, що більш дрібну та рівномірну структуру зерна вдалося отримати із заготовки, яка перед початком зворотного видавлювання була розігріта до температури 1000 – 1050°C, а швидкість деформування складала 5 мм/с.

З використанням МСЕ та програми Forge, досліджено процес радіально-зворотного видавлювання роторною головкою. Також проведено натурний експеримент цього процесу за допомогою торсійного пластоміру STD 810 [5]. В результаті дослідження авторами встановлено, що при застосуванні вказаного способу виникають напруження зсуву в у здеформованому металі виробу, які впливають на активацію додаткових механізмів деформації та на механічні властивості у кінцевому виробі.

Розглянуто та досліджено нову схему процесу зворотного видавлювання порожнистого виробу [6]. Новизна схеми полягає в тому, що між пуансоном та матрицею розміщено нерухому втулку з отвором, в якому встановлюється заготовка. Пуансон починає деформувати заготовку в отворі втулки, внаслідок чого метал тече між втулкою та матрицею доки виріб не набуде необхідної геометричної форми. Дослідження виконано за допомогою МСЕ та проведено натурні експерименти на заготовках з алюмінію. Автори вказують на те, що при застосуванні такої схеми зворотного видавлювання порожнистого виробу ступінь деформації збільшується, структура металу покращується за рахунок зменшення дефектів при формоутворенні.

Процес зворотного видавлювання обміднених алюмінієвих стержнів описано в джерелі [7]. Проведено чисельні розрахунки за допомогою МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Для врахування властивостей матеріалу в програмі DEFORM, було попередньо випробувано на гаряче стискання алюмінієвого сплаву EN AW-1080A та мідного сплаву CW004A та отримано діаграми істинних напружень та заведено в програму. Встановлено, що швидкість течії сердечника з алюмінієвого сплаву EN AW-1080A вища ніж у втулці з мідного сплаву CW004A. Це призвело до виникнення високих значень розтягуючих напружень та руйнування виробу. Результати чисельних розрахунків МСЕ порівняно з натурним експериментом, за допомогою чого було остаточно встановлено необхідну технологію зворотного видавлювання.

З використанням МСЕ, виконано чисельні розрахунки процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого виробу із титанового сплаву марки Ti-6Al-4V [8]. Також проведено натурний експеримент такого процесу. Результати чисельних розрахунків порівняно з даними натурального експерименту, який показав що гаряче видавлювання титанового сплаву тісно пов'язано з фазовими перетвореннями і впливає на ріст зерен. Отримано достатньо точну збіжність результатів розрахунків з даними експерименту.

Досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу в роботі [9]. Авторами проведено чисельне моделювання з використанням МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Вихідним матеріалом для заготовки обрано алюмінієвий сплав. Заготовка циліндричної форми розміщувалась у матриці, а деформування її відбувалось за допомогою пуансону, який при поступальному русі також обертася. Завдяки такому обертанню автори стверджують, що заготовка розігрівається та в зоні деформування характер процесу змінюється з холодного на гаряче видавлювання. Вказано, що отриманий виріб має підвищену

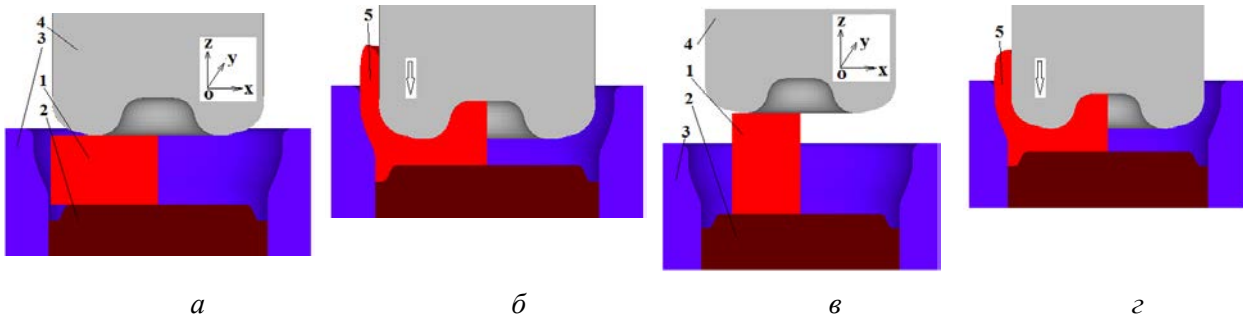


Рис. 2. Розрахункові схеми на початку і в кінці видавлювання: *a* і *б* – заготовки круглого перерізу; *v* і *z* – заготовки квадратного перерізу

Форму і зовнішні розміри половин напівфабрикатів в розрізі після видавлювання заготовок різної форми представлено на рис. 3. Після видавлювання заготовки круглого перерізу отримано напівфабрикат з рівною висотою стінки по периметру торцю (рис. 3а). Торець стінки має утяжини зі сторони порожнини та зі сторони зовнішньої поверхні. Після видавлювання заготовки квадратного перерізу торець стінки напівфабрикату має чотири виступи в місцях, які відповідають кутовим зонам заготовки (рис. 3б), а також має утяжину зі сторони зовнішньої поверхні напівфабрикату. При цьому в обох випадках заповнення металом порожнин на пуансонах і плитах здійснюється на проміжних стадіях видавлювання. Наявність виступів на торці стінки напівфабрикату приводить до витрат металу і необхідності операції підрізки торцю перед виконанням подальшого переходу витягування з потоншенням для зменшення товщини і збільшення висоти стінки. Усунення виступів можна забезпечити шляхом формуванням чотирьох фасок в кутових зонах заготовки гарячим осаджуванням.

