

УДК 621.777.4

Алієв І. С.  
Левченко В. М.  
Кузенко О. А.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ

Радіальне видавлювання – це операція, при якій відбувається збільшення діаметра заготовки на частини її висоти шляхом витіснення матеріалу в радіальну порожнину, розташовану по периметру бокової поверхні заготовки [1]. Процес радіального видавлювання призначений, в основному, для отримання деталей з фланцями як зовнішніми, так і внутрішніми. Аналіз характеру зміни сил видавлювання показує, що при зменшенні висоти робочої порожнини (товщини фланця) різко зростає тиск, що пов'язано зі збільшенням ступеня деформації. Вплив діаметральних розмірів фланця у всіх випадках радіального видавлювання однаковий: збільшення зовнішнього діаметра фланця однозначно пов'язане з величиною робочого ходу пуансона і супроводжується плавним зростанням робочих навантажень [1, 2]. Вплив радіусу заокруглення кутів матриці на значення сил радіального видавлювання носить більш складний характер. При збільшенні значень радіуса заокруглення знижуються сили в початковій стадії процесу, так як при цьому для заповнення порожнини і формування осередку деформації необхідно більше часу. У міру розвитку процесу після досягнення металом плоскопаралельної ділянки кругової порожнини, відмінності в силах згладжуються. Можливості процесу радіального видавлювання також обмежуються виникненням тріщин і руйнуванням фланців на периферійній стоншеній частині. Це обумовлено впливом різноманітної схеми напруженого стану на крайку фланця з одним (окружним) напруженням, що розтягує. Граничний ступінь деформації залежить від пластичних властивостей матеріалу заготовки, висоти фланця, радіуса перехідної ділянки напівматриці: чим вище відносні значення цих параметрів, тим більший граничний діаметр фланця можна отримати [3].

Процеси радіального видавлювання мають велику кількість кінематичних схем їх здійснення і відрізняються різноманітністю деталей. Особливістю процесів радіального видавлювання є складний режим силового впливу як на заготовку, що деформується, так і на елементи штампного оснащення [4]. Завданням теоретичного аналізу процесів видавлювання в закритих матрицях є визначення сили видавлювання і сили розкриття матриці. На силовий режим процесу видавлювання вплив надають такі чинники: умови контактного тертя; геометрія радіальної порожнини; геометрія перехідних кромки матриці, а на працездатність штампів з роз'ємними матрицями має значний вплив сила розкриття [5]. Встановлено, що найбільша точність розмірів і форми видавлених деталей досягається застосуванням процесів закритого радіального видавлювання. Недоліком процесу є значне зростання сил деформування, що може призвести до заклинювання та навіть поломки штампів з дорогого металу і розкриття на заключній стадії заповнення гравюри матриці [6]. Застосовують закрите радіальне видавлювання для створення сприятливого силового режиму з компенсаційними порожнинами, що дозволяють знизити навантаження на інструмент [7].

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану, а також моделювання силового режиму процесу закритого радіального видавлювання фланця з компенсатором.

На рис. 1 розглядаються схеми закритого радіального видавлювання з компенсатором з односторонньою подачею: половина схеми (а) і отримана деталь (б).

Обрані наступні параметри для моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця на кінці стрижня за допомогою програми на основі методу скінченних елементів QForm 2D/3D [4, 8]:

– механічні властивості матеріал заготовки АМцМ: крива істинних напружень описується рівнянням  $\sigma_s(\varepsilon) = 188,4 \cdot \varepsilon^{0,15}$ , межа плину  $\sigma_{0,2} = 105$  МПа, модуль Юнга  $E = 75000$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,3$  і коефіцієнт тертя між матеріалом заготовки і інструментом  $\mu = 0,08$  (закон Зібеля).

– геометричні параметри процесу:  $R_0$  – радіус заготовки ( $R_0 = 18$  мм),  $R$  – радіус фланця ( $R = 36$  мм),  $h$  – висота приймальної порожнини для фланця, що видавлюється,  $h/R_0$  – відносна висота фланця ( $h/R_0 = 0,65$ ),  $h_1$  – висота компенсатора інструменту,  $h_1/h$  – відносна висота компенсатора ( $h_1/h = 0,08; 0,12; 0,16$ ),  $r$  – радіус заокруглення кромки інструменту ( $r = 2,0$  мм),  $L$  – висота заготовки ( $L = 70$  мм).

