

УДК. 621.7

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)46

Калюжний В. Л.  
Левченко В. М.  
Ярошенко О. С.  
Таган Л. В.

## ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА ГАРЯЧЕ ЗВОРОТНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ПОРОЖНИСТОГО ВИРОБУ

*Моделюванням методом скінченних елементів вивчено вплив швидкості деформування на процес гарячого зворотного видавлювання з осаджуванням із високовуглецевої сталі осесиметричного порожнистого виробу з виступом на торці донної частини. Швидкість переміщення пуансону змінювалася від 50 до 400 мм/сек. Проведено розрахунковий аналіз процесів видавлювання з осаджуванням, процесів вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та процесів виштовхування виробів із матриць. Встановлено залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона, залежності зусилля вилучення пуансона від його зворотного переміщення і залежності зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача. За величинами нормальних напружень визначено розподіл питомих зусиль на торцях пуансона, виштовхувача та по висоті поверхні матриці. Збільшення швидкості деформування з 50 до 200 мм/сек призводить до суттєвого зниження зусилля деформування. Подальше зростання швидкості мало впливає величину зусилля. Наведено рекомендації щодо вибору пресового обладнання. Для кінцевої стадії видавлювання з осаджуванням показано розподіл температури, компонент напружень і деформацій в деформованому металі. Визначено температуру охолодження в шарах металу, розташованих поблизу контактуючих поверхонь. Встановлено кінцеві форма та розміри виробу. Для одержання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізання. Проробку структури металу пластичною деформацією оцінено за величиною інтенсивності деформацій у стінці та донній частині виробу. Одночасне формоутворення зворотним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією і знижує нерівномірність інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.*

**Ключові слова:** гаряче видавлювання з осаджуванням, порожній виріб, метод скінченних елементів, швидкість деформування, зусилля, температура, напруження, деформація.

Для виробництва осесиметричних порожнистих виробів різної форми та розмірів використовують процеси точного об'ємного штампування видавлюванням [1–4]. Процеси гарячого зворотного видавлювання достатньо добре описано в джерелі [5], в якому наведено рекомендації з проектування технології і штампового оснащення. В вищезгаданому джерелі мало інформації щодо впливу швидкості деформування на гаряче пластичне формоутворення та практично відсутні дані з проектування технології гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із високовуглецевих сталей, зокрема із сталі AISI 1060.

В теперішній час виготовляється гідравлічне пресове обладнання з високою швидкістю деформування, яке при забезпечує якість і продуктивність виробництва. Тому актуальними задачами є визначення впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів [6–8]. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення параметрів гарячого штампування дозволяє суттєво зменшити час та витрати на підготовку виробництва різноманітних виробів [9, 10]. Особливо високу ефективність має використання МСЕ для встановлення параметрів гарячого штампування виробів з необхідним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією по всьому об'єму або в окремих частинах виробів [11]. Приклади забезпечення потрібного пропрацювання на конкретних деталях, в тому числі в порожнистих виробах із кольорових металів і сталей наведено в роботах [12, 13]. Таке пропрацювання призводить до отримання заданих згідно робочого креслення деталі механічних властивостей у zdeформованому металі. Додатково збільшити пропрацювання структури металу можна застосовуючи формоутворення одночасним зворотним видавлюванням з осаджуванням. При цьому використовують вихідні заготовки меншого діаметру або квадратного перерізу та дещо знижується зусилля деформування.

Метою роботи є встановлення за допомогою методу скінченних елементів впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання з осаджуванням вісесиметричного порожнистого виробу із високовуглецевої сталі.

Розрахунковий аналіз проводили за допомогою моделювання з використанням скінченно-елементної програми DEFORM та циліндричної системи координат. Температура вихідної заготовки із сталі AISI 1060 діаметром  $D_0 = 97$  мм і висотою  $H_0 = 285$  мм становила 1000 °C. Для вказаної сталі рекомендують температурний інтервал штампування у межах 1100–800 °C. Швидкість деформування (швидкість переміщення пуансону) складала  $V_0 = 50, 100, 150, 200, 300$  і 400 мм/сек. Тертя на контактуючих поверхнях враховували по Зібелю з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,25$ . Розміри інструменту, що деформує, який вважався абсолютно жорстким і мав температуру 20 °C, будуть представлені нижче. Процес формоутворення порожнистого виробу виконувався зворотним видавлюванням з одночасним осаджуванням заготовки.

Розрахункові положення деформуючого інструменту в розрізі на різних стадіях видавлювання з осаджуванням показано на рис. 1. Положення інструменту на початку видавлювання зображено на рис. 1,а. Вихідну заготовку 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. Виштовхувач 3 має на торці порожнину для отримання виступу на нижньому торці донної частини виробу. Деформування здійснюється пуансоном 4. Положення на проміжній стадії зображено на рис. 1,б. При опусканні пуансона 4 відбувається формоутворення порожнини і осаджування zdeформованої заготовки. При цьому висота заготовки спочатку зменшується і вона повністю заповнює матрицю по висоті.

