

## РАЗДЕЛ I МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 004.942, 001.57, 621.7

Тарасов О. Ф.  
Коваленко А. К.  
Алтухов О. В.  
Лебідь В. Т.

### СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОЕТАПНОГО ФОРМУВАННЯ РЕБЕР НА ОСНОВІ РОЗРОБКИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ УЗАГАЛЬНЕНОГО ІНСТРУМЕНТА

Деформування заготовок з металопрокату є однією з основних заготівельних операцій в технології виробництва поковок з радіальними ребрами або для отримання заготовок з необхідною епюрою площин поперечних перетинів [1]. Забезпечення необхідної міцності деталей вимагає застосування спеціальних методів обробки, в тому числі можливо і застосування інтенсивної пластичної деформації (ІПД) для попередньої підготовки мікроструктури заготовок, оскільки традиційні методи обробки металів не завжди гарантують отримання потрібного комплексу властивостей. Застосування технологічних схем ІПД дозволяє виконати попередню обробку заготовки і знизити кількість переходів і трудомісткість наступного штампування поковок в порівнянні зі звичайними методами.

Дослідження показали, що методи ІПД забезпечують досягнення високих ступенів деформації і є ефективними для отримання дрібнозернистих мікроструктур в металах і сплавах. До базових методів ІПД відносяться: рівноканальне кутове пресування, всебічне кування, кручення під високим тиском, тощо [1–3]. Серед перерахованих методів ІПД всебічне кування є найбільш простим способом обробки матеріалу, тому що він передбачає використання універсального обладнання та інструменту, а також дає можливість відносно необмеженого масштабування оброблюваних заготовок [2–3]. Процеси ІПД базуються на реалізації схеми простого зсуву, яку можна створити при формуванні радіальних ребер і таким чином інтенсифікувати зсувні деформації для покращення структури металу в ребрах.

Для вирішення задач визначення напружено-деформованого стану (НДС) твердого тіла використовують як аналітичні, так і чисельні методи вирішення задач теорії пластичності [4–6]. На сьогодні найбільш універсальним методом дослідження НДС заготовок при деформуванні є метод скінченних елементів (МСЕ), за допомогою якого вирішують задачі обробки металів тиском [1]. При моделюванні МСЕ дозволяє врахувати схему деформування, особливості заготовок за формою, характеристики матеріалу при заданій температурі деформування і контактні умови на поверхні інструменту. При реалізації схем ІПД зазвичай моделюється плоска течія металу. В процесі формування радіальних ребер ця схема реалізується частково, тому потребує дослідження для визначення технологічних параметрів процесу. МСЕ при цьому дозволяє виявити розподіл деформацій та розтягуючі напруження на гранях заготовки, провести аналіз цих параметрів для визначення причини неоднорідності характеристик в виготовлених заготовках, а також виявити умови та значення факторів, які призводять до утворення дефектів заготовки.

Необхідні параметри процесу обробки тиском забезпечує штампове оснащення, яке проектується в кожному конкретному випадку. Інструмент має геометричну структуру, елементи якої забезпечують управління течією металу і створенням необхідного напружено-деформованого стану заготовки в процесі деформування. При виконанні процесу за кілька переходів проміжні форми інструменту можуть бути різними і містити різні структурні елементи. При цьому, інструмент забезпечує задану форму геометрії поковки на останньому етапі деформування, тому форми інструменту на послідовних етапах мають параметричний зв'язок.

На кожному етапі деформування в залежності від цілей інструмент має різні конструктивні елементи форми. Крім того, кожен елемент характеризується рядом геометричних характеристик, які визначають ступінь впливу елемента на НДС і течію металу в штампі. Таким чином, при багатоетапному деформуванні необхідно забезпечувати і структурну, і параметричну оптимізацію форми інструменту. Для цього необхідно виділити структурні елементи інструменту і розробити параметричну модель, яка дозволить змінювати геометрію інструменту в автоматизованому циклі розрахунку течії металу в штампі.

Для побудови геометричних моделей деталей, пуансонів і матриць доцільно використовувати одну з CAD-систем (AutoCAD, SolidWorks, PTC Creo, тощо), які дозволяють створювати параметричні моделі оснастки та заготовки [1, 7–9], з подальшою інтеграцією з CAE-системою (ANSYS, ABAQUS, QForm, тощо) для проведення досліджень НДС матеріалу в процесі деформування заготовки [1, 6, 7]. Такий підхід дозволить автоматизувати процес дослідження впливу факторів на процес деформування, зменшити трудомісткість моделювання та вибору раціональних параметрів технології.

Метою роботи є зниження трудомісткості моделювання та реалізації процесу формування профільованої заготовки шляхом формування радіальних ребер та їх вплив на напружено-деформований стан заготовок, на основі автоматизації використання об'ємної параметричної моделі оснастки та заготовки з подальшим застосуванням її в CAE-системі.

