

**О.А. ИЩЕНКО**, ассистент каф. высшей математики, Государственный Таврический агротехнологический университет, Мелитополь;  
**Н.А. ДЕМИНА**, канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. высшей математики, Государственный Таврический агротехнологический университет, Мелитополь;  
**А.В. ГРАБОВСКИЙ**, канд. техн. наук, мл. научн. сотрудник каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”, Харьков,  
**А.В. ТКАЧУК**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., ст. научн. сотр. каф. ЭИКТ, НТУ „ХПИ”, Харьков

**БАЗОВЫЕ ПЛИТЫ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ: НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

*Для визначення міцності базових плит розділових штампів розроблено новий підхід та математичну модель. Створені параметричні моделі базових плит, на конкретних прикладах проілюстровано розрахунок напружено-деформованого стану базових плит з урахуванням контактної взаємодії з підштамповою плитою преса.*

*Для определения прочности базовых плит разделительных штампов разработаны новый подход и математическая модель. Созданы параметрические модели базовых плит, на конкретных примерах проиллюстрирован расчет напряженно-деформированного состояния базовых плит с учетом контактного взаимодействия с подштамповой плитой прессы.*

*A new approach and mathematical model are developed to determine the strength of separating stamps base plates. The parametric models of base plates are created; the calculation of stress-strain state of base plates is illustrated on concrete examples taking into account contact interaction with press under-stamp plate.*

**Введение.** Как показывает мировая практика, одним из приоритетных направлений современного машиностроения становится широкое внедрение прогрессивных технологических процессов [1-10]. В частности, интенсивно внедряется переналаживаемая листоштамповочная оснастка. В связи с этим возникает задача разработки методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) наиболее нагруженных элементов штампов, определяющих их прочность и работоспособность. В этой связи особого внимания требуют методы исследования базовых нижних плит переналаживаемых разделительных штампов (РШ), для исследования НДС которых существующие методы требуют существенного развития.

*Целью работы* является совершенствование методов и моделей для расчета базовых плит штампов на основе определения напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия и разработка методологии определения рациональных параметров элементов штампов.

**1. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит штампов с учетом контактного взаимодействия.** Для разработки новых подходов и моделей для расчета элементов штамповой осна-

стки, в частности, базовых плит, на основе анализа напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия необходимо провести анализ конструкций и условий эксплуатации штампов, выявить наиболее нагруженные и ответственные элементы, разработать новые математические и численные модели. В работе [1] описаны решения данных задач на примере разделительных штампов для холоднолистовой штамповки. В частности, выделяются универсальные специализированные переналаживаемые штампы (УСПШ) (рис. 1), специализированные штампы (СПШ) (рис. 2) и универсальные переналаживаемые штампы с механизированным закреплением пакетов (УПШ-М) (рис. 3).

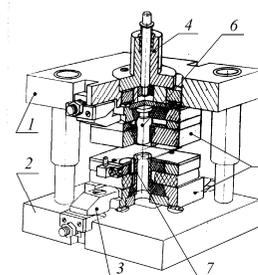


Рис. 1. Конструкция УСПШ совмещенного действия

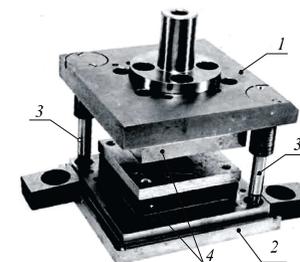
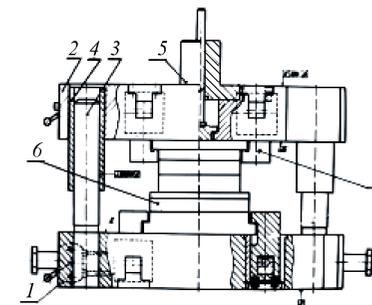


Рис. 2. Специализированный штамп с прихватами: 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – направляющие колонки; 4 – сменный пакет

Рис. 3. Конструкция переналаживаемого штампа с механизированными прихватами:

