

УДК 621.77.043

## МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ ПРЕСУВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ

Лавріненков А. Д., Злочевська Н.К., Шупіченко А.А.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** Для отримання дрібнозернистої структури матеріалу оцінювались наступні схеми пресування: гвинтового уширяючого пресування (ГУП), полігональне пресування (ПП) та багатокутове пресування (БП). Встановлено, що при схемі ПП ефективна пластична деформація матеріалу відбувається біля поверхні заготовки. Глибина розповсюдження деформації складає 1,5-2,5 мм. При схемі ГУП можна говорити про пластичну деформацію матеріалу заготовки по всьому поперечному перерізу заготовки. Найменша пластична деформація відповідає середині заготовки. Глибина розповсюдження пластичної деформації 6-9 мм. Для максимального пропрацювання матеріалу заготовки з метою отримання подрібненої мікроструктури, пресування потрібно робити за два проходи і більше. Порівнюючи схеми пресування по величині пластичної деформації встановлено, що найбільш ефективною є схема багатокутового пресування, потім гвинтового уширяючого пресування. Найменш ефективною схемою пресування є схема полігонального пресування.

**Ключові слова:** гвинтове уширяюче пресування; полігональне пресування; багатокутове пресування; деформації зсуву; пластична деформація; пропрацювання структури.

Перспективність підвищення механічних властивостей металів легуванням в останні роки знижується. Так, за останні 40-50 років питома міцність конструкційних алюмінієвих сплавів збільшилася в 1,5 - 2 рази, а за прогнозом на найближчі роки, може збільшитись тільки на 8 - 20% [1]. При цьому значення питомого модуля пружності практично не змінюється. Така тенденція зберігається і для інших сплавів. Тому в середині минулого століття активно почали розвиватися альтернативні напрями підвищення механічних властивостей металів і сплавів шляхом формування дрібнокристалічної структури пластичним деформуванням, а також створення та використання структурно-неоднорідних матеріалів (СНМ).

Теоретично і експериментально обґрунтовано, що розвиток деформацій зсуву при реалізації технологічних схем деформацією простого зсуву при рівноканальному кутовому пресуванні [2, 3] або деформацією кручення при гвинтовому пресуванні під високим гідростатичним тиском [4, 5] однозначно пов'язаний з подрібненням елементів структури і підвищенням механічних властивостей міцності на 25 - 40% при збереженні показників пластичності.

Застосування конструкційних матеріалів, зміцнених фазовими складовими твердих евтектик – квазікомпозиційні матеріали також підвищують механічні характеристики. Особливий інтерес в авіадвигунобудуванні представляють евтектично зміцнені матеріали системи «титановий сплав - бориди титану» (Ti- TiB<sub>n</sub>). Наприклад, матеріал на основі титанового сплаву ВТ 22 забезпечує підвищення границі міцності до 20% та границі витривалості до 10 %. Такі «квазікомпозиційні» структурно - неоднорідні матеріали мають хороші перспективи використання для виготовлення лопаток компресора газотурбінних двигунів (ГТД), заготовки для яких у промислових умовах отримують пресуванням [6].

В залежності від схеми пресування величина пластичної деформації матеріалу буде різною. Відповідно і пророблення структури матеріалу заготовки буде різною, що у реальному процесі буде впливати на мікроструктуру заготовки. Для моделювання були вибрані наступні схеми пресування: гвинтового уширяючого пресування (ГУП), полігональне пресування (ПП) та багатокутове пресування (БП) (рис. 1). На рис. 1 зображені поперечні перерізи ділянок матрицю де відбуваються інтенсивні пластичні деформації. Моделювання проводилось методом скінчених елементів (МКЕ) в програмі QForm. Параметри моделювання занесені до таблиці.

В натурному експерименті проводилось гвинтове пресування заготовки із матеріалу системи «титановий сплав - бориди титану» на основі титанового сплаву ВТ22. Для моделювання було вибрано титановий сплав ВТ22 без крихкої евтектики TiB<sub>n</sub>. Задачею моделювання є визначення схеми пресування при якій відбувається максимальне пророблення структури матеріалу. Процес не є ізотермічним, так як нагріти штампове оснащення до 920 °С досить проблематично. Також при таких температурах ресурс роботи матриці для пресування є малим.

