

**Н.А. ДЕМИНА**, Государственный Таврийский агротехнологический университет, г. Мелитополь, **А.В. ТКАЧУК**, канд. техн. наук, НТУ „ХПИ“

## **БАЛАНС ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УРОВНИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ „ПУАНСОН – МАТРИЦА – ЗАГОТОВКА”**

Описана методика та результати досліджень напруженого стану елементів системи „пуансон – матриця – заготовка”. Застосовуються моделі різних рівнів складності.

A method and results of researches of stressed state of elements of „punchon - matrix – billet” system are described. The models of different levels of complexity are used.

При моделировании процесса листовой штамповки одним из актуальных вопросов является исследование баланса перемещений и уровней напряжений в области режущих кромок элементов штамповой оснастки. Учитывая, что в процессе деформирования кромок режущего инструмента происходит изменение номинального зазора, то соответственно и меняются условия разделения материала. В работах [1-7] вопросу взаимодействия элементов технологической системы режущий “инструмент – штамп-пресс – штампуемый материал” уделено значительное внимание. Естественно, что более полноценные результаты моделирования следует ожидать при использовании сложных физических, математических и численных моделей, учитывающих контактное взаимодействие, трение, пластичность, разрушение и другие нелинейные эффекты, сопровождающие процесс разделения листового материала (модели 2-го и 3-го уровней). Однако такие модели приводят к необходимости решения громоздких задач, требующих значительных вычислительных ресурсов и временных затрат. В то же время представляет значительный интерес вопрос качественного анализа влияния некоторых параметров на поведение элементов исследуемой технологической системы. С этой точки зрения представляется актуальной и важной такая частная задача как, например, определение вклада перемещений точек матрицы (пуансона, пуансон-матрицы) разделительного штампа в общий баланс перемещений в межкромочной зоне с использованием модели 1-го уровня. Для этого были использованы упрощенные расчетные модели матрицы, обоснованные частично в работах [1-7].

**Расчетные схемы элементов штамповой оснастки.** Проведение теоретических и экспериментальных исследований прочности и жесткости наиболее ответственных и нагруженных элементов разделительных штампов (РШ) в процессе их проектирования, изготовления и эксплуатации приводит к необходимости решения задачи анализа напряженно-деформированного состояния (НДС), в первую очередь, матриц специализированных штампов (СШ) как потенциально вносящих наибольший вклад в баланс перемещений в зоне разделения штампуемого материала.

Подробно методика проведения данного исследования приведена в работе



формуле

$$P_1 = k s_{cp} L^p t, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент запаса, принимаемый обычно 1,2-1,3;  $s_{cp}$  – сопротивление срезу штампуемого материала;  $L^p$  – периметр вырубаемого контура, в данном случае равный  $pd_1$ ;  $t$  – толщина штампуемого материала.

Конкретизируем некоторые параметры расчетной схемы матрицы. Значения ширины кольца контакта  $a$  штампуемого материала с матрицей и глубины его внедрения  $b$  до момента скола были ранее определены экспериментально [8]. Установлено [1], что эти величины зависят от толщины, свойств штампуемого материала, а также от относительного зазора между режущими кромками и т. д. При этом в среднем с достаточной для практики точностью принимаем  $a = 0,5t$ ;  $b = 0,1t$ . Величину распирающего усилия  $p_2$ , равного  $0,35 p_1$  [9], можно определить из соотношения

$$\int_{h_1-b}^{h_1} p_2(z) pd_1 dz = 0,35 p_1. \quad (3)$$

Давление  $p_2$  на стенки матрицы из соображений малости ширины участка распределения принято равномерным, т. е.  $p_2(z) = const$ . Поэтому, принимая значение коэффициента трения между внутренней поверхностью матрицы и проталкиваемой деталью равным 0,3 [10], можно записать  $F = 0,3P_2$ . На основании результатов экспериментов распределение контактного давления  $p_1$  принимается линейным, т. е.  $p_1(r) = k_1 r + l$ . Выполнив необходимые преобразования, можно найти коэффициент  $k_1$  и свободный член  $l$  и, таким образом, полностью определить выражения (1) и (3).

**Результаты исследований. Матрицы.** При исследовании НДС вырубных матриц проведено исследование влияния относительной толщины стенки (внутренние диаметры принимали значения 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100 и 150 мм, для каждого из которых наружные варьировали от 1,03 до 5,0  $d_1$ ) и толщины штампуемого материала на законы распределения и величины напряжений и перемещений (исследования проводили на вырубной матрице с размерами:  $d_1 = 30$  мм;  $d_2 = 31$  мм;  $d_3 = 50$  мм;  $h_1 = 30$  мм;  $h_2 = 10$  мм). В целом качественно и количественно полученные картины распределения компонент напряженно-деформированного состояния, а также интегральные зависимости характеристик НДС находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в работе [1]. Это является дополнительным подтверждением адекватности и точности построенных моделей, а также оправдывает их применение для многовариантных исследований.

Рассмотрим матрицу СШ в виде тела вращения. Геометрия ее задается с

помощью следующих параметров: диаметров  $d(d_1, d_2, d_3)$  и высот  $z(h_1, h_2)$  (см. рис. 1). Толщину стенки матрицы определяем по формуле

$$h = \frac{d_3 - d_1}{2}. \quad (4)$$

Рассмотрим схему нагружения матрицы РШ. Ее верхняя кромка нагружена усилиями штамповки. Их величины определяются на основе теоретических и экспериментальных исследований законов распределения контактных давлений в зоне взаимодействия штампуемого материала с режущими кромками, подробно изложенных в работах [11-15]. На основе анализа результатов, представленных в этих работах, сделан вывод о возможности с достаточной степенью точности описания закона распределения контактных давлений в первом приближении линейной зависимостью от координаты  $r$ .