- 1 – нижняя плита; 2 – верхняя плита;
- 3 – втулки; 4 – направляющие колонки;
- 5 – хвостовик; 6 – сменный пакет;
- 7 – механизированные прихваты



Специализированные переналаживаемые штампы (СПШ) так же, как и УСПШ, собираются из универсальных блоков и сменных пакетов (пакеты изготавливаются на базе комплекта заготовок, который содержит унифицированные заготовки матрицы, съемника, держателей, резинового буфера, подкладок, фиксирующих деталей). СПШ предназначены для выполнения разделительных операций листовой штамповки деталей в условиях серийного, крупносерийного и даже массового производства. Разработано пять его типоразмеров, каждый из которых включает блоки с задним, диагональным и осевым расположением направляющих узлов, а также комплекты заготовок для штампов совмещенного действия, с верхним прижимом и жестким съемником. В СПШ предусмотрена штамповка деталей из листовых материалов толщиной 4-6 мм с различными физико-механическими

характеристиками.

Специализированный штамп, собранный из универсального блока и комплекта заготовок (см. рис. 2) представляет собой штамп специального типа, однако имеет специфические отличительные особенности: блок является универсальным и при сборке штампа не требует доработки; пакет в штампе является сменным; закрепление пакета в блоке осуществляется винтами, а фиксация – на фиксаторы блока при помощи фиксирующих втулок пакета.

Универсальные переналаживаемые штампы с механизированным закреплением пакетов предназначены для разделительных операций листовой штамповки деталей в условиях единичного, опытного, мелкосерийного и серийного производств [10] и состоят из универсальных механизированных блоков и сменных переналаживаемых пакетов (см. рис. 3). Точностные и эксплуатационные возможности СПШ соответствуют аналогичным характеристикам стационарных штампов. Основные сведения из технической характеристики УСПШ и СПШ приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Техническая характеристика УСПШ**

Наименование показателей	Количественные показатели
Габаритные размеры блоков, мм	150x220-30x450
Габаритные размеры пакетов, мм	85x115- 320x320
Закрытая высота блоков, мм	180-280
Закрытая высота пакетов, мм	95-170
Размеры штампуемых деталей, мм	25x40-200x200
Толщина материала, мм	0,1-6,0
Усилие штамповки, кН	250-1000

Таблица 2

**Техническая характеристика СПШ**

Наименование показателей	Типоразмеры				
	1	2	3	4	5
Габаритные размеры блока с задним расположением направляющих узлов, мм	140x160	180x220	250x320	-	-
Габаритные размеры блока с диагональным расположением направляющих узлов, мм	160x160	220x220	280x320	360x300	430x560
Габаритные размеры блока с осевым расположением направляющих узлов, мм	140x160	180x220	250x320	-	-
Закрытая высота блока, мм	110	150	195	230	275
Усилие пресса, кН	25-100	100-250	400-630	630-1000	1000-2500
Габаритные размеры пакета, мм	100x100	125x125	180x180	320x320	360x360
Толщина штампуемого материала, мм	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0

Отличительными особенностями конструкций СПШ: заднее расположение направляющих узлов; наличие в базовых плитах различных горизонтальных и вертикальных пазов, вырезов, полостей и отверстий для монтажа элементов системы механизации; механизированное закрепление пакетов с использованием пневмо-гидравлического привода; необходимость обеспечения точного базирования и надежной фиксации сменных переналаживаемых пакетов; закрепление режущих частей в пакетах при помощи композиционных материалов типа пластмассы АСТ-Т. Основные показатели технической характеристики УПШ-М приведены в табл. 3 [11].

