

УДК 621.73

В.Л. Калюжний, С.С. Артеменко, О.С. Ярмоленко*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***СИЛОВІ РЕЖИМИ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛУ ТА
ТЕМПЕРАТУРНИЙ РОЗПОДІЛ ПРИ ГАРЯЧОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ
ПОРОЖНИСТИХ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ З ЛАТУНІ**

Методом скінченних елементів проведений аналіз гарячого формоутворення вісесиметричних порожнистих виробів з виступом у донній частині із латуні DIN-CuZn28 по схемах традиційного зворотного видавлювання та зворотного видавлювання в рухомій матриці. Встановлені залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансонів та розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі деформування. видавлювання в рухомій матриці забезпечує менші зусилля та тривалість процесу формоутворення. Визначена зміна температури металу на протязі видавлювання. виявлений напружений стан здеформованої заготовки при максимальній величині зусилля та кінцевий деформований стан, а також форма і розміри виробів. По розподілу інтенсивності деформацій проведена оцінка пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

Ключові слова: гаряче видавлювання, метод скінчених елементів, порожнистий виріб, зусилля, напруження, деформації.

В.Л. Калюжний, С.С. Артеменко, А.С. Ярмоленко**СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ, НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
МЕТАЛЛА И ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИ ГОРЯЧЕМ ОБРАТНОМ
ВЫДАВЛИВАНИЕМ ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛАТУНИ**

Методом конечных элементов проведен анализ горячего формообразования осесимметричных изделий из вступом в донной части из латуни DIN-CuZn28 по схемам традиционного обратного выдавливания и обратного выдавливания в подвижной матрицы. Установлены зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансонов и распределение удельных усилий на деформирующем инструменте при максимальном усилии деформирования. Выдавливание в подвижной матрице обеспечивает меньшие усилия и длительность процесса формообразования. Определено изменение температуры металла в течении выдавливания. Выявлено напряженное состояние сдеформированной заготовки при максимальной величине усилия и конечное деформированное состояние, а также форма и размеры изделий. По распределению интенсивности деформаций проведена оценка проработки структуры металла пластической деформацией.

Ключевые слова: горячее выдавливание, метод конечных элементов, полый изделие, усилия, напряжения, деформации.

V.L. Kaliuzhnyi, S.S. Artemenko, O.S. Yarmolenko**FORCE MODES, STRESS - STRAIN STATE OF METAL AND TEMPERATURE
DISTRIBUTION DURING HOT REVERSE EXTRUSION OF HOLLOW AXISYMMETRIC
PRODUCTS MADE OF BRASS**

The hot-shaping of axisymmetric products with a ledge in the bottom part of DIN-CuZn28 brass according to the traditional reverse extrusion and reverse extrusion in a movable matrix was carried out using the finite element method. The dependences of the extrusion force on the movement of the punches and the distribution of the specific forces on the deforming tool with the maximum deformation force have been established. Extrusion in a movable matrix provides less effort and duration of the shaping process. A defined change in metal temperature during extrusion. The stress state of the deformed workpiece with the maximum force and the final deformed state, as well as the shape and dimensions of the product, were is established. The evaluated of the structure of the metal by plastic deformation was carried out according to the distribution of the intensity of deformations.

Keywords: hot extrusion, finite element method, hollow product, forces, stresses, deformations.

Вступ. Останнім часом для виготовлення виробів з підвищеною надійністю і довговічністю процесами гарячого об'ємного штампування вирішують задачі по отриманню необхідного опрацювання структури металу пластичною деформацією по всьому об'єму виробу або в окремих його частинах. Методи і термомеханічні параметри кування на молотах і гарячого штампування на пресах виробів з кольорових металів і сплавів розглянуті в роботі [1]. Приведені елементи конструювання поковок і деформуючого інструменту. Наведені дані присвячені отриманню необхідної форми виробів. У роботі [2] дані рекомендації і наведені приклади проектування технологічних процесів і штампового оснащення для гарячого об'ємного штампування виробів на різному ковальсько-пресовому обладнанні. Також викладені особливості гарячого об'ємного штампування деталей різної форми з кольорових сплавів. У приведених джерелах всі відомості базуються на підставі експериментальних даних і виробничого досвіду та основна увага приділена