Проведення досліджень з радіального формування ребер виконували для заготовок у вигляді циліндрів, щоб з'ясувати вплив схеми течії металу в радіальному напрямку на НДС заготовки. В даному випадку виконували суміщення процесу радіальної плоскої течії металу в двох протилежних напрямках з одночасним осадженням ребер [10]. Перевагою процесу є можливість змінювати форму і площу поперечного перерізу ребер по їх довжині за рахунок форми пуансонів і таким чином керувати процесом течії металу. Розроблена схема деформування забезпечує зниження трудомісткості виготовлення кінцевого виробу за рахунок формування заготовок з необхідною епюрою площин поперечних перетинів.

Виконувати повне деформування заготовки за одну операцію плоскими пуансонами (виключаючи повертання заготовки) недоцільно внаслідок утворення бочки на вільній грані заготовки, що викликає підвищення розтягуючих напружень з можливим подальшим руйнуванням на поверхні деталі. Тому для формування необхідної мікроструктури матеріалу виконували декілька етапів деформування з використанням плоских або випуклих пуансонів. Це забезпечувало керування процесом течії металу та інтенсифікацію зсувних деформацій вздовж ребер.

Основними параметрами, які дозволяють регулювати процес деформування, є геометрична форма деталі та інструмента на кожній технологічній операції, а також тертя між матрицею, пуансонами та заготовкою.

Моделювання течії металу при заповненні порожнини матриці виконували з контролем НДС заготовки для виявлення зон з розтягувальними напруженнями, що виникають всередині і на зовнішніх гранях ребер заготовки. Контроль і зниження напружень в процесі деформування дозволяє визначити можливість виготовлення деталей з порошкових заготовок. При цьому заготовкам, окрім змінення структури в процесі попередньої обробки із застосуванням ПД, буде надаватися і необхідна форма для подальшого штампування. При моделюванні використовували схему деформування (рис. 1), яка включала матрицю 1 з порожниною для розміщення круглої вихідної заготовки 3 і пазами для ребер. Заготовку 3 розміщували

в центральній частині матриці, закривали двома спрощеними за формою пуансонами (верхній 2 і нижній 4) різної або однакової форми та виконували осадження з одночасною течією металу в ребра.

Структурно-параметрична модель пуансона наведена на рис. 2. Узагальнений пуансон має складну форму для створювання нерівномірності деформації зсуву в матеріалі заготовки підчас різних операцій деформування. Він складається з декількох основних структурних елементів.

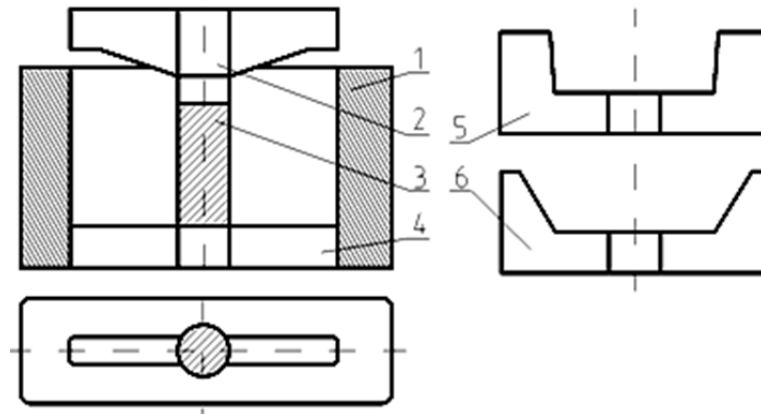


Рис. 1. Поздовжній розріз матриці з випуклим верхнім пуансоном та нижнім профільованим пуансоном для зміни кута вільної грані ребер:

1 – матриця; 2 – верхній пуансон; 3 – заготовка; 4, 5, 6 – нижній пуансон різної конфігурації з різними кутами

Центральна частина пуансону з границею  $X_2$  та глибиною  $y_1$  призначена для профільовання торця заготовки, якщо це необхідно для наступних операцій деформування. Зокрема, глибина центрального виступу заготовки має бути достатньою для забезпечення опори на матрицю при використанні плоского пуансону після фігурного, щоб знизити розтягуючі напруження в ребрах. Площадка контакту пуансона та заготовки в більшості випадків має бути більшою ніж половина радіусу заготовки  $r_1$ , щоб не створювати дефектів на її поверхні. Різниця між значеннями  $x_1$  та  $x_2$  визначає гострий кут  $\alpha_1$ . Значення цього кута не повинно приводити до затисків при наступному осадженні виступу на торці заготовки.