Таблица 3

**Техническая характеристика УПШ-М**

Наименование показателей	Типоразмеры				
	1	2	3	4	5
Габаритные размеры блока, мм	280x504	280x504	280x504	330x580	420x665
Габаритные размеры пакета, мм	80x160	100x160	125x160	160x200	250x265
Усилие пресса, кН	250-400	250-400	250-400	630-1000	630-1000
Габариты штампуемых деталей	22x36	36x48	45x67	65x95	100x150
Толщина штампуемого материала, мм	0,5-2,0	0,5-2,0	0,5-2,0	0,5-4,0	0,5-4,0
Закрытая высота блока, мм	175	200	210	280	295

Анализ конструкций разделительных штампов, в т.ч. переналаживаемых, дает возможность перейти к определению наиболее нагруженных и ответственных их элементов [5-13]. В работе [10] отмечается, что одним из наиболее универсальных и практически применяемых признаков классификации элементов сложных механических систем технологической оснастки является сущность функционального назначения элемента. Критерием обладания тем или иным признаком может служить роль и технологическое предназначение элемента в процессе функционирования системы. По функциональному признаку элементы вырубных штампов всех рассмотренных разновидностей можно сгруппировать и классифицировать следующим образом: рабочие режущие элементы; опорно-базовые элементы; направляющие элементы; корпусные и держащие элементы; прижимные, фиксирующие и удаляющие элементы; крепежные и другие монтажные элементы. К рабочим элементам РПШ относятся вырубные, пробивные пуансоны, матрицы и пуансон-матрицы. Изготавливают режущие элементы обычно из сталей Х12М, У8А, У10А. Они воспринимают значительные усилия штамповки, прикладываемые к режущим кромкам. Опорно-базовые элементы в РПШ представлены нижней и верхней базовыми плитами, на которых закрепляются переналаживаемые

мые пакеты. Для изготовления базовых плит используют стали 40X, 20X, ре- же – сталь 45. Данные элементы воспринимают усилие штамповки по более значительным площадкам, чем рабочие (режущие) элементы, что является более благоприятным режимом работы.

Естественно, что в процессе формирования расчетных моделей элемен- тов штамповой оснастки необходимо исходить из системного подхода, т.е. учитывая всю систему связей, ограничений, сопряжений, силовых потоков в технологической системе холоднолистовой штамповки.

Вычлняя из технологической системы тонколистовой штамповки (рис. 4) отдельные подсистемы, можно, в частности, построить расчетную схему базовых плит штампов.

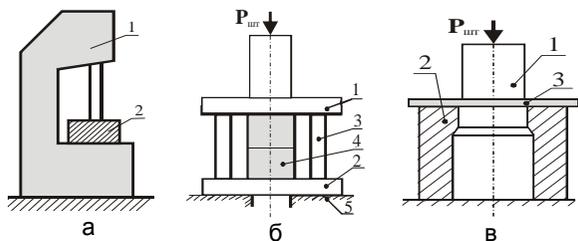


Рис. 4. Структура технологи- ческой системы тонколисто- вой штамповки: а – пресс 1 и штамп 2; б – верхняя и нижняя плиты штампа 1 и 2, колонки 3, пакет 4 и подштамповая плита 5; в – пуансон 1, матрица 2 и штамп- уемый материал 3

Согласно [12, 13] усилие штамповки  $P_1$ , действующее на нижнюю ба- зовую плиту, определяем по формуле [7-9]

$$P_1 = k \sigma_{ср} \pi d_1 t. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_{ср}$  – напряжение среза, принимаемое равным  $0,8\sigma_B$  ( $\sigma_B$  – предел прочности штампуемого материала);  $d_1$  – диаметр режущей кромки;  $t$  – толщина штампуемого материала;  $k$  – коэффициент затупления режущих кро- мок и неравномерности зазора, принятый равным 1,0. Это усилие интеграль- но прикладывается к нижней плите.

Плита опирается на подштамповую плиту пресса. Тогда условие опирания:

$$u_z|_{S_p} \geq 0, \quad (2)$$

где  $u_z$  – вертикальная компонента вектора перемещений точек базовой плиты штампа.