досягненню гарячим формоутворенням необхідної форми виробів. Для удосконалення існуючих і розробки нових технологічних процесів гарячого об'ємного штампування використовують комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Моделювання дозволяє встановлювати технологічні параметри і визначати дані для проектування штампового оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [3,4]. У джерелах [5-7] за допомогою МСЕ проведені розрахункові дослідження процесів гарячого кування та штампування деталей необхідної форми. Можливості отримання куванням і гарячим штампуванням відповідальних виробів із сталей з заданим пропрацюванням структури металу пластичною деформацією та досягненням необхідного розподілу деформацій по об'єму виробів приведені в джерелах [8,9]. Авторами цих робіт показано, що пропрацювання структури металу пластичною деформацією можна оцінити по кінцевому розподілу інтенсивності деформацій у здеформованих заготовках. Актуальними завданнями є проведення аналогічних розрахункових досліджень з використанням МСЕ для гарячого видавлювання вісесиметричних порожнистих деталей з латуні із заданим пропрацюванням структури металу пластичною деформацією.

Постановка завдань. Метою роботи є порівняльний аналіз за допомогою метода скінченних елементів силових режимів і напружено-деформованого стану металу при гарячому видавлюванні вісесиметричних порожнистих виробів із виступом на донній частині по схемі традиційного зворотного видавлювання та схемі зворотного видавлювання в рухомій матриці.

Схеми зворотного видавлювання наведені на рис. 1. На рис. 1а приведена схема традиційного зворотного видавлювання (ТЗВ). Ліворуч від вісі симетрії зображене положення на початку видавлювання, праворуч – в кінці видавлювання. Вихідна циліндрична заготовка 1 встановлена в матриці 2. В матриці 2 розміщений виштовхувач 3. Зусилля деформування прикладається за допомогою пуансона 4. При опусканні пуансона 4 із швидкістю V_0 заготовка деформується по конусній поверхні матриці 2 і на певному етапі, при досягненні торцем заготовки виштовхувача 3, починається формоутворення стінки з отриманням виробу 5. Схема зворотного видавлювання в рухомій матриці (ЗВРМ) показана на рис. 1б. Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При опусканні пуансона 4 виконується формоутворення виробу 5. При цьому одночасно з пуансоном рухається матриця 2 з однаковою швидкістю V_0 . Перевага цієї схеми, в порівнянні з попередньою, полягає в використанні вихідної заготовки меншого діаметра, на отримання якої потрібні менші витрати металу, а також необхідна матриця невеликої висоти.

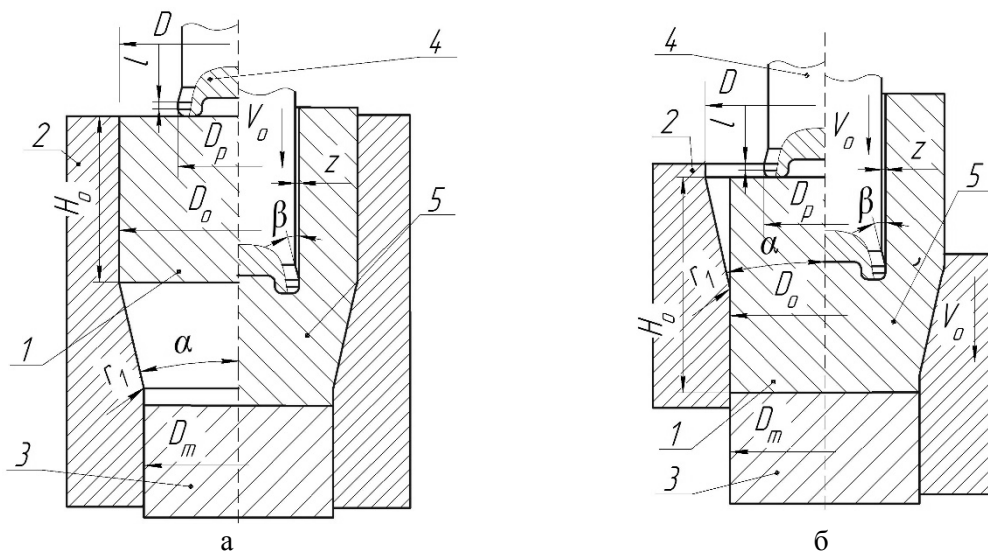


Рис.1 - Схеми зворотного видавлювання: а – схема традиційного зворотного видавлювання, б - схема зворотного видавлювання в рухомій матриці

