

УДК 539.3: 621.9: 004.94

О.А. ИЩЕНКО, Н.Н. ТКАЧУК, А.В. ГРАБОВСКИЙ, Н.А. ТКАЧУК, Н.А. ДЕМИНА, А.А. ЗАРУБИНА

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

В статье предложен новый подход к анализу напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки (ЭШО) с учетом контактного взаимодействия. С этой целью объединены два метода: обобщенного параметрического моделирования и вариационных неравенств. Первый обеспечивает вариативность создаваемых математических и геометрических моделей напряженно-деформированного состояния (НДС) и формы элементов штамповой оснастки. Второй дает возможность учитывать множественные контактные взаимодействия между ЭШО. В результате обеспечивается решение двух взаимосвязанных задач: обоснование рациональных проектно-технологических параметров штампов и определения НДС их элементов. Важно, что учет контактного взаимодействия резко повышает точность и адекватность моделирования НДС элементов штампов. Соответственно, на основе более точного решения задач анализа получается более достоверные рекомендации по обоснованию параметров штампов по критериям прочности и жесткости.

Ключеві слова: напряженно-деформированное состояние, разделительный штамп, базовая плита, контактное взаимодействие, метод конечных элементов

The new approach in the stress-strain state of dies tooling elements (DTE) analysis under the condition of the contact interaction is introduced in the article. Two methods have been combined for this purpose: generalized parametric modeling and variational inequalities. The first method makes it possible to change developed mathematical and geometrical models of the stress-strain state (SSS) as well as the dies tooling elements form. The second method allows to consider multiple contact between DTE. The result shows the solution of two interconnected problems. They are reasonable design and production parameters of the shearing dies and determination of the SSS of their elements. Consideration of the contact interaction is important, because significantly improves the accuracy and adequacy of the stress-strain state of dies tooling elements modeling. It was necessary to substantiate settings for the dies on the criteria of strength and stiffness while production. More reliable recommendations for this have been obtained after the more accurate solving problems of analysis.

Keywords: stress-strain state, shearing die, base plates, contact interaction, finite-element method

У статті запропоновано новий підхід до аналізу напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення (ЕШО) з урахуванням контактної взаємодії. З цією метою об'єднані два методи: узагальненого параметричного моделювання і варіаційних нерівностей. Перший забезпечує варіативність створюваних математичних і геометричних моделей напружено-деформованого стану (НДС) і форми елементів штампового оснащення. Другий дає можливість враховувати множинні контактні взаємодії між ЕШО. В результаті забезпечується вирішення двох взаємопов'язаних завдань: обґрунтування раціональних проектно-технологічних параметрів штампів і визначення НДС їх елементів. Важливо, що облік контактної взаємодії різко підвищує точність і адекватність моделювання НДС елементів штампів. Відповідно, на основі більш точного рішення задач аналізу виходить більш достовірні рекомендації по обґрунтуванню параметрів штампів за критеріями міцності і жорсткості.

Ключові слова: напружено-деформований стан, розділовий штамп, базова плита, контактна взаємодія, метод кінцевих елементів

Введение

Развитие современного машиностроения невозможно без активного продвижения прогрессивных технологий, оборудования, оснастки и инструмента. В частности, одной из доминирующих тенденций является применение технологий обработки материалов давлением. Действительно, эти технологии являются по своей природе чрезвычайно эффективными, т.к. позволяют существенно снизить трудоемкость изготовления деталей, повышают коэффициент использования материала (КИМ), а также во многих случаях обходиться без последующей механической обработки, т.е. получать готовые детали. В то же время одним из узких мест при внедрении данных технологических процессов является значительная стоимость технологической оснастки и инструмента.

В частности, для листоштамповочного производства это сопряжено, например, с изготовлением штампов и режущих элементов. Они должны обладать высокой точностью и стойкостью. С этой целью все большее применение получает обратимая переналаживаемая оснастка. Она состоит из основного блока и сменного переналаживаемого пакета, путем замены которого можно перестраиваться на изготовление той или иной детали. Этим самым повышается оперативность и снижается стоимость технологической подго-

товки производства (ТПП) новых изделий, что особенно важно в условиях преобладающих тенденций снижения серийности машиностроительного производства. При этом повышенные требования к точности и стойкости переналаживаемых штампов требует разработки адекватных, точных и экономичных (с точки зрения потребляемых вычислительных ресурсов) математических и численных моделей и методов расчета проектно-технологических параметров проектируемых штампов по критериям прочности и жесткости.

В то же время существующие аналитические и численные методики расчета штамповой оснастки [1-14] далеко не в полной степени соответствуют выдвигаемым требованиям. В частности, наиболее ощутимым их недостатком является не вполне корректный учет краевых условий в областях сопряжения отдельных элементов исследуемых штампов, что приводит к существенным погрешностям в определении их напряженно-деформированного состояния (НДС). В свою очередь, это приводит либо к недостаточной прочности и жесткости, стойкости и точности штампа, либо к завышенной металлоемкости. Сложившееся противоречие между возможностями науки и потребностями практики формирует актуальную и важную

© Ищенко О.А., Ткачук Н.Н., Грабовский А.В., Ткачук Н.А., Демина Н.А., Зарубина А.А., 2016

научно-практическую задачу разработки новых, более адекватных, точных и оперативных моделей и методов расчета проектно-технологических параметров элементов штамповой оснастки (ЭШО) по критериям обеспечения прочности и жесткости. Решение данной задачи на примере штампов для вырубки-пробивки листового материала составляет направление, описанное в данной работе.

Метод решения задачи

Для определения характеристик стойкости ЭШО и точности выполнения технологических операций выбивки-пробивки необходимо исследовать НДС элементов штампов. При этом наиболее проблемными являются два фактора. Во-первых, в традиционных математических моделях, а также в ходе численного моделирования, например, с привлечением САЕ-систем типа ANSYS, отсутствуют механизмы прямой интеграции всего множества варьируемых и контролируемых параметров. Во-вторых, важно промоделировать, причем по возможности как можно более адекватно и точно, множественные контактные взаимодействия элементов штампов между собой. И, наконец, создаваемую математическую модель необходимо реализовать в виде специализированного программно-модельного комплекса.

Параметрические математические модели напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки

При описании математической модели напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки можно исходить из общего операционного представления:

$$L(u, \sigma, f, t) = 0. \quad (1)$$

Здесь L – оператор начально-краевой задачи, u, σ – вектор перемещений и тензор напряжений ЭШО, f – массив внешних нагрузок, а t – время.

Отвлекаясь на данном этапе от вида оператора L , на первом этапе можно сконцентрироваться на организации многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния ЭШО. Это важно, поскольку при проектировании штамповой оснастки требуется устанавливать зависимости характеристик h_s НДС от варьируемых проектно-технологических параметров p_k :

$$h = h(p, u, \sigma). \quad (2)$$

Здесь h – массив h_s , p – массив p_k , а u, σ – решения (1) при том или ином наборе параметров. Характеристики h_s – это, например, значения максимальных эквивалентных напряжений в элементах штамповой оснастки – могут быть или ограничиваемыми, или оптимизируемыми величинами. Параметры p_k – это, в частности, габаритные размеры и толщины элементов штамповой оснастки или технологические параметры – т.е. варьируемые величины, формы или распределения. Именно механизм оперирования с параметрами p_k является наиболее проблемным.

Действительно, не составляет принципиальной сложности механизм варьирования традиционных численных параметров: геометрические размеры, физико-механические или механические характеристики материалов, из которых изготовлены ЭШО. В то же время гораздо сложнее обстоит дело в случае создания механизма варьирования, например, геометрической формы исследуемых объектов.

Для оперирования такими параметрами, называемыми обобщенными, в наибольшей степени адаптирован метод обобщенного параметрического моделирования [15]. В соответствии с этим методом варьируемость того или иного обобщенного параметра обеспечивается путем специального алгоритма, который ставит в соответствие конкретному значению параметра геометрическую и технологическую или силовую характеристику элементов штамповой оснастки. Этот алгоритм в наиболее сложных случаях является либо трудноформализуемым, либо неформализуемым, и тогда необходимо привлекать опыт и оценки экспертов – конструкторов, технологов или исследователей. Однако, как только такой алгоритм создается, все традиционные операции с численными параметрами могут быть распространены и на операции с обобщенными параметрами.

Естественно, что универсальных способов создания упомянутых выше алгоритмов, служащих "транслятором" для воплощения проекции определенного обобщенного параметра в той или иной модели, не существует. Но в действительности, безусловно, влияние множества p_k на h_s объективно существует. Таким образом, формально соотношения (1) можно переписать, интегрировав в них и традиционные, и обобщенные параметры:

$$L(u, \sigma, p, f, t) = 0. \quad (3)$$

Соотношения (3) устанавливают и функциональную, и параметрическую зависимость переменных состояния от пространственно-временных координат и множества параметров

$$u = u(r, t, p); \quad \sigma = \sigma(r, t, p), \quad (4)$$

где r – радиус-вектор точек пространства, занимаемой элементами штамповой оснастки.