Напряженно-деформированное состояние базовой плиты с компонентами  $\sigma_{ij}$  (тензор напряжений),  $\epsilon_{ij}$  (тензор деформаций) ( $i = 1,2,3$ ) и  $\mathbf{u}$  (вектор переме- щений) можно найти из условия минимума функционала полной энергии системы

$$I = \frac{1}{2} \int_{(\Omega)} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} d\Omega - \int \mathbf{f} \mathbf{u} dS, \quad (3)$$

где  $\Omega$  – область, занимаемая исследуемым объектом с границей  $S$ , а  $\mathbf{f}$  – вектор нагруз- ки. При этом минимум ищется на перемеще- ниях, удовлетворяющих условию (2) [14-25].

При этом наиболее эффективным яв- ляется применение метода конечных эле- ментов. В частности, в данной работе была использована система ANSYS.

**Результаты расчета** напряженно- деформированного состояния нижних базо- вых плит штампов. В отличие от работ Е.И. Заярненко [10, 13], в данной работе использована расчетная схема контакти- рующих тел на основе существенно трех- мерной задачи теории упругости, без упр- ощающих предположений относительно представления плиты как толстой пласти- ны. На рис. 5 представлена расчетная схема исследуемой системы взаимодействующих тел для случая опирания на плиту с про- вальным отверстием. В процессе исследо- ваний проанализировано влияние толщины нижней плиты  $H$  на ее НДС, а также диа- метра провального отверстия  $d$  (см. рис. 5). Для этого толщина варьировалась в следующих зна- чениях:  $H = \{15; 30; 45; 60; 75; 90\}$  мм; а диаметр провального отверстия – в значениях  $d = \{80; 120; 160; 200; 240\}$  мм. Между взаимодействующими телами задавались условия контактного взаимодействия по плоскостям

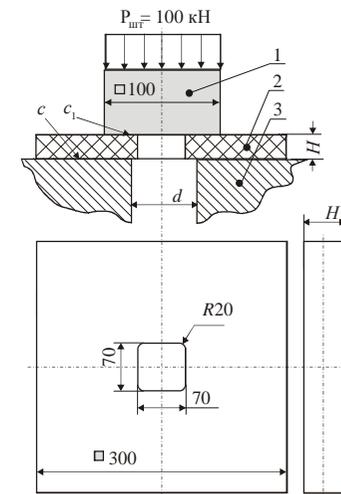
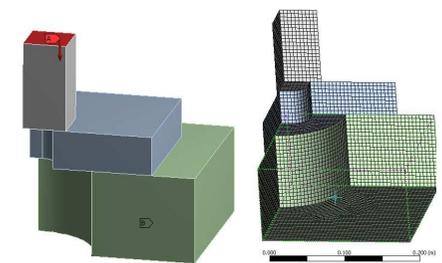


Рис. 5. Расчетная схема нижней плиты во взаимодействии с пакетом и подштамповой плитой пресса: 1 – пакет; 2 – нижняя плита; 3 – подштамповая плита,  $C, C_1$  – поверхности контакта



а б  
Рис. 6. Геометрическая (а) и конечно- элементная (б) модели нижней плиты во взаимодействии с пакетом и подштамповой плитой пресса

с,  $c_1$  (см. рис. 5) с трением, ко- эффициент трения – 0,3. На рис. 6 представлены геометрическая модель системы и конечно- элементная разбивка, на рис. 7- 14 – распределения контактных давлений и компонент НДС для базового вари- анта ( $H = 45$  мм;  $d = 160$  мм), а на рис. 15, 16 – зависимости некоторых величин от варьируемых параметров. Исследования подтвердили, что ширина площадки контакта слабо зависит от величины прилагаемого усилия штамповки и опре-

деляется геометрическими размерами базовых плит и провального окна подштамповой плиты прессы.

