

**Список литературы:** 1. *Гохберг М.М.* Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / Гохберг М.М. – М.: Машиностроение, 1976. – 455 с. 2. *Махненко В.И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / Махненко В.И. – К.: Наук. думка. – 2006. – 618 с. 3. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях / Коллинз Дж. – М.: Мир, 1984. – 624 с. 4. *Крагельский И.В.* Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И.В., Добычи М.Н., Комбалов В.С. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с. 5. *Панасюк В.* Прогнозування довговічності циклічно навантажуваних елементів конструкцій / Панасюк В., Остап О., Чепіль Р. // Тез. доповідей VIII міжнар. симп. укр. інж.-мех. у Львові.– Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2007. – С.5. 6. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров, элементов машиностроительных конструкций / А.Д. Чепурной, Г.П. Глинин, Ю.Б. Гусев и др. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”, 2005. – № 53. – С.162-176. 7. Гусев Ю.Б. К вопросу об исследовании напряженно-деформированного состояния металлоконструкции перегружателя ПМГ-20 / Ю.Б. Гусев // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – 2006. – № 24. – С.70-75. 8. Гусев Ю.Б. К вопросу о диагностировании состояния металлоконструкции углеродного перегружателя / Ю.Б. Гусев // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Динамика и прочность машин”. – 2007. – № 38. – С.50-58. 9. *Гусев Ю.Б.* Обеспечение технического уровня сложных пространственных конструкций на основе моделирования физико-механических процессов на примере обоснования параметров мостового перегружателя / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – 2008. – № 14. – С.34-46. 10. Гусев Ю.Б. Общий подход к обеспечению долговечности, работоспособности и нагрузочной способности мостовых перегружателей / Ю.Б. Гусев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 3/1 (33). – С. 39-45.

*Поступила в редколлегию 02.02.10*

УДК 621.73: 539.3

**Н.А. ДЕМИНА**, Государственный Таврийский агротехнологический университет, г. Мелитополь, **А.В. ТКАЧУК**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр, каф. ЭИКТ, НТУ „ХПИ”, **Ю.Д. СЕРДЮК**, гл. инженер, Головной специализированный конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Запропоновано новий підхід до розрахунку напружено-деформованого стану елементів штампової оснастки. Досліджується контактна взаємодія елементів штампів. Побудована трьохрівнева комплексна математична модель процесу

The new going is offered for computation of stressed and deformed state of stamp rigging elements. Contact interaction of stamps elements is investigated. The three-level complex mathematical model of process is built.

**Введение.** Как показывает мировая практика, одним из приоритетных направлений современного машиностроения становится широкое внедрение прогрессивных технологических процессов. Получение деталей из листовых материалов пластической деформацией с помощью высокопроизводительного кузнечно-прессового оборудования является одной из наиболее прогрес-

сивных металлосберегающих технологий. Характерной для развитых стран мира является тенденция дальнейшего развития листовой штамповки, обеспечивающей снижение затрат на производство, повышение производительности при обеспечении требуемого качества изделий. Дальнейшее распространение получают гибкие производственные системы, которые позволяют быстро перестраиваться на новую продукцию с минимальными затратами и высокими результатами. При этом листоштамповочное производство во все большей мере имеет смешанный характер – от единичного, опытного до серийного, крупносерийного и массового. В этой связи представляется весьма важным разработка конструкций штампов, которые были бы эффективны при различной серийности выпускаемой продукции. В связи с этим в свое время были предложены различные серии переналаживаемых разделительных штампов, а также разработаны методы их расчета. Однако и предложенные подходы, и построенные математические и численные модели не учитывают ряд важных факторов. В первую очередь – это совместное контактное взаимодействие элементов штамповой оснастки. Этот фактор очень важен и для специальных, и тем более – для специализированных штампов, у которых требования к прочности, жесткости, точности и стойкости элементов конструкции должны быть еще более строгими, чем для специальных.

**Актуальность задачи.** Контактное взаимодействие тел всегда являлось задачей, представлявшей научный интерес для механики. Соответственно в свое время был разработан целый ряд аналитических, полуаналитических и численных методов для исследования их напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия. В свою очередь эта проблема в качестве важнейшей составляющей содержит задачу исследования контактного взаимодействия штампов, поскольку сам технологический процесс непосредственно состоит в разделении материала посредством контакта режущих элементов штампа с заготовкой, а другие элементы штампа находятся в силовом контактом взаимодействии, которое обеспечивает передачу технологических усилий и движений в оснастке, которое обеспечивает передачу технологических усилий и движений в оснастке.

Как показал анализ публикаций [1-9], в настоящее время отсутствует единый подход к решению задачи об НДС элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия. Существующие и описанные в литературе методы и подходы обладают существенными недостатками.

Таким образом, можно заключить, что значительную актуальность приобрела задача теоретического обобщения задачи контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки (ЭШО). Это составляет содержание актуальной и важной научно-технической задачи совершенствования методов расчета ЭШО на основе анализа напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия, решаемой на примере разделительных переналаживаемых штампов (РПШ).

**Цель и задачи исследования.** *Целью работы* является совершенствование методов и моделей для расчета элементов штамповой оснастки на основе

определения их напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия.

Это предполагает, в свою очередь, решение следующих задач:

1. Анализ состояния вопроса в литературе.
2. Разработка многоуровневой математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия; развитие методов расчетно-экспериментального обоснования параметров расчетных моделей для анализа НДС исследуемых ЭШО.