Параметрические зависимости, представленные формально соотношениями (4), как правило, идентифицируются в ходе анализа результатов многовариантных решений задачи (3) при варьировании параметров p .

Несмотря на значительный интерес, который представляют зависимости (4), в практике проектных работ еще больший интерес – к решению задачи синтеза, т.е. определения таких оптимальных параметров p^* , которые удовлетворяют некоторым требованиям:

$$h(u, p^*) < [h], \quad I(u, \sigma, p^*, h) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Первое из соотношений (5) фиксирует ограничения на контролируемые характеристики ЭШО (например, максимальные эквивалентные напряжения, прогибы и т.п.), а второе формируется теми или

иными требованиями к конкретному штампу или группе (гамме) штампов (масса, габариты, толщины, стоимость и т.п.). При этом параметры p^* по-прежнему встроены в уравнения (3), которым удовлетворяют переменные состояния u, σ . Естественно, что решение задачи (5) требует множественного решения задач анализа (3). Таким образом, базовой математической моделью так же и при решении задач синтеза является (3), а в ней основным компонентом – способ интеграции обобщенных параметров в эту модель или в ее численную реализацию.

В итоге предложен общий подход к решению задач анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза проектно-технологических решений, удовлетворяющих заданному множеству ограничений и критериев, отличающихся от известных алгоритмом интеграции в нее различных параметров, в том числе – обобщенных.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния с учетом множественного контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки

Соотношения для анализа напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки, представленные выше, записаны в общем виде. В то же время для решения задач для конкретных объектов необходимо их расписать, учтя основную особенность – наличие множественного контакта по поверхностям сопряжения ЭШО друг с другом.

Соотношения (1) в развернутом виде представляют собой геометрические нелинейные соотношения [16]

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{i,k} \cdot u_{k,i}), \tag{6}$$

уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \tag{7}$$

и закон Гука

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}. \tag{8}$$

Здесь $*,_{i} = \partial^*/\partial x_i$ – производная по координате $x_i (r \equiv \{x_1, x_2, x_3\}^T)$; $u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$ – компоненты вектора перемещений точек исследуемых объектов, тензоров деформаций и напряжений соответственно; C_{ijkl} – тензор модулей упругости материалов, из которых состоят исследуемые элементы; F_i – компоненты объемной нагрузки. При этом индексы $i, j, k, l = 1, 2, 3$. При их повторении в выражении действует правило суммирования по этим индексам [17]. Обозначив область, занимаемую исследуемым объектом, как объединение подобластей, занимаемых отдельными деталями:

$$\Omega = \bigcup_s \Omega_s, \tag{9}$$

а их границы – соответственно

$$S = \bigcup_s S_s, \tag{10}$$

можно сформировать краевую задачу для анализа НДС элементов штампов. В областях Ω_s действует система алгебро-дифференциальных уравнений (6)–(8). На границах каждой области S_s действуют краевые условия трех типов:

– геометрические

$$u_i^{(s)}|_{S_u} = u_i^{\wedge}; \tag{11}$$

– силовые

$$\sigma_{ij}^{(s)} n_j|_{S_\sigma} = \sigma_i^{\wedge}; \tag{12}$$

– контактные

$$(u_i^{(s)} n_i^{(s)} + u_k^{(g)} n_k^{(g)})|_{S_c} \leq \delta_{sg}. \tag{13}$$

Здесь при обозначении частей границ $S_s = S_u^{(s)} \cup S_\sigma^{(s)} \cup S_c^{(s)}$ опущены индексы принадлежности к границе того или иного тела s . При этом $u_i^{\wedge}, \sigma_i^{\wedge}$ – заданные перемещения и поверхностная нагрузка, $n_r^{(d)}$ – компоненты вектора нормали к поверхности S_d .

Уравнения (11), (12) представляют собой классические граничные условия типа Дирихле или Неймана [16]. В то же время соотношение (13) принципиально от них отличаются: они представляют собой неравенства, а не равенства, и определяют условия непроникновения тела s в тело g , причем начальный зазор по нормальям между этими телами – δ_{sg} . Кроме того, важным обстоятельством является то, что обычно части поверхности S_u и S_σ являются известными и заданными, а, в отличие от них, S_c – неизвестна и является искомой. Искомым при этом является и контактное давление

$$q = q(r)|_{S_c} \geq 0, \tag{14}$$

определяющее нормальное и (при наличии трения) касательное напряжение на поверхности S_c .

Соотношения на границе (11)–(14) формируют краевые условия, которые дополняют уравнения (6)–(8) и формируют вместе с ними краевую задачу. Она нелинейна не только в силу нелинейности (6), но, в первую очередь, – ввиду наличия нелинейных соотношений (13).

Как отмечалось ранее, для решения контактной задачи применимы различные методы и модели. В то же время для задач, возникающих при анализе контактного взаимодействия ЭШО, имеются ряд особенностей. Главная из них – множественный контакт деталей штампов, причем в основном – по поверхностям согласованной формы. Более того, ввиду вариативности Ω_s, S_s на этапе проектных разработок изменяются и участки локализации S_c , а вдобавок, вариативными могут быть и технологические факторы (и при изготовлении штампов, и при осуществлении технологических операций штамповки с их помощью): свойства материалов крепления колонок и втулок в штампах, технологические зазоры между

режущими кромками матриц, пуансон-матриц и пуансонов, с одной стороны, и штампуемого материала, – с другой, толщина и механические свойства штампуемого материала и т. п.). Все эти обобщенные параметры включаются в сложную математическую модель напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия, а условия (13), реализуемые на поверхностях контактирующих пар, вносят дополнительную сложность в создаваемую комплексную математическую модель.

Образуемая система разрешающих соотношений, как одним из наиболее эффективных методов, может быть удовлетворена с применением теории вариационных неравенств. В соответствии с этим методом вводится в рассмотрение подмножество пробных функций K :

$$K = \left\{ v^{(s)} : \left(v_i^{(s)} n_i^{(s)} + v_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_{sg}} \leq \delta_{sg} \right\}, \quad (15)$$

а также функционал полной внутренней энергии:

$$I(v) = \frac{1}{2} \sum_s \int_{(\Omega_s)} \sigma_{ij}^{(s)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(s)} d\Omega - \sum_s \int_{(S_c^{(s)})} \sigma_i^{\wedge} u_i dS - \sum_s \int_{(S_c)} \sigma_{sj} \cdot v_j \cdot u_s dS. \quad (16)$$

Первое слагаемое в (16) определяет квадратичную форму $a(v, v)$, порождаемую билинейными формулами

$$a(u, v) = \frac{1}{2} \int_{(\Omega_s)} \sigma_{ij}^{(s)}(u) \varepsilon_{ij}^{(s)}(v) d\Omega, \quad (17)$$

а последнее – линейную

$$b_s(v) = \int_{(S_c)} \sigma_{ij}^{(s)} v_i^{(s)} u_i^{(s)} dS. \quad (18)$$

Тогда, следуя [18], всю начально-краевую задачу можно свести к минимизации функционала $I(u)$ на множестве K (см. (15)):

$$u : I(u) \rightarrow \min, u \in K. \quad (19)$$

Из соотношений (6), (7) по найденным распределениям $u(r)$ находятся поля $\varepsilon(u)$, $\sigma(\varepsilon)$, а, соответственно, становится возможным провести полную оценку прочности и жесткости ЭШО. При этом в ходе решения получаем и область контактного взаимодействия S_c , и распределение контактного давления q . Этим самым решается сформулированная связанная задача анализа НДС с учетом контактного взаимодействия ЭШО.

Особенностью предложенного подхода является индифферентность по отношению к наличию множественных областей контактного взаимодействия. Кроме того, не теряется предложенная и описанная в работе выше методология параметризации, что представляет самые широкие возможности при решении задач синтеза проектно-технологических решений при разработке ЭШО.

В качестве замечания можно отметить, что при

поиске минимума функционала (19) на выпуклом множестве (15) возможно применение методов штрафа, множителей Лагранжа, сопряженных градиентов и т.п. [19]. В сочетании с методом дискретизации эти постановки будут затронуты ниже.

Еще одним замечанием служит посыл о присутствии временной координаты в разрешающих уравнениях (1). Естественно, что в полной динамической постановке (т.е. при учете сил инерции в разрешающих уравнениях (4)) задача определения НДС с учетом контактного взаимодействия приводит в общем случае к начально-краевой задаче. Однако, как показывают экспериментальные [2] и численные исследования, собственные частоты колебаний ЭШО, например, базовых плит, гораздо выше частоты приложения усилия штамповки.