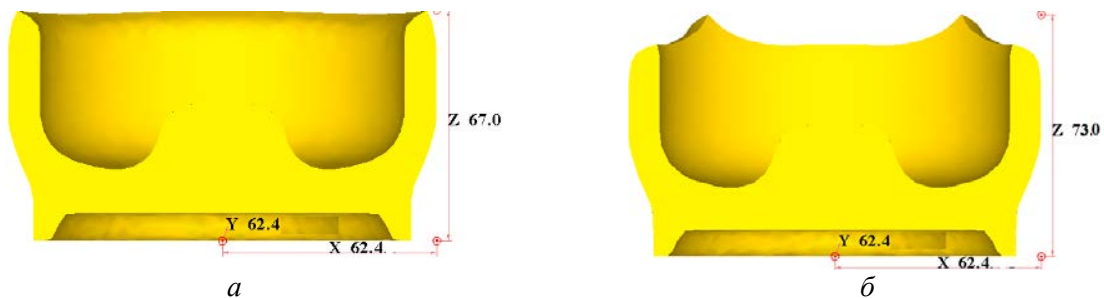


Рис. 3. Форма і зовнішні розміри половин напівфабрикатів в розрізі після видавлювання: *a* - заготовки круглого перерізу, *б* - заготовки квадратного перерізу

Моделюванням встановлено силові режими видавлювання. Для видавлювання з коефіцієнтом тертя $\mu=0,35$ і різними швидкостями деформування заготовок круглого і квадратного перерізів на рис. 4 показано залежності зусиль, які виникають на пуансонах, плитах і матрицях, від переміщення пуансонів. Максимальні значення зусиль на пуансонах і плитах отримано в кінці видавлювання, а на матрицях – на проміжних стадіях видавлювання. Зусилля при формоутворенні напівфабрикатів із круглих заготовок менші від зусиль видавлювання із заготовок квадратного перерізу. Причиною зростання зусилля видавлювання напівфабрикатів із заготовок квадратного перерізу є додаткове деформування такої заготовки між пуансоном і плитою при досягненні зазору між матрицею і пуансоном для формоутворення стінки. Збільшення швидкості деформування приводить до зниження зусиль видавлювання, що пов'язано із скороченням часу на видавлювання та зменшенням охолодження zdeформованого металу. З наведених графіків можна визначити роботу деформації для реалізації видавлювання на кривошипному пресовому обладнанні.

На рис. 5 показано залежності максимальних значень зусиль на пуансонах, плитах і матрицях при видавлюванні з різними коефіцієнтами тертя і швидкостями деформування напівфабрикатів із заготовок круглого перерізу, а на рис. 6 аналогічні дані приведено для видавлювання заготовок квадратного перерізу. При видавлюванні заготовок круглого перерізу зусилля видавлювання на пуансоні менші на 5% в порівнянні із зусиллям видавлювання заготовок квадратного перерізу. Зменшення коефіцієнту тертя з $\mu=0,35$ до $\mu=0,25$ приводить до зниження зусиль видавлювання на 4%, а до $\mu=0,15$ – на 18%.