3. Реализация предложенных методов и моделей в виде подсистемы системы автоматизированного проектирования штампов для разделительных операций.

4. Решение прикладных задач исследования влияния конструктивных и технологических параметров на прочность и жесткость элементов штамповой оснастки, анализ и обобщение выявленных физических особенностей в распределении компонент НДС, а также разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору конструктивных и технологических параметров штампов.

5. Экспериментальные исследования и внедрение результатов исследований в производство.

**Анализ существующих методов исследования контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки.** Достаточно полный обзор традиционных технологий исследования НДС элементов штампов приведен в работах Романовского В.П., Скворцова Г.Д., Попова Е.А., Алиева И.С., Заяренко Е.И., Мовшовича А.Я., Евстратова В.А. и других авторов [1-12]. К настоящему времени накоплен огромный массив результатов экспериментальных, аналитических и численных исследований НДС элементов штамповой оснастки (в т.ч. отдельные исследования с учетом контактного взаимодействия), которые служат основой для создания обобщенных моделей и подходов. Однако обобщения и развития по выполненным работам отсутствуют. Тем не менее, ценность этих материалов как основы для проведения дальнейших исследований неоспорима. Как показал анализ публикаций, в настоящее время отсутствует единый подход к решению задачи об НДС штампов с учетом контактного взаимодействия. Существующие и описанные в литературе методы и подходы обладают следующими недостатками.

1. Традиционные модели не учитывают особенностей реальной геометрической формы взаимодействующих тел, упрощенно моделируют их контактное взаимодействие и не дают полной и адекватной картины НДС.

2. Несогласованность численных и экспериментальных моделей и результатов.

3. Отсутствует механизм сопряжения со специализированными САПР и проведения многовариантных исследований в автоматическом режиме.

Что касается численных методов исследования НДС с учетом контактного взаимодействия, то лидирующее положение среди них занимает метод конечных элементов (МКЭ). Однако, как отмечалось, используемые при расчетах модели страдают целым рядом недостатков. Таким образом, проведенный ана-

лиз позволил сделать вывод об актуальности и важности поставленной задачи и определить задачи исследований.

**Методы исследования НДС элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия на примере разделительных переналаживаемых штампов.** Анализ конструкций, технологических параметров и условий эксплуатации (рис. 1, табл. 1) позволяет сделать вывод, что наиболее нагруженными и ответственными элементами штампов являются пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы и базовые плиты. Выявлены основные недостатки применяемых для их расчета моделей, основной из которых – раздельное рассмотрение НДС без учета контактного взаимодействия.



Рис.1. Конструкция и взаимодействие элементов разделительных штампов

Таблица 1

Технические характеристики СПШ

Наименование показателей	Ед. изм.	Типоразмеры				
		1	2	3	4	5
Габаритные размеры блока	мм	160x160	220x220	280x320	360x300	430x560
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 заготовки	мм	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0

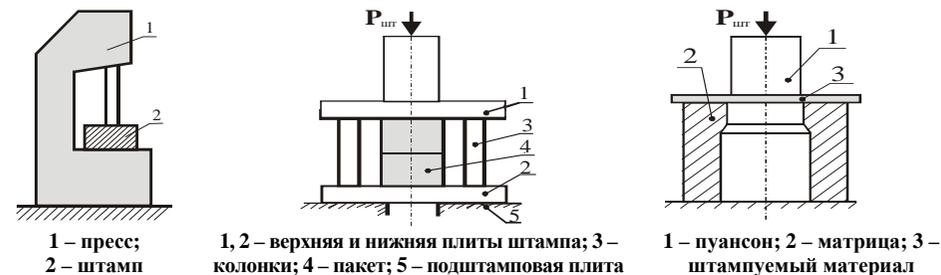


Рис. 2. Элементы технологической системы холоднолистовой штамповки

Для устранения отмеченных недостатков предложено применить к построению расчетных моделей ЭШО системный подход, предполагающий рассматривать все исследуемые конструкции и детали как элементы многоуровневой технологической системы. Верхним уровнем является система «пресс – штамп», подсистемой – «штамп – режущие элементы – заготовка», нижними элементами – пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы и базовые плиты во взаимодействии со штампуемой деталью (рис. 2). Соответственно, и к самому процессу построения расчетных моделей ЭШО предлагается применить расширенный системный подход, базирующийся на методе обобщенного параметрического описания сложных механических систем и адаптированный в данной работе к исследованию элементов разделительных штампов.

Рассматривается организация исследований, представленная на рис. 3. Она обладает существенными преимуществами перед подходами, использованными другими авторами. В частности, она носит комплексный характер, т.е. опирается и на экспериментальные данные, и на аналитические формулировки, и на последующую численную реализацию на основе МКЭ в сопряжении с системами CAD/CAM/ CAE. Рассмотрим отдельные этапы исследований (см. рис.1).

Математическое моделирование НДС элементов штамповой оснастки в соответствие с предлагаемой технологией исследований предполагает 3 варианта подмоделей комплексной математической модели НДС.