В качестве граничных условий принят случай свободного опирания матрицы с возможным проскальзыванием по плоскости  $z = 0$ . Данные условия формулируются следующим образом:

$$u_z|_{z=0} = 0; \quad (5)$$

$$t_{rz}|_{z=0} = 0, \quad (6)$$

где  $u_z$  – осевые перемещения точек матрицы,  $t_{rz}$  – касательные напряжения.

Исследование матриц СШ проводилось на 10 вариантах конструкций, основные параметры которых приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Основные конструктивные параметры матрицы СШ, мм**

№ п/п	$d_1$	$d_3$	$h$	$h_1$	$h_2$	№ п/п	$d_1$	$d_3$	$h$	$h_1$	$h_2$
1	30	50	10	4	4	6	30	50	10	30	20
2				7	7	7				50	40
3				10	5	8				75	65
4				15	10	9				100	90
5				20	10	10				200	190

Задача определения напряженно-деформированного состояния матрицы СШ приведена к исследованию осесимметричной задачи теории упругости для тел сложной геометрической формы. Механизм задания усилий и граничных условий, построения конечно-элементных моделей, формирования матрицы жесткости конструкции и вектора, нагрузки на основе применения метода конечных элементов к решению поставленной задачи описаны в [2-7].

*Результаты расчета напряженно-деформированного состояния матриц с варьированием высоты. С использованием разработанного программно-*

го обеспечения проведены исследования зависимостей характеристик напряженно-деформированного состояния матриц СШ с набором конструктивных параметров, приведенных в табл. 1, от ее высоты. Расчеты производились при значениях  $\sigma_{cp}=100$  МПа и  $\sigma_{cp}=1000$  МПа,  $\rho=0,35$ ,  $k_T = 0,3$ ,  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\nu = 0,28$ . Толщина штампуемого материала  $t = 1$  мм. Усилие штамповки определено по формуле (2) и равно 9,4 кН, усилие распираия – 3,3 кН, усилие трения – 1,0 кН при  $\sigma_{cp}=100$  МПа и соответственно 94 кН, 33 кН и 10 кН при  $\sigma_{cp} = 1000$  МПа.

Как показал анализ полученных результатов, наибольшее влияние изменение высоты матрицы  $H = h_1$  оказывает на ее деформированное состояние. Схемы деформирования матриц при увеличении высоты  $H$  от 4 мм до 200 мм с постоянной толщиной стенки матрицы 10 мм приведены на рис. 2-11. Видно, что с ростом высоты матрицы растут перемещения  $u_z$ . Для малых высот  $H$  характерно смещение точек режущих кромок в направлении оси  $r$  (происходит распираие матрицы в зоне режущей кромки). При  $15 \text{ мм} \leq H < 75$  мм наблюдается сужение матрицы в зоне режущей кромки. При достаточно больших высотах ( $H \geq 75$  мм) характерно волнообразное распираие матрицы вдоль образующей в области, прилегающей к режущей кромке.

Рис. 2. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 4$  мм)

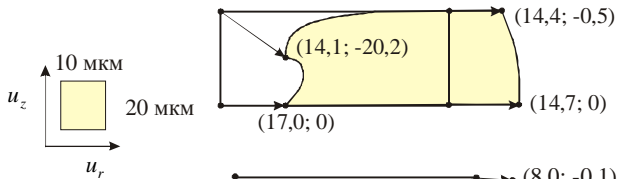


Рис. 3. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 7$  мм)

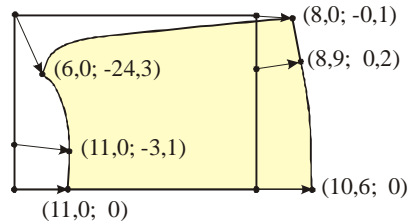
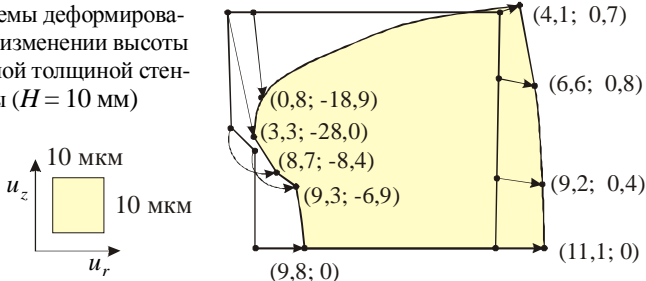


Рис. 4. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 10$  мм)



В табл. 2 приведены перемещения  $u_r$  (максимальные  $u_r^{(\max)}$  и на режущей кромке  $u_r^{(\text{кр})}$ ), а также максимальные перемещения  $u_z^{(\max)}$  в зависимости от высоты матрицы (при  $\sigma_{\text{ср}} = 100$  МПа). Максимальные перемещения  $u_r^{(\max)}$  резко убывают от 1,8 мкм до 0,5 мкм для высот в интервале  $4 \leq H \leq 30$  (мм). Дальнейшее увеличение высоты не оказывает существенного влияния на  $u_r^{(\max)}$ . Для перемещений  $u_r$  на режущей кромке характерно их резкое уменьшение на участке  $4 \leq H \leq 20$  (мм) от 1,4 мкм до -0,3 мкм. Для матриц высотой  $H \geq 75$  мм происходит монотонное снижение перемещения  $u_r^{(\text{кр})}$  до 0,1 мкм. Перемещения  $u_z^{(\max)}$  растут с ростом высоты матрицы от 2,0 мкм для матрицы высотой  $H = 4$  мм до 10,5 мкм для матрицы высотой  $H=200$  мм.