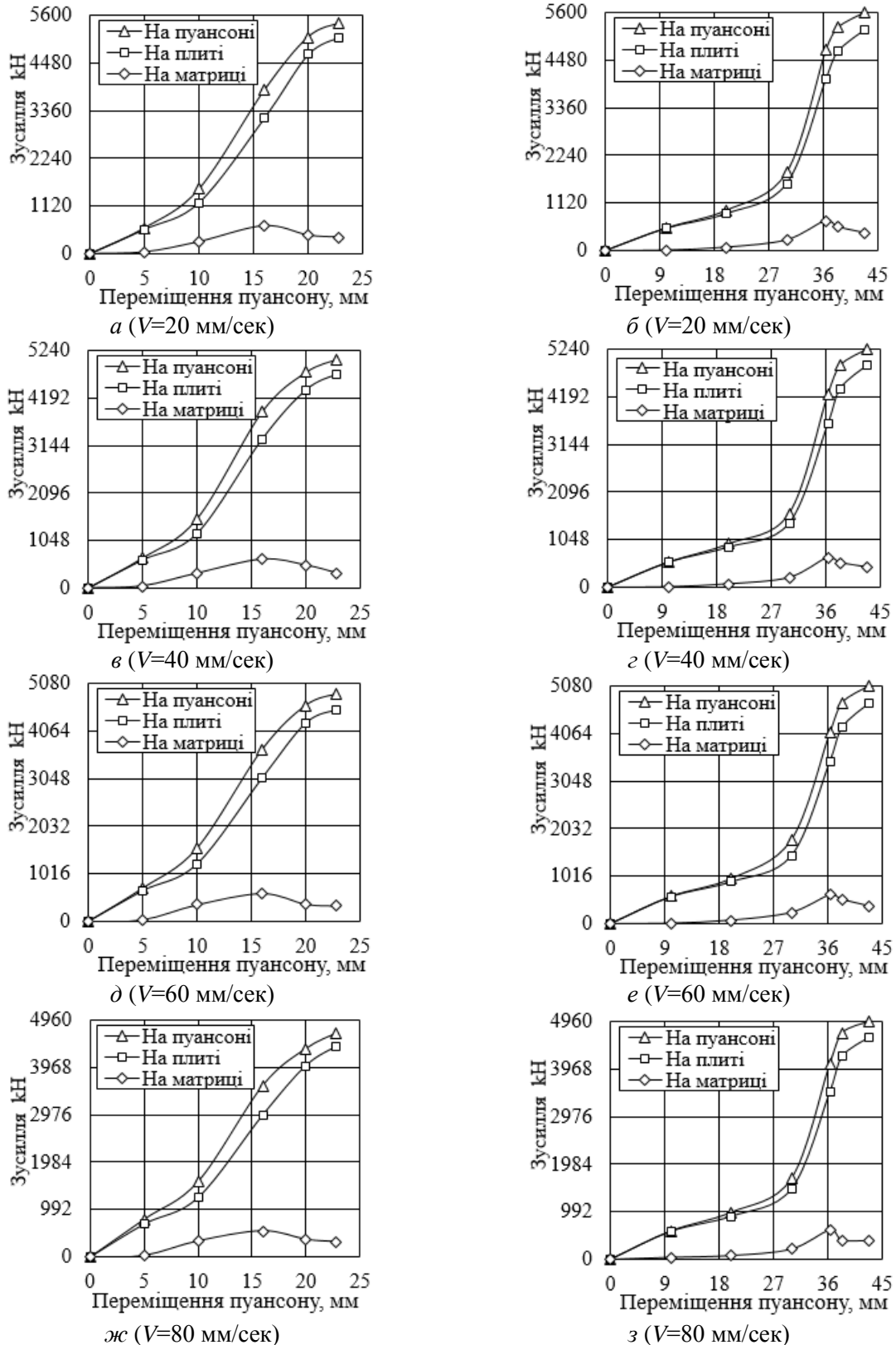


Рис. 4. Залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів при видавлюванні з коефіцієнтом тертя $\mu=0,35$: а, в, д, ж –заготовки круглого перерізу; б, г, е, з –заготовки квадратного перерізу

На рис. 7 показано розподіли температури у здеформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання з коефіцієнтом тертя $\mu=0,35$ заготовок круглого і квадратного перерізу. Встановлено,

що розглянуті швидкості деформування забезпечують витримку температурного інтервалу гарячого видавлювання в обох варіантах формоутворення напівфабрикатів.

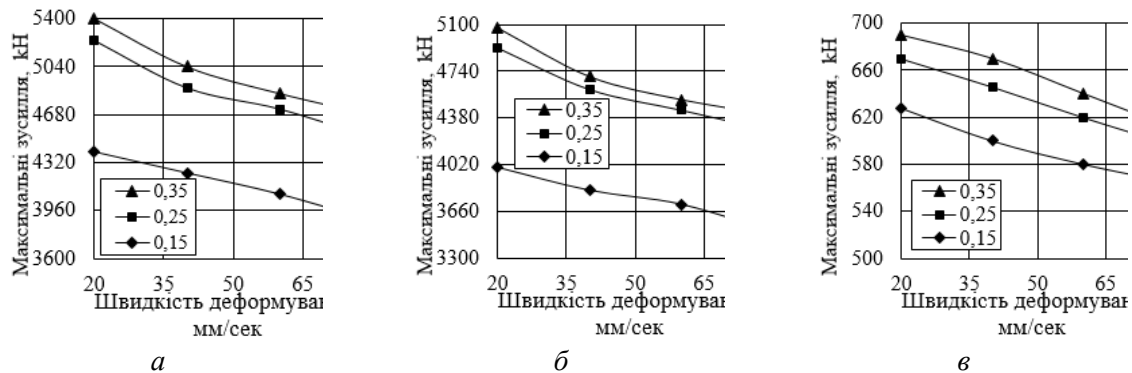


Рис. 5. Вплив коефіцієнту тертя на максимальні значення зусиль при видавлюванні напівфабрикатів з різними швидкостями деформування із циліндричної заготовки: а – зусилля на пуансоні, б – зусилля на плиті, в – зусилля на матриці

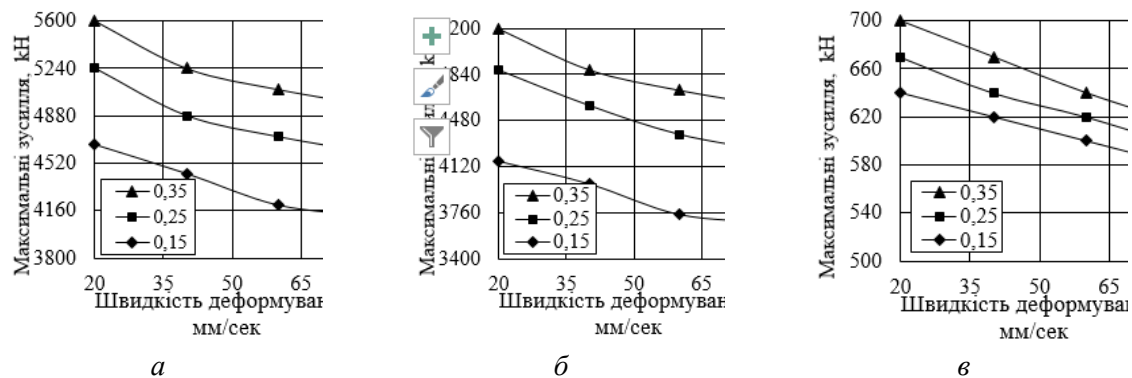


Рис. 6. Вплив коефіцієнту тертя на максимальні значення зусиль при видавлюванні напівфабрикатів з різними швидкостями деформування із квадратної заготовки: а – зусилля на пуансоні, б – зусилля на плиті, в – зусилля на матриці