В связи с этим динамическими эффектами, возникающими при циклическом приложении усилий штамповки (рис. 1), которые действуют с частотой $\nu = 1/T$ и кратными ей, можно пренебречь для серийных кривошипных штампов. Это объясняется тем, что основная частота возбуждения $\nu \ll \nu_1$ (нижняя частота собственных колебаний элементов штамповой оснастки), а для кратных, более высоких гармоник в разложении $P_{шт.}(t)$ в ряде Фурье:

$$P_{шт.} = Q_0 + \sum_k Q_i^{(1)} \sin(2\pi \nu k t) + \sum_k Q_i^{(2)} \cos(2\pi \nu k t), \quad (20)$$

с ростом кратности k резко увеличиваются усилия демпфирования, уменьшающие амплитуды возбуждаемых колебательных процессов.

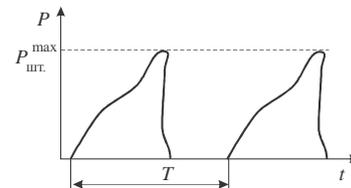


Рис. 1 – Циклическое положение усилий штамповки к ЭШО

Таким образом, без учета динамических эффектов напряженно-деформированное состояние исследуемых элементов штамповой оснастки можно рассматривать как квазистатическое. Зависимость же компонент НДС от времени t можно трансформировать в зависимость от параметра $P_{шт.}$, который изменяется в пределах (см. рис. 1):

$$0 \leq P_{шт.} \leq P_{шт.}^{\max}. \quad (21)$$

Естественно, что если ввести безразмерный параметр $\tau = P_{шт.}/P_{шт.}^{\max}$, то для линейно упругих задач зависимость компонент НДС от τ является линейной (от нуля при $\tau = 0$ до максимума при $\tau = 1$). Однако по-сути задача анализа НДС с учетом контактного взаимодействия является, как отмечалось выше, нелинейной. Таким образом, целесообразно исследовать

зависимость напряженно-деформированного состояния ЭШО от параметра τ , имея ввиду, что максимальное значение усилия штамповки [20] $P_{шт.}^{max} = k_3 \cdot L \cdot h \cdot \sigma_{ср.}$, где $k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент затупления режущих кромок пуансонов, матриц и пуансон-матриц, L, h – периметр и толщина вырубаемой детали, $\sigma_{ср.}$ – напряжение среза – механическая характеристика штампуемого материала.

Для переналаживаемых штампов, предназначенных для изготовления не одной конкретной детали, а их гаммы, описанный выше подход модифицируется. Действительно, в этом случае диапазон изменения усилия штамповки ограничивается сверху величиной $P_{шт.}^{maxmax} = P_{шт.}^{max}(L_{max}, h_{max}, \sigma_{ср.}^{max})$, где максимум определяется по наибольшей толщине, периметру и напряжению среза для выбранного типоразмера переналаживаемого штампа. Соответственно, смысл параметра τ изменяется: он определяет протекание процесса нагружения не только при нагружении ЭШО при штамповке конкретной детали, а целой их гаммы (рис. 2). Таким образом, получаем множество решений при варьировании $0 \leq \tau \leq 1$.

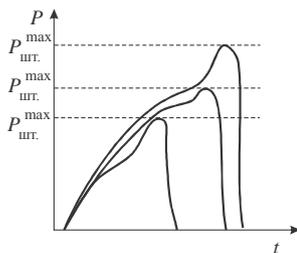


Рис. 2 – Усилие штамповки для гаммы деталей

Подытоживая, можно заключить, что в работе сформулирована усовершенствованная математическая модель напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия, которая учитывает множественный контакт в сопряжении ЭШО и варьированность усилий штамповки, действующих на переналаживаемые штампы при вырубке-пробивке деталей различной толщины, размеров и из различных материалов.

Численная реализация разработанной математической модели

В настоящее время решение задач об определении НДС тел сложной формы в большинстве случаев осуществляется численно, как правило, методом конечных элементов [21, 22]. Этот метод фактически стал стандартным инструментом исследований. В связи с этим единичный расчет отдельной взятой конкретной конструкции не представляет принципиальных трудностей. Однако ситуация может быть существенно осложнена, как, в частности, при исследовании напряженно-деформированного состояния ЭШО. Основными факторами, осложняющими проведение этих исследований, является, во-первых, сложность и вариативность конструкции штампов, а во-вторых, наличие множественных контактов. Первый из факторов обусловлен изначальной неопределенностью

конструктивных и технологических параметров, форм и размеров элементов штамповой оснастки, что может приводить в случае применения тривиальных средств параметризации к коллизиям, т.е. нарушению согласованности, целостности или функциональности штампа при изменении варьируемых параметров во всем диапазоне их изменения. Второй фактор создает проблемную ситуацию при чрезмерном усложнении конструкции с точки зрения введения множественных контактных пар.

Для решения конфликтных ситуаций, порождаемых первым фактором, необходимо создание специальных процедур. Они предназначены либо для обеспечения согласованного изменения геометрической модели элементов штамповой оснастки, либо для анализа на наличие коллизий при том или ином сочетании варьируемых параметров. Проблемы, вызываемые вторым из факторов, разрешаются специальной процедурой, которая путем варьирования условий на поверхностях контакта позволяет уменьшить чрезмерную громоздкость конечно-элементной модели.

На рис. 3 представлена общая структура специализированного программно-модельного комплекса (СПМК) для исследования НДС элементов штампов с учетом контактного взаимодействия.

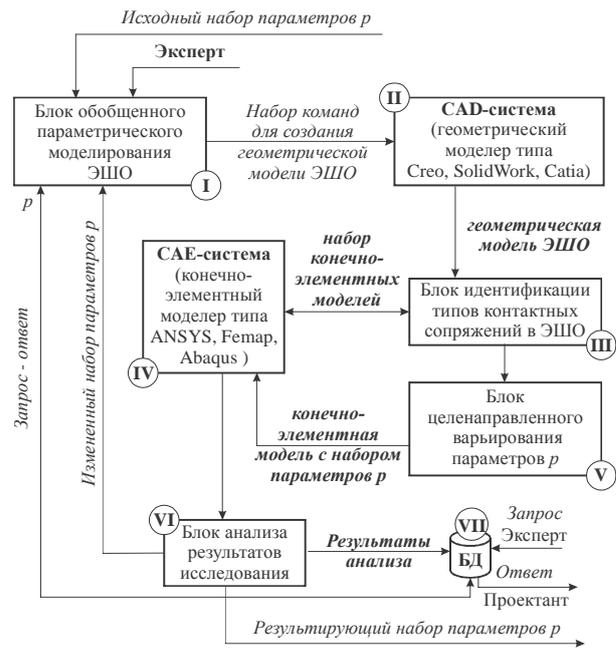


Рис. 3 – Структура СПМК для исследования напряженно-деформированного состояния ЭШО с учетом контактного взаимодействия

Данный специализированный программно-модельный комплекс соединяет углубленные возможности универсальных систем (САД – Creo, SolidWork, Catia и т.п., САЕ-систем – ANSYS, Femap, Abaqus т.п.) и специальных программных средств. На этапах I, III, V моделируются специфические особенности ЭШО, проводится генерация и целенаправленное варьирование их параметров, а этапы II, IV отвечают за создание моделей ЭШО и расчет их НДС.

Предложенная блочно-модульная структура численных исследований является гибкой и "перена-

лаживаемой" на тот или иной тип штампа. При этом важно, что процесс расчетных исследований начинается не "с чистого листа", а с запроса в создаваемую базу данных (БД) VII на предмет наличия в ней результатов расчета, соответствующих текущему варианту. Завершается же каждый цикл расчетов пополнением БД. Таким образом, в ходе этих исследований решаются только задачи, ранее не решенные, а база данных постоянно пополняется и обеспечивает оперативный доступ к информации, уже к данному моменту в ней накопленной, в режиме "запрос – ответ" (диалога с экспертом или проектантом).

Еще одной особенностью данного СПМК является его открытость и потенциальная возможность встраивания в специализированные базы знаний и экспертные системы.

Таким образом, можно заключить, что предложенная комплексная математическая модель нашла свою реализацию в виде специализированного программно-модельного комплекса, который не только не сужает ее возможности, но и создает еще дополнительные. С применением разработанного СПМК далее решен ряд прикладных задач исследования ЭШО.

Результаты численного моделирования

С учетом созданного специализированного программно-модельного комплекса проведено решение ряда прикладных задач об определении напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия, а также определения зависимостей характеристик их НДС от проектно-технологических параметров на примере разделительных штампов.

Формирование комплексных расчетных схем элементов разделительных штампов. Рассмотрен новый подход к формированию комплексных расчетных схем элементов разделительных штампов, базирующийся на системном анализе технологических систем "пресс – штамп – режущие части – заготовка". Следуя работам [1, 3], рассмотрим разноуровневые подсистемы данной технологической системы. Однако, в отличие от подсистемы самого нижнего уровня (рис. 4 [1]), предлагается рассмотреть систему среднего уровня. В этой подсистеме присутствуют все основные элементы, обеспечивающие рабочий процесс штамповки, базирование и взаимное относительное движение частей штампов.

