

элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с. **7. Ткачук Н.А.** Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – вып.56.– С.175-181. **8. Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.** Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // *Механика та машинобудування*. – 2005. – № 1. – С.184-194. **9. Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Головченко В.И., Гоголь Н.А.** Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 53. – С.116-138. **10. Веретельник Ю.В., Миргородский Ю.Я., Пелешко Е.В., Ткачук Н.А.** Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных систем // *Механика та машинобудування*. – 2003.– №1. – Том 2. – С.3-7. **11. Чепурной А.Д., Глинин Г.П., Гусев Ю.Б., Пеклич М.М., Барчан Е.Н., Ткачук Н.А.** Расчетно-экспериментальный метод определения параметров элементов машиностроительных конструкций // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 53. – С.162-176. **12. Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А.** Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // *Механика та машинобудування*. – 2002.– №1. – С.6-13. **13. Сеа Ж.** Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. **14. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В.** Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 240 с. **15. Марчук Г.И.** Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с. **16. Кравчук А.С.** К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С.308-310. **17. Кравчук А.С., Суряков В.А.** Численное решение геометрически нелинейных контактных задач. // Доклады АН СССР, 1981. – Т.259. – №6.– С.1327-1329. **18. Кравчук А.С.** К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикл. мат. и мех. – 1977. –Т.41.– Вып.2. – С.329-337. **19. Кравчук А.С., Васильев В.А.** Численные методы решения контактных задач для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикладная механика. – 1980. –Т.16.– Вып.6. – С.9-15. **20. Кравчук А.С., Васильев В.А.** Вариационный метод в контактной задаче теории упругости / В кн. Упругость и неупругость. – М.: Наука, 1978. – С.23-31. **21. Дюво Г., Лионс Ж.Л.** Неравенства в механике и физике. – М.: Наука, 1980. – 384 с. **22. Лионс Ж.Л.** Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 587 с. **23. Гловачек И, Ганслингер Я, Нечас И., Ловишек Я.** Решение вариационных неравенств в механике. – М.: Мир, 1986. – 270 с. **24. Гуляев В.И., Баженов В.А., Гоцуляк Е.А.** Устойчивость нелинейных механических систем. – Львов: Вища школа, 1982.– 255 с. **25. Иванов В.К.** О корректно поставленных задачах // Математический сборник. 1963. – № 2.– С.211-223. **26. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1974. – 224 с. **28. Вест Ч.** Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. **29. Гинзбург В.М., Степанов Б.М.** Голографические измерения. – М.: Наука, 1981. – 296 с. **29. Роберт К. Эрф.** Голографические неразрушающие исследования – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с. **30. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.** Оптическая голография – М.: Мир, 1982. –736 с. **31. Оптическая голография /** Под ред. Колфилда Г., в 2-х томах. – М.: Мир, 1982. – 736 с. **32. Джоунс Р., Уайкс К.** Голографическая и спекл интерферометрия. – М.: Мир, 1986 – 328 с. **34. Методы неразрушающих испытаний /** Под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1972. – 496 с. **35. Капустин А.А.** Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций. – В кн.: Физические основы голографии. Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137-159.

Поступила в редколлегию 19.12.2005

Н.А. ДЕМИНА, Таврическая государственная агротехническая академия, г. Мелитополь

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТРИЦ ШТАМПОВ ХОЛОДНОЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

У статті описані методи, алгоритми та програмне забезпечення для автоматизованого дослідження напружено-деформованого стану матриць штампів для холоднолистової штамповки. Використано параметричний підхід до опису матриць та навантаження на різучі кромки. Наведені результати аналізу напружено-деформованого стану сімейства конструкцій матриць.

In the article methods, algorithms and software are described for the automated research of stressed deformed state of matrices of stamps for cold sheet stamping. The parametrical approach is taken to description of matrices and loading on cuttings edges. The results of analysis of stressed deformed state of family of matrices constructions are given.

Введение. В работах [1, 2] описана технология, методы, алгоритмы и специализированный программно-аппаратный комплекс (СПАК) для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов штамповой оснастки. В то же время в этих публикациях не затронуты вопросы анализа влияния конструктивных и технологических параметров на их напряженно-деформированное состояние. Эта актуальная проблема всегда возникает при проектировании штамповой оснастки, в частности, режущих элементов для разделительных операций “вырубки – пробивки”, особенно для листового материала с высокими механическими характеристиками, в первую очередь, – напряжениями среза [3-7]. В связи с этим возникает задача разработки параметрических расчетных моделей матриц для анализа их напряженно-деформированного состояния в среде специализированной системы автоматизированного проектирования элементов штампов.