Спостерігається охолодження zdeформованого металу у шарах металу в зонах біля контактуючих поверхонь з деформуючим інструментом. При цьому охолодження більше при отриманні напівфабрикатів із заготовок квадратного перерізу, для яких зростає час формоутворення напівфабрикатів. Зі збільшенням швидкості деформування температура охолодження zdeформованого металу зменшується. При видавлюванні заготовки круглого перерізу з $V=20$ мм/сек температура zdeформованого металу у в шарах металу в зонах торцю і бокової поверхні пуансону знижується до $T=775^{\circ}\text{C}$, а по середині стінки і донної частини отримано температуру у межах $T=875\div 925^{\circ}\text{C}$ (рис. 7а). Для видавлювання заготовки квадратного перерізу в зонах біля контактуючих поверхонь отримано $T=730^{\circ}\text{C}$ (рис. 7б). В таких зонах метал деформується в умовах напівгарячої деформації. По середині стінки і донної частини температура металу знаходиться у межах $T=860\div 920^{\circ}\text{C}$. У першому варіанті видавлювання переміщення пуансону було 23 мм, а у другому – 43 мм (див. рис. 4а і 4б). В зонах біля контактуючих поверхонь метал деформується в умовах напівгарячої деформації. Зростання швидкості деформування до $V=80$ мм/сек привело до наступних результатів. Для двох варіантів видавлювання температура zdeформованого металу в зонах біля контактуючих поверхонь знижується до $T=850\div 855^{\circ}\text{C}$, а по середині стінок і донних частин - до $T=960\div 990^{\circ}\text{C}$ (рис. 7ж і 7з).

Моделювання встановлено розподіли компонент напружень при максимальних величинах зусиль видавлювання. Коефіцієнт тертя і швидкість деформування практично не впливають на вигляди розподілів напружень по об'єму напівфабрикатів, але такі фактори є визначальними для величин напружень. Для проектування штампового оснащення потрібно знати розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті, які можна оцінити із розподілів напружень σ_z по їх максимальних значеннях. Розподіли напружень σ_z в кінці видавлювання напівфабрикатів з

коефіцієнтом тертя $\mu=0,35$ із заготовок круглого і квадратного перерізів, при якому мають місце найбільші зусилля видавлювання, показано на рис. 8.

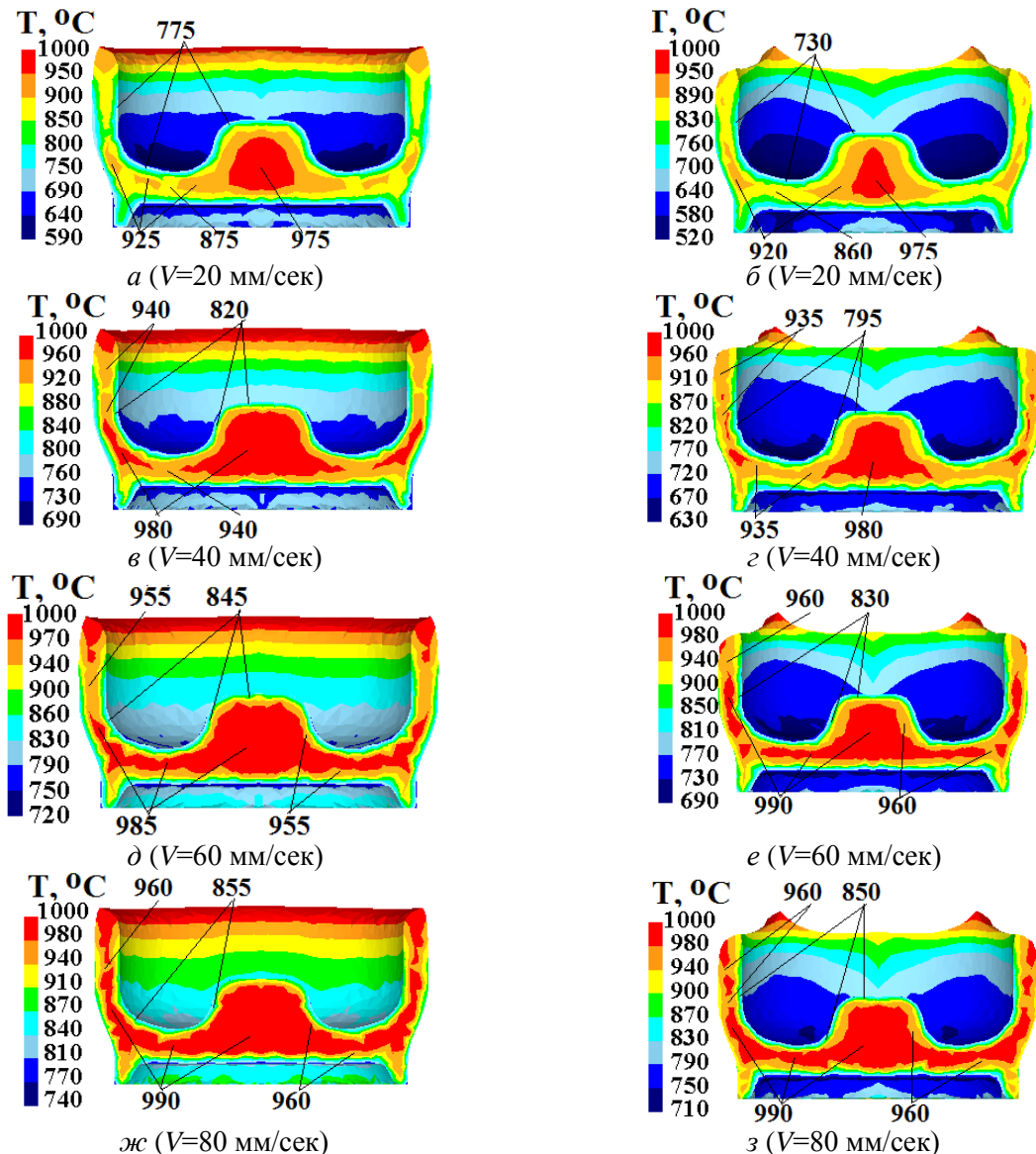


Рис. 7. Розподіли температури в кінці видавлювання напівфабрикатів з коефіцієнтом тертя $\mu=0,35$: а, в, д і ж – із заготовки круглого перерізу, б, г, е і з – із заготовки квадратного перерізу