– силові параметри процесу:  $P$  – сила видавлювання,  $Q$  – сила розкриття матриці,  $V$  – швидкість пуансона.

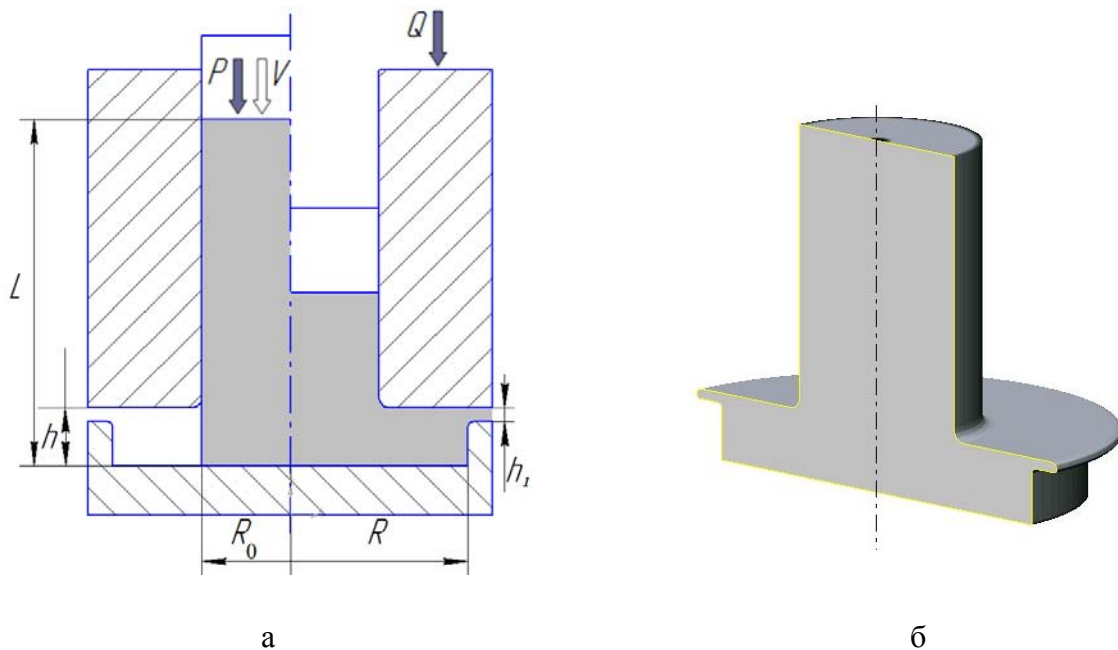


Рис. 1. Схема процесу радіального видавлювання фланця на кінці стрижня з компенсатором (а) і отримана деталь (б)

На рис. 2 представлено результати моделювання процесу радіального видавлювання при  $h/R_0 = 0,65$  такі, як викривлення діляльної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_1$  (б) і напружень  $\sigma_1$ , МПа (в) за ходом деформування.

Розподіл інтенсивності деформації показує, що максимальне значення зосереджено в нижній частині осередку деформації  $\varepsilon_1 = 4,5$ . Також з розподілу інтенсивності напружень видно, що максимальне значення  $\sigma_1 = 200$  МПа ( $h_1/R_0 = 0,1$ ).

З графіка залежності сили процесу від ходу пуансона (рис. 3, а) видно, що при кожному зі значень відношення висоти компенсатора до висоти фланця ( $h_1/h = 0,08$  – для кривої 1;  $0,12$  – кривої 2;  $0,16$  – кривої 3) відбувається плавне збільшення сили до  $P = 400$  кН при ході  $S = 24$  мм, а потім сила різко зростає і досягає найбільших значень при ході  $S = 36 \dots 37$  мм для різних кривих. Найбільше значення сили для кривої 1 –  $P = 1350$  кН, для кривої 2 –  $P = 1200$  кН, для кривої 3 –  $P = 1000$  кН. Це пояснюється тим, що до величини ходу  $S = 24$  мм відбувається заповнення металом заготовки радіальної порожнини в півматрицях, тому сила зростає повільно, а потім сила зростає інтенсивно через примусове заповнення невеликої порожнини компенсатору (зі зменшенням значення висоти компенсатору збільшується сила видавлювання). Окрім дослідження впливу висоти компенсатору на силу радіального видавлювання також досліджувався її вплив на силу розкриття матриці (рис. 3, б). Зі збільшенням відносної висоти компенсатору від  $h_1/h = 0,08$  (крива 1) до  $h_1/h = 0,16$  (крива 3) сила розкриття матриці зменшується.