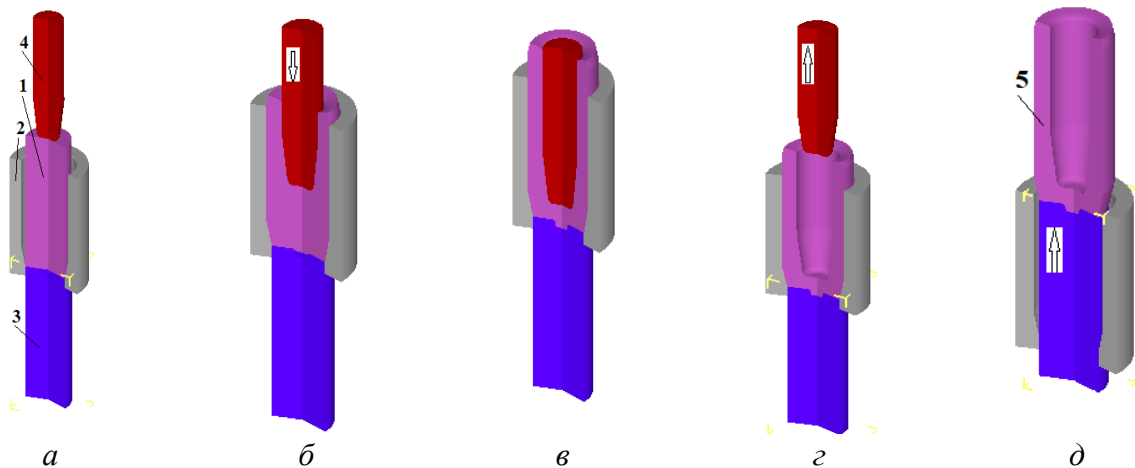


Рис. 1. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні з осаджуванням:

а – на початку видавлювання, б – на проміжній стадії видавлювання, в – в кінці видавлювання, г – після виймання пуансона, д – після виштовхування виробу

Положення після виймання (вилучення) пуансону із zdeформованої заготовки наведено на рис. 1,г, а після виштовхування виробу 5 із матриці 2 – на рис. 1,д.

Силкові режими при видавлюванні з осаджуванням зі швидкістю деформування  $V_0 = 50$  мм/сек наведено на рис. 2. На рис. 2, а зображено залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Графік зусилля має неусталену і усталену стадії. На неусталеній стадії зусилля інтенсивно зростає і сягає величини 2200 кН при переміщенні пуансону 170 мм. На усталеній стадії зусилля збільшується повільно та сягає максимального значення 2410 кН в кінці видавлювання при переміщенні пуансону 259 мм. Аналогічні залежності отримано для інших величин швидкостей деформування. Залежність максимальної величини зусилля видавлювання з осаджуванням від швидкості деформування  $V_0$  показано на рис. 2, б. Із збільшенням величини швидкості з  $V_0 = 50$  мм/сек до  $V_0 = 200$  мм/сек зусилля деформування значно зменшується, а подальше зростання швидкості практично не впливає на величину зусилля. Така залежність пов'язана з охолодженням шарів металу zdeформованої заготовки, які контактують з деформуючим інструментом, про що буде сказано нижче.

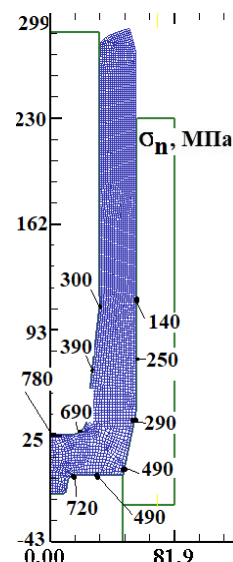


Рис. 3. Розподіли нормальних напружень

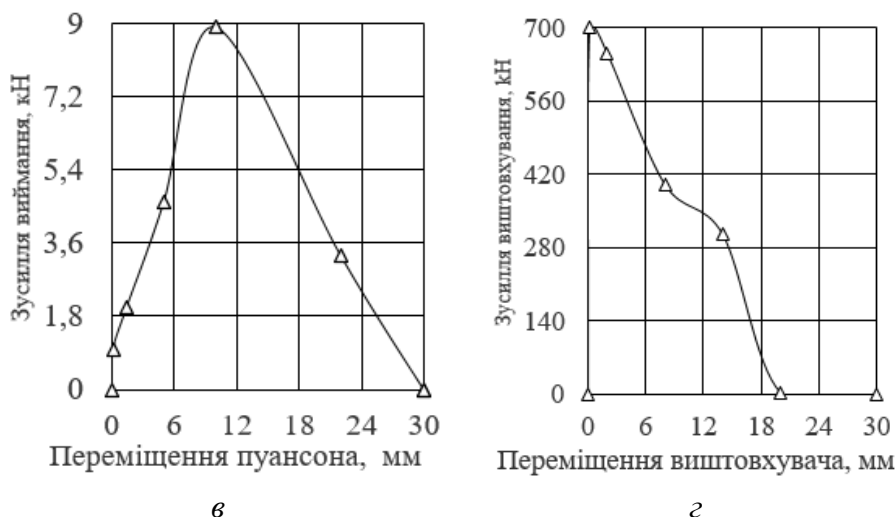


Рис. 2. Силкові режими при видавлюванні з осаджуванням: а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, б – залежність максимальної величини зусилля видавлювання від швидкості деформування, в – залежність зусилля виймання пуансону із zdeформованої заготовки від його зворотного переміщення, г – залежність зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача

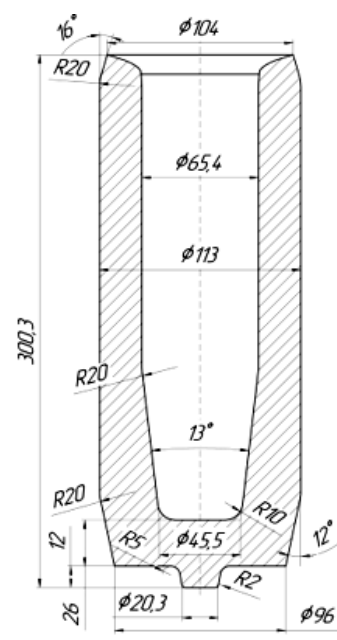


Рис. 4. Форма і розміри виробу

На рис. 2,в наведено залежність зусилля виймання пуансона із zdeформованої заготовки від його зворотного переміщення (див. рис. 1,г). Найбільша величина зусилля виймання складала 8,9 кН. Це приблизно складає 4 % від зусилля видавлювання з осаджуванням. Залежність зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача показано на рис. 2, г. Зусилля сягає максимальної величини 700 кН на початку виштовхування і дорівнює 29 % від максимальної величини зусилля видавлювання з осаджуванням. З урахуванням встановлених силкових режимів для реалізації процесу видавлювання з осаджуванням необхідно використовувати гідравлічний прес зусиллям 2,5 МН з величиною робочого ходу повзуна не менше 260 мм із зусиллям виштовхувача більшим за 700 кН та переміщенням його на меншим за 230 мм. При цьому, з урахуванням встановлених основних розмірів деформуючого інструменту (див. рис. 1) та необхідних підкладних плит і плит штапу, відкрита висота пресу повинна бути 1400 мм.

Для проектування штампового оснащення, крім зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки, потрібно знати розподіл питомих зусиль на контактних поверхнях заготовки з інструментом при максимальному значенні зусилля видавлювання з осаджуванням. Такий розподіл можна отримати по значенням нормальних напружень  $\sigma_n$ , які виникають на контактних поверхнях пуансона, матриці та виштовхувача. Розподіли напружень  $\sigma_n$  наведено на рис. 3. Тут і надалі показано половину здеформованої заготовки, тонкими лініями зображено інструмент, що деформує, а розміри по вісях наведено в міліметрах. На поверхні пуансону із здеформованою заготовкою величини таких напружень отримано у межах  $\sigma_n = 690 \div 780$  МПа, на поверхні матриці –  $\sigma_n = 140 \div 490$  МПа, а на поверхні виштовхувача –  $\sigma_n = 490 \div 720$  МПа. При вказаних питомих зусиллях матриця може бути без бандажів.

Кінцеві форма і розміри виробу представлено на рис. 4. Розміри порожнини визначаються розмірами пуансона, розміри зовнішньої поверхні відповідають розмірам матриці, а розміри торця донної частини дорівнюють розмірам порожнини виштовхувача. На торці стінки виробу має місце утяжина зі сторони порожнини, а на боковій поверхні є певне відхилення від циліндричності. Для отримання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізки.

Розподіли температури  $T(^{\circ}C)$  по об'єму здеформованої заготовки в кінці видавлювання з осаджуванням зображено на рис. 5. При деформуванні зі швидкістю  $V_o = 50$  мм/сек має місце інтенсивне охолодження здеформованого металу (рис. 5, а). В шарах металу стінки зі сторони порожнини температура отримана у межах  $T = 700 \div 800$   $^{\circ}C$ , а в шарах металу зі сторони бокової поверхні –  $T = 610 \div 770$   $^{\circ}C$ . Аналогічні величини температури отримано в зоні торця пуансону та поблизу поверхні виштовхувача. Тому при цій швидкості отримано максимальне зусилля деформування (див. рис. 2,б). В самій стінці і донній частині отримано  $T = 930 \div 1000$   $^{\circ}C$ . Збільшення швидкості деформування призводить до зменшення охолодження металу у шарах металу зі сторони порожнини та зі сторони бокової поверхні стінки, а також в зоні під торцем пуансону та біля контактної поверхні виштовхувача. При формоутворенні зі швидкістю  $V_o = 100$  мм/сек (рис. 5,б) температура у стінці сягає  $T = 940 \div 1000$   $^{\circ}C$ . В шарах металу зі сторони порожнини отримано  $T = 940$   $^{\circ}C$ , а в шарах зі сторони бокової поверхні –  $T = 740$   $^{\circ}C$ . Таким чином, вказані шари металу деформуються в умовах напівгарячої деформації. Збільшення швидкості деформування до  $V_o = 150$  мм/сек призводить до розширення області з температурою металу  $T = 1000$   $^{\circ}C$  (рис. 5, в). Подальше зростання швидкості деформування забезпечує формоутворення виробів в умовах гарячої деформації, що показано на рис. 5, в–е. При цьому має місце незначне підвищення температури здеформованого металу за рахунок виділення тепла при пластичній деформації. Очевидно, що видавлювання з осаджуванням наступних заготовок в штампі призведе до розігріву інструменту, що деформує, та необхідності застосування для нього примусового охолодження.