В результаті моделювання схеми ГУП (рис. 1, а) було встановлено, що якщо процес відбувається на гідравлічному пресі, відбувається значне охолодження заготовки в наслідок тривалого контакту заготовки із стінкою матриці. Тому для реалізації процесу було вибрано гвинтовий прес-молот зусиллям 250т. Встановлено, що пресуванні заготовок на молоті, охолодження відбувається не значне, на деяких ділянках (що відповідають інтенсивним пластичним деформаціям) відбувається розігрів на 20-40 °С. В цілому в залежності від схеми пресування температура заготовки знаходиться в межах 880-950 °С.

Таблиця

Параметри процесу моделювання

Параметр процесу	Значення
Тип операції	Деформування із урахуванням теплових процесів
Тип задачі	3D
Матеріал заготовки	ВТ-22
Температура заготовки, С0	920
Обладнання	Гвинтовий прес-молот зусиллям 250 т
Змащення	Мінеральне змащення + графіт
Температура інструменту (пуансон, матриця), С0	300
Теплообмін із заготовкою	враховується, простий
Кількість заготовок (окрім кутового пресування)	дві (друга виступає в якості протитиска)

Задачею моделювання було встановлення ступеня заповнення каналу матриці. Для кращого заповнення каналу матриці пресування заготовок відбувається безперервно (попередня заготовка виконує роль протитиска). Найбільш повне заповнення відбувається при схемі ГУП. Процент заповнення складає 90-95%.

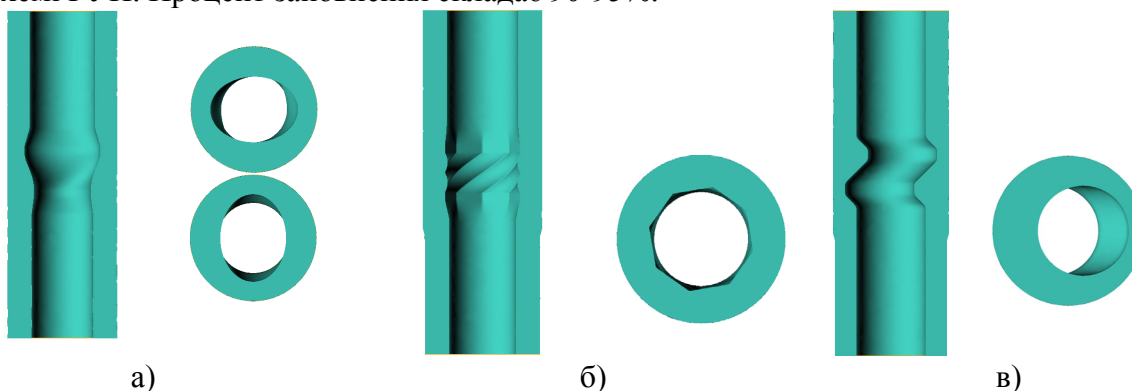


Рис. 1. Схеми пресування а) – ГУП; б) – ПП; в) – БП

При схемі ПП заповнення каналу матриці склало 50-60%. При схемі БП реалізувати схему безперервного пресування не вдалось. Пластичне деформування відбувається на першому кутовому переході. Для заповнення другого кутового переходу потрібно прикладати протитиск гідроциліндром, так як попередня заготовка не створює необхідне зусилля. З огляду на це найбільш ефективною схемою пресування є саме ГУП.

По результатам моделювання (рис. 2) можна говорити, що схема пресування при якій відбувається пластична деформація максимального об'єму метала відповідає схемі ГУП.

Встановлено, що при схемі ПП ефективна пластична деформація матеріалу відбувається біля поверхня заготовки. Глибина розповсюдження деформації складає 1,5-2,5 мм. При схемі ГУП можна говорити про пластичну деформацію матеріалу заготовки по всьому поперечному перерізу заготовки. Найменша пластична деформація відповідає середині заготовки. Глибина розповсюдження пластичної деформації 6-9 мм.