Для формирования комплексных расчетных схем исследуем основные элементы разделительного штампа, вступающие в силовое взаимодействие (рис. 5).

Основные элементы штампа базируются на нижней и верхней базовых плитах. Основное рабочее движение осуществляется путем перемещения верхней базовой плиты по направляющим колонкам. При этом в силу деформирования нижней базовой плиты штампа колонки, в них запрессованные или соединенные при помощи склеивания (например, заливкой зазора между колонкой (втулкой) и плитой эпоксидным компаундом или иным твердеющим составом), деформируются, вступая в верхней части в зоне направляющих отверстий в контактное сопряжение с верхней базовой плитой.

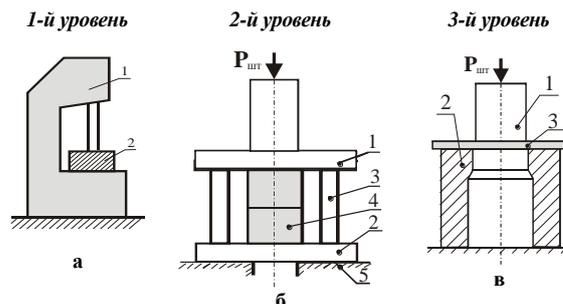


Рис. 4 – Подсистемы технологической системы "пресс – штамп – режущие части – заготовка":

- 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 штампуемый материал 3

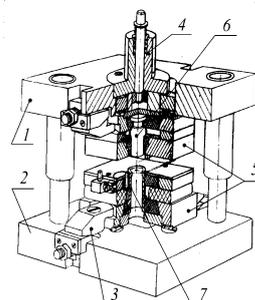


Рис. 5 – Взаимодействие элементов разделительных штампов на примере конструкции УСПШ совмещенного действия:

- 1 – верхняя базовая плита; 2 – нижняя базовая плита;
3 – прихват; 4 – хвостовик; 5 – пакет; 6 – пуансон;
7 – матрица

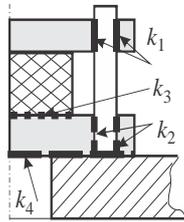
Во время такого взаимодействия возникают нормальные и касательные (от трения) усилия, включаемые в силовые потоки в технологической подсистеме "стол пресса – блок штампа – пакет – заготовка". Одновременно ответные усилия оказывают обратное воздействие на нижнюю базовую плиту. Таким образом, точный расчет этих усилий возможен только на основе анализа контактного взаимодействия, в которое опосредованно вовлечены не только соседние, непосредственно механически сопрягаемые, но и удаленные друг от друга элементы штампов. Кроме рассмотренных элементов, необходимо также учесть контактное взаимодействие в сопряжении "пакет – нижняя базовая плита" и в сопряжении "нижняя базовая плита – подштамповая плита пресса".

На рис. 6 представлены элементы исследуемой технологической системы и соответствующие характерные зоны контактного взаимодействия. Здесь k_1 – контакт "колонки – верхняя базовая плита"; k_2 – контакт "колонки – фиксирующий слой – нижняя базовая плита"; k_3 – плоскость опирания пакета на нижнюю базовую плиту; k_4 – плоскость опирания нижней базовой плиты на подштамповую плиту штампа.

Таким образом, комплексная расчетная схема разделительного штампа предполагает наличие множественного контакта в сопряжениях элементов штампа. При этом усилия, возникающие между кон-

тактирующими элементами, определяются в ходе решения самой контактной задачи, будучи в ней дополнительными неизвестными. В этом состоит принципиальное отличие создаваемой комплексной расчетной схемы от ранее использованных [1, 2].

Рис. 6 – Элементы исследуемой технологической системы и соответствующие характерные зоны контактного взаимодействия



Тестовая задача 1. В качестве иллюстрации рассмотрим контактное взаимодействие тестовой конструкции, схема которой – на рис. 7: сменный пакет воздействует на нижнюю базовую плиту, опирающуюся на подштамповую плиту пресса. Варьируются: диаметр провального отверстия в подштамповой плите пресса – параметр r_2 (в диапазоне 160÷360 мм); толщина нижней базовой плиты штампа – параметр r_1 (в диапазоне 15÷90 мм). Усилие штамповки $P_{шт}$ (см. рис. 6) – 50 кН, габариты штампа – 240×240 мм, габариты пакета 100×100 мм. Материал основных деталей – сталь 40Х (модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$). В силу симметрии здесь и далее (задача 2) рассмотрена 1/4 конструкции. На рис. 8-11 приведены характерные картины распределения компонент НДС элементов штампа.

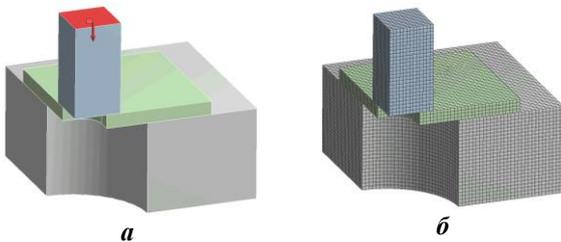


Рис. 7 – Нижняя базовая плита во взаимодействии со сменным пакетом и подштамповой плитой пресса: а – геометрическая модель, б – конечно-элементная модель

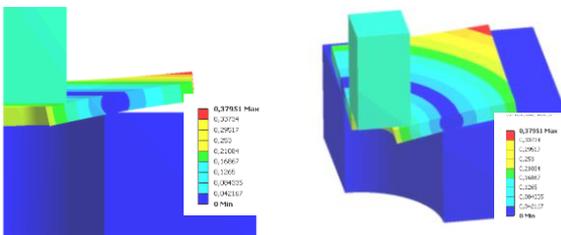


Рис. 8 – Результаты исследования НДС элементов штампа (задача 1): распределение полных перемещений

На рис. 12-13 приведены интегральные зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров. Полученные зависимости изменения картин распределений компонент НДС элементов технологической подсистемы "пакет – нижняя базовая плита штампа – подштамповая плита пресса" дает возможность сделать следующие выводы.

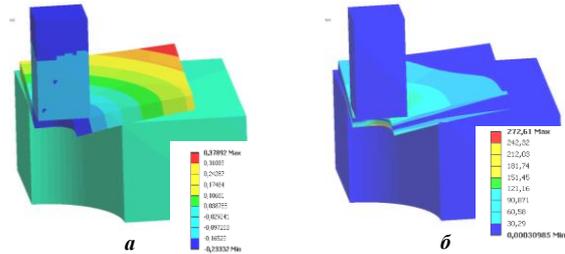


Рис. 9 – Результаты исследования НДС элементов штампа (задача 1): а – вертикальные перемещения; б – эквивалентные напряжения по Мизесу

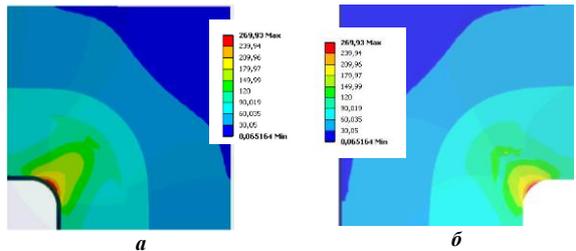


Рис. 10 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в нижней базовой плите в плоскости сопряжения (задача 1): а – со сменным пакетом, б – с подштамповой плитой пресса

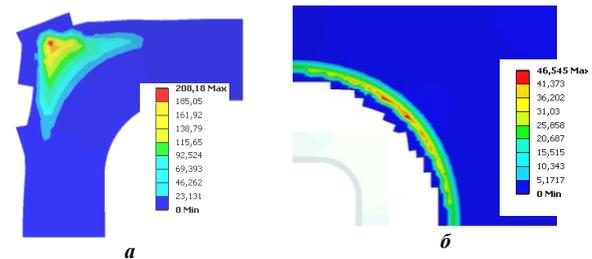


Рис. 11 – Результаты исследования напряженно-деформированного состояния элементов штампа – распределение контактных давлений (задача 1): а – в сопряжении сменного пакета и базовой плиты; б – в сопряжении подштамповой плиты пресса и базовой плиты штампа

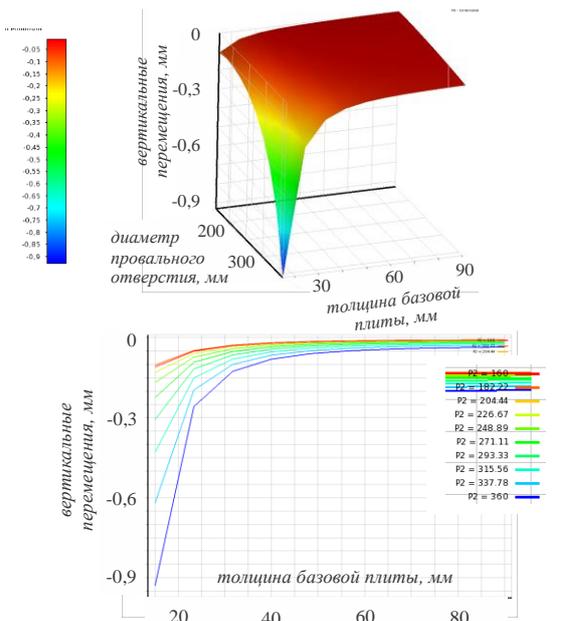


Рис. 12 – Зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров (задача 1): изменение минимальных (максимальных по величине) вертикальных перемещений во всей подсистеме

1. Напряжения в элементах данной подсистемы концентрируются в зонах их механического контакта.