**I. Нижний уровень** представляет линейная модель, в которой предполагается известными из эксперимента и заданными законы распределения контактных усилий взаимодействия со штампуемым материалом. В этом случае задача сводится к трехмерной задаче теории упругости для тел с заданными площадками нагружения и известными законами распределения усилий, предложена новая форма записи граничных условий в терминах „кромочных” координат (рис.4.):

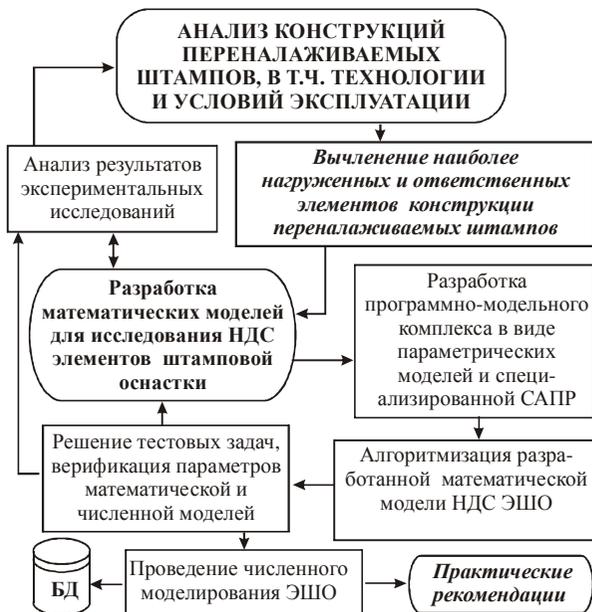


Рис. 3. Общая структура исследований

$$L(u)|_{\Omega} = 0; \quad (1) \quad \sigma_z|_{r' < r'_0} = q(r'); \sigma_r|_{z' < z'_0} = q_n(z'); \tau_{rz}|_{z' < z'_0} = q_\tau(z'); \quad (2)$$

$$\int_{(S)} (q + q_\tau) ds = P_{шт}; \quad (3) \quad P_{шт} = L_{шт} \sigma_{cp} t k_{шт}. \quad (4)$$

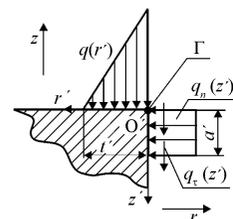


Рис. 4. Модель уровня I. Расчетные схемы матрицы, пуансона и пуансон-матрицы и система “кромочных” координат  $O'r'z'$ :  $\Gamma$  – режущая кромка;  $q(r')$  – основное усилие штамповки;  $q_n, q_\tau$  – усилия обжатия и трения

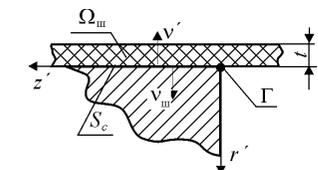


Рис. 5. Схема взаимодействия режущего элемента штампа со штампуемым материалом:  $\Omega_{шт}$  – область пространства, занимаемая штампуемым материалом;  $S_c$  – зона возможного контактного взаимодействия;  $v', v_{шт}$  – нормали к поверхностям режущего элемента и заготовки соответственно

В уравнениях (1-4)  $L$  – оператор краевой задачи теории упругости относительно перемещений  $u$ , действующий в области  $\Omega$ ,  $P_{шт}$  – интегральное усилие штамповки, распределенное по периметру  $L_{шт}$  режущей кромки инструмента,  $t, \sigma_{cp}, k_{шт}$  – толщина, сопротивление среза штампуемого материала и коэффициент затупления режущих кромок соответственно.

**Модель уровня II.** Основной, наиболее заметный недостаток математической модели I состоит в раздельном рассмотрении режущих элементов штампов (т.е. отдельно друг от друга и от основного элемента технологической системы, их связывающего, – от штампуемого материала). На рис. 5 приведена схема такого взаимодействия, отнесенная к локальным “кромочным” координатам. Тогда, кроме системы уравнений, дополненной кинематическими граничными условиями на частях поверхности  $S_u$ , добавляются следующие условия на части поверхности возможного контакта:

$$u_v' + u_{v_{шт}} \leq \delta_c, \quad (5)$$

где  $u_v', u_{v_{шт}}$  – перемещения точек режущего элемента и заготовки по нормальям к поверхностям;  $\delta_c$  – начальный зазор в сопряжении.

При решении нелинейной задачи получаем не постулируемый заранее закон распределения контактных нагрузок  $q_c$ , а искомый закон их распределения в качестве еще одного неизвестного полученной задачи. При этом в качестве параметра нагружения можно взять или величину усилия штамповки или величину хода ползуна прессы из некоторой нулевой точки  $\Delta$ , и тогда

$$\int_{(S_c)} q_c ds = P_{шт}, \quad (6) \quad u|_{S_u} = \Delta, \quad (7)$$

Соотношение (6) задает силовое нагружение, а (7) – кинематическое.

Получаемая в результате задача становится более сложной, существенно

нелинейной, причем в качестве дополнительных неизвестных выступают конфигурации контактных зон и распределения контактных нагрузок. В качестве выходных параметров и данных выступают распределения  $q_c$  и значения  $t_m$ ,  $t_n$  и  $t_{nm}$ . Сама задача анализа становится не только громоздкой, но и качественно сложнее, поскольку переводит задачу анализа НДС в нелинейную постановку.

**Модель уровня III.** Следующим качественным шагом в формировании более адекватной математической модели НДС элементов исследуемой системы является устранение того факта, что при изучении ее поведения никак не моделируется сам физический процесс, который является основой технологического процесса штамповки – процесс разделения штампующего материала. В этом случае переходим от линейного оператора  $L$  в (1) к нелинейному

$$L^{(n)}(u, \Delta) = 0, \quad (8)$$

причем в нем присутствует и нелинейность геометрическая, и физическая, и структурная. Кроме того, в операторе присутствует также параметр процесса  $\Delta$  (например, ход ползуна прессы), от которого зависит текущее состояние нагруженности системы. Таким образом, записываемая соотношением (8) модель оказывается наиболее сложной из всех, однако при этом ожидаемо более адекватно описывающей поведение исследуемой системы.