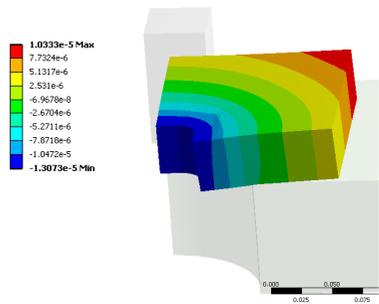


Рис. 7. Характер распределения прогибов (м) нижней плиты штампа

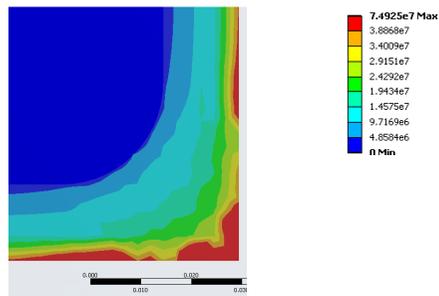


Рис. 8. Распределение контактного давления (Па) в сопряжении нижней плиты штампа с пакетом

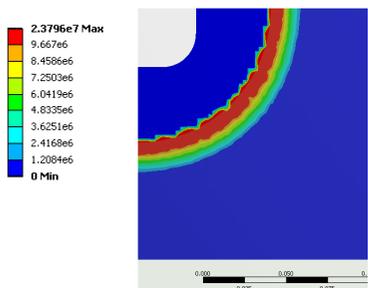


Рис. 9. Распределение контактного давления (Па) в сопряжении нижней плиты штампа с подштамповой плитой

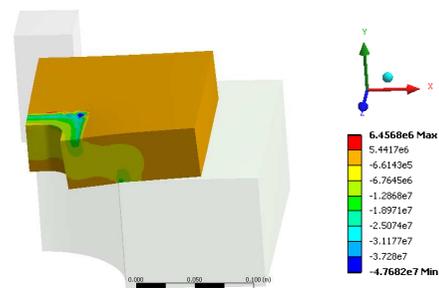


Рис. 10. Распределение осевых напряжений (Па) в нижней плите штампа

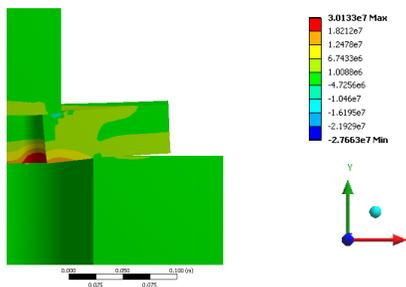


Рис. 11. Распределение первых главных напряжений (Па) в нижней плите штампа

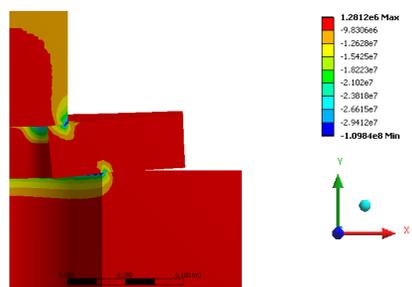


Рис. 12. Распределение третьих главных напряжений (Па) в нижней плите штампа

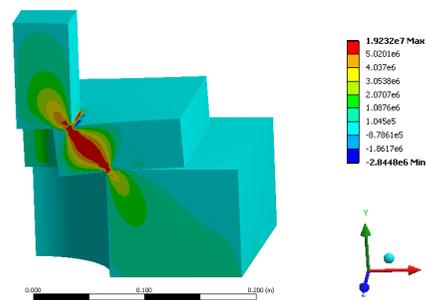


Рис. 13. Распределение касательных напряжений (Па) в нижней плите штампа (плоскость XY)

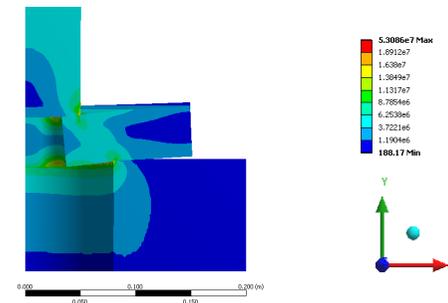
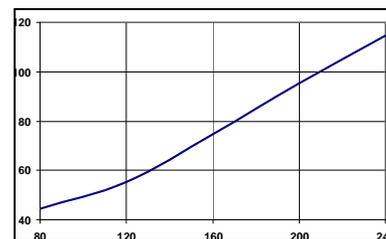
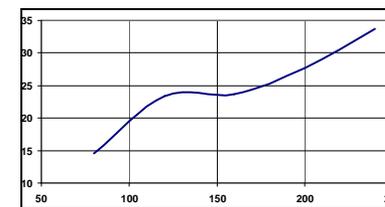