2. Напряжения и контактные давления распределяются по площадям контактного сопряжения существенно неравномерно.

3. Интегральные зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров (в данном случае – толщина базовой плиты и диаметр провального отверстия) соответствуют "гиперболическому" поведению: резкое возрастание при убывании объема материала детали ниже некоторого предела, практически неизменная величина – при возрастании этого объема выше некоторого другого предела и плавное изменение в переходном диапазоне.

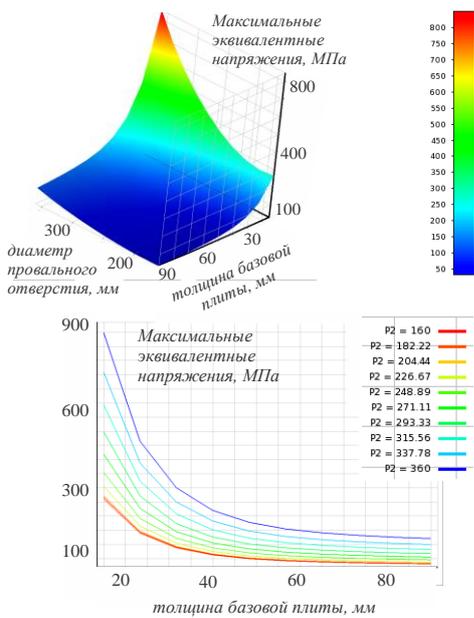


Рис. 13 – Зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров (задача 1): изменение максимальных эквивалентных напряжений в базовой плите штампа

Таким образом, полученные картины распределений характеристик напряженно-деформированного состояния ЭШО определяют наиболее нагруженные их зоны, а построенные поверхности отклика дают возможность решать задачу обоснования проектно-технологических параметров штампов по критериям стойкости, точности, прочности и жесткости.

Тестовая задача 2. Для исследования взаимодействия элементов подсистемы "нижняя базовая плита штампа – направляющие колонки" рассмотрим контактное взаимодействие тестовой конструкции, схема которой на рис. 14. Усилие штамповки, материал и размеры элементов штампа – те же, что и в задаче 1.

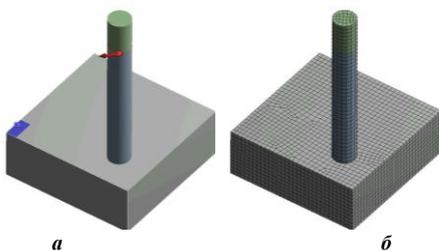


Рис. 14 – Взаимодействие направляющей колонки с нижней базовой плитой штампа:

а – геометрическая модель, б – конечно-элементная модель

Задача 2.1. Исследуется влияние усилия, действующего со стороны верхней базовой плиты штампа (параметр $p_1 = 0 \div 10$ кН) через втулку на уровне ее верхнего среза (на высоте 120 мм) под углом в плоскости плиты (параметр $p_2 = 0 \div \pi/4$). Втулка диаметром 20 мм посажена в нижней плите толщиной 45 мм с натягом (параметр $p_3 = 0.001, 0.005, 0.1, 0.2$ мм). Картины распределения компонент напряженно-деформированного состояния приведены на рис. 15–18, а на рис. 19–20 – зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров.

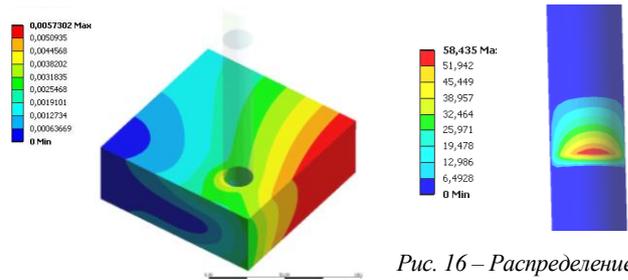


Рис. 15 – Распределение полных перемещений в нижней базовой плите штампа (задача 2.1)

Рис. 16 – Распределение контактных напряжений в сопряжении колонки с плитой штампа (задача 2.1)

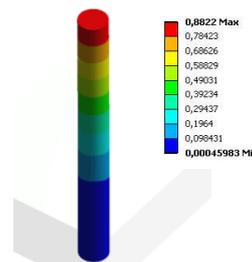


Рис. 17 – Распределение полных перемещений в колонке штампа (задача 2.1)

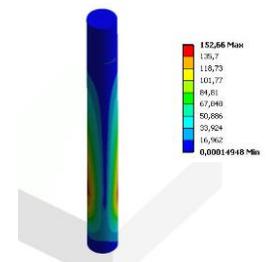


Рис. 18 – Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений в колонке штампа (задача 2.1)

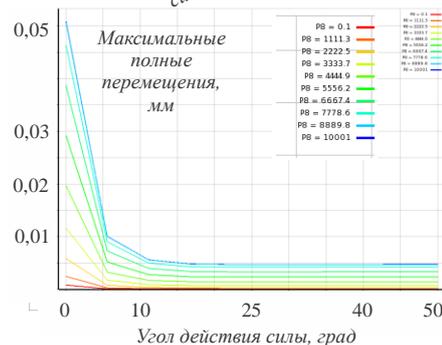
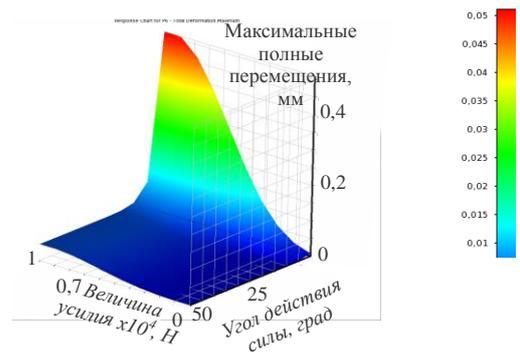


Рис. 19 – Зависимость полных перемещений верхнего среза колонки от параметров p_1, p_2 (задача 2.1)

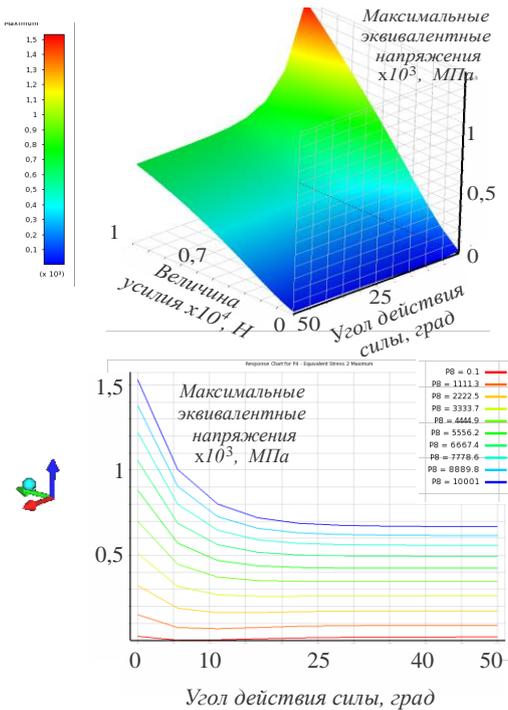


Рис. 20 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от параметров p_1, p_2 (задача 2.1)

Как видно из представленных графиков и распределений, наблюдаются следующие закономерности.

1. Наиболее нагруженными от горизонтальных усилий зонами являются области, примыкающие к соединению колонок с плитами.

2. Контактные давления в сопряжении "колонка – плита" распределяются неравномерно, и чем меньше натяг, тем больше эта неравномерность.

Интегральные характеристики напряженно-деформированного состояния демонстрируют примерно такую же зависимость от конструктивных параметров, как и описанная выше (см. задачу 1) "гиперболическая" зависимость, и более равномерную и плавную – от параметров нагружения.

Задача 2.2. Исследуется влияние усилия, действующего со стороны верхней базовой плиты штампа (параметр $p_1 = 0 \div 10$ кН) через втулку на уровне ее верхнего среза (на высоте 120мм) под углом в плоскости плиты (параметр $p_2 = 0 \div \pi/4$). Втулка диаметром 20 мм посажена в нижней плите толщиной 45 мм при помощи клеявого состава (толщина слоя – параметр $p_3 = 2.0, 3.5, 5.0$ мм). В качестве фиксирующего состава применен состав на основе эпоксидной смолы ($E = 3,2 \cdot 10^3$ МПа, $\nu = 0,45$). На рис. 21-25 приведены результаты исследований.