Для моделирования контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки (центральной в работе является модель уровня II) использованы методы теории вариационных неравенств, описанные в работах А.С. Кравчука, Колтунова М.А., Майбороды В. П. [13].

Пусть поверхности контактирующих тел описываются уравнениями (рис. 6)

$$\Psi(\mathbf{r}) = 0; \quad \Psi'(\mathbf{r}') = 0; \quad (9)$$

$$\Psi(\mathbf{r}) > 0 \text{ при } \mathbf{r} \in \Omega; \quad (10)$$

$$\Psi'(\mathbf{r}') < 0 \text{ при } \mathbf{r}' \in \Omega',$$

а положение произвольной точки после деформирования

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + u(\mathbf{r}_0). \quad (11)$$

Тогда (9) с учетом (11) представимо в виде

$$\Psi(\mathbf{r} - u(\mathbf{r}_0)) = 0. \quad (12)$$

С учетом представления

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r}_0 + t_0 \nabla \Psi(\mathbf{r}_0) \quad (13)$$

и линеаризации условий непроникновения контактирующих тел друг в друга приходим к условию контакта в общем виде

$$u_{vN} + u'_{vN} \leq \delta, \quad (14)$$

аналогичному (5). Т.о., исходная контактная задача (9)-(14) для тел 1,2,...  $\alpha$  приводится к вариационному неравенству

$$a(u, \delta u) \geq L(\delta u), \quad \forall \delta u, v \in K, u \in K; \quad a(u, v) = \sum_{\alpha} a^{\alpha}(u, v), L(v) = \sum_{\alpha} L^{\alpha}(v), \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega^{\alpha}} \sigma_{ij}(u^{\alpha}) \delta \epsilon_{ij} d\Omega - \int_{\Omega^{\alpha}} \rho^{\alpha} F \cdot \delta u^{\alpha} d\Omega - \int_{S_{\sigma}^{\alpha}} P^{\alpha} \cdot \delta u^{\alpha} dS - \int_{S_{\epsilon}^{\alpha}} \sigma_{ij}(u^{\alpha}) \cdot \delta u_i^{\alpha} v_j^{\alpha} dS \equiv \\ & \equiv a^{\alpha}(u^{\alpha}, \delta u^{\alpha}) - L^{\alpha}(\delta u^{\alpha}) - \int_{S_{\epsilon}^{\alpha}} \sigma_{ij}(u^{\alpha}) \cdot \delta u_i^{\alpha} v_j^{\alpha} dS = 0, \quad \forall \delta u^{\alpha}, \quad \alpha = 1, \dots, M, \end{aligned}$$

эквивалентному проблеме минимизации функционала полной внутренней энергии системы

$$J(v) = 1/2 a(v, v) - L(v) \rightarrow \min \quad (16)$$

на подмножестве  $K$  пространства  $V$ :

$$K = \left\{ v \in V; v_{vN}^{\alpha} + v_{vN}^{\beta} \leq \delta \right\}, \quad (17)$$

$$V^{\alpha} = \left\{ v \mid v = v(\mathbf{r}), \mathbf{r} \in \Omega^{\alpha}; v|_{S_u^{\alpha}} = 0; v \in H^1(\Omega^{\alpha}) \right\}, \quad \alpha = 1, \dots, M.$$

Естественно, что по сравнению с общей постановкой, решаемая задача об определении НДС элементов штампов с учетом их контактного взаимодействия обладает целым рядом специфических особенностей: большая часть сопрягаемых элементов штампов взаимодействуют по поверхностям согласованной геометрии, что существенно усиливает строгость принятых предположений о геометрии контактирующих поверхностей; принятые модели предполагают малые перемещения точек поверхностей взаимодействующих тел, что ограничивает область применимости данной модели первыми этапами процесса штамповки; несмотря на то, что взаимодействующие поверхности контактирующих тел – плоские, область контакта и распределение контактного давления по-прежнему являются в данной задаче искомыми (как и в общем случае).

Формирование комплекса моделей исследуемых элементов штамповой оснастки осуществляется на основе их единого параметрического описания, в т.ч. физической, математической, геометрической, конечно-элементной и экспериментальной моделей. Предложенная адаптация метода обобщенного параметрического описания применительно к элементам штамповой оснастки является замыкающим звеном, позволяющим объединить МКЭ, метод пространственного геометрического моделирования, а также процедуры и алгоритмы синтеза элементов штамповой оснастки в единой комплексной математической модели.

**Общая структура реализации подхода, конкретизированная в виде специализированного программно-модельного комплекса** отражает общий подход, предлагаемый в статье и основанный на соединении использования моделей разного уровня сложности. На этой основе могут быть построены экспресс-модели и экспресс-системы для исследования ЭШО. Комплекс мо-

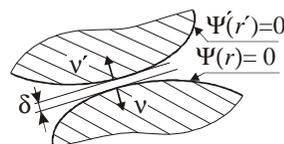


Рис. 6. Схема взаимодействия ЭШО

делей и параметров представлен на рис.7.