Для розглянутих величин швидкостей деформування встановлено напружено-деформований стан металу в кінці видавлювання з осаджуванням. Розподіли осьових  $\sigma_z$ , радіальних  $\sigma_r$ , тангенціальних  $\sigma_{\theta}$  та інтенсивності  $\sigma_i$  напружень при деформуванні зі швидкістю  $V_o = 50$  мм/сек зображено на рис. 6. В осередку деформації під пуансоном та між конусною частиною пуансону і матрицею осьові  $\sigma_z$  (рис. 6,а), радіальні  $\sigma_r$  (рис. 6,б) і тангенціальні  $\sigma_{\theta}$  (рис. 6, в) напруження є такими, що стискають, та суттєво зменшуються за абсолютною величиною у циліндричній частині стінки. У донній частині під торцем пуансона осьові напруження отримано у межах  $\sigma_z = -360 \div -840$  МПа, радіальні –  $\sigma_r = -380 \div -730$  МПа, тангенціальні –  $\sigma_{\theta} = -370 \div -660$  МПа. При цьому вигляд розподілів для напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_{\theta}$  практично однаковий. Осередок деформації охоплює всю донну частину здеформованої заготовки, що видно з розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (рис. 6,г) В цій частині інтенсивність напружень отримано у межах  $\sigma_i = 140 \div 165$  МПа.