На рис. 21, 22, 24, в частности, представлены распределения перемещений и напряжений в тестовой конструкции. Видно, что распределения контактного давления и напряжений в сопряжениях элементов штампов далеки от равномерных. Этот фактор существенным образом сказывается на НДС всех элементов штампов, находящихся во взаимодействии, и его нужно учитывать при формировании более адекватных, чем традиционные, расчетных схем элементов разделительных штампов.

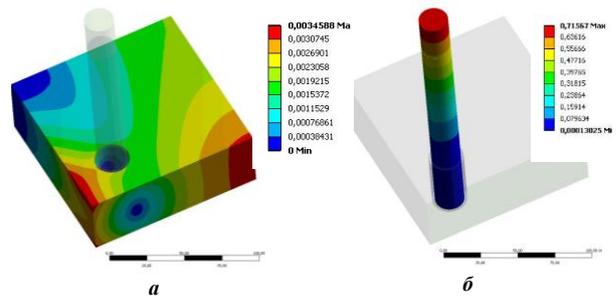


Рис. 21 – Распределение полных перемещений (задача 2.2): а – в нижней базовой плите, б – в колонке штампа

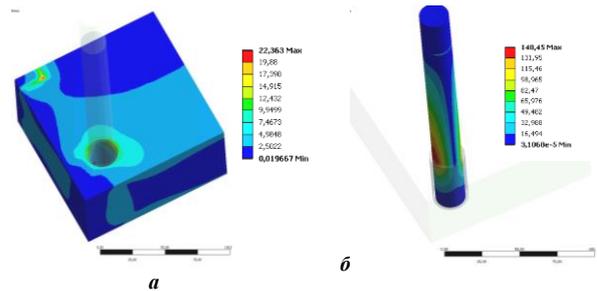


Рис. 22 – Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений (задача 2.2): а – в нижней плите, б – в колонке штампа

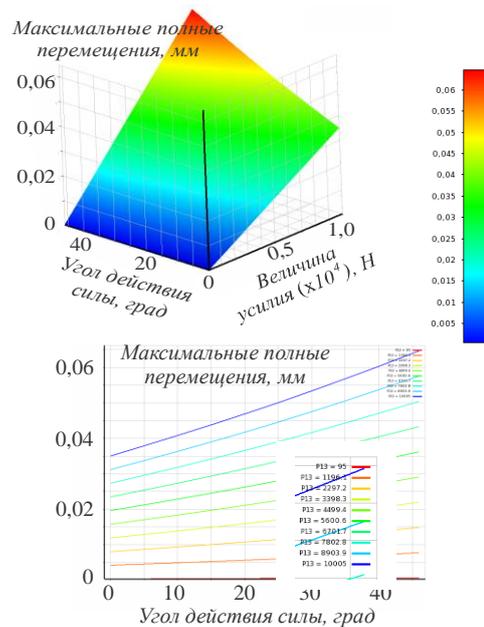


Рис. 23 – Распределение полных перемещений в нижней базовой плите штампа (задача 2.2)

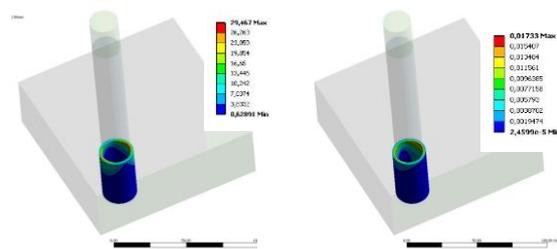


Рис. 24 – Распределение полных перемещений и эквивалентных (по Мизесу) напряжений в фиксирующем слое (задача 2.2)

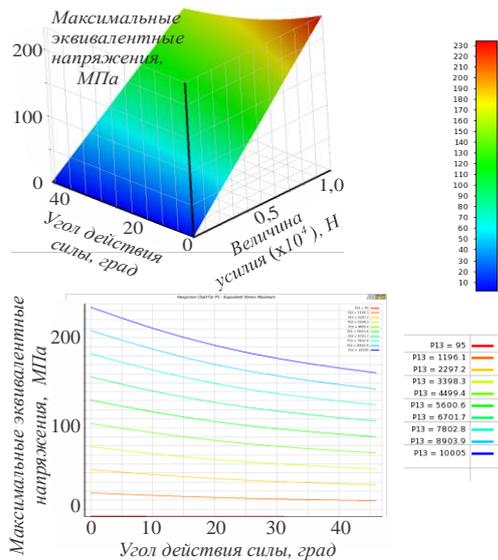


Рис. 25 – Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений в колонке штампа (задача 2.2)

Как следует из анализа полученных результатов, НДС данной подсистемы имеет свои особенности.

1. Напряжения в данном случае гораздо ниже, чем в случае посадки колонок с натягом.

2. Перемещения колонок от действия горизонтальных усилий выше, чем в случае посадки колонок с натягом.

3. Распределение напряжений в слое клеящего компаунда после полимеризации и приложения нагрузки в случае посадки колонок с натягом – неравномерное по высоте.

4. Несмотря на более низкий уровень напряжений, следует учитывать также и более низкий уровень механических характеристик материала клеяющего слоя по сравнению со свойствами металла, из которого изготовлены колонка и плита.

5. Интегральные зависимости характеристик напряженно-деформированного состояния данной подсистемы от всех варьируемых параметров носят примерно линейный характер.

Задача 3. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов системы "подштамповая плита прессы – нижняя базовая плита – пакет – направляющие колонки – верхняя базовая плита". Описанные выше задачи являются ценными с точки зрения установления закономерностей изменения характеристик НДС элементов штамповой оснастки при варьировании отдельных проектно-технологических параметров или их множества. В то же время в созданные расчетные модели были объединены не все основные элементы штампа. В связи с этим требуется провести исследование напряженно-деформированного состояния с использованием модели более высокого уровня.

В частности, с этой целью была построена модель разделительного штампа в виде системы "подштамповая плита прессы – нижняя базовая плита – пакет – направляющие колонки – верхняя базовая плита" (рис. 26, в силу симметрии рассмотрена 1/4 конструкции, усилие штамповки – 10 кН). На рис. 27 приведены картины распределения контактного да-

вления в зонах k_2, k_3 (см. рис. 6), на рис 28 – k_1, k_2 .

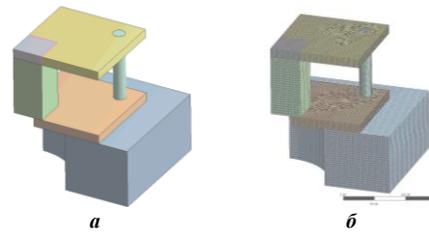


Рис. 26 – Разделительный штамп:
а – геометрическая модель, б – конечно-элементная модель

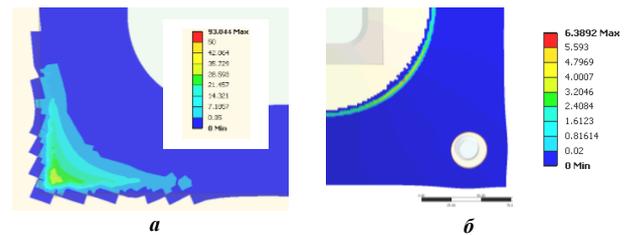


Рис. 27 – Картины распределения контактного давления в зонах: а – k_3 , б – k_4

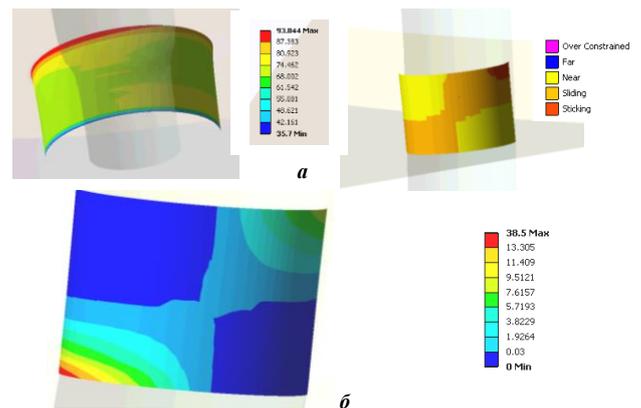


Рис. 28 – Картины распределения контактного давления в зонах: а – k_2 , б – k_1

Из представленных распределений видно, что отмеченные на частных моделях (см. задачи 1, 2) закономерности, а именно относительно существенно неравномерного распределения контактного давления в сопряжениях ЭШО, целиком и полностью подтверждаются. То же можно сказать и о распределении полных перемещений, эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 29). Из всей системы, как отмечалось выше, можно вычлнить картины НДС отдельных элементов (рис. 30–32). Они также дают основание подтвердить прогнозируемые особенности НДС, обоснованные на более частных моделях: о концентрации напряжении в зонах контактного взаимодействия отдельных элементов штампов и о значительных уровнях упругих перемещений.

