

УДК 621.73, 621.777

Маковей В. О.
Бородій Ю. П.
Проценко П. Ю.

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РІЖУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗДІЛОВИХ ШТАМПІВ

Ріжучі елементи розділових штампів експлуатуються в складних умовах циклічного навантаження з концентрацією напружень на кромках. Ці напруження досягають значних значень, що приводить до зминання, зношування та викришування кромки [1–3]. Визначенню розподілу напружень в ріжучих кромках присвячена значна кількість робіт [4–8]. Для аналізу НДС ріжучих кромки та заготовки використовують експериментально-розрахункові підходи, які засновані на методі ліній ковзання. При цьому залишається маловивченим, які діють сили та виникають напруження в процесі різання листових матеріалів. З однієї сторони, вважають існування високих розтягуючих напружень в області кромки [2], які призводять до руйнування втому, з іншої сторони, вказують [8], що на ріжучі кромки діють високі напруження стиску, які приводять до їх зминання. Знання цих даних необхідне для розробки методів підвищення стійкості ріжучих кромки.

Метою даної роботи є оцінка методом скінчених елементів параметрів процесу різання листових матеріалів: зусилля, контактний тиск на ріжучі кромки з урахуванням сил тертя, які на них діють, а також розподілу напружень в ріжучих елементах розділових штампів.

Ці параметри залежать від діаметра пуансону, товщини матеріалу, зазору між пуансоном і матрицею, механічних властивостей матеріалу.

Технологічне навантаження, яке виникає при розділенні листового матеріалу, прикладається до заготовки та ріжучих кромки штампів, через них до інших елементів штампів. Існує декілька видів розділових операцій: вирубка, пробивка, відрізка, надрізка, обрізка, просікання. Найбільш характерними операціями листового холодного штампування (ЛХШ) є вирубка, пробивка та відрізка. Незважаючи на конструктивні відмінності штампової оснастки, ріжучих елементів, технологічних вимог, розділові операції листових матеріалів мають спільні закономірності процесу розділення. Аналіз механіки розділових операцій має значення для визначення основних параметрів процесу розділення – діючого зусилля, контактних тисків на ріжучі кромки та сил тертя, які діють на робочі поверхні пуансонів та матриць. В уявленні багатьох авторів процес розділення складається з наступних стадій: пружної, пружно-пластичної, пластичної та стадії руйнування. В зоні розділення утворюється складний напружено-деформований стан листового матеріалу.

Дуже важливим є правильний вибір розрахункової схеми, від якої залежать чисельні значення визначуваних величин, достовірність їх визначення. В цьому випадку для моделювання системи пуансон – матриця – заготовка (рис. 1) був залучений програмний пакет Deform 2d. В якості змінних параметрів для дослідження вирубки-пробивки круглих деталей виступають діаметр пуансону, зазор між пуансоном і матрицею, товщина заготовки, фізико-механічні властивості матеріалу (рис. 2) та параметри скінчено-елементної сітки. На кінцевій стадії процесу розділення, коли відбувається руйнування матеріалу, при використанні для моделювання методу скінчених елементів (МСЕ) необхідне введення критерію руйнування.

Для встановлення можливості моделювання процесу різання листових матеріалів в програмному пакеті Deform 2d, проведено моделювання процесу пробивання круглим пуансоном діаметром 9 мм листової сталі Ст. 3 товщиною 3 мм з визначенням зміни зусилля від переміщення пуансону, які порівнювалися з відомим експериментальним графіком $P(h)$ (рис. 3) [9].

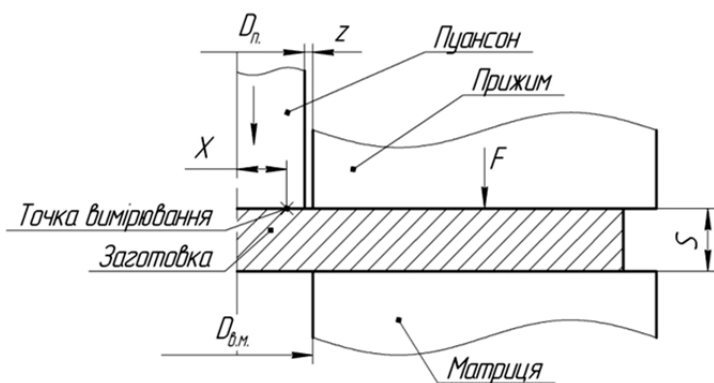


Рис. 1. Розрахункова схема системи пуансон – матриця – заготовка (F – зусилля прижим; x – відстань від осі пуансона до точки вимірювання; D_n – діаметр пуансону; $D_{в.м.}$ – внутрішній діаметр матриці; z – зазор)