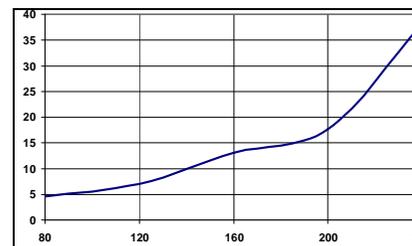
Рис. 14. Распределение максимальных касательных напряжений (Па) в нижней плите штампа



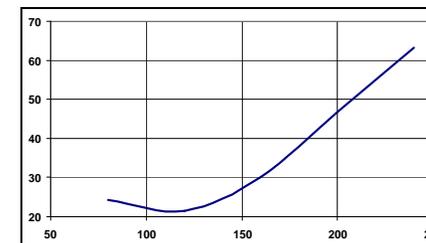
Зависимость контактного давления от пакета (МПа) от диаметра провального отверстия (мм)



Контактное давления (МПа) в сопряжении нижняя плита – подштамповая плита в зависимости от диаметра провального отверстия (мм)



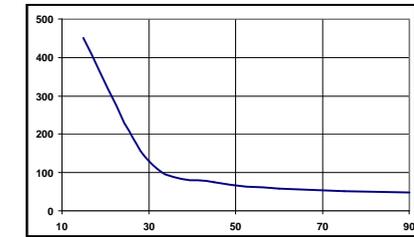
Зависимость прогиба (мкм) от диаметра провального отверстия (мм)



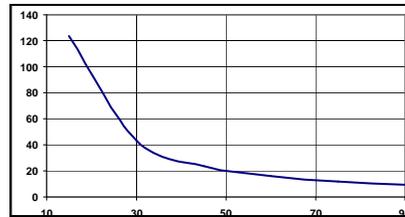
Эквивалентные напряжения в плите (МПа) от диаметра провального отверстия (мм)

Рис. 15. Влияние диаметра провального отверстия подштамповой плиты штампа (мм) на контактные давления, прогибы и напряжения в нижней базовой плите штампа

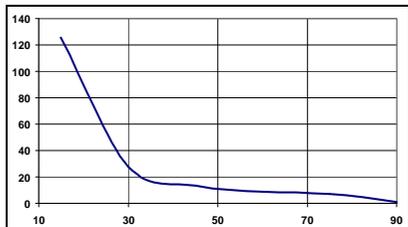
С увеличением толщины  $H$  контактные давления, прогибы и напряжения уменьшаются, а с ростом диаметра  $d$  – растут. Как видно из результатов, рекомендуемая толщина нижних плит – не ниже 10-15% ее габарита, а диаметр провального отверстия – больше 70% габарита пакета (для блоков с габаритными размерами от 140x160 (мм) до 280x320 (мм)).



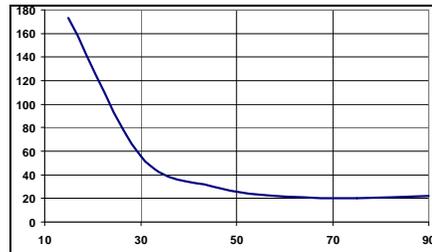
Зависимость контактного давления (МПа) в сопряжении пакет – плита от толщины нижней плиты штампа (мм)



Контактное давление (МПа) в сопряжении пакет – плита от толщины нижней плиты штампа (мм)



Максимальный прогиб (мкм) при варьировании толщины нижней плиты штампа (мм)



Эквивалентные напряжения (МПа) от толщины нижней плиты штампа (мм)

Рис. 16. Влияние толщины нижней плиты штампа (мм) на контактные давления (МПа), прогибы (мкм) и напряжения (МПа) в ней

**Заключение.** Предложенный в работе подход, математическая модель, расчетные схемы и модели, а также полученные результаты служат в качестве основы для дальнейших исследований напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов с учетом контактного взаимодействия.