Як відмічено вище, вигляди розподілів не відрізняються для двох варіантів видавлювання. В донних частинах напівфабрикатів виникають стискаючі напруження σ_z . Зі зростанням швидкості деформування V значення напружень σ_z зменшуються по абсолютній величині. У напівфабрикаті, який отримано із заготовки круглого перерізу з $V=20$ мм/сек, у донній частині такі напруження знаходяться у межах $\sigma_z=-265\div-890$ МПа (рис. 8а), а із заготовки квадратного перерізу – у межах $\sigma_z=-265\div-890$ МПа (рис. 8б). При цьому найбільші питомі зусилля на пуансоні складають 765 МПа, на плиті – 890 МПа для першого варіанту видавлювання. Та і відповідно 785 МПа і 920 МПа для другого варіанту видавлювання. Збільшення швидкості деформування до $V=80$ мм/сек приводить до зменшення питомих зусиль. У донній частині напівфабрикату із заготовки круглого перерізу напруження σ_z знаходяться у межах $\sigma_z=-190\div-780$ МПа (рис. 8ж). Питомі зусилля складають на пуансоні 665 МПа, на плиті – 780 МПа. У донній частині напівфабрикату із заготовки квадратного перерізу отримано $\sigma_z=-210\div-830$ з питомими зусиллями на пуансоні 705 МПа і на плиті 830 МПа (рис. 8з).

Коефіцієнт тертя μ і швидкість деформування V не суттєво впливають на деформований стан напівфабрикатів.