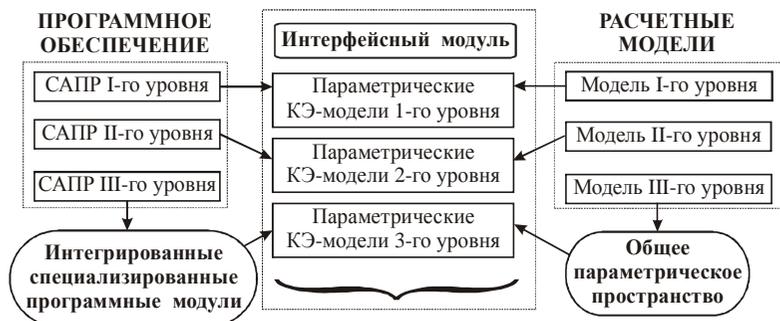


Рис. 7. Структура программно-модельного комплекса

Преимущество предложенной технологии на основе использования обобщенного параметрического подхода, создания специализированных подсистем моделирования и анализа элементов сложных механических систем и применения сокращенного цикла исследований – в повышенной оперативности, сбалансированности по критериям точности модели и временным затратам на решение возникающих задач анализа и синтеза, а также в возможности работы в автоматизированном режиме. Таким образом, создается мощный и высокоэффективный инструмент для конструктора, технолога, исследователя.

Программно-модельный комплекс для расчета НДС элементов штамповой оснастки был реализован в нескольких вариантах, соответствующих уровням **I, II, III** описанной выше математической модели (см. рис. 7).

**Численное исследование элементов штамповой оснастки**, в частности, баланс перемещений и уровни напряженного состояния в системе „пуансон - матрица – заготовка”. Расчетная схема матрицы и результаты – на рис. 8, 9.

Исследование НДС матриц служит основой для следующих выводов:

- 1) доминирующими напряжениями в исследованных матрицах СШ различной высоты являются осевые  $\sigma_z$ ;
- 2) максимальные напряжения имеют одинаковый уровень независимо от высоты и толщины стенки матрицы;
- 3) деформированное состояние матриц существенно зависит от их высоты. При этом условно можно выделить матрицы: низкие; средней высоты

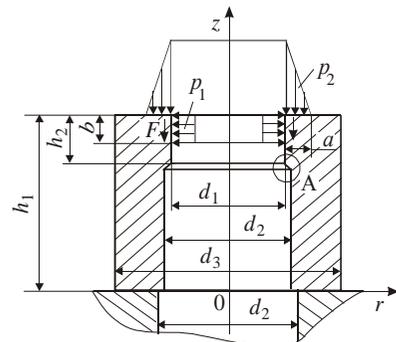


Рис. 8. Расчетная схема и геометрические параметры матрицы

( $d/3 < H < 2d$ ,  $d = d_1$  – внутренний диаметр матрицы); высокие.

Также исследовано НДС пуансон-матриц и пуансонов. Важной особенностью

их НДС является наличие трех характерных зон:

- 1) I – область непосредственной окрестности режущих кромок: в ней наблюдается резкий всплеск всех компонент тензора напряжений;
- 2) II – область, отстоящая от режущих кромок на удалении, превышающем толщину штампуемого материала, но меньше толщины стенки матрицы, является переходной между областями I и III;
- 3) III – область, удаленная от режущих кромок: НДС определяется интегральными силовыми факторами.

С использованием представленной модели уровня **II** проведены исследования в осесимметричной постановке напряженно-деформированного состояния элементов системы „матрица – материал – пуансон” с учетом контакта (рис. 10). В ходе многовариантного расчета варьируются геометрические и технологические параметры штампов и контролируется ряд скалярных параметров (напряжений, перемещений и контактных давлений – рис. 11, 12). Данные величины определяются с помощью специального макроса на языке APDL ANSYS.

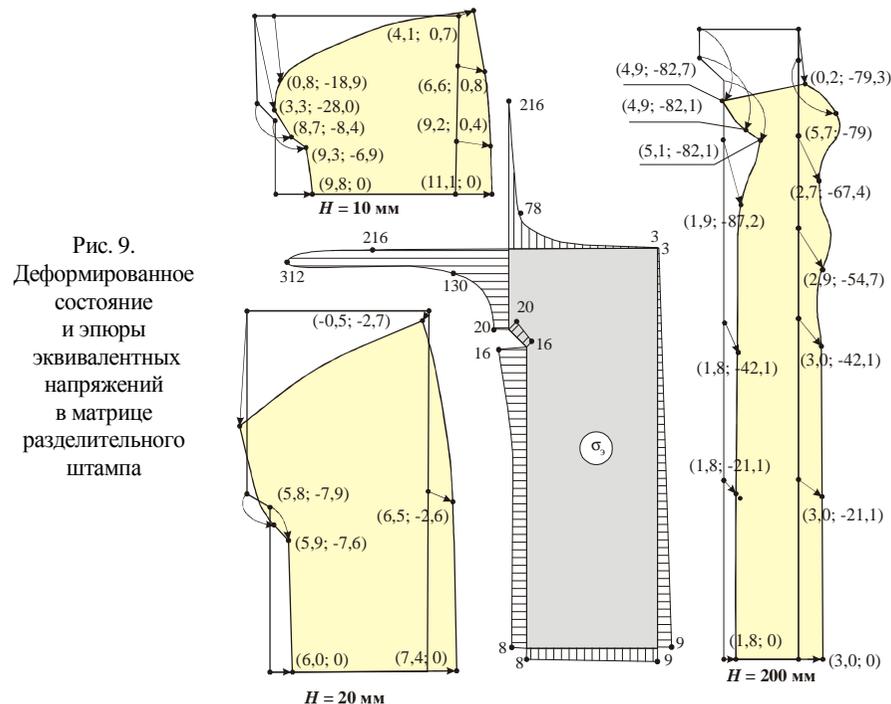


Рис. 9. Деформированное состояние и эпюры эквивалентных напряжений в матрице разделительного штампа