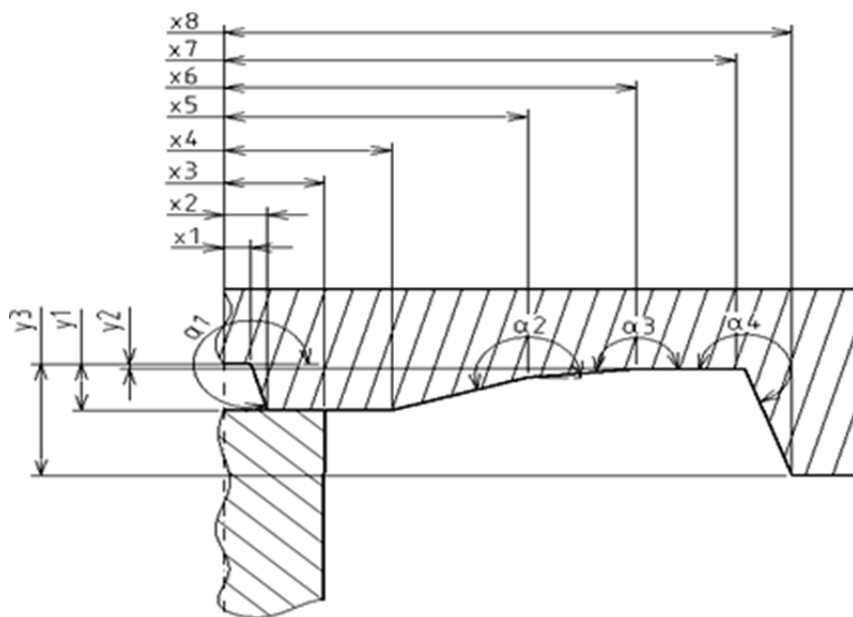


Рис. 2. Загальна структурно-параметрична модель пуансона

За плоскою частиною пуансона починається похила частина, при цьому похила грань пуансона  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  складається з двох частин з більшим кутом нахилу до горизонталі  $\alpha_2$  і відповідною довжиною до  $X_5$  та з меншим кутом нахилу до горизонталі  $\alpha_3$  і відповідною довжиною до  $X_6$ . Розділення похилої частини грані пуансону на дві частини дозволяє управляти течією металу у ребрах заготовки, наприклад, уникати відриву краю заготовки від верхнього пуансону при видавлюванні ребер. Похила частина грані пуансону переходить до горизонтальної площадки, що має довжину до  $X_7$  та висоту  $Y_2$ . Горизонтальна площадка  $X_6 - X_7$  має обмежувати течію металу заготовки назустріч випуклій частини пуансона. Остання частина пуансону, що має довжину до  $X_8$  та висоту  $Y_3$ , призначена, щоб створювати обмеження течії металу в сторони та змінити напрямом течії за висотою ребра. Ця частина має кут нахилу до горизонталі  $\alpha_4$  та створює виступ відносно площадки пуансона  $X_6 - X_7$ .

Призначення частин заготовки може змінюватись відповідно до розміщення та параметрів геометрії. Центральна частина пуансону з границею  $X_1$ ,  $X_2$  може бути призначеною для створення виступу – центральної опори при вирівнюванні торця заготовки плоским пуансоном. При цьому висота  $Y_1$  центрального виступу має бути не меншою ніж  $Y_2$ . Висота виступу  $Y_3$ , на краю пуансона не повинна бути більшою, ніж висота заготовки після видавлювання, щоб пуансони не контактували між собою в кінці деформування.

В ході моделювання застосовували різні варіанти змінення форми пуансонів з різними кутами нахилу граней верхнього пуансона до горизонталі, з метою знаходження раціонального діапазону значень параметрів пуансонів. Кути  $\alpha_2$  та  $\alpha_3$  нахилу граней верхнього пуансона на площадці  $X_4 - X_6$  приймали рівними та змінювали від  $7.5^\circ$  до  $20^\circ$ . При моделюванні видавлювання необхідно забезпечити течію металу без руйнування протягом заповнення металом порожнини матриці в двох протилежних відносно вісі заготовки напрямках течії.

Для моделювання використовували заготовки з титанового сплаву ВТ6 з діаметром  $\varnothing 40$  мм та висотою 80 мм. Температура заготовки при деформуванні становила  $750^\circ\text{C}$ . Деформування моделювали в ізотермічних умовах.

Ширина пазів матриці змінювалась від 10 до 20 мм. Кут нахилу граней верхнього пуансону змінювався від  $7.5^\circ$  до  $20^\circ$ , за базовий приймали  $10^\circ$ . Підчас моделювання використовували закон тертя, запропонований А. Н. Левановим [17], приймали фактор тертя у діапазоні від  $\mu = 0.6$  до  $\mu = 0.8$  [18]. Загальний хід верхнього пуансону складав 60 мм, що необхідно для отримання заготовки. Для пошуку найкращих значень використовували метод прямого перебору в межах прийнятого діапазону значень параметрів.

Параметричну модель будували за допомогою програми на мові C#, яка використовує API функції CAD-системи SolidWorks [13] будувала моделі необхідної структури для кожного етапу деформування та зберігала їх у форматі стандарту обміну даними моделі STEP (STandard for Exchange of Product model data) для подальшого імпортування моделей у CAE-систему. Моделювання деформування заготовок виконували з використанням MCE, який реалізований у спеціалізованій CAE-системі QForm VX 2D/3D 8.2.0. Дана система обрана, оскільки забезпечує визначення НДС та інших параметрів заготовки в процесі її багатоетапного пластичного деформування [6].

Задачу вирішували в динамічній постановці, що дозволило виконувати моделювання процесу деформування заготовки за декілька операцій переміщення верхнього пуансона та повертання заготовки на кут  $180^\circ$  вздовж горизонтальної осі між операціями деформування для окремого деформування верхньої та нижньої частин заготовки.