Рис. 5. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 15$  мм)

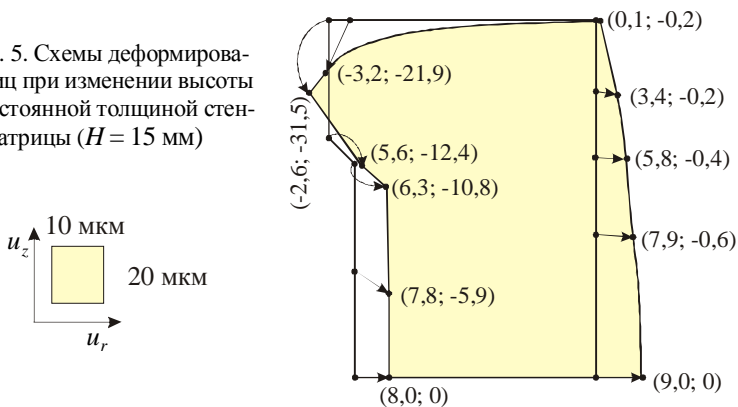
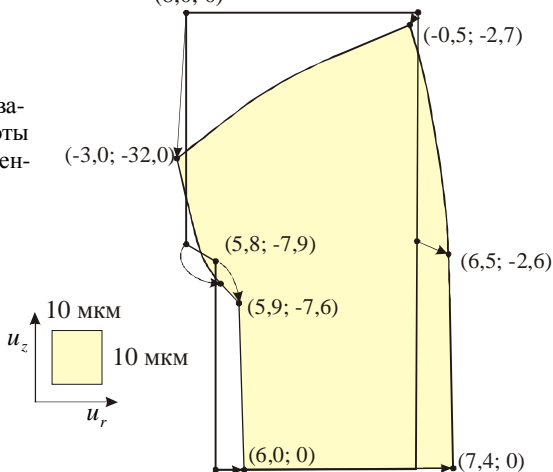


Рис. 6. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 20$  мм)



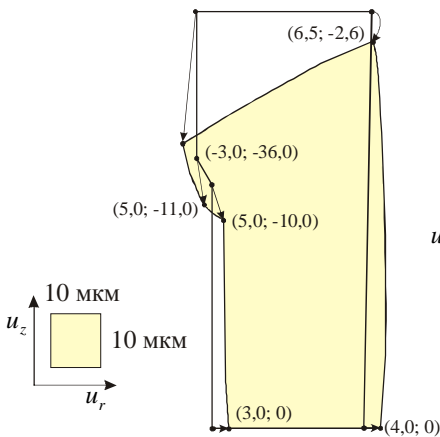


Рис. 7. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 30$  мм)

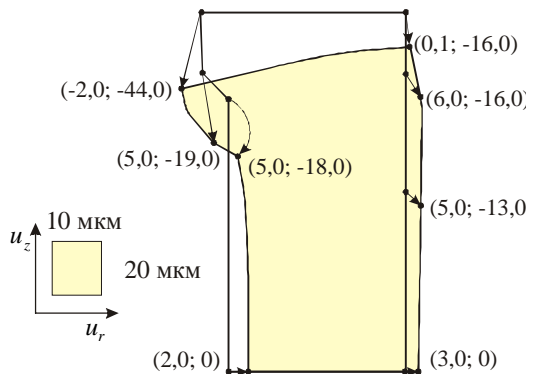


Рис. 8. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 50$  мм)

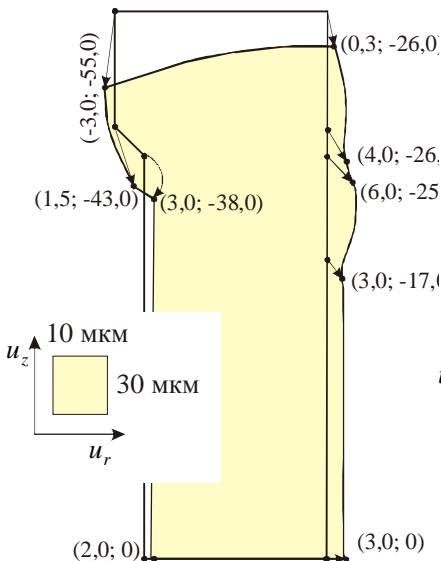


Рис. 9. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 75$  мм)

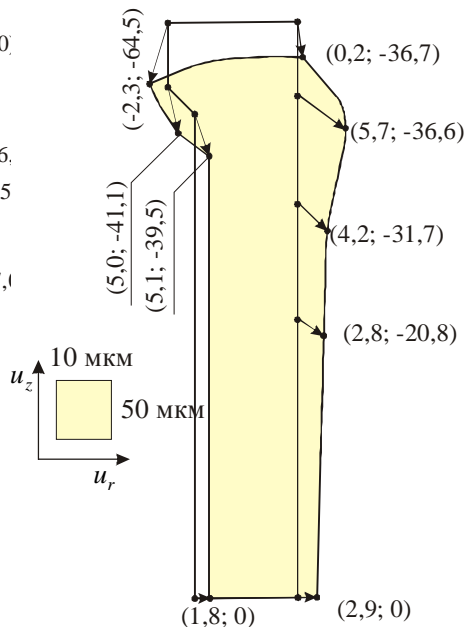


Рис. 10. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 100$  мм)