Расчетная схема. Одним из наиболее ответственных и нагруженных элементов специализированных штампов (СШ) являются матрицы [7]. Рассмотрим матрицу СШ в виде тела вращения (рис. 1). Ее геометрия задается с помощью следующих параметров: диаметров $d(d_1, d_2, d_3)$ и высот $z(h_1, h_2)$ (рис. 2). Толщину стенки матрицы определяем по формуле

$$h = \frac{d_3 - d_1}{2}. \quad (1)$$

Рассмотрим схему нагружения матрицы СШ. Ее верхняя кромка

нагружена усилиями штамповки. Их величины определяем на основе теоретических и экспериментальных исследований законов распределения контактных давлений в зоне взаимодействия штампуемого материала с режущими кромками, подробно изложенных в работах [3-7].

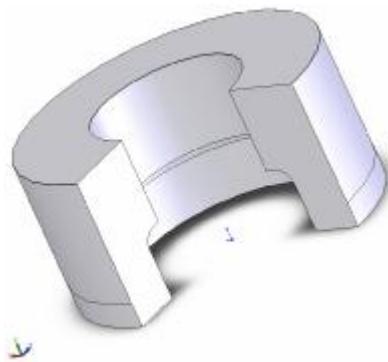
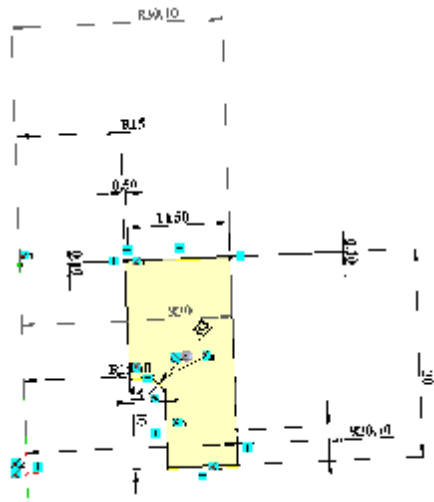


Рис. 1. Конструкция и параметры матрицы штампа в виде тела вращения



На основе анализа результатов, представленных в этих работах, сделан вывод о возможности с достаточной степенью точности описания закона распределения контактных давлений линейной зависимостью от координаты r .

Согласно работам [6, 7] усилие штамповки P_1 определяем по формуле

$$P_1 = k \sigma_{\text{ср}} \pi d_1 t, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ – напряжение среза, принимаемое равным $0,8 \sigma_{\text{в}}$ ($\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности штампуемого материала);

d_1 – диаметр режущей кромки; t – толщина штампуемого материала;

k – коэффициент затупления режущих кромок и неравномерности

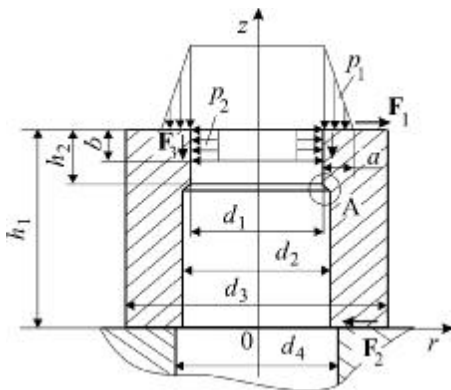


Рис. 2. Расчетная схема матрицы штампа

зазора, принятый равным 1,0.

Ширина контактного пояaska на режущей кромке a (см. рис. 2) вычисляется по формуле:

$$a = 0,5 \cdot t. \quad (3)$$

Распирающая нагрузка P_2 , равномерно распределенная на участке протяженностью

$$b = 0,1 \cdot t \quad (4)$$

связана с усилием штамповки P_1 соотношением

$$P_2 = \rho P_1, \quad (5)$$

где ρ – коэффициент, полученный эмпирическим путем и принимаемый равным 0,35.

На участке b действует также усилие трения F_3 , определяемое законом Кулона и равное

$$F_3 = k_T P_2, \quad (6)$$

где $k_T = 0,3$ – коэффициент трения.

Усилением трения F_1 , возникающим в зоне взаимодействия режущей кромки со штампуемым материалом, можно пренебречь в силу малости взаимных тангенциальных смещении последних.