Розрахунковий аналіз проводили шляхом моделювання з використанням програми DEFORM. Використані циліндричні координати. Для видавлювання використали вихідні циліндричні заготовки із латуні DIN-Cu-Zn28. Щоб отримати вироби однакових розмірів по схемі ТЗВ використовували вихідну заготовку діаметром $D_0 = 230$ мм і висотою $H_0 = 44.2$ мм, а по схемі ТЗВРМ - $D_0 = 212$ мм і висотою $H_0 = 52$ мм. Величина коефіцієнта тертя при формоутворенні прийнята $\mu = 0,2$. Швидкість деформування складала $V_0 = 40$ мм/сек. Температура вихідної заготовки 870°C . Температурний інтервал гарячого штампування був $700-870^\circ\text{C}$. Деформуючий

інструмента вважався абсолютно жорстким. Величина інтенсивності деформацій ϵ_z здеформованого металу у донній частині та стінці виробу повинна бути не менше 0,5 для забезпечення необхідного пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

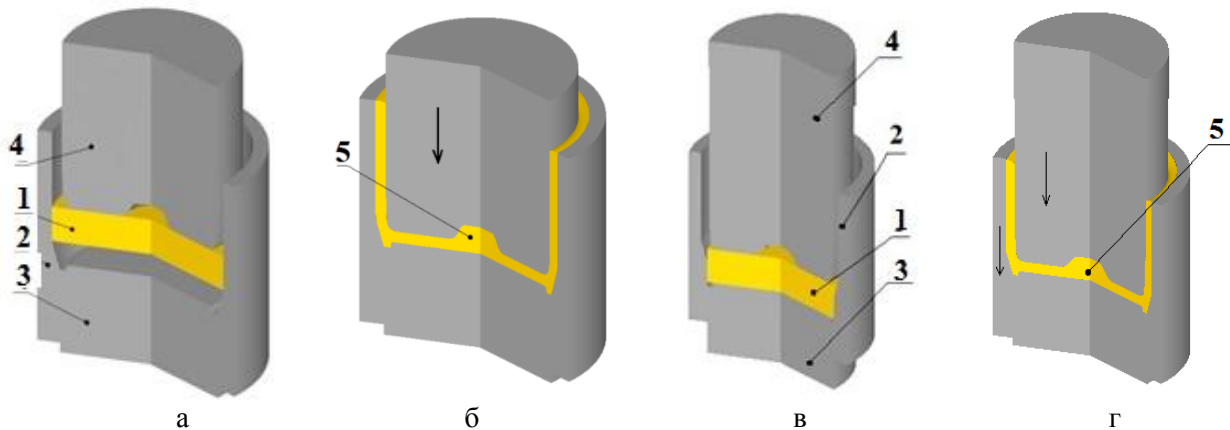


Рис. 2 - Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці процесів формоутворення по схемах ТЗВ і ЗВРМ: а і б - формоутворення по схемі ТЗВ, в і г - формоутворення по схемі ЗВРМ

Викладення основного матеріалу. Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці процесів формоутворення по схемах ТЗВ і ЗВРМ приведені на рис.1. Нарис. 1а зображене положення на початку формоутворення по схемі ТЗВ. Вихідна заготовка 1 встановлена в матриці 2. Також в матриці 2 розміщений виштовхувач 3. На заготовці 1 встановлений пуансон 4. При опусканні пуансона 4 отримується виріб 5 (рис. 1б). Положення на початку формоутворення по схемі ЗВРМ показане на рис. 1в. Заготовка 1 розміщена в матриці 2 на виштовхувачі 3. Зусилля деформування створюється пуансоном 4. При опусканні пуансона 4 одночасно з матрицею 2 виконується формоутворення виробу 5 (рис. 1г).

На рис. 3 приведені залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона та розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях при максимальних значеннях зусилля видавлювання. Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона зображені на рис. 3а. При видавлюванні по схемі ТЗВ зусилля спочатку зростає повільно, що зв'язано з деформуванням заготовки по конусній поверхні матриці (див. рис. 1а), та досягає максимуму 6900кН при переміщенні пуансона 60 мм. Застосування рухомої матриці приводить до зменшення переміщення пуансона і зусилля деформування при формоутворенні. В кінці процесу зусилля досягає 6100 кН при переміщенні пуансона 39 мм. Зниження зусилля, в порівнянні з видавлюванням по схемі ТЗВ, склало 11,6%. Розподіл напружень σ_n на поверхнях пуансона, матриці та виштовхувача, які контактують із здеформованою заготовкою, при формоутворенні по схемах ТЗВ і ЗВРМ показані на рис. 3б і 3в. Тут і в подальшому зображені половини здеформованих заготовок з розмірами по вісях в міліметрах, а тонкими лініями наведений деформуючий інструмент. Найбільші величини вказаних напружень у межах $\sigma_n = 270 \div 290$ МПа виникають на поверхнях пуансона і виштовхувача (рис. 3а).