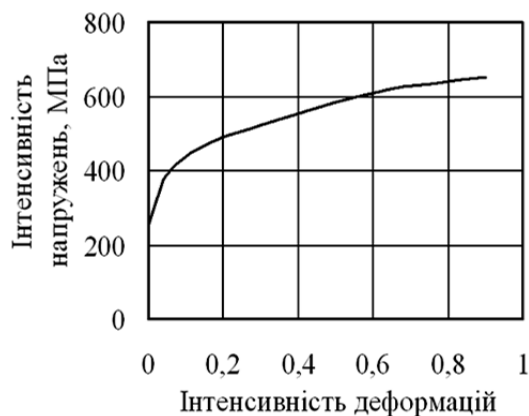


Рис. 2. Крива зміцнення Ст. 3

На кінцевій стадії процесу розділення використовували критерій руйнування normalized Cockcroft-Latham, який передбачений в програмному пакеті Deform 2d:

$$\int_{\bar{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

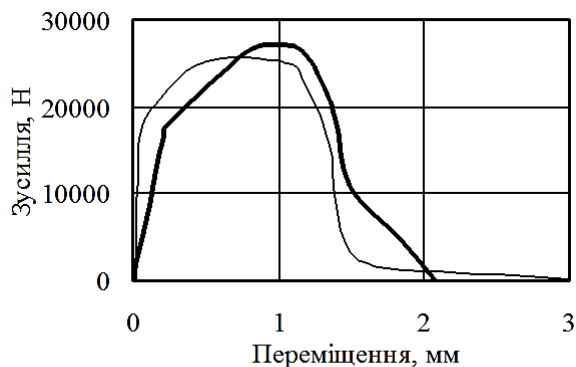
де $\bar{\varepsilon}_f$ – критична інтенсивність деформацій;

$\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень;

σ^* – найбільше розтягуюче напруження;

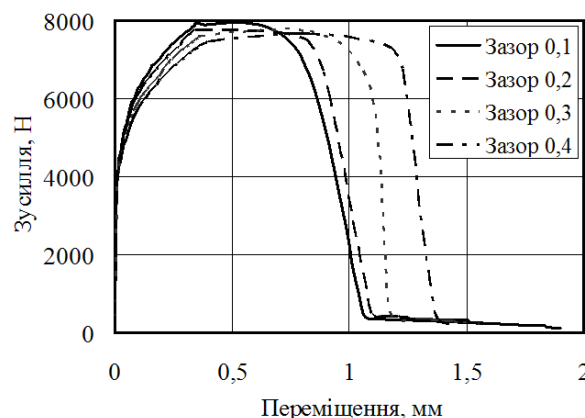
$\bar{\varepsilon}$ – інтенсивність деформацій.

Порівняння експериментальних графіків та моделювання (див. рис. 3) показали незначне відхилення розрахункових даних від експериментальних [9]. Це дає можливість визначати розподіл напружень в ріжучих елементах пуансонів і матриць. При цьому досліджували вплив зазору, який змінюється від $0,05S$ до $0,2S$, на зусилля пробивання круглим пуансоном діаметром 4 мм листової сталі Ст. 3 товщиною 2 мм з визначенням зміни зусилля від переміщення пуансону (рис. 3, б) та на інтенсивність напружень σ_i в заготовці на контакті з пуансоном в залежності від відносної відстані від його осі (рис. 4).