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

$$u_z \Big|_{z=0} = 0; \quad (7)$$

$$\tau_{rz} \Big|_{z=0} = 0; \quad (8)$$

где u_z – осевые перемещения точек матрицы,

τ_{rz} – касательные напряжения.

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

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 (МКЭ) к

решению поставленной задачи описаны в [1].

Таблица 1

Основные конструктивные параметры матрицы СШ, мм

№ пп.	d_1	d_3	h	h_1	h_2	№ пп.	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

2. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния матриц с варьированием высоты. С использованием разработанного программного обеспечения были 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 матрицы высотой $H = 30$ мм показаны на рис.3. С ростом высоты матрицы растут перемещения u_z . Для малых высот H характерно смещение точек режущих кромок в направлении оси r (происходит расширение матрицы в зоне режущей кромки). При $H \geq 15$ мм наблюдается сужение матрицы в зоне режущей кромки. При достаточно больших высотах ($H \geq 75$ мм) характерно волнообразное распираие матрицы вдоль образующей в области, примыкающей к режущей кромке.

На рис. 4 представлена картина распределения радиальных перемещений – максимальных (u_r^{\max}) и на режущей кромке (u_r^{kp}), а также максимальных перемещений (u_z^{\max}) в зависимости от высоты матрицы (при $\sigma_{cp} = 100$ 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 перемещений $u_r^{кр}$ – до 0,1 мкм. Перемещения u_z^{max} растут с ростом высоты матрицы от 2,0 мкм для матрицы высотой $H=4$ мм до 10,6 мкм для матрицы высотой $H=200$ мм.

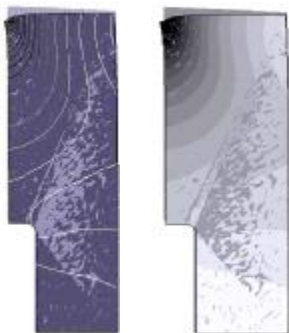


Рис. 3. Деформированное состояние матрицы штампа высотой 30мм

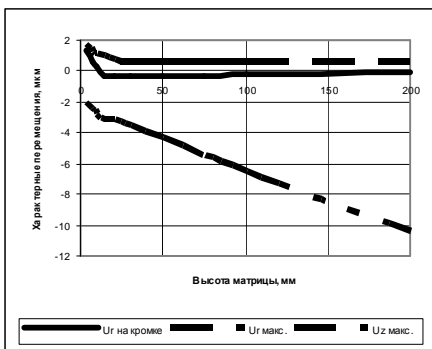


Рис. 4. Зависимость характерных параметров деформированного состояния матрицы штампа от ее высоты

Картина напряженного состояния исследованных матриц соответствует в основных чертах результатам, представленным в [1]. Эпюры распределения напряжений σ_z , σ_r , σ_θ , τ_{rz} и эквивалентных напряжений $\sigma_{экр}$ для матриц с высотой $H \geq 20$ мм аналогичны приведенным в [1]. Эпюры эквивалентных напряжений $\sigma_{экр}$ (по Мизесу) для этих матрицы СШ высотой 30 мм представлены на рис. 5.



Рис. 5. Характер распределения эквивалентных (по Мизесу) напряжений в районе режущей кромки матрицы штампа высотой 30мм (область кромки выделена с разными масштабами)

Отличительной особенностью напряженного состояния матриц СШ малой высоты ($H \leq 15$ мм) является распространение зоны высоких напряжений на область подошвы матрицы. Картина распределения

напряжений σ_z – доминирующих для матриц СШ – при $z=0$ носит явно выраженный неравномерный характер в отличие от близкого к равномерному закону распределение σ_z по координате r для матриц с $H \geq 20$ мм. Но величины максимальных значений σ_z^{\max} , наблюдающихся на внутренней стенке матрицы на расстоянии $(0,1-0,15) \cdot t$ от режущей кромки, и значение $\sigma_z^{\text{кр}}$ на режущей кромке неизменны для всех высот и примерно равны соответственно – 450 МПа и – 425 МПа.