На рис. 11, 12 представлены картины, характеризующие напряженно-деформированное состояние в режущих элементах штампов и в штампуемом материале, а также характерные картины распределения компонент контактных давлений в исследуемой системе. Анализ полученных распределений и

параметрических зависимостей контролируемых величин от варьируемых параметров штампов позволяет сделать следующие основные выводы:

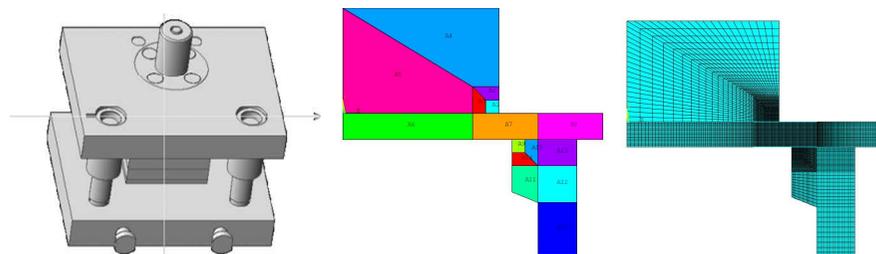


Рис. 10. Геометрическая модель штампа, геометрическая и конечно-элементная модели системы „пуансон – заготовка – матрица”

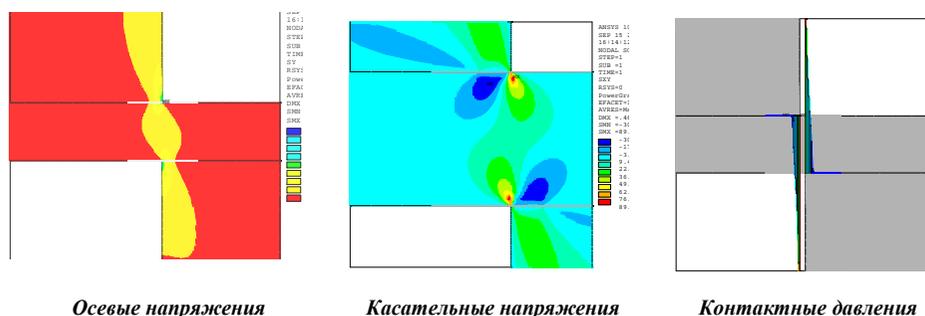


Рис. 11. Типовые распределения компонент НДС в исследуемой системе

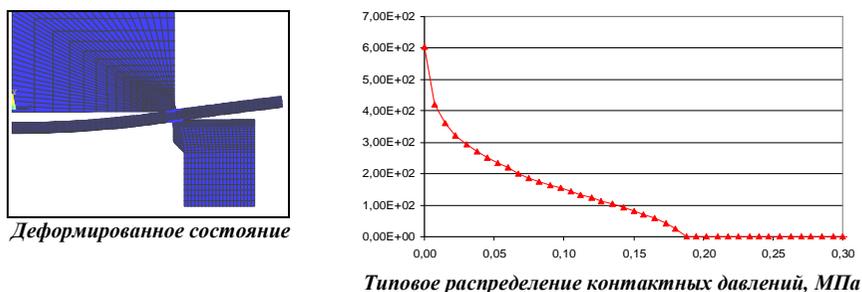


Рис. 12. Типовые распределения перемещений и контактных давлений

- контакт со штампуемым материалом реализуется вдоль режущих кромок по ширине  $0.1 \div 0.5t$  ( $t$  – толщина штампуемого материала), контактное давление между инструментом и заготовкой имеет колоколообразный с максимумом на кромке вид, указанный на рис. 12;
- размеры зоны контакта и вид контактного давления слабо зависят от величины приложенной нагрузки (рис. 11);

- с уменьшением толщины заготовки и с ростом величины относительного зазора контактные давления и эквивалентные напряжения в заготовке растут;

- увеличение толщины заготовки приводит к увеличению относительной ширины зоны контакта (рис. 13-15);

- уменьшение технологического зазора между матрицей и пуансоном может достигать значительных величин, соизмеримых с самим зазором, что необходимо учитывать при назначении номинального зазора в процессе проектирования того или иного конкретного штампа.

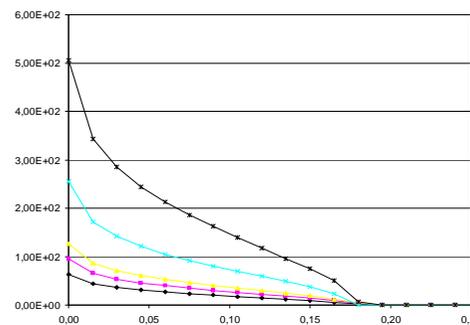


Рис. 13. Зависимость контактных давлений, МПа, от усилия внедрения, Н

Анализ полученных результатов позволяет сделать некоторые выводы.

1. В целом предложенный подход и разработанный программно-модельный комплекс являются достаточно эффективными работоспособными инструментами для численного моделирования НДС элементов штамповой оснастки.

2. Полученные характерные результаты в целом коррелируют с результатами, описанными в других работах. В частности, это относится к ширине зоны контактного взаимодействия, характеру распределения контактных напряжений, зависимости ширины зоны контакта от толщины штампуемого материала и технологического зазора между матрицей и пуансоном.