— Моделювання — Експеримент

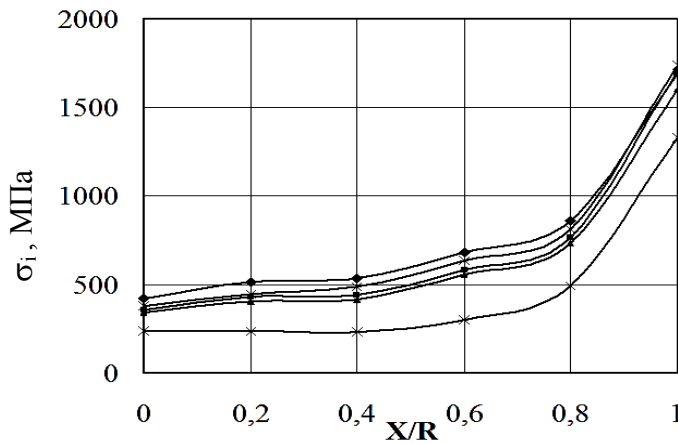
а



б

Рис. 3. Порівняння експериментального і отриманого при моделюванні графіка зусилля пробивання (а), визначення впливу зазору на зусилля (б)

Розподіл інтенсивності напружень в заготовці на контакті з пуансоном за рівнем відповідає розподілу напружень σ_z вздовж осі пуансону (рис. 4 і 5). Це дає можливість визначити тиск на контактних поясах ріжучих кромок пуансона та матриці по формулі $p_k = \sigma_z$.



—◆— Dп=4 мм; зазор 0,1; S=2 мм —■— Dп=4 мм; зазор 0,2; S=2 мм —▲— Dп=4 мм; зазор 0,3; S=2 мм
—×— Dп=4 мм; зазор 0,4; S=2 мм —●— Dп=9 мм; зазор 0,14; S=3 мм

Рис. 4. Вплив зазору на інтенсивність напружень σ_i в заготовці на контакті з пуансоном в залежності від відносної відстані від його осі (R – радіус пуансону; S – товщина заготовки; коефіцієнт тертя $f=0,1$)

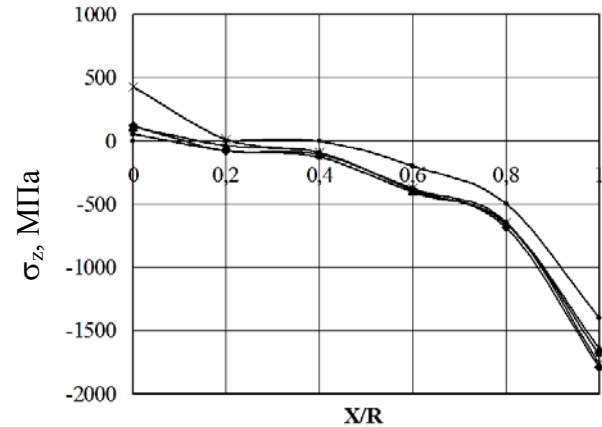
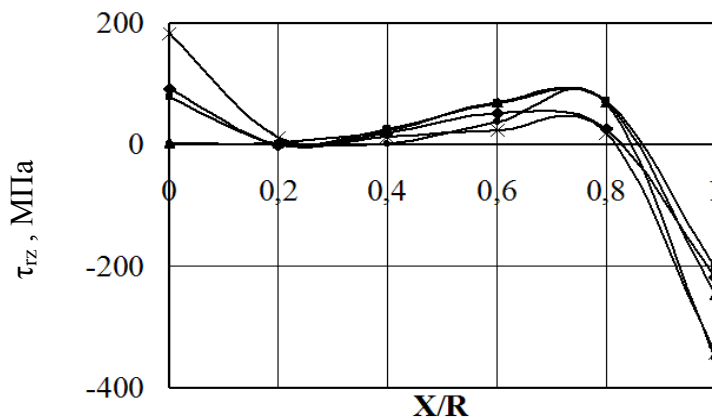


Рис. 5. Вплив зазору на σ_z (R – радіус пуансону; S – товщина заготовки; коефіцієнт тертя $f=0,1$)

На рис. 6 наведений розподіл напружень σ_z вздовж осі пуансону та дотичних τ_{rz} на торцевій поверхні пуансону при вирубванні деталі діаметром 4 мм із листа товщиною 2 мм при різних значеннях зазору між пуансоном та матрицею та деталі діаметром 9 мм із листа товщиною 3 мм. Ширина контактної зони, де діють максимальні напруження, складає $0,2 R_n$.