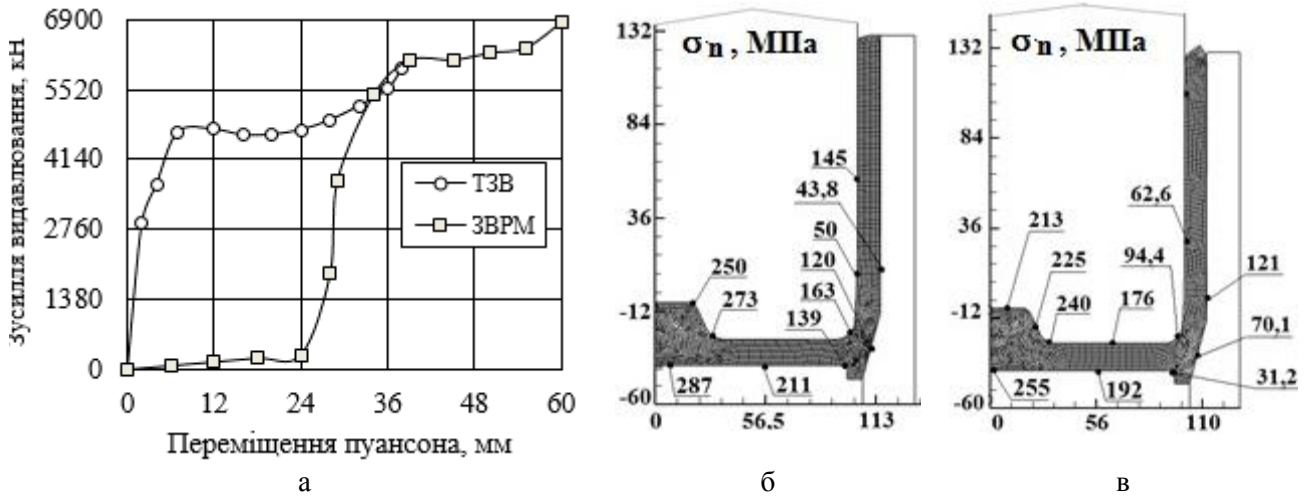


Рис. 3 - Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона та розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях при максимальних значеннях зусилля видавлювання: а – залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона при формоутворенні по схемах ТЗВ та ЗВРМ, б – розподіл напружень σ_n при формоутворенні по схемі ТЗВ, в – розподіл напружень σ_n при формоутворенні по схемі ЗВРМ

Видавлювання по схемі ЗВРМ приводить до зменшення величин нормальних напружень на всіх контактуючих поверхнях (рис. 3в). По напруженнях σ_n можна оцінити питомі зусилля на деформуючому інструменті, вибрати марку матеріалу для нього та призначити кількість бандажів для матриці.

Розподіли температури у здеформованих заготовках, які отримані при різних схемах видавлювання, показані на рис. 4. На рис. 4а показаний розподіл температури у здеформованій заготовці, яка отримана по схемі ТЗВ. У донній частині заготовки температура знаходиться в межах 798÷840°C, у стінці отримано 805÷819°C. Розподіл температури у здеформованій заготовці по схемі ЗВРМ зображений на рис. 4б. Оскільки тривалість формоутворення по цій схемі суттєво менша в порівнянні з попередньою, температура здеформованої заготовки дещо вища, але при цьому зменшується розігрів деформуючого інструмента. У донній частині заготовки температура знаходиться у межах 818÷840 °С, у стінці - 833÷840 °С.