Таблица 2

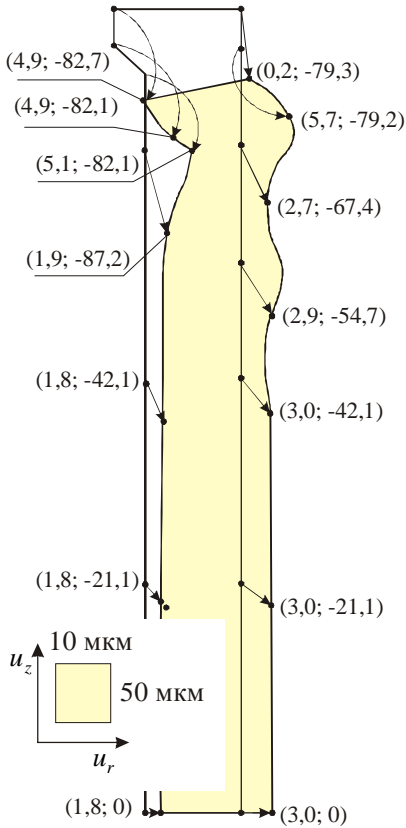


Рис. 11. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки матрицы ( $H = 200$  мм)

$H$ , мм	Перемещения, мкм		
	$u_r^{(кр)}$	$u_r^{(max)}$	$u_z^{(max)}$
4	1,4	1,8	-2,0
7	0,6	1,2	-2,4
10	0,3	1,1	-2,8
15	-0,3	0,9	-3,2
20	-0,3	0,7	-3,2
30	-0,3	0,6	-3,6
50	-0,3	0,6	-4,4
75	-0,3	0,6	-5,5
100	-0,2	0,6	-6,5
200	-0,1	0,6	-10,5

Таким образом, получаем параметры, характеризующие НДС матриц СШ:  $u_r^{(max)}$ ,  $u_r^{(кр)}$ ,  $u_z^{(max)}$ .

Картина напряженного состояния исследованных матриц (табл. 3) соответствует в основных чертах результатам, представленным в [15]. Эпюры распределения напряжений  $s_z$ ,  $s_r$ ,  $s_q$ ,  $t_{rz}$  и эквивалентных напряжений  $s_{экр}$  для матриц с высотой  $H \geq 20$  мм аналогичны приведенным в [15]. Эпюры эквивалентных напряжений  $s_{экр}$  (по Мизесу) для этих матрицы СШ высотой 30 мм представлены на рис. 12.

Отличительной особенностью напряженного состояния матриц СШ малой высоты ( $H \leq 15$  мм) является распространение зоны высоких напряжений на область подошвы матрицы. Картина распределения напряжений  $s_z$  – доминирующих для матриц СШ – при  $z = 0$  носит явно выраженный неравномерный характер в отличие от близкого к равномерному закону распределения  $s_z$  по координате  $r$  для матриц с  $H \geq 20$  мм. Но величины максимальных значений  $s_z^{max}$ , наблюдающихся на внутренней стенке матрицы на расстоянии  $(0,1-0,15) \cdot t$  от режущей кромки, и значение  $s_z^{кр}$  на режущей кромке неизменны для всех высот и примерно равны соответственно – 450 МПа и – 425 МПа.



Параметры напряженно-деформированного состояния матриц СШ  
в зависимости от их высоты ( $s_{cp} = 100$  МПа)

$H$ , мм	Напряжения, МПа							
	$s_z^{кр}$	$s_z^{max}$	$s_r^{max}$	$s_q^{max}$	$t_{rz}^{кр}$	$t_{rz}^{max}$	$s_{экр}^{кр}$	$s_{экр}^{max}$
4	-422	-422	-236	-164	27	87	232	320
7	-422	-422	-236	-175	27	87	224	317
10	-422	-422	-236	-187	27	87	219	314
15	-422	-422	-236	-187	27	87	216	313
20	-422	-422	-236	-188	27	87	216	313
30	-422	-422	-236	-187	27	87	216	313
50	-422	-422	-236	-186	27	87	216	313
75	-422	-422	-236	-187	27	87	216	313
100	-422	-422	-236	-186	27	87	216	313
200	-422	-422	-236	-185	27	87	217	313

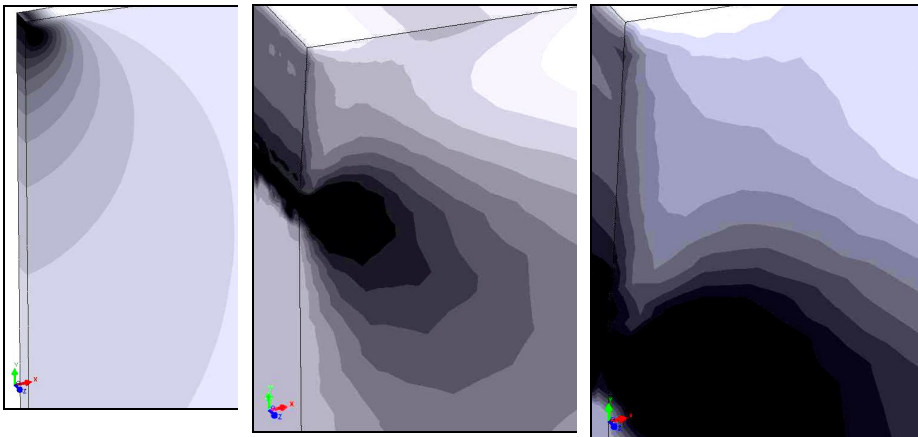


Рис. 12. Характер распределения эквивалентных (по Мизесу) напряжений в районе режущей кромки матрицы штампа высотой 30мм (область кромки выделена с разными масштабами)

Качественная и количественная картина распределения напряжений  $s_r$  и  $s_q$  одинакова для матриц любой высоты, за исключением области подошвы матрицы для малых высот ( $H \leq 7$  мм). Здесь наблюдается незначительный рост напряжения  $s_r$  ( $-10$  МПа) в средней ее части.