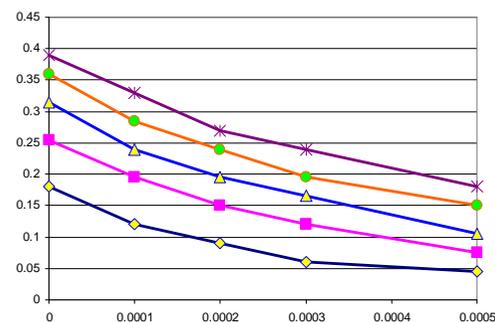


Рис. 14. Зависимость относительной ширины контакта от величины зазора (м) для 5-ти толщин (м)

Для решения возникающей сложной задачи исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки на уровне III (рис. 16) предложено привлечь обобщенный параметрический подход, а в качестве расчетного инструмента – программный продукт LS-DYNA. Специализированные программные модули реализованы в среде языка Delphi и с помощью языка APDL в среде пакета ANSYS. Поля напряжений на деформированной геометрии элементов технологической системы листовой штамповки при увеличении хода ползуна прессы показаны на рис. 16.

Разработанный специализированный программно-модельный комплекс продемонстрировал работоспособность и возможность получения полной информации о текущем состоянии всех взаимодействующих тел в технологической системе „режущий инструмент штампа – заготовка”.

Анализ полученных результатов продемонстрировал преимущество результатов от модели I уровня к модели III, а также некоторые качественные отличия. В результате предлагается использование в зависимости от типа задачи модели разного уровня сложности.

Отдельного рассмотрения требуют задачи исследования НДС базовых плит. В отличие от методов и моделей, предложенных ранее в работах Л.Г. Кузнецовой Е.И. и Заярненко [4], которые использовали пластинчатые конечно-элементные модели или метод R-функций, в данной работе предложено применять пространственные конечно-элементные модели. Это дает возможность более адекватно учитывать контактное взаимодействие в системе и получать более достоверные результаты.

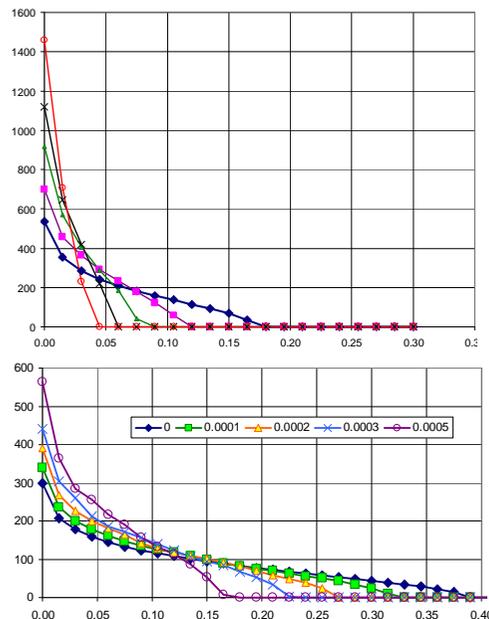


Рис. 15. Распределение контактного давления (МПа) для различных величин зазора (м)

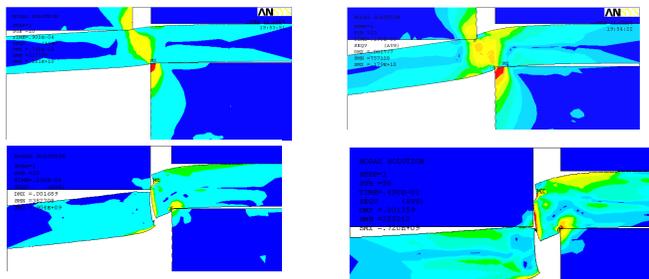


Рис. 16. Поэтапное моделирование процесса разделения штампуемого материала

Так, на рис.17 представлены результаты расчета НДС базовых плит СШ. Сравнение с результатами предшествующих расчетов показывает, что результаты по напряжениям и прогибам отличаются на 25-30%. Это вызвано тем, что форма области контактного взаимодействия базовой плиты с круглым проваль-

ным отверстием при восприятии давления от прямоугольного в плане пакета не является ни прямоугольной, ни круглой, а лепесткообразной. Соответственно и контактные давления распределены более сложным образом. Эти факторы приводят к 15-25% погрешностям в определении конструктивных параметров базовых плит.

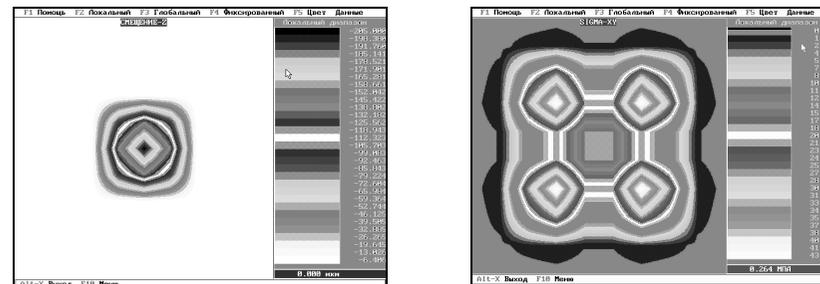


Рис. 17. Напряжения и прогибы в нижних базовых плитах СПС

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по рациональному проектированию элементов штампов.

**Результаты расчетно-экспериментального исследования ЭШО.** Используются результаты экспериментальных исследований, проведенных авторами, а также ранее полученные другими исследователями экспериментальные результаты.

В частности, автором использована новая технология измерения контактных давлений с применением пленок фирмы Fujitsu.

На рис. 18 представлены рабочие моменты испытаний, а на рис. 19 – примеры контактных отпечатков. В результате измерений получены распределения давлений, напряжений и прогибов.