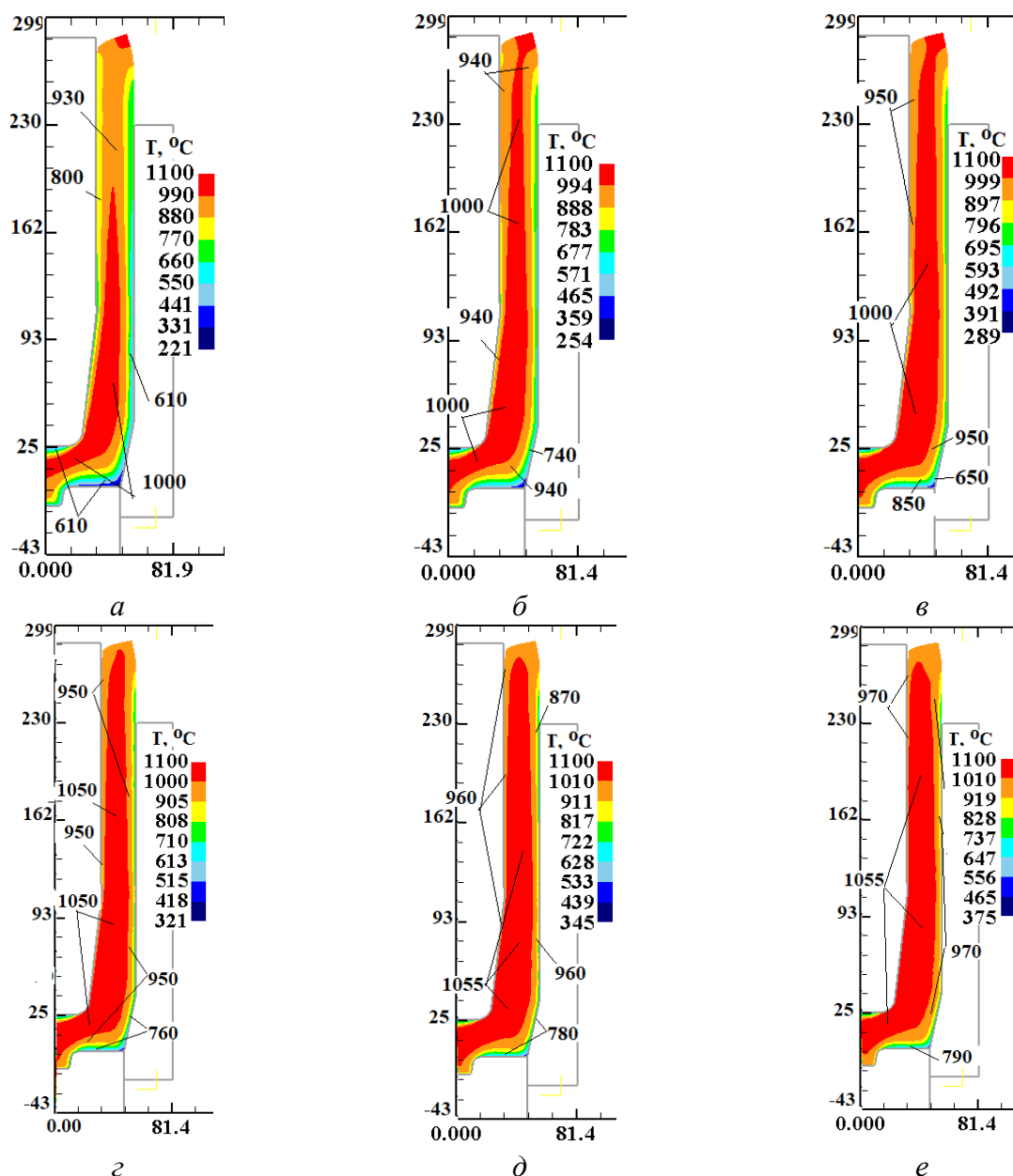


Рис. 5. Розподіли температури  $T(^{\circ}C)$  у здеформованому металі в кінці видавлювання з осаджуванням із різними швидкостями деформування:

$a - V_0 = 50$  мм/сек,  $б - V_0 = 100$  мм/сек,  $в - V_0 = 150$  мм/сек,  $г - V_0 = 300$  мм/сек,  $е - V_0 = 400$  мм/сек

Розподіли кінцевих осьових  $\epsilon_z$ , радіальних  $\epsilon_r$ , тангенціальних  $\epsilon_{\theta}$  та інтенсивності  $\epsilon_i$  деформацій представлено на рис. 7. У донній частині напівфабрикату безпосередньо під торцем пуансону виникають значні осьові деформації, що стискають, величиною у межах  $\epsilon_z = -0,6 \div -2,4$  (рис. 7, а). При формоутворенні виступу на донній частині ці деформації стають розтягувальними та сягають значень  $\epsilon_z = 0,4$ . У шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано  $\epsilon_z = -1$ , а по товщині стінки виникають розтягувальні деформації  $\epsilon_z$ . Радіальні деформації, що наведені на рис. 7,б, у циліндричній і конусній частинах стінки є стискаючими і сягають величини  $\epsilon_r = -0,88$  у шарах металу зі сторони порожнини та змінюються по товщині в напрямку бокової поверхні до величини  $\epsilon_r = -0,4$ . В області донної частини поблизу вісі симетрії виникають розтягувальні радіальні деформації у межах  $\epsilon_r = 0,3 \div 0,8$ . Тангенціальні деформації у стінці і у донній частині під торцем пуансону є також розтягувальними (рис. 7, в). При цьому у шарах металу стінки біля зовнішньої поверхні вони отримано величину  $\epsilon_{\theta} = 0,3$  з поступовим збільшенням до  $\epsilon_{\theta} = 1,2$  в шарах металу зі сторони порожнини. По об'єму донної частини ці дефо-

рмації отримано у межах  $\varepsilon_{\theta} = 0,05 \div 1,6$ , а у виступі донньої частини такі деформації є стискаючими та сягають величини  $\varepsilon_{\theta} = -0,14$ . Пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією можна оцінити з розподілу інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$ , який наведено на рис. 7, з. По ширині циліндричної і конусної частин стінки має місце інтенсивне пропрацювання у шарах металу зі сторони порожнини ( $\varepsilon_i = 1,2$ ) з подальшим зменшенням по ширині стінки до  $\varepsilon_i = 0,43$  в шарах металу біля зовнішньої поверхні. Також інтенсивне пропрацювання відбувається в донній частині під торцем пуансона. Тут величини деформації знаходяться у межах  $\varepsilon_i = 0,43 \div 2,1$ . У виступі донньої частини отримано  $\varepsilon_i = 0,11 \div 0,37$ . Формоутворення одночасним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу в цілому та отримання більш рівномірного розподілу інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