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

Таблица 2

Параметры напряженно-деформированного состояния матриц СШ
в зависимости от их высоты ($\sigma_{\text{ср}} = 100$ МПа)

H, мм	Перемещения, мкм							
	$u_r^{\text{кр}}$	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					
H, мм	Напряжения, МПа							
	$\sigma_z^{\text{кр}}$	σ_z^{\max}	σ_r^{\max}	σ_θ^{\max}	$\tau_{rz}^{\text{кр}}$	τ_{rz}^{\max}	$\sigma_{\text{экр}}^{\text{кр}}$	$\sigma_{\text{экр}}^{\max}$
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

В табл. 2 представлены численные характеристики напряженно-деформированного состояния матриц СШ в зависимости от их высоты. В табл. 3 представлены характеристики напряженного состояния в слое, отстоящем на расстоянии $1/5H$ от подошвы матрицы при $\sigma_{cp} = 100$ МПа. В числителе указаны максимальные значения напряжений в слое (для σ_z и τ_{rz}), а также $\sigma_{экр}$ максимальные напряжения наблюдаются в области $r = 15$ мм), в знаменателе – значения напряжений в средней части матрицы – ($r = 20$ мм)

Таблица 3

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

H, мм	Напряжения, МПа									
	σ_z		σ_r		σ_θ		τ_{rz}		$\sigma_{экр}$	
	в слое	в средней части	в слое	в средней части	в слое	в средней части	в слое	в средней части	в слое	в средней части
4	-53,0	-21,5	-10,3	-7,2	14,2	14,2	15,6	-2,6	58,1	20,2
7	-40,0	-11,0	-6,2	-4,4	10,3	8,8	8,4	-0,8	41,0	16,0
10	28,8	-12,6	-3,6	-3,6	10,2	7,7	3,2	0,9	31,4	15,9
15	20,2	-9,8	-2,2	-2,2	7,6	7,6	2,0	1,4	25,0	13,6
20	-9,3	-8,5	0,3	0,2	3,1	2,2	0,9	9,7	10,0	10,0
30	-9,3	-8,6	0,5	0,2	3,1	2,0	0,7	0,4	10,0	10,0
50	-9,2	-8,6	0,4	0,2	1,6	1,1	0,3	0,2	9,2	8,7
75	-8,8	-8,8	-0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,1	-0,1	8,7	8,7
100	-8,7	-8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	8,7
200	-8,8	-8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	8,8

На рис. 6, 7 представлены характерные распределения компонент вектора перемещений в матрице, в частности, в районе режущей кромки.



Рис. 6. Характер распределения



Рис. 7. Характер распределения радиальных

осевых перемещений в районе режущей кромки матрицы штампа высотой 30мм

перемещений во всей области и в районе режущей кромки матрицы штампа высотой 30мм

Закключение. Представленные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Доминирующими напряжения в исследованных матрицах СШ различной высоты являются напряжения σ_z , а далее по степени уменьшения - σ_r , σ_θ , τ_{rz} .

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

3. Максимальное значение напряжений σ_r достигается на режущей кромке матрицы СШ и равно примерно –240 МПа при $\sigma_{cp} = 100$ МПа.

4. Величины максимальных напряжений σ_z^{\max} , σ_r^{\max} и τ_{rz}^{\max} , а также напряжений на режущей кромке $\sigma_z^{кр}$ и $\tau_{rz}^{кр}$ имеют одинаковый уровень независимо от высоты толщины стенки матрицы.

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

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

7. Максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}^{\max}$ достигаются на внутренней 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.

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности и работоспособности созданного специализированного программного обеспечения и могут быть использованы в практике конструирования режущих элементов штампов.

В дальнейшем планируется построить многопараметрическую базу данных, содержащую информацию о зависимости характеристик напряженно-деформированного состояния от всех значимых конструктивных и технологических параметров.

Список литературы. 1. Львов Г.И., Ткачук Н.А. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки // Механика та машинобудування. – 1997.– №1. – С.34-39. 2. Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Головенко В.И., Гоголь Н.А. Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Машинознавство та САПР”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 53. – С.116-137. 3. Артюхов В.П., Савченко В.И. Исследования распределения напряжений в рабочих элементах вырубных штампов методом фотоупругости. // Кузнечно-штамповочное производство, 1970. – № 11. – С.24-27. 4. Елистратов В.И. Исследование нормальных напряжений по торцу твердосплавных пуансонов при вырубке-пробивке. // Кузнечно-штамповочное производство, 1973. – № 8. – С.21-24. 5. Заярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ // В сб.: Прогрессивная технология, переналаживаемая оснастка и инструмент. Материалы отраслевого научно-технического семинара. – Харьков. – 1985. – С.95-103. 6. Заярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом. – Вестник Оборонной Техники. Серия 2, 1985. – Вып.10(176). – С.20-23. 7. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.

Поступила в редколлегию 22.12.2005