На кожному етапі циклу переміщення верхнього пуансона та повертання заготовки відбувається деформація зі зміною розподілу деформацій зсуву по висоті заготовки: (рис. 3, а – максимальна деформація випуклим пуансоном зверху заготовки, рис. 3, б – після перевероту заготовки, максимальна деформація – біля випуклого пуансона).

В ході моделювання ПДД переміщення верхнього пуансона відбувалися поетапно: на першому кроці верхній пуансон переміщували вздовж вертикальної осі на крок  $h = 20$  мм. На другому кроці відбувалося повертання заготовки в матриці на  $180^\circ$ . Для зміни форми пуансона симетрично відносно осі заготовки додавали вставки 4 та 5 (див. рис. 1) для зміни кута

вільної грані відносно вертикалі, після цього повторювали деформування на наступному кроці. На третьому кроці також повертали заготовку, з матриці вилучали вставки та змінювали верхній пуансон на плоский, після цього повторювали деформування до повного заповнення порожнини матриці. Після цього, на останньому кроці, заготовку знов повертали та продовжували деформувати доки відстань між пуансонами не дорівнювала кінцевому значенню (рис. 3г). Таким чином отримували поковку, яка мала циліндричне потовщення в центрі та два однакових протилежно направлених ребра.

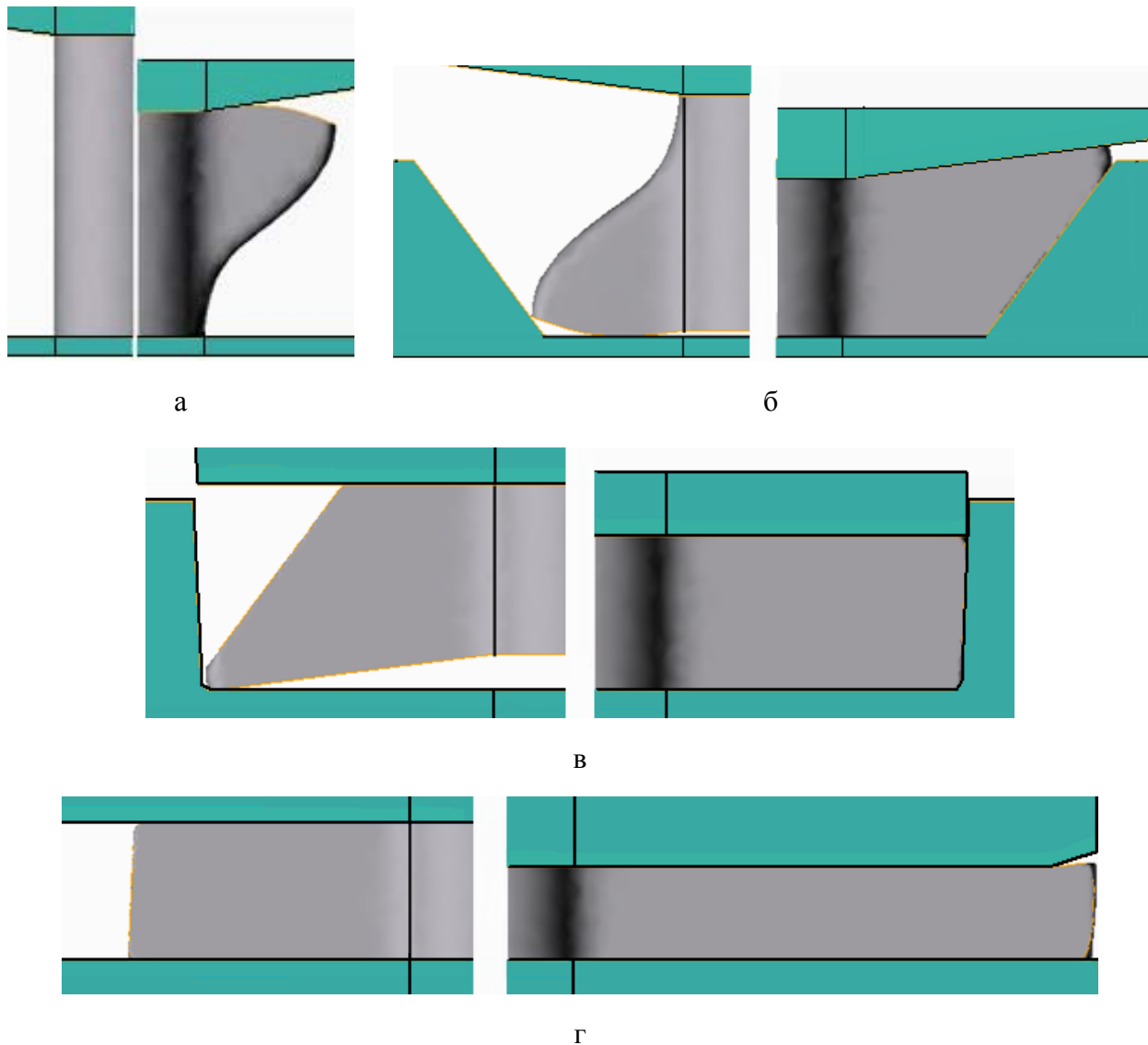


Рис. 3. Зміна геометрії заготовки впродовж етапів деформування, зони круглої частини заготовки виділені прямокутниками:

а) максимальна деформація зсуву біля випуклого пуансона; б) вирівнювання деформації зсуву по висоті заготовки; в) повторення інтенсивної течії металу біля верхнього пуансона при формуванні ребер та вирівнювання вільної грані відносно вертикалі; г) продовження осадження заготовки та ребер плоскими пуансонами. Ліва частина – заготовка на початку операції, права – наприкінці етапу деформування

В процесі моделювання отримані поля розподілу накопленого ступеня пластичної деформації (рис. 4), досліджено утворення дефектів в центральній частині вільної грані заготовки (рис. 5), а також розтягуючих напружень. Оскільки заготовка є симетричною на рисунках зображена її половина з одним ребром.

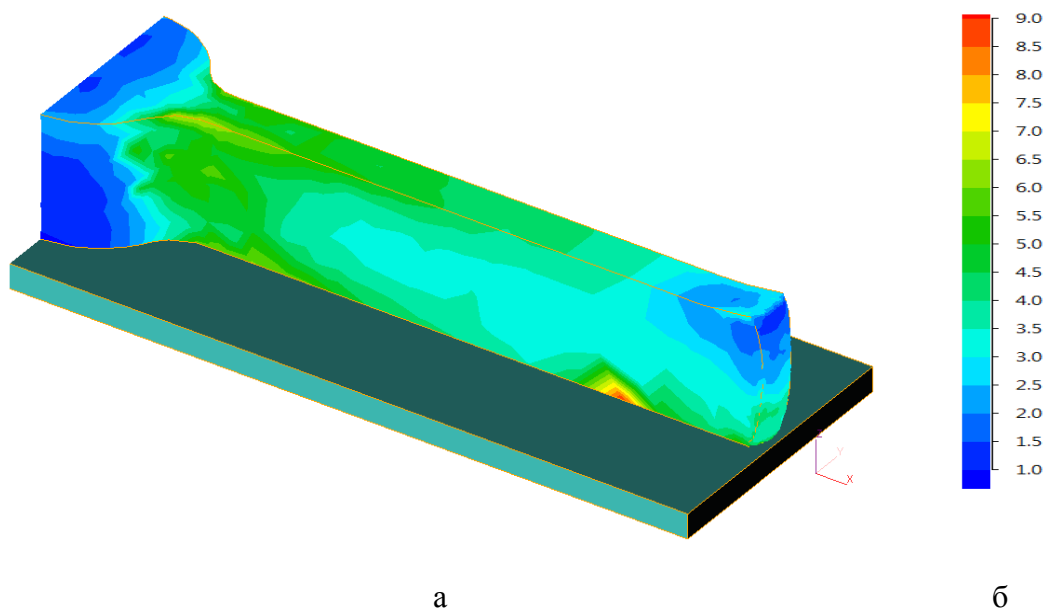


Рис. 4. Результати моделювання:

а – поле розподілу накопиченої пластичної деформації вздовж ребра деталі при параметрах: ширина пазу матриці  $b = 10$  мм, кут нахилу верхнього пуансона  $\alpha = 10^\circ$ , фактор тертя за законом А. Н. Леванова  $\mu = 0.8$ ; б – шкала накопиченої пластичної деформації

На рис. 4 видно, що найбільшу область в заготовці займає зсувна деформація з величиною, що має значення  $\varepsilon > 3$ , розподіл середньої накопиченої пластичної деформації по довжині ребра заготовки зображено на рис. 4. Розподіл деформації практично не залежить від кута нахилу граней верхнього пуансона, що можна пояснити відривом заготовки від пуансона, а також послідовною зміною операцій нерівномірного по висоті заготовки деформування ребер та вирівнювання деформації по їх висоті на наступному етапі.

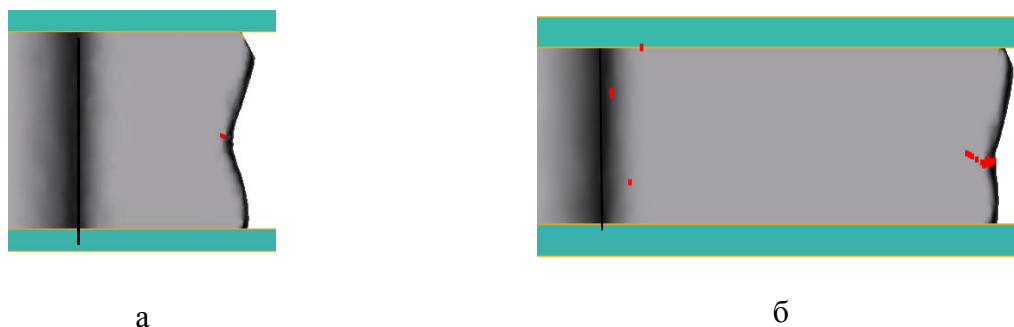


Рис. 5. Дефект на вільній грані заготовки на другому етапі деформування без вставки при параметрах: ширина пазу матриці  $b = 10$  мм, кут нахилу верхнього пуансона  $\alpha = 10^\circ$ , фактор тертя за законом А. Н. Леванова  $\mu = 0.8$ : а – вогнутий торець ребра, б – затискування при подальшому осаджуванні