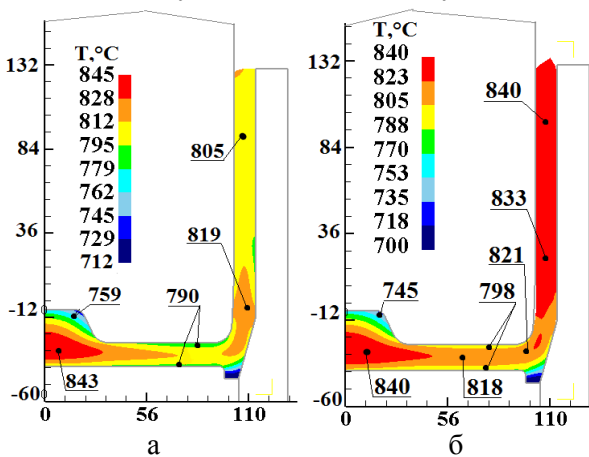


Рис.4 - Розподіли температур у здеформованих заготовках: а – після формоутворення по схемі ТЗВ б – після формоутворення по схемі ЗВРМ

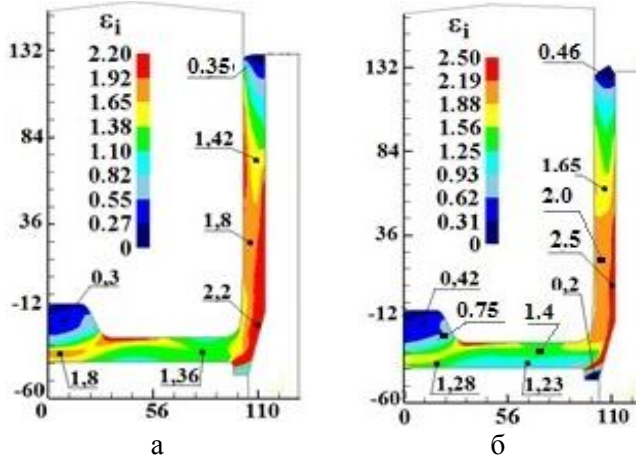


Рис. 5 - Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i у здеформованих заготовках: а – після формоутворення по схемі ТЗВ б – після формоутворення по схемі ЗВРМ

Схема видавлювання впливає на пропрацювання структури металу пластичною деформацією, яке можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій. Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i у здеформованих заготовках після формоутворення по різних схемах видавлювання приведені на рис. 5. На рис. 5а показаний розподіл ϵ_i у здеформованій заготовці після формоутворення по схемі ТЗВ. У вступі донної частини інтенсивність деформацій знаходиться у

межах $\varepsilon_i = 0,3 \div 0,68$, у самій донній частині отримано $\varepsilon_i = 1,36 \div 1,8$. В стінці здеформованої заготовки величини ε_i розподілені нерівномірно по висоті та по ширині. По висоті стінки найменше значення $\varepsilon_i = 0,35$ отримано в області торця з подальшим збільшенням до $\varepsilon_i = 2,2$ в місці переходу стінки у донну частину. В шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано $\varepsilon_i = 1,8$, а в зовнішніх шарах - $\varepsilon_i = 2,2$. При видавлюванні по схемі ЗВРМ розподіл інтенсивності деформацій дещо відрізняється від попередньої схеми (рис. 5б). У виступі донної частини величини ε_i практично однакові. У самій донній частині отримано $\varepsilon_i = 1,23 \div 1,4$. Наведені величини менші з попереднім випадком. По висоті стінки величини вказаних деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0,46 \div 2,5$, а по ширині стінки - $\varepsilon_i = 2,0 \div 2,5$. Обидві схеми формоутворення забезпечують отримання виробів з інтенсивністю деформацій у донній частині і стінці не менше заданої величини $\varepsilon_i = 0,5$. Таким чином для отримання виробів з інтенсивним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією донної частини необхідно використовувати схему ТЗВ, а для інтенсивного пропрацювання стінки виробу потрібно застосовувати схему ЗВРМ.

Для розглянутих схем видавлювання визначений напружений стан у здеформованих заготовках при максимальних значеннях зусилля деформування. На рис. 6 приведені розподіли компонент напружень при видавлюванні по схемі ЗВРМ. Розподіл радіальних напружень σ_r приведений на рис. 6а. По всій заготовці спостерігаються стискачі напруження σ_r . В області донної частини з виступом вказані напруження знаходяться у межах $\sigma_r = -185 \div -220$ МПа.