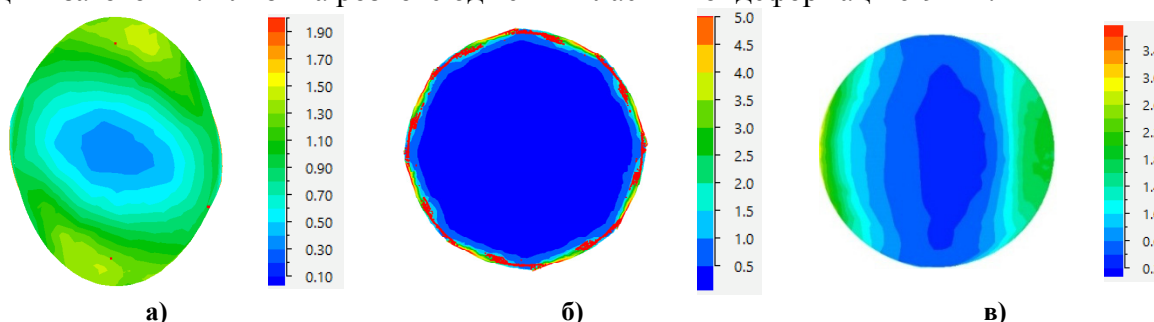


Рис. 2. Розподіл ефективної пластичної деформації  $e_{ef}^p$  в осередку деформування:  
а – УГП; б – ПП; в – БП

Але із-за особливостей каналу матриці, інтенсивна пластична деформація при схемі ГУП (зміна поперечного перерізу матриці коло-еліпс-еліпс(поворот  $90^{\circ}$ С)-коло) пропрацювання матеріалу відбуваються з двох сторін заготовки, і під кутом, що відповідає куту зміни поперечного перерізу матриці (рис. 3). Для максимального пропрацювання матеріалу заготовки з метою отримання подрібненої мікроструктури, пресування потрібно робити за два проходи. Також для того, щоб не відбулося повторного деформування тих самих ділянок заготовки, на вході в матрицю заготовку потрібно повертати на  $90^{\circ}$  по відношенню до першого проходу заготовки. При дотриманні цієї умови пропрацювання матеріалу заготовки при пресуванні за схемою ГУП буде максимальне. Цієї ж умови потрібно дотримуватись і при пресуванні за схемою БП (рис. 1, в). По схемі ГУП глибина пластичної деформації складає 3-6 мм. Але якщо реалізувати повне заповнення матеріалом двох кутових переходів матриці, то і глибина пластичної деформації матеріалу і величина будуть збільшено. Якщо порівнювати схеми пресування по величині пластичної деформації то найбільш ефективною є схема багатокутового пресування, потім гвинтового уширяючого пресування. Найменш ефективною схемою пресування є схема полігонального пресування.

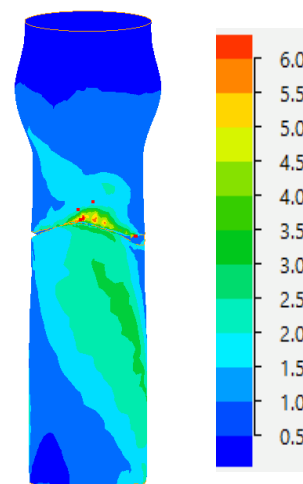


Рис. 3. Пластична деформація заготовки по схемі УГП

#### Список літератури:

1. Фриляндер И. Н. Свойства композиционных материалов и эффективность их применения Композиционные материалы - М.: Наука. 1981. - с. 5-11.
2. The innovation potential of bulk nanostructured materials / R.Z. Valiev, M.J. Zehetbauer, Y. Estrin at al. // Advanced Engineering Materials. – 2007. = V. 9. - № 7. – P. 527-533.
3. The effect of grain refinement by warm equal-channel-angular extrusion on room temperature in magnesium alloy ZK60 / R. Lapavok, P.F. Thomson, B. Cottam // Jour. of Mat. Sc. – 2005. = V. 40.– P. 1699-1708.
4. High pressure effects in severe plastic deformation / V.N. Varykhin, Y. Beygelzimer, V.M. Efros at al.// Физика и техника высоких давлений.- 2004.- том 14, №4, С. 9 - 18.
5. Бейгельзимер Я.Е. Полунепрерывная винтовая экструзия / Я.Е. Бейгельзимер, Д.В. Приленко, С.Г. Сынков // Физика и техника высоких давлений.-2007.- том №17, №2, с. 100-104.
6. Титов В.А. Особенности комплексного процесса изготовления заготовок лопаток из эвтектически упрочненных титановых сплавов / В.А. Титов, Н.К. Злочевская, А.Я. Качан, И.Г. Савчинский, П.С. Вишневецкий // Металлург. – 2014. - № 2. - С. 87-92.