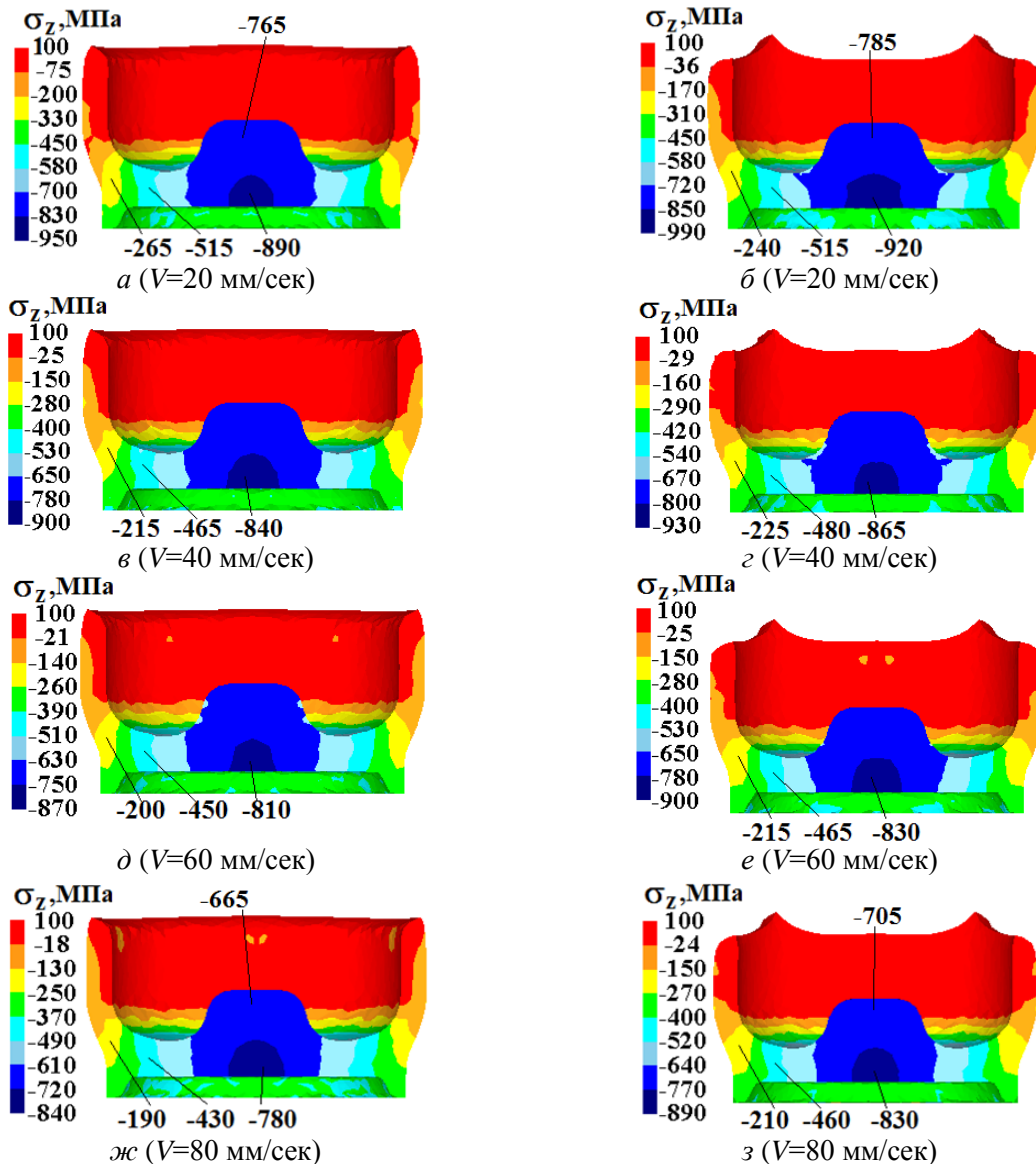


Рис. 8. Розподіли напруження σ_z в кінці видавлювання напівфабрикатів з коефіцієнтом тертя $=0,35$: а, в, д і ж – із заготовки круглого перерізу, б, г, е і з – із заготовки квадратного перерізу

На рис. 9 зображено розподіли деформацій ε_z у здеформованому металі напівфабрикатів після видавлювання із $\mu=0,15$ і $\mu=0,35$ та $V=40$ мм/сек. У напівфабрикатах із заготовок круглого перерізу вигляди розподілів та величини деформацій ε_z практично однакові за виключенням розмірів зони з $\varepsilon_z=1,04$ у зовнішніх шарах металу стінки (рис. 9а і 9б). У донних частинах напівфабрикатів виникають стискаючі деформації у межах $\varepsilon_z=-0,22\div-1,0$. Зовсім інші значення стискаючих деформацій ε_z отримано у здеформованому металі донних частин напівфабрикатів із заготовок квадратних перерізів (рис. 9д і 9е). Змінюються і вигляди розподілів. У вказаних частинах деформації ε_z знаходяться у межах $\varepsilon_z=-0,38\div-1,5$.

Аналіз пропрацювання структури металу пластичною деформацією проведено по розподілах інтенсивності деформацій ε_i у напівфабрикатах після видавлювання із $\mu=0,15$ і $\mu=0,35$ та $V=40$ мм/сек. Розглянуті величини коефіцієнтів тертя і швидкостей деформування також практично не впливають на вигляди розподілів і величини інтенсивності деформацій при видавлюванні напівфабрикатів із заготовок круглого і квадратного перерізів. Але видавлювання із заготовок квадратного перерізу приводить до суттєво більшого пропрацювання металу стінок і донних частин напівфабрикатів. Якщо після видавлювання заготовок круглого перерізу у стінках і донних частинах отримано інтенсивності деформацій відповідно у межах $\varepsilon_i=0,4\div1,04$ і $\varepsilon_i=0,83\div1,8$ (рис. 10а і 10б), то

після видавлювання заготовок квадратного перерізу у стінці ці деформації досягають значень у межах $\varepsilon_t=0,81\div 2,1$, а у донних частинах - $\varepsilon_t=1,2\div 1,8$ (рис. 10в і 10г).

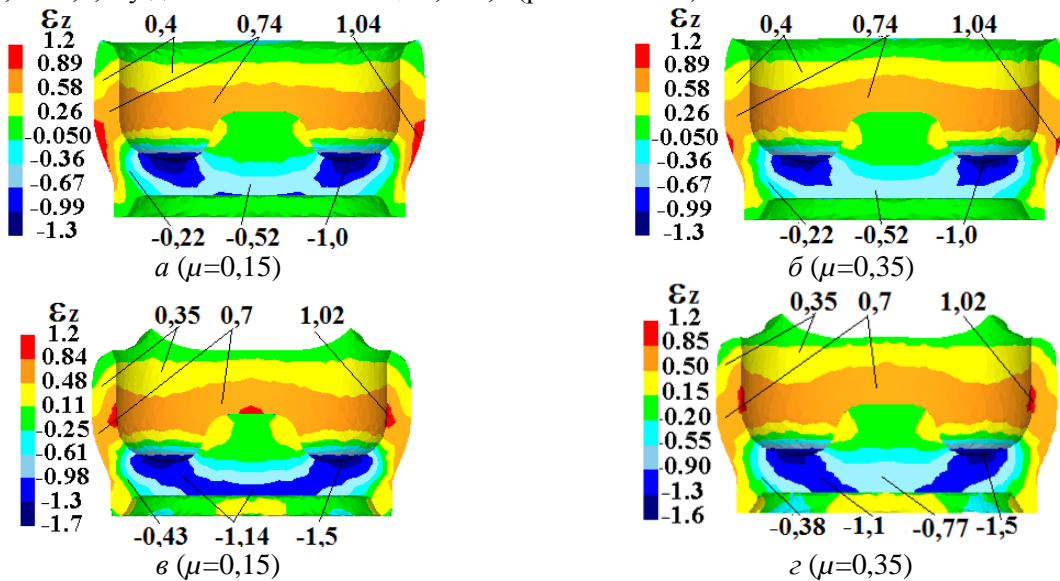


Рис. 9. Розподіли деформацій ε_z у напівфабрикатах після видавлювання з $V=40$ мм/сек та з $\mu=0,15$ і $\mu=0,35$: а і б – заготовок круглого перерізу; в і г – заготовок квадратного перерізу