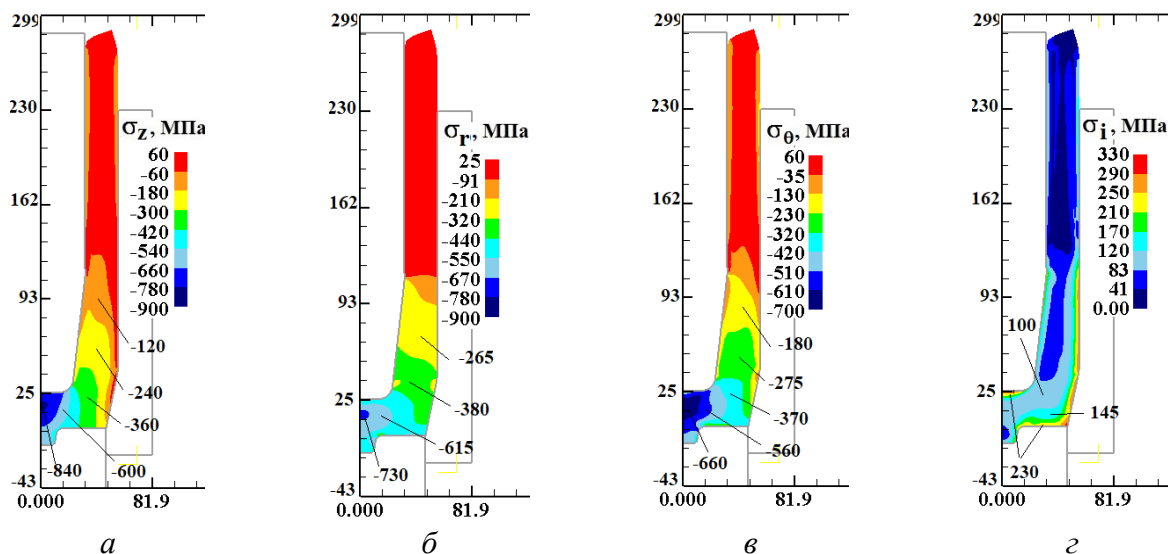


Рис. 6. Розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці в кінці видавлювання з осаджуванням:

*a* – розподіл  $\sigma_z$ , *б* – розподіл  $\sigma_r$ , *в* – розподіл  $\sigma_{\theta}$ , *г* – розподіл  $\sigma_i$

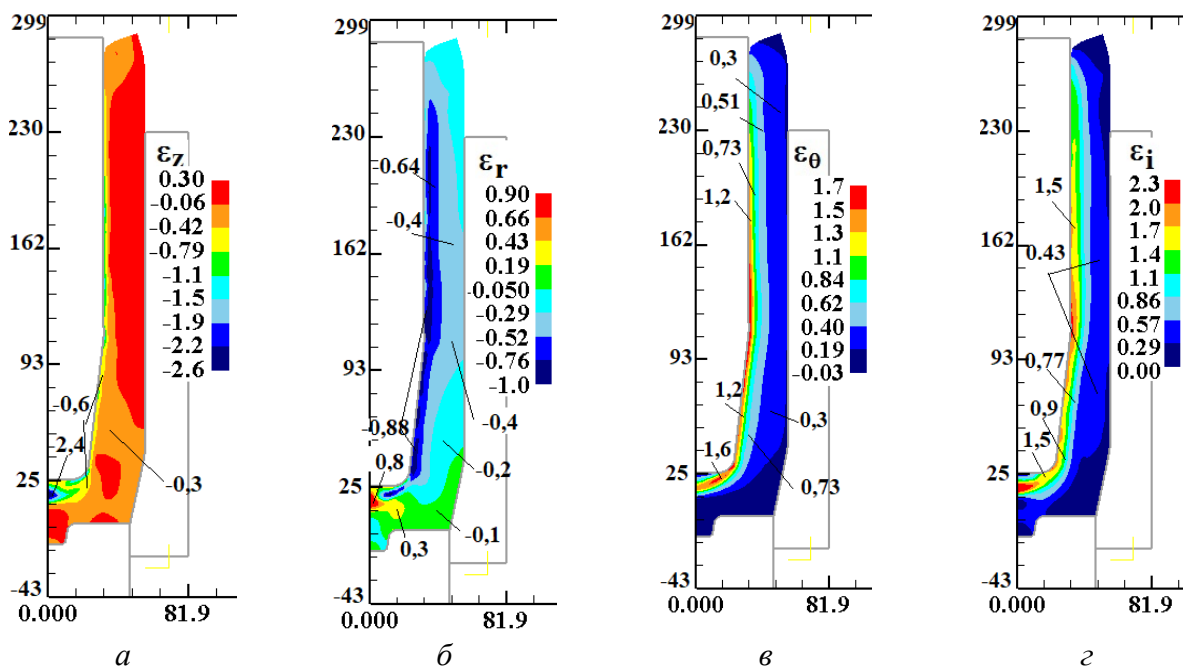


Рис. 7. Розподіли кінцевих осьових  $\varepsilon_z$ , радіальних  $\varepsilon_r$ , тангенціальних  $\varepsilon_{\theta}$  та інтенсивності  $\varepsilon_i$  деформацій після видавлювання з осаджуванням:

*a* – розподіл  $\varepsilon_z$ , *б* – розподіл  $\varepsilon_r$ , *в* – розподіл  $\varepsilon_{\theta}$ , *г* – розподіл  $\varepsilon_i$



## ВИСНОВКИ

Наведено результати скінченно-елементного моделювання по визначенню впливу швидкості деформування величиною 50, 100, 150, 200, 300 і 400 мм/сек на процес гарячого формоутворення одночасним зворотним видавлюванням з осаджуванням осесиметричного порожнистого виробу із високовуглецевої сталі. Встановлено силові режими вказаних процесів, розподіли питомих зусиль на інструменті, що деформує. Зростанням швидкості деформування з 50 до 200 мм/сек призводить до значного зменшення зусилля формоутворення. Подальше збільшення швидкості практично не впливає на величину зусилля. Для кінцевої стадії видавлювання з осаджуванням встановлено розподіли температури, компонент напружень і деформацій у металі здеформованої заготовки. Визначено температуру охолодження в шарах металу, розташованих поблизу контактуючих поверхонь з інструментом.