—◆— Dп=4 мм; зазор 0,1; S=2 мм —■— Dп=4 мм; зазор 0,2; S=2 мм
—▲— Dп=4 мм; зазор 0,3; S=2 мм —×— Dп=4 мм; зазор 0,4; S=2 мм
—●— Dп=9 мм; зазор 0,14; S=3 мм

Рис. 6. Вплив зазору на τ_{rz} (коефіцієнт тертя $f=0,1$)

Зменшення інтенсивності напружень σ_i на контактних поясах пуансону та матриці біля ріжучих кромки, а відповідно, зниження питомих локальних зусиль на ріжучі кромки, сприяє підвищенню їх стійкості. Зношування робочих граней вирубного штампу (торцеве та бокове) реалізується за різними механізмами. На торцеву поверхню діють найбільші нормальні навантаження з максимумом у самої кромки (див. рис. 5), викликаючи інтенсивну пластичну деформацію та змінання кромки. Кільцева сильно навантажена зона вздовж кромки невелика: її розміри складають $0,2-0,4$ від товщини заготовки S , що вирубасться. Бокові грані

зношуються за механізмом малоциклової фрикційної втоми. Механізм пошкоджуваності поверхонь штампуну полягає в тому, що під дією тангенційних навантажень зносостійкі карбіди інструментальних сталей викришуються з мартенситної основи. При цьому матрицю, що швидко зношується, можна розглядати як певну зв'язку, яка працює тим краще, чим довше утримує карбід.

В роботі досліджено вплив на зусилля пробивання та розподіл напружень діаметру пуансону, який складає 4, 9, 10 та 20 мм, товщини листа 2, 3 та 4 мм, зазорів 0,05S, 0,1S, 0,15S, 0,2S. При цьому визначались також максимальні зусилля за наближеною формулою [10]:

$$P_p^{\max} = 0,5LS\sigma_B, \quad (2)$$

де L – довжина лінії різання;

S – товщина матеріалу;

σ_B – межа міцності з кривої зміцнення.

Максимальні значення напружень, зусилля пробивання з урахуванням прижиму, які визначені в дослідженні, занесені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати аналізу НДС пуансонів при пробиванні

№	D_n , мм	S , мм	D_n/S	За-зор, мм	f	P_p , кН	P_m , кН	Напруження на кромці, МПа			Напруження по вісі, МПа			Прижим, кН
								σ_i	σ_z	τ_{rz}	σ_i	σ_z	τ_{rz}	
1	4	2	2	0,1	0,1	8,16	7,8	1670	-1730	-259	600	73,7	81,7	2,76
2	4	2	2	0,1	0,1	8,16	7,72	1700	-1730	-266	435	123	92,3	0
3	4	2	2	0,1	0,3	8,16	8	1760	-1740	-257	587	73	72,5	2,76
4	4	2	2	0,2	0,1	8,16	7,8	1660	-1700	-224	552	94,7	81,2	2,76
5	4	2	2	0,2	0,1	8,16	7,7	1700	-1720	-266	386	113	78,3	0
6	4	2	2	0,2	0,3	8,16	7,85	1700	-1750	-229	423	363	135	2,76
7	4	2	2	0,3	0,1	8,16	7,8	1650	-1680	-230	482	109	80,1	2,76
8	4	2	2	0,3	0,1	8,16	7,74	1610	-1640	-248	370	122	73,4	0
9	4	2	2	0,3	0,3	8,16	7,78	1680	-1700	-249	408	80,1	66,9	2,76
10	4	2	2	0,4	0,1	8,16	7,63	1620	-1640	-246	418	328	150	2,76
11	4	2	2	0,4	0,1	8,16	7,66	1750	-1750	-339	380	421	180	0
12	4	2	2	0,4	0,3	8,16	7,78	1660	-1670	-239	384	261	122	2,76
13	9	3	3	0,14	0,1	27,5	26,2	1320	-1400	-368	301	0,3	1,18	0
14	10	4	2,5	0,4	0,3	40,8	40,6	1880	-1870	-419	402	0,35	1,67	0
15	10	4	2,5	0,4	0,3	40,8	39,6	1680	-1660	-317	421	0,3	1,63	12,86
16	20	4	5	0,4	0,3	81,6	78,9	880	-1040	-358	110	0,12	0,27	0
17	20	4	5	0,4	0,3	81,6	78,5	1110	-1110	-294	128	0,12	0,31	25,28