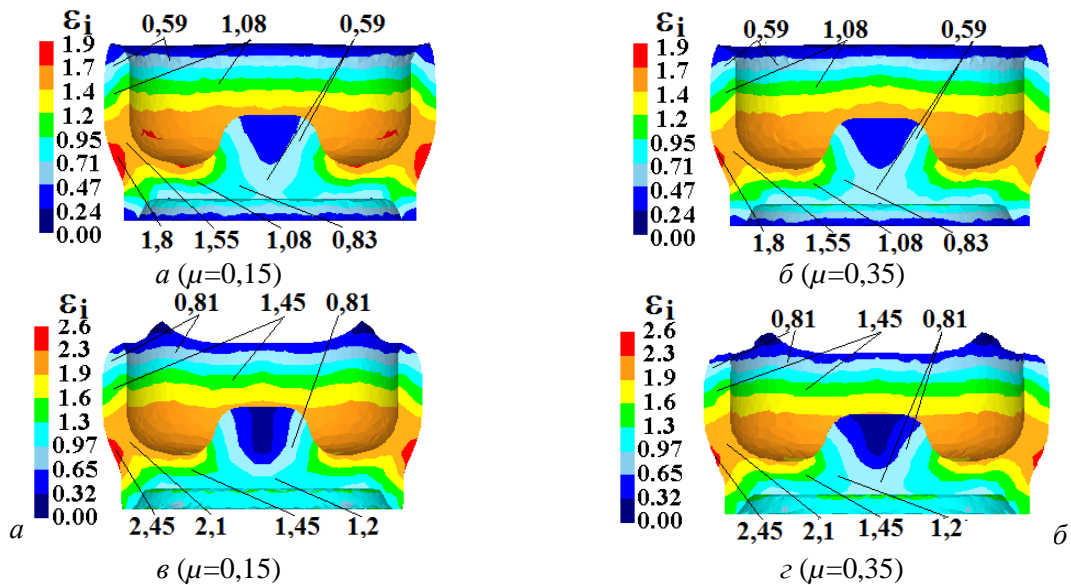


Рис. 10. Розподіли інтенсивності деформацій ε_i у напівфабрикатах після видавлювання з $V=40$ мм/сек та з $\mu=0,15$ і $\mu=0,35$: а і б – заготовок круглого перерізу; в і г – заготовок квадратного перерізу

На основі результатів моделювання спроектовано штампове оснащення для гарячого видавлювання. Загальний вигляд штампу представлено на рис. 11. Штмп складається із нижньої плити 1, до якої прикріплено матрицетримач 2 за допомогою восьми гвинтів 20. В матрицетримачі 2 розміщено опорну плиту 3 із штовхачем 4. На матрицетримачі 2 з центруванням встановлено матрицю 5 з виштовхувачем 6, на який спираються кільце 7 і пружина 18. Пружина 18 попередньо стиснута за допомогою направляючого конусного кільця 8 і циліндричного кільця 9 та восьми гвинтів 19. Конусна поверхня кільця 8 обробляється у зборі спільно з отвором матриці 5. До верхньої плити 10 штампу прикріплено пуансонотримач 11 за допомогою восьми гвинтів 23. У пуансонотримачі 11 розміщено підп'ятник 12 і п'яту 13, на які спирається пуансон 14 та фіксується конусним кільцем 15 і гайкою 16. Також у пуансонотримачі 11 встановлено з посадкою по пуансону 14 знімач 17, який утримується чотирма рухомими гвинтами 22 і спирається на чотири пружини 21. Знімач 17, крім знімання напівфабрикату з пуансону, призначений для направлення пуансону 14

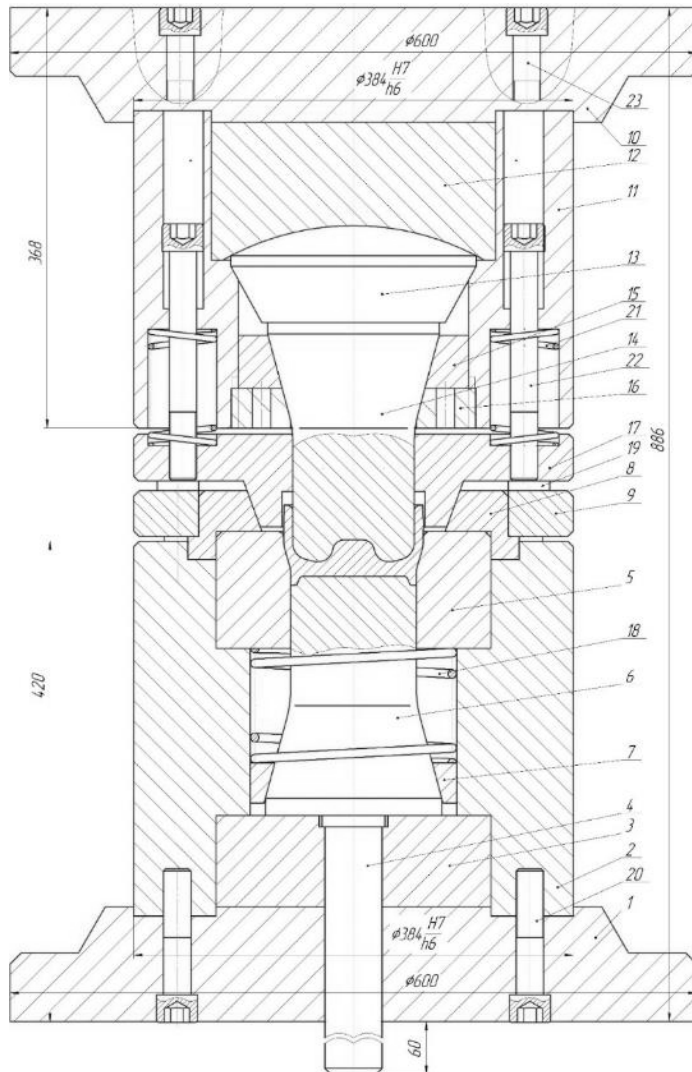


Рис. 11. Конструкція штампу для гарячого зворотного видавлювання

здійснюється виштовхувачем 6 і штовхачем 4, які приводяться в рух від виштовхувача пресу. При цьому стискається пружина 18 і повертає виштовхувач 6 і штовхач 4 в вихідне положення при опусканні виштовхувача пресу.