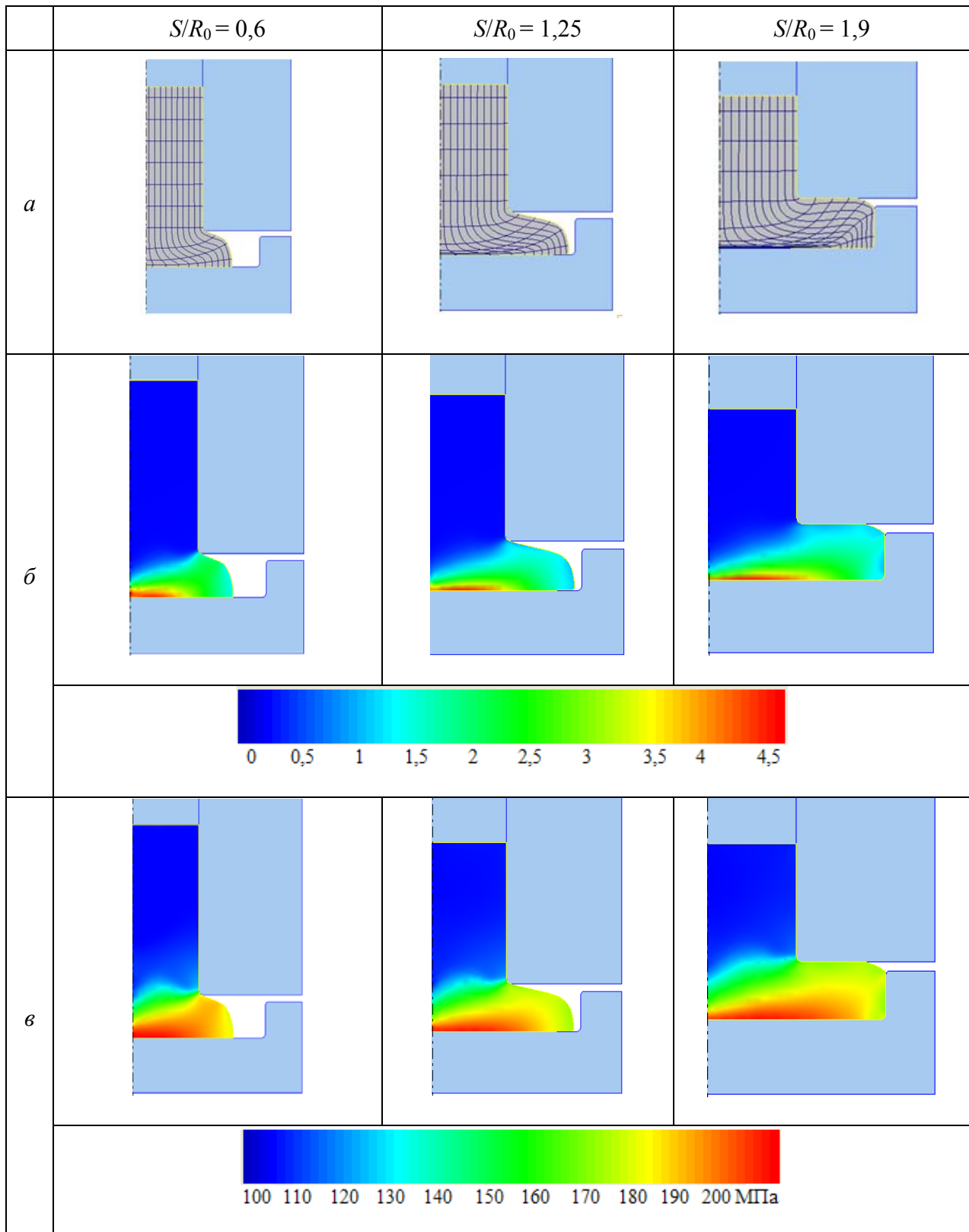


Рис. 2. Викривлення ділительної сітки (*a*), розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (*б*), розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (*в*) за ходом деформування при радіальному видавлюванні фланця на кінці стрижня –  $h_1/R_0 = 0,1$  при  $h/R_0 = 0,65$ ;  $\mu = 0,08$

Як зменшується сила радіального видавлювання на пуансоні та сила розкриття матриці в залежності від збільшення відносної висоти компенсатору, можна побачити відповідно на рис. 4.