УДК 621.7

## АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ХОЛОДНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ВИСТУПОМ НА ДОННІЙ ЧАСТИНІ ЗІ СТОРОНИ ПОРОЖНИНИ

Калюжний В.Л., Потятиник А.М., Руденко І.В.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація.** Методом скінченних елементів проведено моделювання холодного зворотного видавлювання з низьковуглецевої сталі вісесиметричних порожнистих виробів з виступом на донній частині зі сторони порожнини та встановлені параметри для проектування технології. Визначені залежності зусилля видавлювання, зусилля виймання пуансона із zdeформованої заготовки від переміщення пуансона та зусилля виштовхування виробу із матриці від переміщення виштовхувача. При максимальному значенні зусилля видавлювання наведений розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях між zdeформованою заготовкою та деформуючим інструментом. З встановлені кінцеві форма і розміри виробу. Показані розподіли інтенсивності деформацій та компонент деформацій у zdeформованому металі виробу. Визначений тепловий ефект при холодному формоутворенні зворотним видавлюванням.*

***Ключові слова:** зворотне видавлювання, порожнистий виріб, метод скінченних елементів, зусилля і питоми зусилля, форма і розміри виробу, тепловий ефект, zdeформований стан.*

Технології і штампове оснащення для виготовлення вісесиметричних порожнистих виробів зворотним видавлюванням проектуються в основному на базі виробничого досвіду та експериментальних даних [1]. При цьому практично відсутні дані по формоутворенню таких виробів з виступом на донній частині зі сторони порожнини. Використання метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє встановлювати дані для проектування технології та оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [2,3].

Метою роботи є встановлення шляхом моделювання з використанням МСЕ параметрів холодного зворотного видавлювання із низьковуглецевої сталі порожнистих виробів з виступом на донній частині зі сторони порожнини.

Для моделювання використана скінченно-елементна програма DEFORM. Метал заготовки вважався пружно-пластичним зі зміцненням, деформуючий інструмент – абсолютно жорстким. Використання такої моделі металу дозволяє визначити кінцеві форму і розміри виробу, а також виконати моделювання процесів виймання пуансона із zdeформованої заготовки та виштовхування її із матриці після видавлювання. Враховано вплив тертя по Кулону з коефіцієнтом тертя  $\mu=0,08$ . Швидкість деформування складала  $V_0=2$  мм/сек.

На рис. 1 показаний ескіз порожнистого виробу з виступом на донній частині зі сторони порожнини, який необхідно отримати холодним видавлюванням. Матеріал виробу – сталь 11ЮА. Крім форми виробу, при видавлюванні необхідно забезпечити задані властивості по висоті стінки. Розміри вихідної заготовки для видавлювання: діаметр  $D_0=48$  мм, висота  $H_0=30$  мм. Розміри пуансона прийняті по розмірах порожнини та виступу на дні, а розміри матриці – по розмірах зовнішньої поверхні виробу.

Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту та заготовки на різних стадіях формоутворення виробу зворотним видавлюванням наведені на рис. 2. На рис. 2а зображене положення на початку видавлювання. Вихідна заготовка 1 встановлена в матриці 2 і нижнім торцем спирається на конусну поверхню матриці. В циліндричній частині матриці встановлений виштовхувач 3. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 4. Положення в кінці видавлювання показане на рис. 2б. Після видавлювання проведений

розрахунок виймання пуансона із здеформованої заготовки (рис. 2в). При цьому заготовка залишається в матриці. Далі виконане моделювання виштовхування виробу із матриці. Положення після виштовхування приведені на рис. 2г.

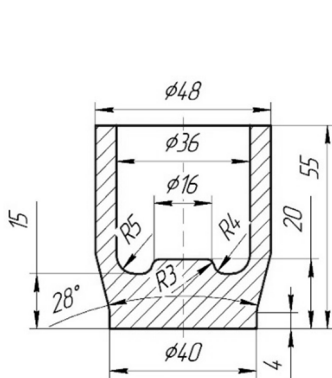


Рис. 1 - Ескіз порожнистого виробу з виступом на донній частині зі сторони порожнини