Таким образом, можно заключить, что качественную картину распределения компонент НДС можно проанализировать по результатам исследования более полной модели штампа, в то время как количественные зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров можно определять по результатам

расчета с применением частных моделей, менее громоздких, а, значит, и требующих меньше вычислительных затрат на компьютерное моделирование. В результате обеспечивается сбалансирование получаемых результатов и сложности создаваемых моделей на различных этапах проектных исследований.

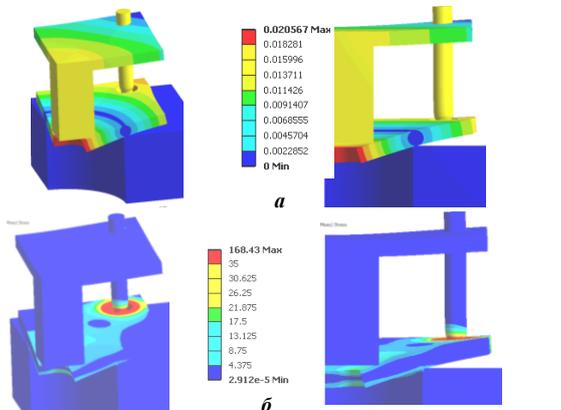


Рис. 29 – Картины распределения компонент НДС: а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

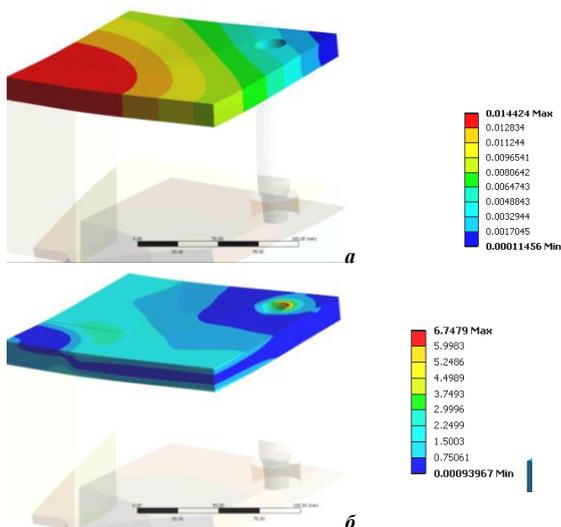


Рис. 30 – Картины распределения компонент НДС в верхней базовой плите: а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

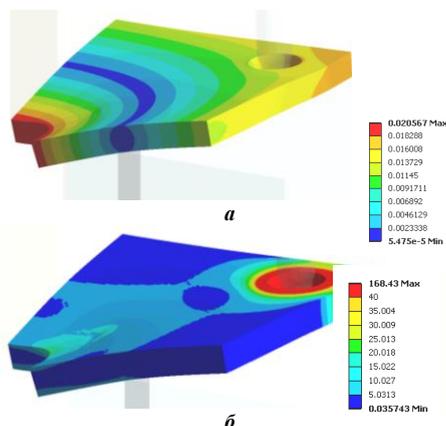


Рис. 31 – Картины распределения компонент НДС в нижней базовой плите: а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

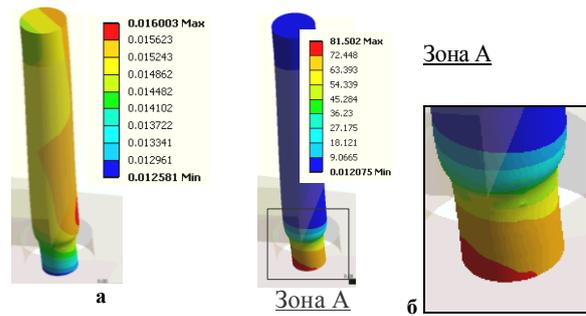


Рис. 32 – Картины распределения компонент НДС в направляющей колонке: а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

Заключение

В работе описана комплексная модель напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки. Получены результаты, позволяющие обосновать следующие выводы.

1. Для обеспечения возможности вариативности геометрических и численных моделей ЭШО интегрирован и адаптирован подход с применением метода обобщенного параметрического моделирования. Этим самым обеспечивается, в отличие от традиционных подходов, бесконфликтное построение моделей ЭШО в широком диапазоне варьирования их проектно-технологических параметров.

2. Разработан алгоритм повышения точности и оперативности численных исследований напряженно-деформированного состояния ЭШО оснастки за счет обоснования дифференцированного назначения условий контактного сопряжения при наличии множественных контактов деталей штампов. Этим самым обеспечивается, в отличие от традиционных подходов, возможность проведения многовариантных численных исследований ЭШО на этапах проектирования параллельно с остальными работами.

3. Созданный СПМК отличается от известных гибкой модульной структурой, сочетающей, с одной стороны, развитые средства геометрического и конечно-элементного моделирования универсальных CAD/CAM/CAE-систем, с одной стороны, и нацеленность на объект – элемент штамповой оснастки – за счет специализированных программных модулей, – с другой. Благодаря такой структуре удается получить новое качество исследований – бесконфликтное оперирование с большими объемами информации. Кроме того, перенацеливание на новый объект исследований, в отличие от универсальных или специальных CAD/CAM/CAE-систем, требует доработки только отдельных модулей. Также новой отличительной особенностью созданного специализированного программно-модельного комплекса является наличие пооплачиваемой базы данных, которая аккумулирует результаты предшествующих исследований, в еще большей степени повышает оперативность расчетов и снижает их объем, а также создает предпосылки для построения экспертных систем и баз знаний по обоснованию проектных решений элементов штамповой оснастки по критериям стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций.

4. В работе представлен подход к созданию комплексных расчетных схем ЭШО. Они отличаются от традиционных расчетных схем включений в единую интегрированную расчетную схему всех основных элементов разделительных штампов, причем с учетом их контактного взаимодействия: значения контактных давлений определяются в ходе решения, контактной задачи, а не задаются заранее известными.

5. На примере ряда частных моделей ЭШО определены особенности их НДС с учетом контактного взаимодействия. В частности, установлено существенно неравномерное распределение контактных давлений, перемещений и напряжений, причем концентрация контактных давлений и напряжений наблюдается в зоне контактирования отдельных элементов штампов.

6. Получены зависимости интегральных характеристик НДС элементов штамповой оснастки (максимальные перемещения, контактные давления и напряжения) от варьируемых проектно-технологических параметров, как правило, зависимость от конструктивных параметров носит "гиперболический" характер, а от технологических – близкий к линейной зависимости.

7. Предложена и реализована в виде СПМК технология исследований, дающая возможность проведения многовариантных исследований НДС элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия.

8. В созданный СПМК интегрирована специализированная база данных, в которой хранятся результаты исследований напряженно-деформированного состояния ЭШО.

9. В ходе моделирования НДС элементов РШ при помощи метода конечных элементов на модели более высокого уровня подтверждены все основные особенности распределения контактных давлений, полных перемещений и напряжений, определенные при помощи менее громоздких моделей, состоящих из 2-3 элементов непосредственно взаимодействующих штампов. Это свидетельствует о возможности использования зависимостей характеристик НДС от варьируемых параметров, полученных на этих более простых моделях, при проведении проектных исследований. При этом на завершающей их стадии, несомненно, требуется проведение проверочных расчетов с применением расчетной модели более высокого уровня.

В ходе дальнейших исследований планируется провести анализ НДС элементов разделительных штампов с учетом контактного взаимодействия на основе описанной в работе комплексной расчетной схемы.

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. Заярченко Е.И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов: дисс... доктора. техн. наук: спец. 01.02.06 и 05.03.05 / Заярченко Евгений Иванович. – Харьков, 1992. – 280 с.
3. Ищенко О.А. Базовые плиты разделительных штампов: напряженно-деформированное состояние с учетом контактного взаимодействия / О.А. Ищенко, Н.А. Деміна, А.В. Грабовский и др. // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2011. – № 51. – С. 50-58.
4. Ищенко О.А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко // Моделювання процесів в

металургії. – 2015. – № 1. – С. 93-96.

5. Ищенко О.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов / О.А. Ищенко, Н.А. Деміна, А.В. Грабовский, Н.А. Ткачук // КШП. ОМД (Москва). – 2012. – №9. – С. 40-44.

6. Борисевич В.К. Анализ разделительных процессов листовой штамповки / В.К. Борисевич, В. В. Драгобецкий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 12. – С. 9-12.

7. Zhang L.C. A new mechanics model of stamping a thin strip on an elastic foundation/ L.C. Zhang, Zhongqin Lin // International Journal of Solids and Structures. – 1997. – 34(3). – P. 327-339.

8. Kardes N. Determining the flow stress curve with yield and ultimate tensile strengths. Part I / N. Kardes, C. Choi, X. Yang, T. Altan // STAMPING Journal. – May/June. – 2011. – P. 12-13.

9. Kardes N. Determining the flow stress curve with yield and ultimate tensile strengths. Part II / N. Kardes // STAMPING Journal. – July/August. – 2011. – P. 14-15.