В табл. 4 представлены характеристики напряженного состояния в слое, отстоящем на расстоянии  $1/5H$  от подошвы матрицы при  $s_{cp} = 100$  МПа. В

числителе указаны максимальные значения напряжений в слое (для  $s_z$  и  $t_{rz}$ , а также  $s_{\text{экв}}$  максимальные напряжения наблюдаются в области  $r = 15$  мм), в знаменателе – значения напряжений в средней части матрицы – ( $r = 20$  мм)

Таблица 4

Параметры напряженного состояния матриц в слое, отстоящем на расстоянии  $1/5H$  от подошвы матрицы ( $s_{\text{ср}} = 100$  МПа)

H, мм	Напряжения, МПа					
	$s_z$			$s_r$		
	в слое	в средней части	в слое	в средней части	в слое	в средней части
4	-53,0	-21,5	-10,3	-7,2		
7	-40,0	-11,0	-6,2	-4,4		
10	28,8	-12,6	-3,6	-3,6		
15	20,2	-9,8	-2,2	-2,2		
20	-9,3	-8,5	0,3	0,2		
30	-9,3	-8,6	0,5	0,2		
50	-9,2	-8,6	0,4	0,2		
75	-8,8	-8,8	-0,1	-0,1		
100	-8,7	-8,7	0,0	0,0		
200	-8,8	-8,8	0,0	0,0		
	$s_q$		$t_{rz}$		$s_{\text{экв}}$	
	в слое	в средней части	в слое	в средней части	в слое	в средней части
4	14,2	14,2	15,6	-2,6	58,1	20,2
7	10,3	8,8	8,4	-0,8	41,0	16,0
10	10,2	7,7	3,2	0,9	31,4	15,9
15	7,6	7,6	2,0	1,4	25,0	13,6
20	3,1	2,2	0,9	9,7	10,0	10,0
30	3,1	2,0	0,7	0,4	10,0	10,0
50	1,6	1,1	0,3	0,2	9,2	8,7
75	0,2	0,1	-0,1	-0,1	8,7	8,7
100	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	8,7
200	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	8,8

На рис. 13, 14 представлены характерные распределения компонент вектора перемещений в матрице, в частности, в районе режущей кромки. Анализ картин распределений перемещений, напряжений и интегральных зависимостей перемещений и напряжений точек режущей кромки матрицы раздели-

тельного штампа служит основой для следующих основных выводов.

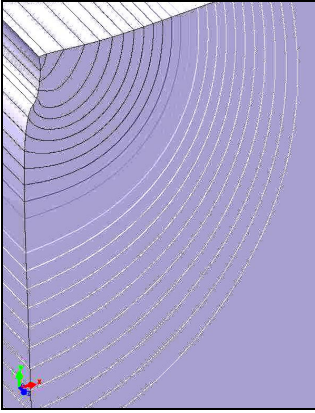


Рис. 13. Характер распределения осевых перемещений в районе режущей кромки матрицы штампа высотой 30мм

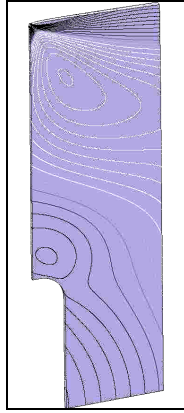
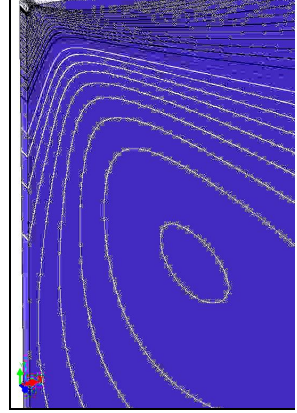


Рис. 14. Характер распределения радиальных перемещений во всей области и в районе режущей кромки матрицы штампа высотой 30мм



1. Доминирующими напряжения в исследованных матрицах СШ различной высоты являются напряжения  $s_z$ , а далее по степени уменьшения –  $s_r$ ,  $s_q$ ,  $t_{rz}$ .

2. Наибольшие значения напряжений  $s_z$  и  $t_{rz}$  достигаются на удалении примерно  $(0,1-0,15) \cdot t$  мм от режущей кромки и равны примерно  $-450$  МПа и  $90$  МПа при  $s_{cp} = 100$  МПа, на режущей кромке соответственно  $-425$  МПа и  $30$  МПа.

3. Максимальное значение напряжений  $s_r$  достигается на режущей кромке матрицы СШ и равно примерно  $-240$  МПа при  $s_{cp} = 100$  МПа.

4. Величины максимальных напряжений  $s_z^{\max}$ ,  $s_r^{\max}$  и  $t_{rz}^{\max}$ , а также напряжений на режущей кромке  $s_z^{kp}$  и  $t_{rz}^{kp}$  имеют одинаковый уровень независимо от высоты толщины стенки матрицы.