Якщо не використовувати профільований нижній пуансон 4 (див. рис. 3, а), то на другому етапі деформування заготовки при малих значеннях ширини пазу утворюється подвійна бочка (рис. 5, а) і дефекти в центральній частині вільної грані заготовки (рис. 5, б). Зменшення розміру ширини пазу матриці впливає на гальмування течії металу в ребра по висоті заготовки за рахунок тертя на бокових гранях матриці. Тому необхідно блокувати переміщення металу в ребро відносно нижнього пуансона при вирівнюванні вільної поверхні ребер відносно вертикалі (див. рис. 3, в). Це також дозволяє зменшити розтягуючі напруження на відстані радіусу від центру круглої заготовки (рис. 6).

Найбільш небезпечною з приводу руйнування металу є область на відстані радіусу від центру круглої заготовки, при переході до ребер, де з'являються найбільші розтягуючі напруження (рис. 6, а, б). Однак збільшення ширини пазу матриці призводить до зменшення області, де з'являються розтягуючі напруження та їх чисельного значення (рис. 6, в, г).

Причиною виникнення розтягуючих напружень біля круглої заготовки є момент, який виникає між торцем верхнього пуансона і опорою заготовки на нижній пуансон по краям ребер після її повороту на  $180^{\circ}$  (див. рис. 3, в).

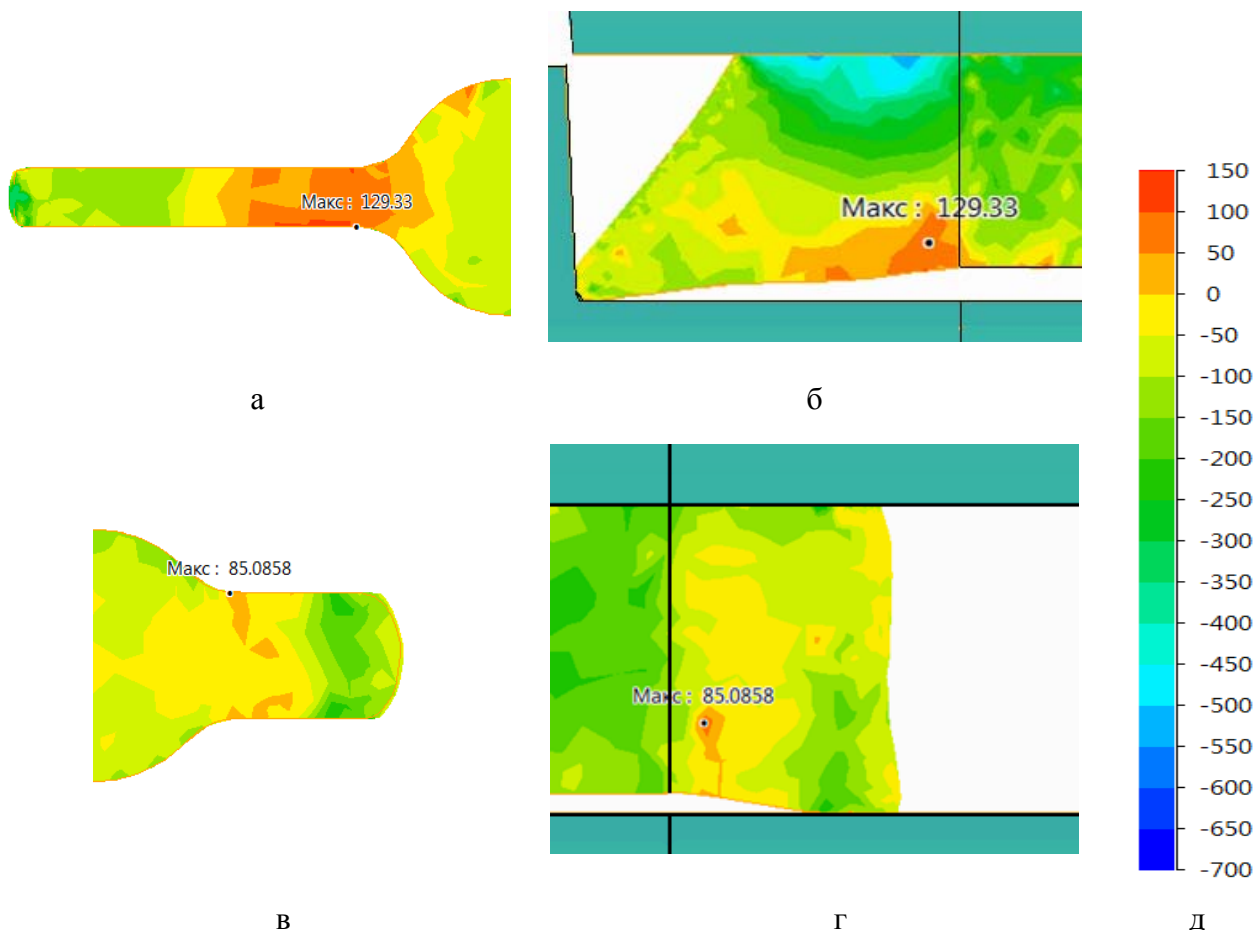


Рис. 6. Область виникнення розтягуючих напружень підчас 3-ї операції деформування при параметрах: кут нахилу верхнього пуансона  $\alpha = 10^{\circ}$ , фактор тертя за законом А. Н. Леванова  $\mu = 0.8$ , ширина пазу матриці  $b = 10$  мм; а – вид на заготовку знизу, б – фронтальна проекція заготовки; в – ширина пазу матриці  $b = 20$  мм, в – вид на заготовку знизу, г – фронтальна проекція заготовки; д – шкала напружень, МПа