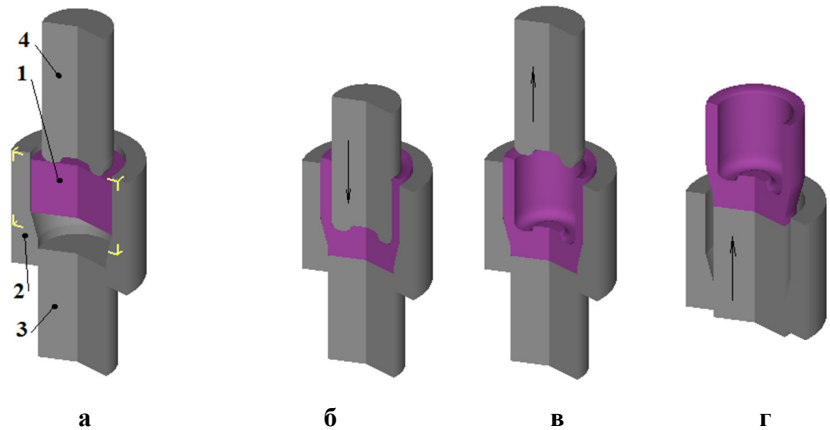


Рис. 2 - Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту на різних стадіях формоутворення виробу зворотним видавлюванням: а – на початку видавлювання, б – в кінці видавлювання, в – після виймання пуансона із здеформованої заготовки, г – після виштовхування виробу із матриці

Розрахунковим шляхом встановлені зусилля видавлювання, виймання пуансона із здеформованої заготовки та виштовхування її із матриці від переміщення відповідного деформуючого інструменту. На рис. 3 зображені силові режими формоутворення виробу. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона показана на рис. 3а. Зусилля спочатку зростає до величини 2200 кН, а в подальшому дещо зменшується. Найбільшої величини зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки досягає 22 кН на середині зворотного руху пуансона після видавлювання (рис. 2б). Зусилля на виштовхувачі при видаленні здеформованої заготовки із матриці має найбільше значення 36 кН на початку переміщення виштовхувача.

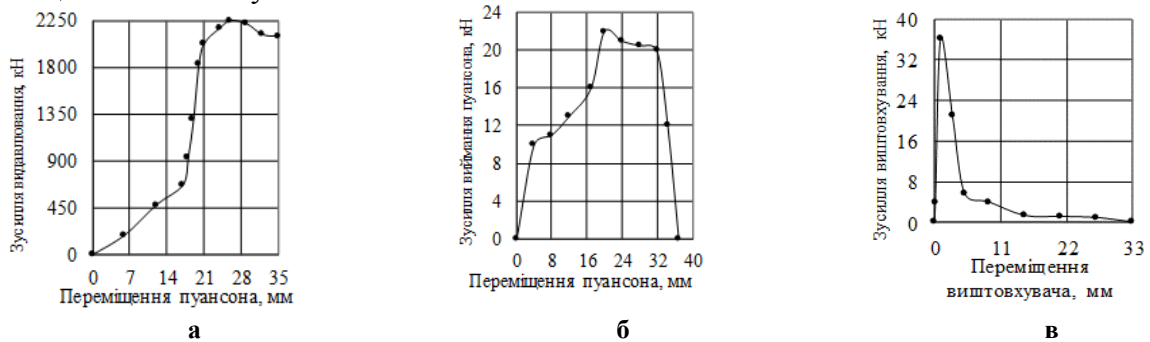


Рис. 3 - Силові режими формоутворення виробу: а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, б – залежність зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки від переміщення пуансона, в – залежність зусилля виштовхування виробу із матриці від переміщення виштовхувача

Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень  $\sigma_n$  на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з інструментом. Розподіл таких напружень при максимальному значенні зусилля видавлювання зображений на рис. 4. Тут і в подальшому наведена половина здеформованої заготовки, тонкими лініями показаний деформуючий інструмент, а по осях розміри наведені в міліметрах.

Стадії формоутворення виробу та кінцеві форма і розміри виробу показані на рис. 5. На рис. 5а наведена стадія, коли металом заповнюється конусна частина матриці. При цьому