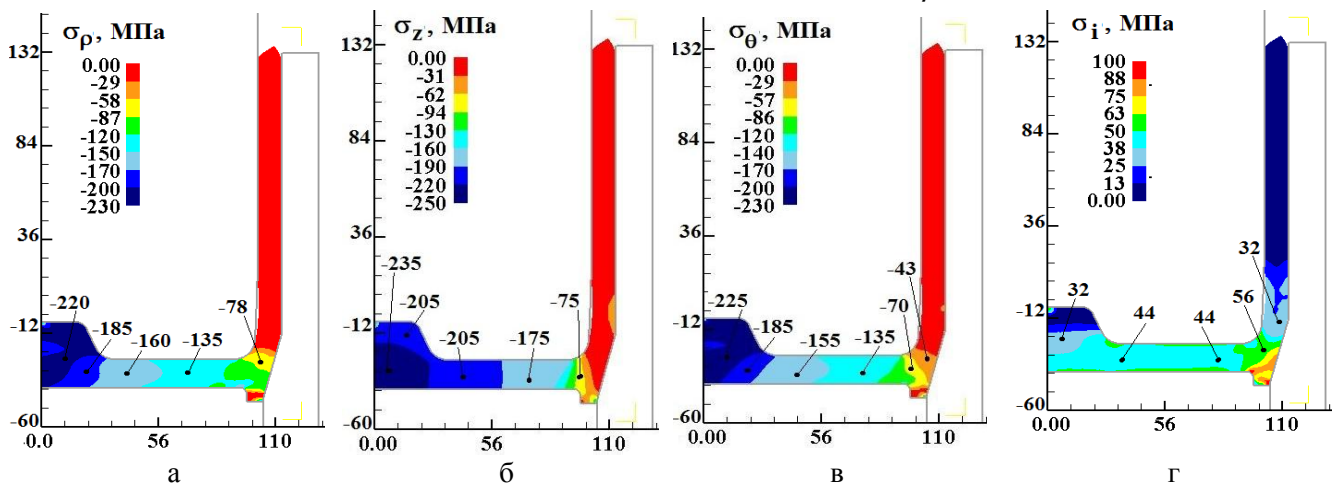


Рис. 6 - Розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці при максимальному зусиллі штампування: а – розподіл радіальних напружень σ_r , б – розподіл осьових напружень σ_z , в - розподіл тангенціальних напружень σ_θ , г - розподіл інтенсивності напружень σ_i

У самій донній частині отримано $\sigma_r = -87 \div -160$ МПа, а в місці переходу донної частини в стінку - $\sigma_r = -78$ МПа. На рис. 6б зображений розподіл осьових напружень σ_z . Ці напруження також стискаючі. В місці переходу стінки у донну частину отримано $\sigma_z = -31 \div -78$ МПа, далі по ширині донної частини напруження σ_z змінюються у межах $\sigma_z = -94 \div -205$ МПа. В області виступа отримано $\sigma_\theta = -205 \div -235$ МПа. Розподіл тангенціальних напружень σ_θ подібний з розподілом радіальних напружень (рис. 6в). В місці переходу стінки у донну частину напруження σ_θ становлять $-43 \div -78$ МПа. В донній частині вони приймають значення у межах $\sigma_\theta = -86 \div -185$ МПа, а в області виступа донної частини отримано $\sigma_\theta = -185 \div -225$ МПа. Розподіл інтенсивності напружень показаний на рис. 6г. У донній частині здеформованої заготовки величини вказаних напружень становлять $\sigma_\theta = 32 \div 56$ МПа.

Розподіли компонент кінцевих деформацій у здеформованій заготовці по схемі ЗВРМ зображені на рис. 7. Радіальні деформації (рис. 7а) ε_r по висоті стінки заготовки стискаючі та мають значення у межах $\varepsilon_r = -0,25 \div -1,8$. В донній частині, крім виступа, ці деформації розтягувальні і змінюються у межах $\varepsilon_r = 0,51 \div 1,6$. Осьові деформації ε_z по висоті стінки розтягувальні (рис. 7б). Найменша величина $\varepsilon_z = 0,4$ отримана в області торця стінки з подальшим зростанням до $\varepsilon_z = 1,3$ до місця переходу стінки в донну частину. В виступі донної частини ці деформації також розтягувальні, а в самій донній частині вони стискаючі з досягненням величини $\varepsilon_z = -1,5$. По об'єму здеформованої заготовки, крім виступа, виникають розтягувальні тангенціальні

деформації ε_θ (рис. 7в). По висоті стінки вони знаходяться у межах $\varepsilon_\theta = 0,09 \div 0,8$, а в донній частині отримано $\varepsilon_\theta = 0,58 \div 0,8$.