Наявність моменту призводить до виникнення розтягуючих напружень на нижній грані заготовки, які чисельно дорівнюють 120–140 МПа в прийнятому діапазоні змінення параметрів моделювання. Тому треба відмовитись від цього виду операції, якщо розтягуючі напруження перевищують допустимі і переходити до видавлювання з одночасним осадженням заготовки и ребер плоским верхнім пуансоном. Іншим варіантом вирішення проблеми є використання центрального виступу на пуансоні (з границею  $X_1$ ,  $X_2$ , див. рис. 2), який створює додаткову опору в центрі заготовки і зменшує момент згину ребер.

## ВИСНОВКИ

Розробка структурно-параметричної моделі узагальненого пуансона, підчас вирішення задачі моделювання з використанням МСЕ процесу багатоетапного формування ребер циліндричних заготовок, дозволяє керувати процесом течії матеріалу в плоских каналах

матриці. Виявлений вплив геометрії інструменту на характер течії матеріалу при урахуванні тертя між заготовкою та інструментом дозволив обґрунтувати вибір геометрії пуансонів та послідовність операцій формування ребер.

Використання побудованої структурно-параметричної моделі узагальненого пуансона та розробленої програми для інтеграції с CAD/CAE – системами дозволяє зменшити час на підготовку та постановку задачі моделювання МСЕ в межах функціональності, яку забезпечують засоби інтеграції цих систем.

Встановлено ряд правил структурної модифікації конструктивної форми пуансонів на послідовних етапах формування ребер та закономірності впливу параметрів елементів форми пуансона та ширини порожнин матриці на процес деформування (НДС, дефекти, характер течії).

Аналіз результатів моделювання показав закономірності впливу технологічних параметрів процесу багатоетапного формування радіальних ребер на напружено-деформований стан матеріалу заготовок на кожному етапі деформування та можливості керування процесом течії за допомогою використання пуансонів з різними структурними геометричними елементами. Встановлений наступний вплив параметрів цих елементів на процес деформування та виключення дефектів:

– кут нахилу граней верхнього пуансона не повинний бути більшим ніж  $15^\circ$ , оскільки при більших кутах верхнього пуансона зростають розтягуючі напруження (на 30 %) та утворюються дефекти на вільній грані заготовки;

– ширина пазів матриці впливає на гальмування течії металу на бокових гранях пазів, при її збільшенні розтягуючі напруження на вільній грані заготовки зменшуються, а зменшення ширини пазів призводить до утворення дефектів на вільній грані заготовок;

– при зменшенні фактору тертя, який впливає на гальмування течії металу і нерівномірність течії металу по висоті заготовки, розтягуючі напруження на вільній грані заготовки також зменшуються.

При зміні параметрів в діапазонах, які були опрацьовані у процесі моделювання, значення накопиченої пластичної деформації вздовж ребра деталі становить не менш 2,5. Процес двостороннього деформування інтенсифікує зсувні деформації в об'ємі заготовки. За рахунок нерівномірної течії металу в ребра по висоті заготовки реалізується схема близька до простого зсуву. Така схема відповідає схемі ПД, що покращує мікроструктуру матеріалу. Застосування виявлених параметричних залежностей для виготовлення поковок з радіальними ребрами за схемою ПД матеріалу в ребрах дозволить підвищити якість отриманих профільних заготовок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Моделирование процесса штамповки заготовок имплантатов с применением схем интенсивного пластического деформирования / Тарасов А. Ф., Алтухов А. В., Шейкин С. Е., Байцар В. А. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 139–150. – DOI: 10.15593/per.mech/2015.2.09.*
2. *Rahulkumar Shivajirao Hingole. Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 126 p.*
3. *A. A. Nazarov, R. R. Mulyukov. Nanostructured Materials. In: Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, ed. by Goddard W., Brenner D., Lyshevski S., Iafrate G., CRC Press (2003) Chapter 22, P. 1*
4. *O. Sitdikov, T. Sakai, A. Goloborodko, H. Miura, R. Kaibyshev. Philosophical Magazine. 85, 1159 (2005).*
5. *Duan X. Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys / X. Duan, X. Velay, T. Sheppard // Materials Science and Engineering A. – 2004. – Vol. 369. – P. 66–75. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.275.*
6. *Ershov A. A. Capabilities of QForm-extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes / A. A. Ershov, V. V. Kotov, Yu. N. Loginov // Metallurgist. – 2012. – Vol. 55, no. 9–10. – P. 695–701. – DOI: 10.1007/s11015-012-9489-8.*
7. *Лобур М. В. Інформаційна інтеграція систем проектування у рамках парадигми паралельного інжинірингу / М. В. Лобур // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2003. – № 471 : Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 26–30. – Бібліографія: 7 назв.*
8. *Zhang Heming, Zhang Yuyun, Xiong Guangleng. Product data integration based on STEP in concurrent engineering. CIRP Symposium, Hong Kong, 1997.*