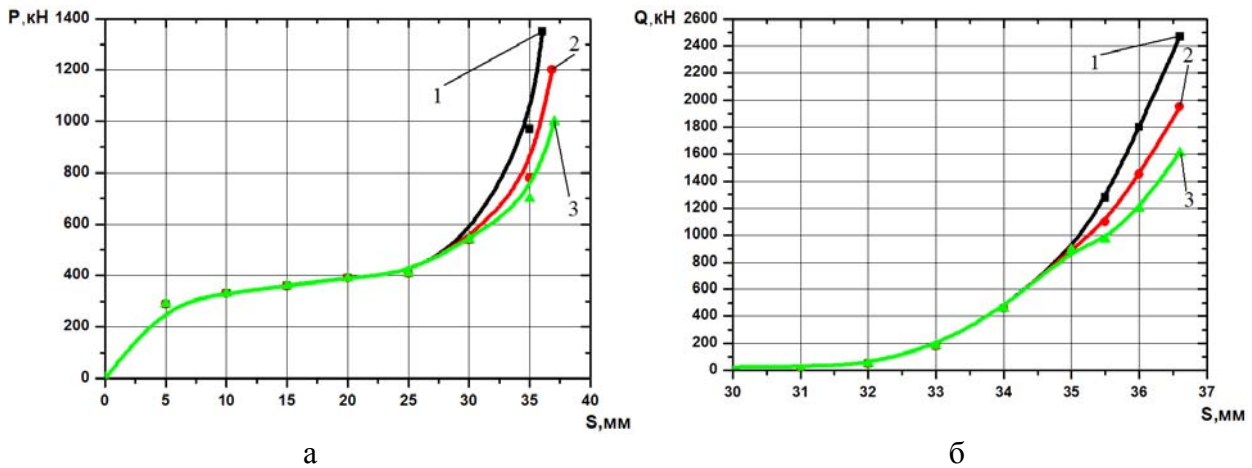


Рис. 3. Графік залежності сили процесу радіального видавлювання (а) та сили розкриття напівматриці (б) від ходу пуансона:

1 –  $h_1/h = 0,08$ ; 2 –  $h^2/h = 0,12$ ; 3 –  $h_1/h = 0,16$ ; при  $r = 2,0$  мм

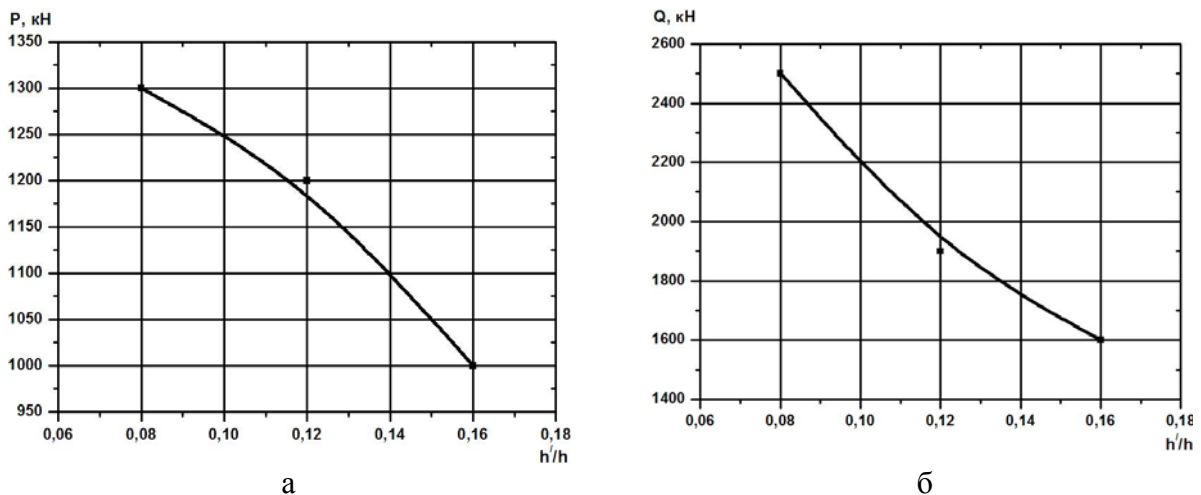


Рис. 4. Графік залежності сили видавлювання (а) та сили розкриття напівматриці (б) від відносної висоти компенсатора до висоти фланця при  $r = 2,0$  мм