**Список литературы:** 1. Дьоміна Н.А. Удосконалення методів розрахунку елементів штампового оснащення на основі аналізу їх напружено-деформованого стану: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.05 „Процеси та машини обробки тиском” / Н. А. Дьоміна – Харків, 2011. – 20 с. 2. Демина Н.А. Численное моделирование процесса холоднолистовой штамповки / Н.А. Демина, О.П. Назарова, А.Д. Чепурной [и др.] // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2006. – № 3. – С. 70-79. 3. Демина Н.А. К вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки / Н.А. Демина // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2006. – № 24. – С.75-83. 4. Демина Н.А. Общий подход к конструкторско-технологическому обеспечению стойкости элементов штампов / Ю.Д.Сердюк, Н.А. Ткачук, Н.А.Демина // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР” – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2009. – № 28. – С.92-102. 5. Демина Н.А. Моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / Н.А. Ткачук, Н.А. Демина, Ю.Д.Сердюк [и др.] // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 240-248. 6. Демина Н.А. Экспериментальные исследования контактного взаимодействия матриц и пуансонов с листовой заготовкой / Н.А. Демина, Н.А. Ткачук, Ю.Д. Сердюк // Вісник НТУ „ХПИ”. – Харків: НТУ „ХПИ”. – 2011. – № 22. – С. 46-50. 7. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с. 8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с. 9. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов. – Харьков: Вища школа,

1981. – 248 с. 10. Заярненко Е.И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналяживаемых штампов: дисс... доктора. техн. наук: спец. 01.02.06 и 05.03.05 / Заярненко Евгений Иванович. – Харьков, 1992. – 280 с. 11. Экспериментальное исследование контактных напряжений в матрице при торцевой раскатке / К.Н. Богоявленский, Б.А. Кирсанов, С.М. Мочалов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 4. – С. 25-26. 12. Артохов В.П. Исследование распределения напряжений в элементах вырубных штампов методом фотоупругости / В.П. Артохов, В.И. Савченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 11. – С. 24-26. 13. Заярненко Е.И. Расчеты на прочность вырубных матриц и пуансон-матриц для листовой штамповки / Е.И. Заярненко, Н.А. Ткачук, А.В. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 12. – С. 18-21. 14. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А.С. Кравчук // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С. 308-310. 15. Кравчук А.С. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач / А.С. Кравчук, В.А. Суряков // Доклады АН СССР, 1981. – Т. 259. – № 6. – С. 1327-1329. 16. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А.С. Кравчук // Прикл. мат. и мех. – 1977. – Т.41. – Вып.2. – С. 329-337. 17. Кравчук А.С. Численные методы решения контактных задач для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А.С. Кравчук, В.А. Васильев // Прикладная механика. – 1980. – Т.16. – Вып.6. – С. 9–15. 18. Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования / А.С. Кравчук // Прикл. мат. и мех. – 1978. – Т.42. – Вып.3. – С. 466–474. 19. Дюво Г. Неравенства в механике и физике / Г. Дюво, Ж.Л. Лионс. – М.: Наука, 1980. – 384 с. 20. Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач / Ж.Л. Лионс. – М.: Мир, 1972. – 587 с. 21. Решение вариационных неравенств в механике / И. Гловачек, Я. Ганслингер, И. Нечас [и др.]. – М.: Мир, 1986. – 270 с. 22. Гловински Р. Численное исследование вариационных неравенств / Р. Гловински, Ж.Л. Лионс, Р. Тремольер. – М.: Мир, 1979. – 574 с. 23. Львов Г.И. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки / Г.И. Львов, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. – 1997. – № 1. – С.34-39. 24. Лурье А.И. Теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 25. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

Поступила в редколлегию 15.09.11