Встановлено кінцеві форма та розміри виробу. Для одержання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізання. Проробку структури металу гарячою пластичною деформацією оцінено за величиною інтенсивності деформацій у стінці та донній частині виробу. Одночасне формоутворення зворотним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією і знижує нерівномірність інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x
2. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж - 51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.
3. Bhaduri A. Extrusion. In: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13)
4. Алієв І. С., Грудкіна Н. С., Малій Х. В., Таган Л. В. Моделювання та розробка процесів точного штампування видавлюванням: монографія. Краматорськ : ДДМА. 2021. 210 с. ISBN 978-617-7889-08-2.
5. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х. т. Москва: Машиностроение. 1986. Т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е. И. Семенова. 1986. 592 с.
6. Гусинский В. И., Мулин В. П., Новиков В. В. Влияние скорости деформирования на усилие холодного обратного выдавливания. В кн. *Совершенствование процессов и оборудования для холодного деформирования*. Воронеж: ЭНИКМАШ. 1978. С. 19–23.
7. Neugebauer R., Bouzakis K.-D., Denkena B., et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. 60, pp. 627–650.
8. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: *collective monograph "Meatronics"*. Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81–100. ISBN: 978-1-032-10585-7. DOI: 10.1201/9781003225447
9. Данченко В. Н., Миленин А. А, Кузьменко В. И. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии. 2008. 448 с.
10. Kaliuzhnyi V. L., Alieva L. I., Kartamyshv D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts, *Metallurgist*. 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
11. Алиев И. С., Жбанков Я. Г. Методы расчета процессов горячего пластического деформирования и совершенствование технологийковки крупных поковок: монография. Краматорск : ДДМА. 2020. 192 с. ISBN 978-966-379-910-0
12. Калюжний В. Л., Ярмоленко О. С., Малій Х. В. Гаряче штампування сталевих порожнистих виробів з інтенсивною пластичною деформацією стінки і донної частини. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2020. 1 (50). С. 98–103.
13. Алиева Л. И., Калюжний В. Л., Картамышев Д. О., Моисеева А. М., Сивак Р. И. Дослідження напружено-деформованого стану порожнистих виробів при комбінованому видавлюванні з роздачею. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, 2019. 2 (49). С. 14–22.

## REFERENCES

1. Aliev I.S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x
2. Aliieva L. I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Tiraj – 51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (in Russian).

3. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13)
4. Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Malii Kh.V., Tahan L.V. Modeling and development of the processes of precise volumetric stamping for various purposes: monograph. Kramatorsk: DSEA, 2021. 210 p. ISBN 978-617-7889-08-2 (*in Russian*).
5. Forging and stamping. Handbook. In 4 t., T. 2. Hot stamping. Ed. Semenov E.I. Moscow: Mechanical Engineering. 1987. 592 p. (*in Russian*).
6. Gusinsky V.I., Mulin V.P., Novikov V.V. Influence of the strain rate on the force of cold reverse extrusion. In book. Improvement of processes and equipment for cold deformation. Voronezh: ENIKMASH. 1978, pp. 19-23. (*in Russian*).
7. Neugebauer R., Bouzakis K.-D., Denkena B., et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. 60, pp. 627-650.
8. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: collective monograph "Mechatronics". Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81-100. ISBN: 978-1-032-10585-7. DOI: 10.1201/9781003225447
9. Danchenko V.N., Milenin A.A., Kuzmenko V.Y. Computer design of processes of treatment of metals pressure. Numeral methods. Dnipropetrovsk: System technologies. 2008. 448 p. (*in Russian*).
10. Kaliuzhnyi V. L., Alieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts, *Metallurgist*. 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
11. Aliiev I.S., Zhibankov Ya.G. Methods for calculating the processes of hot plastic deformation and improving the technology of forging large forgings: a monograph. Kramatorsk: DDDMA. 2020. 192 p. ISBN 978-966-379-910-0 (*in Russian*).
12. Kaliuzhnyi V. L., Yarmolenko O. S., Malii Kh. V. Hot stamping of steel empty molds with intense plastic deformation of the wall and bottom part. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1 (50), pp. 98-103. (*in Russian*).
13. Aliieva L. I., Kaliuzhnyi V. L., Kartamyshev D. O., Moiseeva A. M., Sivak R. I. Follow-up of a stress-strained mill of empty bins with a combined type of injection with distribution. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2019. 2 (49), pp. 14-22. (*in Russian*).