9. Teeuw W. B., Liefting J. R. *Experiences with product data interchange: on product models, integration, and standardization // Computer in Industry.* – 1996. – 31. – P. 205–220.
10. Пат. 122492 Україна, МПК В22F 3/00, В22F 3/02. Спосіб бокового видавлювання деталей з радіальними ребрами / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, А. К. Коваленко. – № u 201707816 ; заявл. 25.07.2017 ; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.
11. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / Леванов В. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П., Картан Б. Р., Ашпур Ю. В., Спасский Ю. И. – М. : Metallurgiya, 1976. – 416 с.
12. Алимов А. И. Определение фактора трения при штамповке сплава ВТ6 / А. И. Алимов, С. А. Евсюков, И. Е. Семенов // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2017. – Вып. 11. Ч. 1. – С. 142–147.
- 13 *SolidWorks 2008 API: Programming & Automation / Luke Malpass // AngelSix, 2008.* – 268 p.
- 14 *SolidWorks 2009 API: Advanced Product Development / Luke Malpass // AngelSix, 2009.* – 246 p.

## REFERENCES

1. Modelirovanie processa shtampovki zagotovok implantatov s primeneniem shem intensivnogo plasticheskogo deformirovaniya / Tarasov A. F., Altuhov A. V., Shejkin S. E., Bajcar V. A. // *Vestnik PNIPU. Mehanika.* – 2015. – № 2. – S. 139–150. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.09.
2. Rahulkumar Shivajirao Hingole. *Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.* – 126 p.
3. A. A. Nazarov, R. R. Mulyukov. *Nanostructured Materials. In: Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, ed. by Goddard W., Brenner D., Lyshevski S., Iafrate G., CRC Press (2003) Chapter 22, P. 1*
4. O. Sitdikov, T. Sakai, A. Goloborodko, H. Miura, R. Kaibyshev. *Philosophical Magazine.* 85, 1159 (2005).
5. Duan X. *Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys / X. Duan, X. Velay, T. Sheppard // Materials Science and Engineering A.* – 2004. – Vol. 369. – P. 66–75. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.275.
6. Ershov A. A. *Capabilities of QForm-extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes / A. A. Ershov, V. V. Kotov, Yu. N. Loginov // Metallurgist.* – 2012. – Vol. 55, no. 9–10. – P. 695–701. – DOI: 10.1007/s11015-012-9489-8.
7. Lobur M. V. *Informacijna integracija sistem projektuvannja u ramkah paradigmi paralelnogo inzhi-niringu / M. V. Lobur // Visnik Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politehnika».* – 2003. – № 471 : *Komp'ju-terni sistemi projektuvannja. Teorija i praktika.* – S. 26–30. – Bibliografija: 7 nazv.
8. Zhang Heming, Zhang Yuyun, Xiong Guangleng. *Product data integration based on STEP in concurrent engineering. CIRP Symposium, Hong Kong, 1997.*
9. Teeuw W. B., Liefting J. R. *Experiences with product data interchange: on product models, integration, and standardization // Computer in Industry.* – 1996. – 31. – R. 205–220.
10. Пат. 122492 Україна, МПК В22F 3/00, В22F 3/02. Спосіб бокового видавлювання деталей з радіальними ребрами / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, А. К. Коваленко. – № u 201707816 ; заявл. 25.07.2017 ; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.
11. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / Леванов В. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П., Картан Б. Р., Ашпур Ю. В., Спасский Ю. И. – М. : Metallurgiya, 1976. – 416 с.
12. Алимов А. И. Определение фактора трения при штамповке сплава ВТ6 / А. И. Алимов, С. А. Евсюков, И. Е. Семенов // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2017. – Вып. 11. Ч. 1. – С. 142–147.
- 13 *SolidWorks 2008 API: Programming & Automation / Luke Malpass // AngelSix, 2008.* – 268 p.
- 14 *SolidWorks 2009 API: Advanced Product Development / Luke Malpass // AngelSix, 2009.* – 246 p.

Тарасов О. Ф. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. КІТ ДДМА;

Коваленко А. К. – асистент каф. КІТ ДДМА;

Алтухов О. В. – канд. техн. наук, ст. викл. каф. КІТ ДДМА;

Лебідь В. Т. – д-р техн. наук, доц. каф. АВП ДДМА.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

E-mail: [kit@dgma.donetsk.ua](mailto:kit@dgma.donetsk.ua); [dsea.kovalenko.andrey@gmail.com](mailto:dsea.kovalenko.andrey@gmail.com); [app@dgma.donetsk.ua](mailto:app@dgma.donetsk.ua)