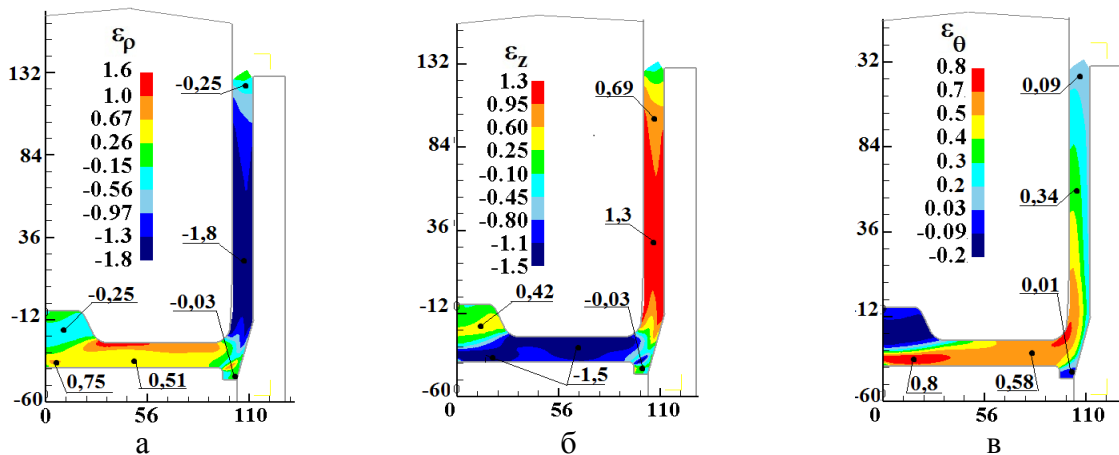


Рис. 7 - Розподіли кінцевих радіальних ε_ρ , осевих ε_z і тангенціальних ε_θ деформацій здеформованих заготовках: а – розподіл ε_ρ , б – розподіл ε_z , в - розподіл ε_θ

Висновки. З використанням МСЕ проведений розрахунковий аналіз гарячого формоутворення із латуні по схемах ТЗВ і ЗВРМ вісесиметричних порожнистих виробів з виступом у донній частині. Встановлені зусилля видавлювання, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті, зміна температури та напружено-деформований стан металу.

При

деформуванні по схемі ЗВРМ отримані менші тривалість процесу, зусилля, питомі зусилля та більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по висоті стінки виробу. Схема ТЗВ забезпечує покращене пропрацювання донної частини виробу. Отримані необхідні дані для проектування технології і оснащення для гарячого видавлювання: зусилля – для вибору обладнання, питомі зусилля – для проектування штампного оснащення, кінцеві форми і розміри виробів з розподілами інтенсивності деформацій – для оцінки якості виробів.

Література.

1. Корнеев Н.И. Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник / Н.И. Корнеев, В.Н. Аржаков, Б.Г. Бармашенко и др. – М: Машиностроение, 1971. – 232 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.3 // Ред. Совет: Е.И. Семенов (предс.), Ганаго О.А., Живов Л.И. и др. – М.: Машиностроение, 1986, т.2. Горячая объемная штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. 1986. – 592 с.
3. Данченко В.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, А.Н. Головкин. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 448 с.
4. Данченко В.Н. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 448 с.
5. Снитко С.А. Конечн-элементное моделирование многопереходного формоизменения при производстве железнодорожных колес / С.А. Снитко, В.Л. Калюжный // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение. – Киев: НТУУ «КПИ», 2011, №11. – С. 106-112.
6. Алиев И.С. Влияние операции выворота поковки коническими плитами на распределение деформаций / И.С. Алиев, О.Е. Марков, Я.Г. Жбанков и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. №3(24). – С. 64-69.
7. Алиев И. С. Управление напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессах ковки крупных поковок / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2013. №1(34). – С. 50-59.
8. Марков О.Е. Современные способы получения тонкостенных днищ ответственного назначения / О.Е. Марков, А.О. Шарун, М.С. Косилов и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2017. №1(44). – С. 115-123.
9. Калюжный В.Л. Горячая штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданной проработкой структуры металла пластической деформацией / В.Л. Калюжный, В.Н. Горноста́й, А.А. Гулюк // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2017. -№ 1(44). – С. 137-143.

Рецензенти:

Гожій Сергій Петрович, професор, д.т.н, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Баглюк Геннадій Анатолійович, заст. директора з наукової роботи, д.т.н., с.н.с. інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України

Стаття надійшла до редакції 15.04.2019