Окремо досліджували питання залежності сили розкриття матриці при видавлюванні фланця за ходом процесу та при зворотному ході пуансона. В пакеті QForm 2D/3D методом скінчених елементів розраховували сили розкриття матриці в залежності від ходу пуансона при радіальному видавлюванні деталей з різною висотою фланців. Для розрахунків використовували циліндричну заготовку з діаметром 25 мм та висотою 50 мм, діаметр фланця, що видавлюється, дорівнював 45 мм. Матеріал заготовки – сталь 10, інструмента – сталь 40X. Обладнання – гідравлічний прес зусиллям 50 МН, швидкість деформування – 1 мм/с. Крок розрахунків для видавлювання – 0,1 мм, крок для зворотного ходу – 0,001 мм. Сітка будувалась на заготовці (пружно-пластичне середовище) та півматриці (пружне середовище), параметри сітки обирались програмою QForm 2D/3D автоматично.

Аналіз отриманих кривих для фланців з товщиною 6, 8, 10, 12 та 14 мм (рис. 5) показав, що сила розкриття матриць збільшується зі збільшенням висоти фланцю. Крім того, з певного моменту має місце зміна напрямку її дії. Це можна пояснити тим, що спочатку навантаження на півматрицю визначається діями контактних напружень з жорсткою зоною заготовки під пуансоном, яка має на початку процесу видавлювання велику висоту, а фланець, що формується, навпаки, має малий радіус. Потім за ходом пуансона вплив напружень, що притискають півматрицю, зменшується, а напружень розпору від фланця вже з відносно великим радіусом зростає, і сила розкриття змінює напрям та становиться умовно від'ємною, тобто спрямованою на розкриття матриці (див. рис. 5).

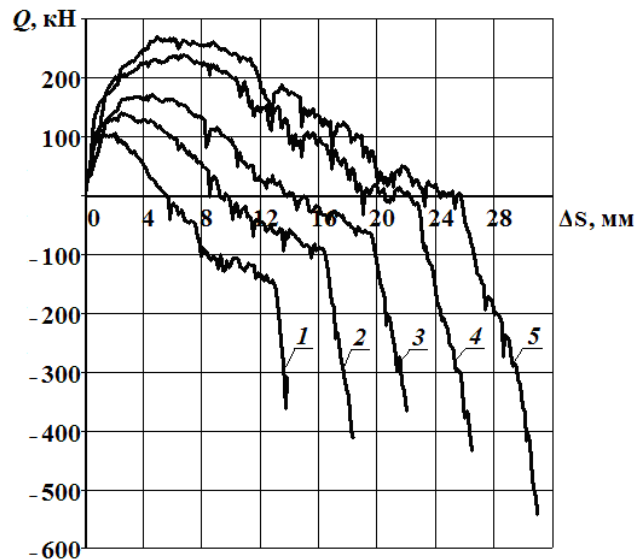


Рис. 5. Графіки зміни сили розкриття матриці  $Q$  від ходу пуансона  $\Delta S$  при видавлюванні для різної товщини фланця  $h$ :

1 – 6 мм; 2 – 8 мм; 3 – 10 мм; 4 – 12 мм; 5 – 14 мм

Також в роботі розглядали питання щодо явища підскоку сили розкриття матриці пуансона після зняття основного навантаження в момент закінчення операції видавлювання [4]. Виявлено, що при цьому сила розкриття матриці може достатньо істотно зростати внаслідок пружної віддачі технологічної системи «штамп-заготовка» (рис. 6).