Максимальні зусилля пробивання визначені за формулою (2) та моделюванням мало відрізняються. При однаковій товщині матеріалу та діаметру пуансона вплив зазору між пуансоном та матрицею на максимальні значення напружень на контактному пояску ріжучої кромки пуансона незначний. Тертя та використання прижиму в процесі пробивання мало впливає на максимальні значення напружень на контактному пояску ріжучої кромки пуансона.

ВИСНОВКИ

На різучі кромки діють значні контактні напруження (до 2000 МПа), при чому чим менше відношення діаметру пуансона до товщини листа (D_n/S), тим будуть більшими напруження σ_z , які діють в осьовій зоні пуансона. Ширина контактної пояски, де діють максимальні напруження, складає $0,2 R_n$.

Вплив зазору виявляється найбільшим для дотичних напружень, напруження вздовж осі пуансона мало залежать від зазору.

Зменшення інтенсивності напружень σ_i на контактних поясках пуансона та матриці біля різучих кромок, а відповідно, зниження питомих локальних зусиль, які діють на різучі кромки, сприяє підвищенню їх стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Георгиев М. Н. Роль трещиностойкости в изнашивании гетерофазных штамповых сталей при вырубке / М. Н. Георгиев, Г. С. Фукс-Рабинович // ФХММ. – 1987. – № 3. – С. 63–66.
2. Степанский Л. Г. Усталостная прочность режущих кромок вырубных и пробивных пуансонов и матриц / Л. Г. Степанский, Е. И. Чемерис // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – № 8. – С. 7–8.
3. Леник К. С. О механизме изнашивания и разрушения рабочих частей вырубных штампов при штамповке высоколегированной электротехнической стали / К. С. Леник, Г. С. Фукс-Рабинович, А. Н. Кузнецов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 12. – С. 15–17.
4. К определению напряжений на режущих кромках вырезных твердосплавных матриц / С. М. Хмара, В. П. Смолянинов, А. А. Коломойцев, В. И. Рудь // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 6. – С. 22–24.
5. Хмара С. М. О причинах выкрашивания твердосплавных вырезных матриц / С. М. Хмара, В. П. Смолянинов, А. А. Коломойцев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – № 8. – С. 21–23.
6. Лисин А. Г. Определение напряжений на режущей кромке штампа методом линий скольжения / А. Г. Лисин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1964. – № 3. – С. 20–22.
7. Михаленко Ф. П. Закономерности распределения интенсивности напряжений и деформаций по пояскам смятия при вырубке-пробивке / Ф. П. Михаленко, А. И. Гулиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 12. – С. 17–19.
8. Дьоміна Н. А. Наукове обґрунтування конструювання робочих деталей розділових штампів / Н. А. Дьоміна, В. О. Євстратов, М. А. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2011. – № 45. – С. 13–22.
9. Влияние состояния поверхности пуансонов на силовой режим, износостойкость инструмента и качество деталей при пробивке листовой малоуглеродистой стали / С. З. Юдович, Ю. Т. Сычук, Ф. А. Фурманов, В. А. Глазков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 4. – С. 17–19.
9. Смолянинов В. П. Определение контактных давлений на режущие кромки матрицы и пуансона при чистовой вырубке / В. П. Смолянинов, И. Я. Камышов, О. А. Чегринцев // Обработка металлов давлением в машиностроении : республиканский междудементальный научно-технический сборник. – Харьков : Вища школа, 1985. – № 21. – С. 48–50.
10. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.

Маковей В. О. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;

Бородій Ю. П. – асистент НТУУ «КПІ»;

Проценко П. Ю. – аспірант НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: makovei@ukr.net; borodiyuriy@ukr.net; pavel07@i.ua

Стаття надійшла до редакції 23.10.2012 р.