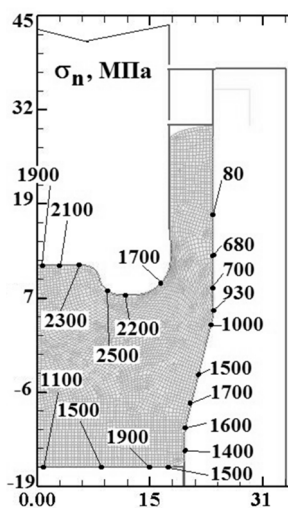


Рис - 4 - розподіли нормальних напружень на деформуючому інструменті

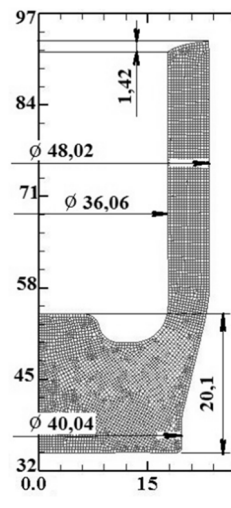
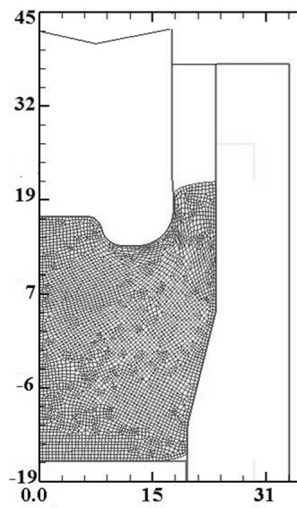
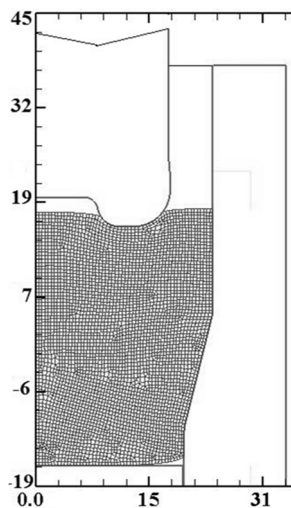


Рис. 5 - Стадії формоутворення виробу та кінцеві форма і розміри виробу: а – при заповненні конусу матриці, б – при заповненні впадини на пуансоні; в - форма і розміри виробу

зусилля видавлювання досягає величини 940 кН, а переміщення пуансона складає 18 мм. Виступ на донній частині утворюється при зусиллі видавлювання 2030 кН і переміщенні пуансона 21 мм (рис. 5б). На рис. 5в наведена кінцева форма і розміри виробу, що отримані з урахуванням пружної деформації.

Моделювання встановлений тепловий ефект та деформований стан металу при холодному видавлюванні. Розподіли температури у zdeформованих заготовках та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  по об'єму виробу зображені на рис. 6. На рис. 6а представлений

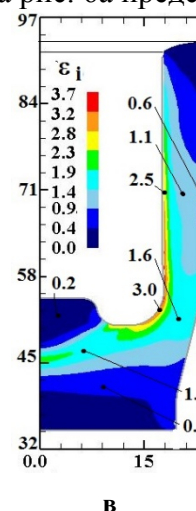
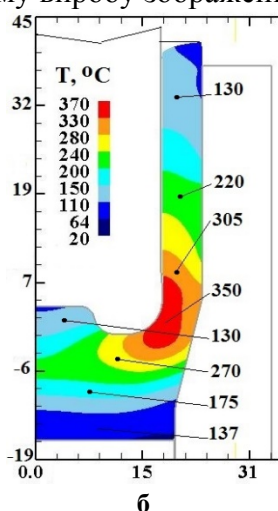
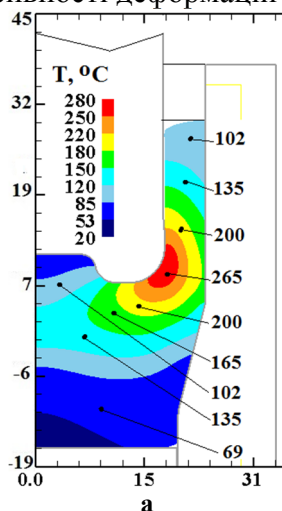


Рис. 6 - Розподіли температури у zdeформованих заготовках та розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  по об'єму виробу: а – розподіл температури при максимальному значенні зусилля видавлювання, б – розподіл температури в кінці видавлювання, в – розподіл  $\epsilon_i$

розподіл температури у zdeформованій заготовці при максимальному значенні зусилля видавлювання. Найбільша температура 265°C виникає в області заготовки, яка знаходиться біля радіуса заокруглення пуансона. У стінці температура zdeформованого металу знаходиться в межах 102°÷200°C. При подальшому видавлюванні температура зростає і в кінці формоутворення досягає 350°C в зоні біля радіуса заокруглення пуансона та 130°÷305°C і стінці zdeформованої заготовки. На рис. 6в приведений розподіл інтенсивності деформацій по об'єму виробу. По ширині стінки величину  $\epsilon_i=2,1$  отримано у внутрішніх шарах металу стінки, по середині стінки -  $\epsilon_i=1,1$ , а у зовнішніх шарах -  $\epsilon_i=0,6$ . По величинах  $\epsilon_i$  з

використанням експериментальної діаграми істинних напружень можна прогнозувати межу текучості zdeформованого металу.