Сравнение полученных результатов с численными данными дает возможность оценить точность численного моделирования в 10-12%.

**Выводы.** В работе предложены новые подходы и комплекс математических моделей различного уровня сложности для исследования напряженно-деформированного состояния и анализа контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки на примере раздельных штампов на основе расчетно-экспериментального обоснования пара-



Экспериментальная установка



Элементы сборки «пуансон-заготовка-матрица»

Рис. 18. Рабочие моменты испытаний

метров численных моделей, разработан программно-модельный комплекс, реализующий предложенный подход, а также решены прикладные задачи для элементов разделительных штампов, что в совокупности представляет новое решение актуальной и важной научно-практической задачи.

1. Анализ состояния вопроса показал, что в настоящее время отсутствует единый подход к решению задачи определения НДС элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия, что делает данную задачу актуальной и важной, особенно в силу распространенности гибких технологических систем в штамповочном производстве.

2. На основе единого описания в работе предложен новый подход к проведению исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки, отличающийся тем, что предложенная иерархическая структура математических моделей соединяет в себе преемственность, адекватность, оперативность, параметричность, а также единый сквозной подход.

3. В отличие от многих ранее использованных расчетных схем и моделей, построенных по принципу раздельного исследования напряженно-деформированного состояния контактирующих тел, в данной работе предложен подход, основанный на исследовании этих элементов в составе единой системы взаимосвязанных и взаимодействующих тел. Это качественное изменение расчетной модели позволяет сделать вывод о ее более широких и глубоких потенциальных возможностях, большей степени точности, корректности, адекватности, управляемости.

4. Разработанный подход реализован в виде специализированного программно-модельного комплекса для исследования напряженно-деформированного состояния ЭШО методом конечных элементов, на его основе проведены многовариантные исследования НДС элементов штамповой оснастки с варьированием наиболее важных и значимых конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров штампов.

5. Анализ полученных распределений и параметрических зависимостей характерных величин от варьироваемых параметров элементов штампов позволил установить следующие особенности: контакт со штампуемым материалом реализуется вдоль режущих кромок по ширине  $0.1 \div 0.5t$ , контактное

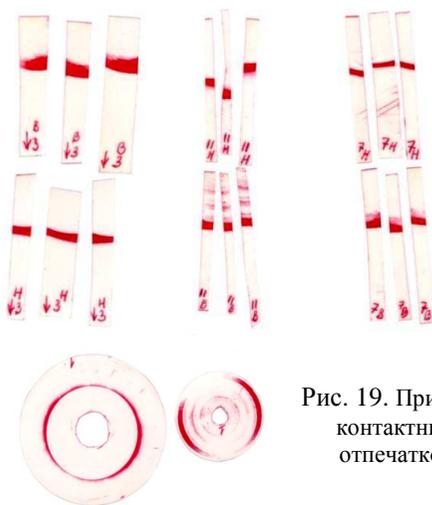


Рис. 19. Примеры контактных отпечатков

давление между инструментом и заготовкой имеет колоколообразный вид с максимумом на режущей кромке; размеры зоны контакта и вид контактного давления слабо зависят от величины приложенной нагрузки; с уменьшением толщины заготовки и с ростом величины относительного зазора контактные давления и эквивалентные напряжения в заготовке растут; увеличение толщины заготовки приводит к увеличению относительной ширины зоны контакта; напряжения на режущих кромках инструмента в 2,5-4,5 раза выше напряжений в заготовке; уменьшение технологического зазора между матрицей и пуансоном может достигать значительных величин, соизмеримых с самим зазором, что необходимо учитывать при назначении номинального зазора в процессе проектирования того или иного конкретного штампа.

6. Важной особенностью НДС матриц, пуансонов и пуансон-матриц СП является наличие трех характерных зон: I – непосредственная окрестность режущих кромок; II – переходная область; III – удаленная область. В ходе исследований выявлена сильная зависимость характера распределения компонент напряженно-деформированного состояния в области III от конструктивных параметров (высота, диаметры, толщина и их соотношения), и слабая зависимость – от технологических параметров (толщина штампуемого материала и его механические свойства – рабочий зазор между режущими кромками инструментов), и, наоборот, сильная зависимость характера распределения компонент НДС в области I от технологических параметров, а от конструктивных параметров – слабая.

7. Существенным преимуществом предложенного в работе программно-модельного комплекса является его адаптация к функционированию в составе или параллельно с системами автоматизированного проектирования. Это позволяет при модульном построении использовать геометрические и конечно-элементные модели в универсальных CAD/CAM/CAE системах: Pro/ENGINEER, ANSYS, SolidWorks, а также в среде специализированных САПР. За счет этого обеспечивается дополнительное преимущество таких систем по оперативности проведения расчетов НДС элементов штампов с учетом контактного взаимодействия.

8. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования подтвердили точность и достоверность построенных моделей и полученных результатов. Погрешность определена на уровне 12-18%.

Предложенные подходы, методы, модели внедрены в производство и могут быть использованы для исследования НДС широкого класса разделительных и других штампов, представляющих собой систему тел, находящихся в контактно-взаимодействии.

При подготовке материалов статьи численные исследования проводились с использованием программного комплекса ANSYS, лицензию на который НТУ «ХПИ» получил в 2010 г. при поддержке фирмы EMT U (г. Киев).

**Список литературы:** 1. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с. 2. Романовский В.П., Мовиович И.Я., Долгов В.А. Исследование стойкости режущих элементов универсально-сборных штампов // Кузнечно-штампо-