5. Максимальные значения напряжений  $s_q$  достигаются в области режущей кромки матрицы и незначительно растут по мере увеличения ее высоты в пределах  $(-160 \div -190)$  МПа (при  $s_{cp} = 100$  МПа).

6. Эквивалентные напряжения на режущей кромке матрицы уменьшаются по мере увеличения ее высоты от  $232$  МПа до  $216$  МПа (при  $s_{cp} = 100$  МПа).

7. Максимальные эквивалентные напряжения  $s_{\text{экр}}^{\max}$  достигаются на внут-

ренной стенке матрицы на удалении  $(0,1-0,15) \cdot t$  мм от режущей кромки и слабо падают от 320 МПа до 313 МПа по мере увеличения высоты матрицы от 4 мм до 15 мм.

8. Деформированное состояние матриц существенно зависит от их высоты. При этом условно можно выделить матрицы: низкие ( $H < d/3$ ,  $d = d_1$  – внутренний диаметр матрицы); средней высоты  $d/3 < H < 2d$ ; высокие ( $H > 2d$ ).

9. Для низких матриц характерно их распирание во всех сечениях; уменьшение высоты матрицы происходит вдоль внутренней образующей  $r = d/2$ , внешняя образующая  $r = d_3/2$  укорачивается незначительно или даже растягивается.

10. Матрицы средней высоты испытывают сужение в зоне режущей кромки и распирание в средней части и при приближении к подошве. Все сечения  $z = const$  матрицы осаживаются в направлении действия усилий штамповки, причем укорочение внутренней образующей на порядок выше, чем наружной.

11. Для высоких матриц характерной особенностью является волнообразный характер распирания сечений  $z = const$  при движении вдоль образующих в зоне режущей кромки, а также примерно равномерная осадка данных сечений в направлении действия усилия штамповки; доминирующими являются осевые перемещения точек матриц.

12. Распределение осевых напряжений в области подошвы низких матриц  $z = 0$  характеризуется резким всплеском сжимающих напряжений в зоне внутренней образующей и переходом к растягивающим напряжениям в зоне внешней образующей.

13. Осевые напряжения в зоне подошвы высоких матриц являются сжимающими и имеют близкий к равномерному закон распределения.

14. Распределение осевых напряжений в области подошвы матриц средней высоты носит промежуточный характер между законами их распределения для низких и высоких матриц.

**Пуансон-матрицы.** При исследовании НДС пуансон-матриц (рис. 15) изучали влияние толщины стенки на величины возникающих напряжений и перемещений. При этом для внутреннего диаметра  $d_1$ , равного 60 мм, наружный диаметр  $d_3$  принимал такие значения, что отношение  $d_3/d_1$  изменялось от 1,1 до 2,5. Общая высота пуансон-матрицы равнялась 70 мм.

Для удобства применения полученных результатов для штампуемых листовых материалов с любыми механическими характеристиками и любых толщин все расчеты производили при  $\sigma_{cp} = 100$  МПа и 1000 МПа,  $t = 1$  мм. В результате расчета получены все компоненты тензоров деформаций, напряжений и векторов перемещений для всех конечно-элементных моделей во всех рассмотренных конструктивных вариантах матриц и пуансон-матриц, т. е. полностью охарактеризованы их НДС.

Расчетная схема пуансон-матрицы (рис. 15) отличается от расчетной

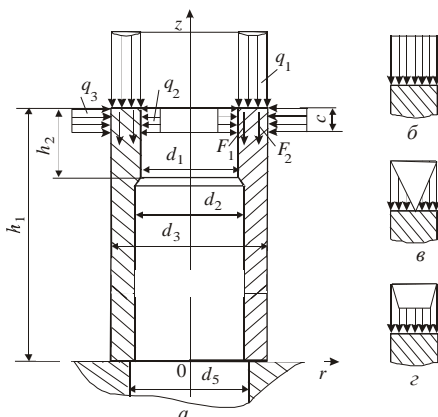


Рис.15. Расчетная схема пуансон-матрицы штампа

схемы матрицы наличием наружной режущей кромки, которая выполняет роль пуансона. Поэтому все приведенные соотношения справедливы, с небольшой адаптацией, и для пуансон-матрицы. Анализ НДС пуансон-матрицы показал, что изменение толщины штампуемого материала от 1 до 10 мм в 10 раз и более увеличивает осевые и радиальные перемещения, нормальные и касательные напряжения по всему поперечному сечению, но практически не изменяет величины максимальных

напряжений в зоне режущей кромки. Естественно, вне этой зоны напряжения увеличиваются пропорционально толщине, однако здесь они невелики по абсолютному значению. Эквивалентные напряжения вычисляли по энергетической гипотезе прочности.

На рис. 16 показаны графические зависимости относительных максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{э max}} (t=1 \text{ мм}, \sigma_{cp}=100 \text{ МПа})$  и максимальных осевых перемещений  $u_{z \text{ max}} (t=1 \text{ мм}, S_{cp}=1000 \text{ МПа})$  от относительной толщины стенки матрицы  $\gamma = (d_3 - d_2) / 2d_2$ , где 1-8 соответственно  $d_1=5; 10; 15; 20; 30; 50; 100; 150 \text{ мм}$ . Как следует из графиков, для уменьшения максимальных напряжений,

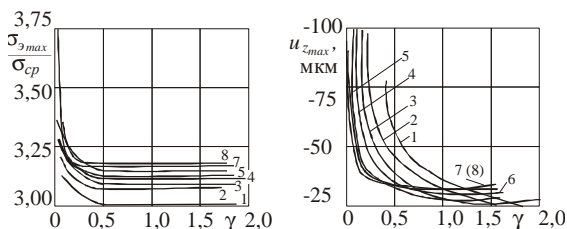


Рис. 16. Графические зависимости относительных максимальных эквивалентных напряжений и максимальных осевых перемещений  $u_{z \text{ max}}$

возникающих в зоне режущей кромки, в большинстве случаев увеличивать толщину стенки матрицы имеет смысл лишь в интервале  $0 < \gamma \leq 0,35$ . Дальнейшее утолщение стенки лишь увеличивает габаритные размеры и металлоемкость матрицы.