**Kaliuzhnyi V. L., Levchenko V. M., Yarmolenko O. S., Tahan L. V. The influence of the deformation rate on the hot extrusion of axisymmetric hollow product**

*The influence of the deformation rate on the process of hot backward extrusion with a setting made of high-carbon steel of an axisymmetric hollow product with a projection on the end of the bottom part was studied using finite element modeling. The speed of movement of the punch varied from 50 to 400 mm/sec. A computational analysis of the processes of extrusion with setting, the processes of extracting punches from deformed workpieces and the processes of pushing products out of dies was carried out. The dependence of the force of extrusion vs the movement of the punch, the dependence of the force of extraction of the punch vs its reverse movement and the dependence of the force of pushing the product out of the die vs the movement of the knock-out are established. The distribution of specific forces on the ends of the punch and the knock-out and along the height of the die surface are determined by the values of the normal stresses. Increasing in the rate of deformation from 50 to 200 mm/sec leads to a significant decreasing the force of deformation. Further growth of speed practically does not affect the amount of force. Recommendations for choosing press equipment are given. For the final stage of extrusion with setting, temperature distributions, the stress component and deformations in the deformed metal are shown. The cooling temperature in the metal layers located near the contacting surfaces, is determined. The final shape and dimensions of the product are established. To obtain a smooth end of the wall, an additional operation of cutting it is necessary. The processing of the metal structure by plastic deformation is estimated by the magnitude of the intensity of the deformations in the wall and the bottom part of the product. Simultaneously forming by backward extrusion with setting leads to more intensive processing of the metal structure by plastic deformation and reduces the unevenness of the intensity of deformations along the width of the product wall.*

**Key words:** hot extrusion with setting, hollow product, finite element method, deformation rate, force, temperature, stress, deformation.

**Калиужный В. Л., Левченко В. Н., Ярмоленко А. С., Таган Л. В. Влияние скорости деформирования на горячее выдавливание осесимметричного полого изделия**

*Моделированием методом конечных элементов изучено влияние скорости деформирования на процесс горячего обратного выдавливания с осадкой из высокоуглеродистой стали осесимметричного полого изделия с выступом на торце донной части. Скорость перемещения пуансона изменялась от 50 до 400 мм/сек. Проведен расчетный анализ процессов выдавливания с осадкой, процессов извлечения пуансонов из деформированных заготовок и процессов выталкивания изделий из матриц. Установлены зависимости усилия выдавливания, от перемещения пуансона, зависимости усилия извлечения пуансона от его обратного перемещения и зависимости усилия выталкивания изделия из матрицы от перемещения выталкивателя. По величинам нормальных напряжений определены распределения удельных усилий на торцах пуансона, выталкивателя и по высоте поверхности матрицы. Увеличение скорости деформирования с 50 до 200 мм/сек приводит к существенному снижению усилия деформирования. Дальнейший рост скорости практически не влияет на величину усилия. Приведены рекомендации по выбору прессового оборудования. Для конечной стадии выдавливания с осадкой показаны распреде-*



ления температуры, компонент напряжений и деформаций в деформированном металле. Определена температура остывания в слоях металла, расположенных вблизи контактирующих поверхностей. Установлены конечные форма и размеры изделия. Для получения ровного торца стенки необходима дополнительная операция его подрезки. Проработка структуры металла пластической деформацией оценена по величине интенсивности деформаций в стенке и донной части изделия. Одновременное формообразование обратным выдавливанием с осадкой приводит к более интенсивной проработке структуры металла пластической деформацией и снижает неравномерность интенсивности деформаций по ширине стенки изделия.

**Ключевые слова:** горячее выдавливание с осадкой, полое изделие, метод конечных элементов, скорость деформирования, усилие, температура, напряжение, деформация.

**Калюжний Владимир Леонидович** – д-р техн. наук, профессор НТУУ

**Kaliuzhnyi Vladymyr** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of NTUU

**Калюжний Володимир Леонідович** – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: kwl\_2011@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-8879>

**Левченко Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИПЭ им. А. Я. Усикова НАНУ

**Levchenko Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU

**Левченко Володимир Миколайович** – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ

E-mail: goldangel271@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2411-4198>

**Ярмоленко Александр Сергеевич** – аспирант НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»

**Yarmolenko Oleksandr** – aspirant of NTUU

**Ярмоленко Олександр Сергійович** – аспірант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: olesboxme@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6568-4963>

**Таган Любовь Викторовна** – канд. техн. наук, ст. препод. ДГМА

**Tahan Liubov** – PhD, Senior Lecturer of DSEA

**Таган Любов Вікторівна** – канд. техн. наук, ст. викл. ДДМА

E-mail: l.vik.tagan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-2142>

НТУУ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», м. Київ

NTUU – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Kyiv

НТУУ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків

Ya. Usikov IRE of NASU – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

ІПЭ ім. А. Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики і електроніки ім. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков

*Статья поступила в редакцию 13.05.22 г.*