Розподіл компонент деформацій по об'єму виробу приведений на рис. 7. На рис. 7а зображений розподіл радіальної деформації  $\varepsilon_r$ . По висоті стінки виробу ці деформації стискаючі, знаходяться в межах  $\varepsilon_r = -0,25 \div -1,3$ . У виступі на донній частині деформації  $\varepsilon_r$  стискаючі, а у самій донній частині – розтягувальні та досягають значень у межах  $\varepsilon_r = 0,04 \div 0,5$ . Осьові деформації  $\varepsilon_z$  у стінці виробу розтягувальні та знаходяться у межах  $\varepsilon_z = 0,45 \div 1,1$  (рис. 7б). У донній частині деформації  $\varepsilon_z$  в основному стискаючі. На рис. 7в наведений розподіл тангенціальних деформацій  $\varepsilon_\theta$ . У стінці виробу вказані деформації знаходяться в межах  $\varepsilon_\theta = 0,07 \div 0,67$ . В осередку деформації під пуансоном отримано  $\varepsilon_\theta = 0,82$ .

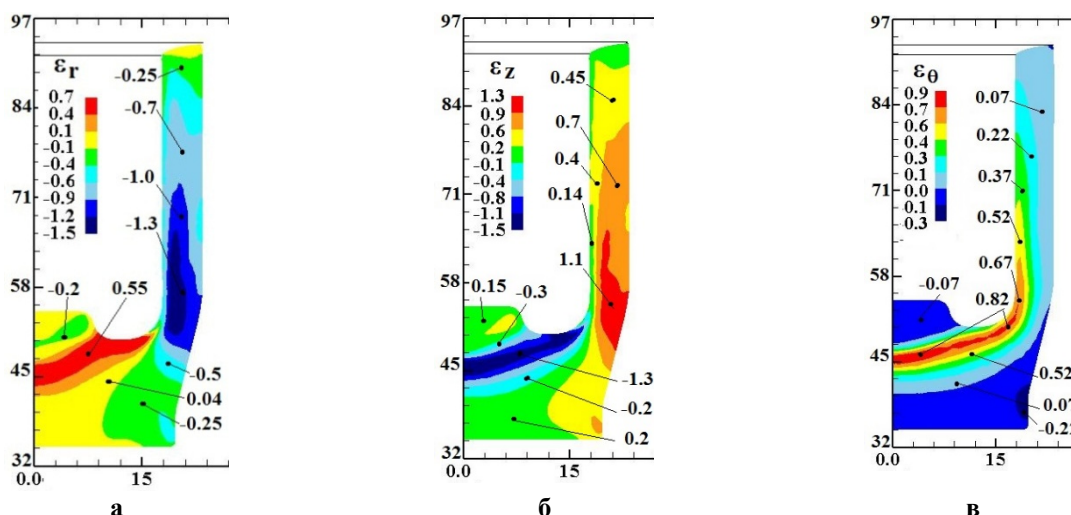


Рис. 6 - Розподіли радіальних  $\varepsilon_r$ , осьових  $\varepsilon_z$  та тангційних  $\varepsilon_\theta$  деформацій по об'єму виробу:  
а – розподіл  $\varepsilon_r$ , б – розподіл  $\varepsilon_z$ , в – розподіл  $\varepsilon_\theta$

**Висновки.** За допомогою МСЕ визначені параметри холодного видавлювання порожнистих виробів з виступом на донній частині. Встановлені зусилля формоутворення для вибору пресового обладнання. Виявлені питомі зусилля на деформуючому інструменті для проектування штампного оснащення. Розраховані кінцеві форма і розміри виробу з урахуванням пружної деформації.

#### Список літератури:

1. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-хт. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. . – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
2. Калюжный В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей изделий с полостью постоянного диаметра / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. - №4(37). – С. 87-92.
3. Калюжный В.Л. Определение усилий извлечения пуансона из сдеформированной заготовки и выталкивания заготовки из матрицы при холодном выдавливании полых изделий с разной степенью деформации / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, В.Н. Горностай // Усовершенствование процессов и оборудования для обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. - №1(42). – С. 90-100.