В процессе исследования НДС пуансон-матриц установлено, что характер приложения нагрузки к верхнему торцу существенно влияет на характер распределения и абсолютные значения максимальных перемещений и напря-

жений, возникающих в зонах режущих кромок. Это соответствует результатам, полученным в [1]. При удалении от верхнего торца пуансон-матрицы по оси  $Oz$  на 3-5 мм это влияние уменьшается, и закон распределения внешней нагрузки для общего напряженно-деформированного состояния практически уже не имеет значения. Однако здесь величины напряжений значительно меньше, поэтому прочностные расчеты следует проводить, исходя из максимальных значений напряжений, возникающих при наиболее неблагоприятном характере нагружения. Численные эксперименты показали, что наиболее неблагоприятным законом распределения исходных нагрузок на верхнем торце пуансон-матрицы для напряженного состояния зон режущих кромок является вариант, приведенный на рис. 15, в. В качестве основного конструктивного варианта для исследования распределения напряжений и перемещений рассматривали пуансон-матрицу со следующими параметрами:  $d_1=60$  мм;  $d_2=61$  мм;  $d_3=80$  мм;  $d_4=96$  мм;  $h_1=70$  мм;  $h_2=20$  мм;  $h_3=6$  мм;  $h_4=15$  мм;  $h_5=24$  мм.

На рис. 17, а показано распределение эквивалентных напряжений по контуру пуансон-матрицы основного исполнения, а на рис. 17, б – схема ее деформирования при штамповке листового материала толщиной 1 мм с  $S_{cp}=100$  МПа и 1000 МПа соответственно. В скобках даны величины радиальных и осевых перемещений в микронах.

Деформированное состояние пуансон-матрицы отличается от деформированного состояния вырубной матрицы тем, что здесь радиальные перемещения во всем сечении направлены от центра, в то время как в матрице ее верхняя часть с режущей кромкой под воздействием сформировавшейся системы сил перемещается к центру. Но как в матрицах, так и в пуансон-матрицах вертикальные перемещения верхнего торца значительно (в среднем на порядок) выше радиальных.

**Пуансон.** Анализ напряженно-деформированного состояния пуансонов

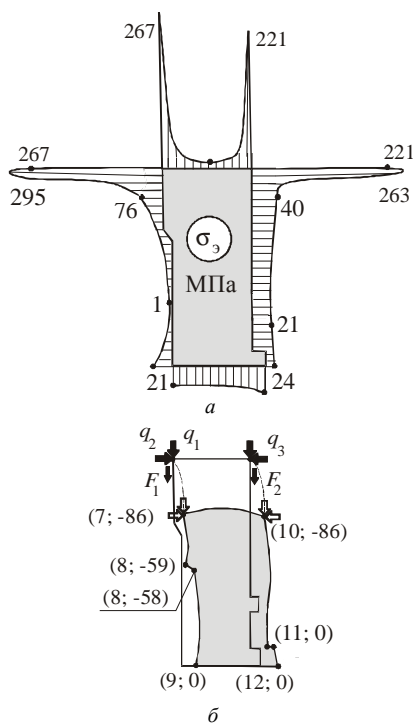


Рис. 17. Распределение  $\sigma_{экв}$  по контуру пуансон-матрицы основного исполнения (а) и схема ее деформирования при штамповке листового материала (б)

показывает полное соответствие полученных картин и величин напряжений и перемещений результатам, описанным в [1]. Происходит чувствительное изменение размеров и формы пуансона в районе режущей кромки. При этом напряжения локализуются в основном также в зоне режущей кромки.

**Анализ результатов исследований. Заключение.** Анализ результатов расчетов на жесткость вырубных матриц, пуансонов и пуансон-матриц с учетом характера деформирования пуансонов показывает, что при определенных усилиях штамповки и конструктивных параметрах режущего инструмента в процессе вырубки деталей за счет радиальных перемещений режущих кромок изменяется назначенный конструктором рабочий зазор. Так, например, при вырубке шайбы из стали 50ХГ ( $s_{cp} = 1200$  МПа) толщиной 4 мм с наружным диаметром 80 мм и внутренним 60 мм радиальное сближение режущих кромок между матрицей и пуансон-матрицей составит около 65 мкм, т. е. 20 % величины одностороннего номинального зазора для данного случая, что изменит требуемую точность вырубки и ухудшит качество поверхности среза шайбы. Зазор между пуансоном и пуансон-матрицей увеличится на 7 мкм, т. е. на 2 % номинального значения.

Таким образом, при проектировании рабочего инструмента следует считать его прочность и жесткость, определить величины радиальных смещений режущих кромок и скорректировать величину номинального зазора. Что касается осевых перемещений между матрицей и пуансон-матрицей, то они практически не влияют на точность штампуемых деталей, качество поверхности среза и величину зазора. В данном случае вся система „пуансон – матрица – штампуемый материал – пуансон-матрица” сжимаясь, смещается вниз на величину абсолютной осевой деформации пуансон-матрицы.