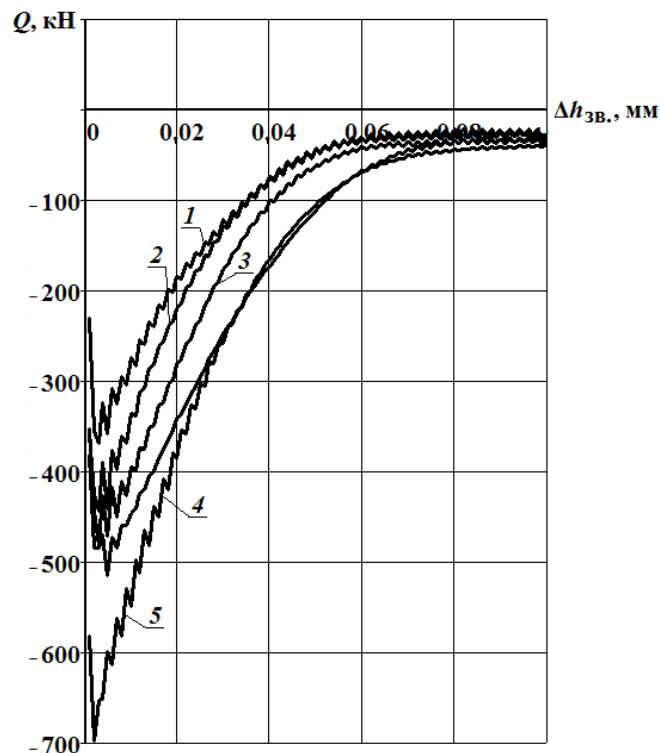


Рис. 6. Графіки зміни сили  $Q$  розкриття матриці від зворотного ходу пуансона  $\Delta h_{зв}$  для різної товщини фланця  $h$ :

1 – 6 мм, 2 – 8 мм, 3 – 10 мм, 4 – 12 мм, 5 – 14 мм

Проведені в QForm розрахунки для деталей з різною товщиною фланцю дозволили оцінити збільшення сили розкриття матриць на початку зворотного руху пуансона. Наведені в табл. 1 результати показують, що в залежності від товщини фланця ця сила може зростати

порівняно з максимальним її значенням при видавлюванні від декілька відсотків (для тонких фланців) до майже 30 % для товстих. Зростання сили розкриття матриці при зворотному русі пуансона можна пояснити дією пружної частини деформації заготовки, яка намагається вивільнитися, внаслідок раптового зняття навантаження на пуансон.

Також проаналізовано вплив розміру радіусу кромки матриці на силу розкриття матриці. Встановлено, що при його збільшенні відносно зростання сили розкриття матриці при розвантаженні на зворотному ході пуансона може становити від декілька відсотків для малих радіусів до десятків відсотків для великих та зростати майже на третину (див. табл. 2).

Таблиця 1

Розрахункове відносне зростання сили розкриття матриці при радіальному видавлюванні фланця для радіусу кромки матриці  $r = 3$  мм

Товщина фланця $h$ , мм	6	8	10	12	14
Відносне зростання сили розкриття матриці, %	2,0	9,6	16,3	21,5	24,8

Таблиця 2

Розрахункове відносне зростання сили розкриття матриці при радіальному видавлюванні фланця товщиною  $h = 10$  мм для різних радіусів кромки матриці

Радіус кромки $r$ , мм	1	2	3	4	5
Відносне зростання сили розкриття матриці, %	8,4	14,0	16,3	19,9	28,3

Підвищення сили розкриття має піковий характер та має місце на початковій стадії зворотного ходу пуансона (див. рис. 6), потім воно поступово зменшується. Незважаючи на таку короткотермінову дію зростання сили розкриття при розвантаженні, це може призвести до негативних наслідків у вигляді видавлювання металу на дзеркало півматриць або навіть руйнування інструменту [9]. Тому цю особливість потрібно враховувати при проектуванні штампного оснащення для видавлювання з роз'ємними матрицями, наприклад, введенням операції підсадки фланця зближенням півматриць на заключній стадії процесу [10].

## ВИСНОВКИ

Моделюванням процесу закритого радіального видавлювання з компенсатором методом МСЕ встановлено закономірності напружено-деформованого стану і виявлені зони інтенсивної деформації та залежність сил деформування і розкриття матриці від геометричних параметрів. Найбільші значення інтенсивності деформацій зосереджені у нижнього торця деталі з фланцем.

Встановлено, що з ходом пуансону збільшується як сила видавлювання, так і сила розкриття матриці, а зі збільшенням відносної висоти компенсатору сила видавлювання на пуансоні та сила розкриття матриці зменшуються.

Виявлено, що зняття деформуючої сили пуансону сила розкриття матриці достатньо помітно зростає під впливом пружної віддачі системи «штамп-заготовка».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.
2. Алиева Л. И. Силовые режимы радиального выдавливания деталей с высоким фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // КШП. ОМД. – 2010. – № 4. – С. 24–26.
3. Balendra R. Injection forging: Engineering and research / R. Balendra, Y. Qin // Journal of Materials Processing. – 2004. – 145. – P. 189–206.