Висновки.

1. За допомогою МСЕ створені моделі та проведено розрахунковий аналіз процесів гарячого зворотного видавлювання порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглого і квадратного перерізу з маловуглецевої сталі під подальше витягування з потоншенням. Досліджено вплив коефіцієнтів тертя $\mu=0,15; 0,25$ і $0,35$ та швидкостей деформування $V=20, 40, 60$ і 80 мм/сек на силові режими видавлювання, напружено-деформований стан напівфабрикатів.

2. Встановлено залежності зусиль видавлювання на деформуючому інструменті від переміщення пуансонів. Виявлено величини зниження зусилля видавлювання при зменшенні коефіцієнту тертя та при збільшенні швидкості деформування.

3. У донних частинах і стінках порожнистих напівфабрикатів визначено вплив тертя і швидкості деформування на розподіли напружень і деформацій. Встановлено, що використання заготовки квадратного перерізу забезпечує більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по об'єму напівфабрикатів.

4. Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно проводити по визначенню форми і розмірів вихідних заготовок квадратного перерізу для усунення виступів при видавлюванні порожнистих напівфабрикатів.

відносно матриці 5 при видавлюванні.

Нижня плита 1 має чотири пази для кріплення на столі модернізованого гідравлічного пресу ДБ 2438 зусиллям 6,3 МН, який має швидкість робочого ходу повзуна не менше 20 мм/сек. Такі пази для кріплення на повзуні пресу має верхня плита 10 штампу.

У вихідному положенні віддаль між торцем пуансону 14 і кільцем 9 повинна бути дещо більшою за висоту напівфабрикату. В матрицю 5 встановлюють нагріту заготовку. При опусканні повзуна пресу з верхньою плитою 10 штампу перед початком видавлювання знімач 17 попадає в конусне кільце 8 і пуансон 14 направляється відносно матриці 5. При видавлюванні відбувається стискання пружин 21. Після видавлювання повзун пресу з верхньою плитою піднімається в вихідне положення. Якщо напівфабрикат залишиться на пуансоні, то знімання його відбувається за рахунок дії стиснутих пружин 21 і знімача 17. Коли напівфабрикат залишається в матриці 5, то видалення його

Список використаних джерел.

1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х. т. Москва: Машиностроение. 1986. Т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е.И. Семенова. 1986. 592 с.
2. Данченко В.Н., Миленин А.А., Кузьменко В.И. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии. 2008. 448 с.
3. Калюжный В.Л., Алиева Л.И., Алиев И.С., Горностаев В.Н. Горячая объемная штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданными механическими свойствами. Заготовительное производство. Москва. 2018. №12. С. 18-25.
4. Hu X., Mei R.B., Zhu F., Fan Y., Liang Y.B., Wang X.B., Wang D.G., Jing Z.R. Numerical Simulation for Microstructure Evolution in In718 Alloy During Cylindrical Cup Backward Extrusion Northeastern University at Qinhuangdao Branch, Northeastern University, Qinhuangdao 066004, China. ISSN: 1662-8985, Vol. 650. Pp. 92-97.
5. Zota S., Mróz S., Stefanik A., Laber K., Mola R., Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy / *Metabk 60* (2021) 1-2. Pp. 36-38, ISSN 0543-5846.
6. Hosseini S.H., Abrinia K., Faraji G. Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminium. *Materials and Design*. 2014. Vol. 65. Pp. 521-528. DOI: 10.1016/j.matdes
7. Kuhnke S., Sanabria V., Gensch F., Nitschke R., Mueller S, Numerical Investigations on Material Flow During Indirect Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rods / *Front. Mater.* June 2020, Volume 7, Article 157. Pp. 1-10, doi: 10.3389/fmats.2020.00157.
8. Jong-Taek Yeom, Jeoung Han Kim, Jae-Keun Hong, Nho-Kwang Park, Chong Soo Lee, Prediction of Microstructure Evolution in Hot Backward Extrusion of Ti-6Al-4V Alloy / Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Metallurgy*, Volume 2012, Article ID 989834. Pp. 1-6, doi:10.1155/2012/989834.
9. Roham Broomand, Alireza Babaei, Hadi Mazloom Bashiri, Mohammad Hasan Zaheri. Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion, *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering*, Volume 19, Issue 1 – Serial, Number 57, July 2022. Pp. 225-242, doi:10.48301/KSSA.2021.287462.1550.
10. Duk Jae Yoon, Eung-Zu Kim, Kyoung Hoan Na, Yong-Shin Lee, A study on the forming characteristics of AZ 31B Mg Alloy in a combined Forward-backward extrusion at warm temperatures / *MDPI*, Received: 15 October 2018; Accepted: 2 November 2018; Published: 8 November 2018. Pp. 1-10, doi:10.3390/app8112187.
11. Калюжный О.В., Калюжный В.Л., Ситник С.В., Шульга К.М., М.В. Готра. Збільшення пропрацювання пластичною деформацією стінок і донної частини порожнистого напівфабрикату при гарячому зворотному видавлюванні. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцьк: НТУ. Вип. 76, 2024. С. 72-80. DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.11*

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