Расчеты показали, что изменение толщины стенки пуансон-матрицы практически не влияет на максимальные значения напряжений в зоне режущих кромок, а на расстоянии 3-5 мм от верхнего торца в тонких стенках могут возникать напряжения, превосходящие допустимые (в зоне режущих кромок напряженное состояние, близкое к всестороннему сжатию, позволяет стенкам выдерживать величины напряжений, в несколько раз превосходящие допускаемые). В частности, конструкторам не рекомендуется назначать толщину стенки пуансон-матрицы, при которой отношение  $d_3 / d_1$  было бы меньше 1,2. В противном случае при штамповке листового материала толщиной  $t \geq 3$  мм и  $s_{cp} \geq 400$  МПа, может разрушиться пуансон-матрица уже на первых циклах нагружения.

**Список литературы:** 1. *Заяренко Е.И.* Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов. – Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. – Харьков. – 1992. – 418 с. 2. *Гоголь Н.А., Ткачук Н.А., Назарова О.П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов штампов // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАА, 2005. – Вип.31. – С.103-108. 3. *Гоголь Н.А., Назарова О.П., Ткачук А.В., Кохановская О.В.* К задаче формирования расчетных элементов технологических систем листовой штамповки // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Динамика и прочность машин”. – 2005. – №47. – С.50-60. 4. *Ткачук Н.А., Грищенко Г.Д., Липовецкий Л.С., Глуценко Э.В., Гоголь Н.А.* Методика экспериментального исследования элементов механических систем методом голографической

интерферометрии // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С.88-99. **5. Гоголь Н.А.** Влияние конструктивных и технологических параметров на напряженно-деформированное состояние матриц штампов холоднолистовой штамповки // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР. – 2005. – №60. – С.68-76. **6. Демина Н.А., Назарова О.П., Четурной А.Д., Бараников Я.Н.** Численное моделирование процесса холоднолистовой штамповки // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР. – 2006. – №3. – С.70-79. **7. Демина Н.А.** К вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – 2006. – №24. – С.75-83. **8. Мовшиович И.Я., Заряненко Е.И., Долгов В.А.** Исследование сопротивления срезу при штамповке листового материала // Технология и организация производства, 1975.– № 2.– С.28-30. **9. Хмара С.М., Смолянинов В.П., Коломойцев А.А. и др.** О причинах выкрашивания твердосплавных вырезных матриц // Кузнечно-штамповочное производство, 1965. – №8.– С.21-23. **10. Хмара С.М., Смолянинов В.П., Коломойцев А.А. и др.** К определению напряжений на режущих кромках вырезных твердосплавных матриц // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 6.– С.22-24. **11. Артюхов В. П., Савченко В. И. и др.** Исследования распределения напряжений в рабочих элементах вырубных штампов методом фотоупругости // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 11. – С.24-27. **12. Елистратов В. И.** Исследование нормальных напряжений по торцу твердосплавных пуансонов при вырубке-пробивке // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 8. – С.21-24. **13. Заряненко Е. И., Ткачук А. В., Ткачук Н. А.** Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ// Прогрессивная технология, переналаживаемая оснастка и инструмент. // Мат. отр. науч.-техн. семинара. – Харьков, 1985. – С.95-103. **14. Заряненко Е. И., Ткачук А. В., Ткачук Н.А.** Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом // ВОТ. Серия 2. – 1985. – Вып.10(176). – С.20-23. **15. Львов Г.И., Ткачук Н.А.** Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки // Механіка та машинобудування. – 1997.– №1. – С.34-39.

*Поступила в редколлегию 21.01.2008*

УДК 539.3

**О.О.ЗОЛОЧЕВСЬКИЙ**, докт. техн. наук, НТУ “ХПИ”

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІ ПЕРОВСКІТОВИХ КЕРАМІЧНИХ МЕМБРАН, ЯКІ БАЗУЮТЬСЯ НА ХІМІЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ДЕФЕКТІВ ТА НА АНАЛІЗІ ХІМІЧНО НАВЕДЕНИХ НАПРУЖЕНЬ**

У статті описані дослідження взаємозв'язку між характеристиками перовскітової кераміки, такими як кристалічна структура, склад, хімічні дефекти та дефекти мікроструктури, та властивостями матеріалу, пов'язаними з дифузією іонних та електронних домішок, а також дослідження впливу характеристик матеріалу, хімічних градієнтів кисню, явищ переносу, хімічного розширення та дифузійної повзучості на деградацію та зниження терміну експлуатації проникних для кисню мембран. Також в роботі буде описано, як характеристики матеріалу (кристалічна структура, склад, хімічні дефекти та дефекти мікроструктури), заміщення кисню, дифузійні процеси, кінетичне перемішування, хімічне розширення, деформації повзучості, а також зростання пошкоджуваності внаслідок повзучості, що супроводжується мікроструктурними змінами в мембрані через деякий час, можуть бути керованими, з використанням хімічно обумовлених напружень. Це дозволить знизити деградацію, оптимізувати конструкцію та умови керування, а також підвищити час експлуатації каталітичних мембранних реакторів.

In this paper, a comprehensive investigation will be carried out with the main focus directed at the understanding of the relationships between characteristics of perovskite ceramics such as crystal structure, composition, defect chemistry and microstructure, and material properties related to diffusion of ionic and electronic species as well as at the understanding