4. Применение пакета QForm для оценки усилия раскрытия матрицы при выдавливании деталей с фланцем / И. С. Алиев, В. Н. Левченко, В. Л. Калужный, П. Б. Абхари, Н. В. Биба // *Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів ОМТ» 21–23 листопада 2018.* – Харків, 2018. – С. 10–11.

5. Смуров А. М. Из опыта разработки, освоения и внедрения штампов с разъемной матрицей для металло-экономной штамповки / А. М. Смуров // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1992. – № 6. – С. 5.

6. Алиев И. С. Оценка силовых параметров поперечного выдавливания / И. С. Алиев, О. К. Савченко // *Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства.* – Тула : ТПИ, 1989. – С. 67–72.

7. Эдуардов М. С. Штамповка в закрытых штампах / М. С. Эдуардов. – Л. : Машиностроение, 1971. – 240 с.

8. QForm – универсальная и эффективна программа для моделирования коки и штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков, П. С. Мордвинцев // *КШП. ОМД.* – 2011. – № 1. – С. 36–42.

9. Разработка штампов для выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, Л. И. Алиева, И. С. Алиев, А. А. Еремينا // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Караматорськ : ДГМА, 2016.* – № 1(42). – С. 223–231.

10. А. с. № 1038050. В21 J 13/2. Штaмп для радиального выдавливания / И. С. Алиев, К. Д. Махмудов. – № 3435062/25–27 ; заявл. 07.05.82 ; опубл. в Б. И. – 1983. – № 32. – С. 38.

## REFERENCES

1. Aliiev I. S. Tehnologicheskie processy holodnogo poperechnogo vydavlivaniya / I. S. Aliiev // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo.* – 1988. – № 6. – S. 1–4.

2. Aliieva L. I. Silovye rezhimy radial'nogo vydavlivaniya detalej s vysokim flancem / L. I. Aliieva, Ja. G. Zbankov, P. Abhari // *KShP. OMD.* – 2010. – № 4. – S. 24–26.

3. Balendra R. Injection forging: Engineering and research / R. Balendra, Y. Qin // *Journal of Materials Processing.* – 2004. – 145. – R. 189–206.

4. Primenenie paketa QForm dlja ocenki usilija raskrytija matricy pri vydavlivanii detalej s flancem / I. S. Aliiev, V. N. Levchenko, V. L. Kaljuzhnyj, P. B. Abhari, N. V. Biba // *Materiali H Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferencii «Resursozberzhennja ta energoeftivnist' procesiv OMT» 21–23 listopada 2018.* – Harkiv, 2018. – S. 10–11.

5. Smurov A. M. Iz opyta razrabotki, osvoenija i vnedrenija shtampov s raz#emnoj matricej dlja metallojekonomnoj shtampovki / A. M. Smurov // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo.* – 1992. – № 6. – S. 5.

6. Aliiev I. S. Ocenka silovyh parametrov poperechnogo vydavlivaniya / I. S. Aliiev, O. K. Savchenko // *Issledovanija v oblasti teorii, tehnologii i oborudovanija shtampovochnoego proizvodstva.* – Tula : TPI, 1989. – S. 67–72.

7. Jeduardov M. S. Shtampovka v zakrytyh shtampah / M. S. Jeduardov. – L. : Mashinostroenie, 1971. – 240 s.

8. QForm – universal'naja i jeftektivna programma dlja modelirovanija koki i shtampovki / N. V. Biba, S. A. Stebunov, Ju. A. Gladkov, P. S. Mordvincev // *KShP. OMD.* – 2011. – № 1. – S. 36–42.

9. Razrabotka shtampov dlja vydavlivaniya v raz#emnyh matricah / P. B. Abhari, L. I. Aliieva, I. S. Aliiev, A. A. Eremina // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Karamators'k : DGMA, 2016.* – № 1(42). – S. 223–231.

10. А. с. № 1038050. V21 J 13/2. Shtamp dlja radial'nogo vydavlivaniya / I. S. Aliiev, K. D. Mahmudov. – № 3435062/25–27 ; zajavl. 07.05.82 ; opubl. v B. I. – 1983. – № 32. – S. 38.

Алієв І. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМТ ДДМА;

Левченко В. М. – канд. техн. наук, ст. наук. співроб., докторант ДДМА;

Кузенко О. А. – аспірант кафедри ОМТ ДДМА.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

E-mail: [omd@dgma.donetsk.ua](mailto:omd@dgma.donetsk.ua)

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018 р.