10. Oujebbour F.-Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping / F.-Z. Oujebbour, A. Habbal, R. Elaia, Z. Zhao // Journal of Computational Design and Engineering. – 2014. – Vol. 1. – No 3. – P. 187-193.

11. Liu W. Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm / Liu W., Yang Y. // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – 208(1). – P. 499-506.

12. Azaoui M. An heuristic optimization algorithm for the blank shape design of high precision metallic parts obtained by a particular stamping process/ Azaoui M., Naceur H., Delamézière A., Batoz J.L., Belouettar S. // Finite Elements in Analysis and Design. – 2008. – 44(14). – P. 842-850.

13. Lin B.T. Application of an integrated CAD/CAE/ CAM system for stamping dies for automobiles / Lin B.T., Kuo C.C. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – No 35(9-10). – P. 1000-1013.

14. Hamdaoui M. POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems / Hamdaoui M., Le Quilliec G., Breitkopf P., Villon P. // International Journal of Material Forming. – 2013. – P. 1-22.

15. Ткачук Н.А. Конечные-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Грищенко, А.Д. Чепурной [и др.] // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 57-79.

16. Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity. Oxford etc.: Pergamon Press, 1982. – 342 p.

17. Сокольников И.С. Тензорный анализ (теория и применения в геометрии и в механике сплошных сред) / И.С. Сокольников. – М.: Наука, 1971. – 376 с.

18. Колтунов М.А. Прикладная механика деформируемого твердого тела / Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. – М.: Высш. школа, 1983. —349 с. – 264 с.

19. Карманов В. Г. Математическое программирование / Карманов В. Г. – М.: Наука, 1980. – 258 с.

20. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.

21. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Перев. с англ. под ред. Б.Е. Победри./ О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542.

22. Ищенко О.А. Формирование комплексных розрахункових моделей елементів штампів для розподілових операцій / О.А. Ищенко, Г.В. Ткачук, А.В. Грабовський, Н.А. Деміна // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 12 (1184). – С. 23-30.

Bibliography (transliterated)

1. D'omina N.A. Udoskonalennya metodiv rozrakhunku elementiv shtampovoho osnashchennya na osnovi analizu yikh napruzhenno-deformovanoho stanu: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.03.05 „Protsesty ta mashyny obrobky tyskom” / N.A. D'omina – Kharkiv, 2011. – 20 p.
2. Zajarnenko E.I. Razrabotka matematicheskikh modelej i raschety na prochnost' razdelitel'nyh perenalazhivaemykh shtampov: diss... doktora. tehn. nauk: spec. 01.02.06 i 05.03.05 / Zajarnenko Evgenij Ivanovich. – Kharkov, 1992. – 280 p.
3. Ishhenko O.A. Bazovye plity razdelitel'nykh shtampov: naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie s uchetom kontaktnogo vzaimodejstvia / O.A. Ishhenko, N.A. Demina, A.V. Grabovskij i dr. // Vestnik NTU "KhPI". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2011. – No 51. – P. 50-58.
4. Ishhenko O.A. Kontaktnoe vzaimodejstvie jelementov shtampov dlja razdelitel'nykh operacij / O.A. Ishhenko // Modeljuvannja procesiv v metalurgii. – 2015. – No 1. – P. 93-96.

5. **Ishhenko O.A.** Modelirovanie naprjazhenno-deformirovanogo sostojanija bazovyh plit razdelitel'nyh shtampov / **O.A. Ishhenko, N.A. Demina, A.V. Grabovskij, N.A. Tkachuk** // KShP. OMD (Moscow). – 2012. – No 9. – P. 40-44.
6. **Borisevich V.K.** Analiz razdelitel'nyh processov listovoj shtampovki / **V.K. Borisevich, V. V. Dragobeckij** // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2009. – № 12. – P. 9-12.
7. **Zhang L.C.** A new mechanics model of stamping a thin strip on an elastic foundation/ **L.C. Zhang, Zhongqin Lin** // International Journal of Solids and Structures. – 1997. – 34(3). – P. 327-339.
8. **Kardes N.** Determining the flow stress curve with yield and ultimate tensile strengths. Part I / **N. Kardes, C. Choi, X. Yang, T. Altan** // STAMPING Journal. – May/June. – 2011. – P. 12-13.
9. **Kardes N.** Determining the flow stress curve with yield and ultimate tensile strengths. Part II / **N. Kardes** // STAMPING Journal. – July/August. – 2011. – P. 14-15.
10. **Oujebbour F.-Z.** Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping / **F.-Z. Oujebbour, A. Habbal, R. Ellaia, Z. Zhao** // Journal of Computational Design and Engineering. – 2014. – Vol. 1. – No 3. – P. 187-193.
11. **Liu W.** Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm / **Liu W., Yang Y.** // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – 208(1). – P. 499-506.
12. **Azaouzi M.** An heuristic optimization algorithm for the blank shape design of high precision metallic parts obtained by a particular stamping process/ **Azaouzi M., Naceur H., Delamazière A., Batoz J.L., Belouettar S.** // Finite Elements in Analysis and Design. – 2008. – 44(14). – P. 842-850.
13. **Lin B.T.** Application of an integrated CAD/CAE/ CAM system for stamping dies for automobiles / **Lin B.T., Kuo C.C.** // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – № 35(9-10). – P. 1000-1013.
14. **Hamdaoui M.** POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems / **Hamdaoui M., Le Quilliec G., Breikopf P., Villon P.** // International Journal of Material Forming. – 2013. – P. 1-22.
17. **Sokol'nikov I.S.** Tenzornyj analiz (teoriya i primeneniya v geometrii i v mehanike sploshnyh sred) / **I.S. Sokol'nikov.** – Moscow: Nauka, 1971. – 376 p.
18. **Koltunov M.A.** Prikladnaja mehanika deformiruемого tverdogo tela / **Koltunov M.A., Kravchuk A.S., Majboroda V.P.** – Moscow: Vyssh. shkola, 1983. – 349 p. – 264 p.
19. **Karmanov V.G.** Matematicheskoe programmirovaniye / **Karmanov V.G.** – Moscow: Nauka, 1980. – 258 p.
20. **Romanovskij V.P.** Spravochnik po holodnoj shtampovke / **V.P. Romanovskij.** – Leningrad: Mashinostroenie, 1979. – 520 p.
21. **Zenkevich O.** Metod konechnykh jelementov v tekhnike. Pe-rev. s angl. pod red. B.E. Pobedri/ **O. Zenkevich.** – Moscow: Mir, 1975. – 542 p.
22. **Ishhenko O.A.** Formirovanie kompleksnyh rozrahunko-vih modelej elementiv shtampiv dlja rozpodilovyh operacij / **O.A. Ishhenko, G.V. Tkachuk, A.V. Grabovskij, N.A. Demina** // Vestnik NTU "KhPI", Serija: Novi rishennja v suchasnihi tehnolo-gijah. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2016. – No 12 (1184). – P. 23-30.

Надійшло (received) 10.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Параметрические модели для компьютерного моделирования контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / **О.А. Ищенко, Н.Н. Ткачук, А.В. Грабовский, Н.А. Ткачук, Н.А. Демина, А.А. Зарубина** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 31(1140). – С. 66-78. – Библиогр. 22 назв. – ISSN 2079-0775.

Parametric models for computer modeling of the contact interaction between dies tooling elements / **Ishchenko O., M.M. Tkachuk, A. Grabovskiy, M.A. Tkachuk, N. Demina, A. Zarubina** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Machines and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 39 (1211). – P. 66–78. ISSN 2079-0775.

Параметричні моделі для дослідження контактної взаємодії елементів штампового оснащення / **О.А. Ищенко, М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, Н.А. Дьоміна, А.О. Зарубіна** // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПИ", 2016. – № 39 (1211). – С. 66-78. – Бібліогр. 22 назв. – ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів (About authors)

Ищенко Ольга Анатоліївна – ст. викладач кафедри вищої математики та фізики, Таврійський Державний агротехнологічний університет, Мелітополь

Ishchenko Olga – Senior Lecturer, Higher Mathematics and Physic Department, Tavria State Agrotechnological University; Melitopol

Ткачук Микола Миколайович – кандидат технічних наук, НТУ "ХПИ", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01; e-mail: mikolei@rambler.ru.

Tkachuk Mykola Mykolayovych – Ph.D., NTU "KhPI", doctorante at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-69-01; e-mail: mikolei@rambler.ru.

Грабовський Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ "ХПИ", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Grabovskiy Andrey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", Senior Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Ткачук Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, НТУ "ХПИ", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Tkachuk Mykola – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, NTU "KhPI", Chief of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Дьоміна Наталія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики, Таврійський Державний агротехнологічний університет, Мелітополь

Demina Nataliya – candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Higher Mathematics and Physic Department, Tavria State Agrotechnological University, Melitopol

Зарубіна Алла Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, НТУ "ХПИ", професор кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01

Zarubina Alla – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, NTU "KhPI", Professor at Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01

