

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Транспортне машинобудування

№ 5 (1227) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування. – X. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 5 (1227). – 192 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України (**голова**);
К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;
А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;
В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;
Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.; О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;
В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.; П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.;
В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;
В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.;
М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: А. І. Бондаренко, д-р техн. наук, доц.

Відповідальний секретар: А. І. Бондаренко, д-р техн. наук, доц.

Члени редколегії: Д. О. ВОЛОНЦЕВИЧ, д-р техн. наук, проф.; В. В. ДУЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В. С. ІВАШКО, д-р техн. наук, проф.; Б. І. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

Д. М. КЛЕЦ, д-р техн. наук, доц.; В. І. ОМЕЛЬЯНЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

І. В. ПАРСАДАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. О. ПИЛЬОВ, д-р техн. наук, проф.;

В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

М. РУЦКИЙ, д-р техн. наук, проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Транспортне машинобудування», індексується в наукометричних базах **WorldCat** і **Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 28 квітня 2017 р.

УДК 539.3: 621.9: 004.94

**О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЕМИНА, Н. Н. ТКАЧУК, Н. Б. СКРИПЧЕНКО, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
Г. А. КРОТЕНКО, А. В. ТКАЧУК, А. А. ЗАРУБИНА, О. В. КОХАНОВСКАЯ**

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

У роботі запропоновано новий підхід до забезпечення точності і стійкості виконання технологічних операцій вирубки-пробивання за рахунок створення більш адекватних, точних і оперативних методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів розділових штампів. Розроблена більш досконала комплексна математична модель напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення з урахуванням множинної контактної взаємодії. За результатами числових досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штампів встановлені уточнені залежності їх міцності та характеристик жорсткості від варіюваних параметрів

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

В работе предложен новый подход к обеспечению точности и стойкости выполнения технологических операций вырубki-пробивки за счет создания более адекватных, точных и оперативных методов расчета напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов. Разработана более совершенная комплексная математическая модель напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с учетом множественного контактного взаимодействия. По результатам численных исследований напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов установлены уточненные зависимости их прочностных и жесткостных характеристик от варьируемых параметров.

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

New approach to ensure the accuracy and stability of technological operations cutting-punching was proposed in this paper. Accurate and rapid methods of stress-strain state calculation of dividing stamps elements were used for contact interaction research. Full integrated mathematical model of stress-strain state of the elements was developed. According to the numerical investigation results, refined based their strength and stiffness characteristics have been identified.

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

Введение. Развитие современного машиностроения немислимо без активного продвижения 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 снижать трудоемкость изготовления деталей, повышать коэффициент использования материала, 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 подготовки производства 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, а также методов расчета проектно-технологических параметров проектируемых штампов по критериям прочности и жесткости.

В то же время существующие аналитические и численные методики расчета штамповой оснастки 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 научно-практическую задачу разработки новых, более адекватных, точных и оперативных моделей и методов компьютерного моделирования и расчета проектно-технологических параметров элементов штамповой оснастки по критериям обеспечения прочности и жесткости. Решение данной задачи на примере штампов для вырубki-пробивки листового материала составляет направление представленных исследований.

Целью работы является создание усовершенствованных методов компьютерного моделирования и расчета прочностных и

жесткостных характеристик элементов штамповой оснастки (ЭШО) для обоснования их проектно-технологических параметров по критериям прочности, жесткости, стойкости и точности выполнения технологических операций.

Это предполагает, в свою очередь, решение следующих задач:

1. Обзор современного состояния методов расчета штамповой оснастки, проектно-технологических решений на примере разделительных штампов и определение основных направлений исследований.

2. Разработка усовершенствованной математической модели напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов с учетом множественного контактного взаимодействия, а так же интеграция в нее варьируемых и контролируемых параметров, создание усовершенствованных численных моделей НДС контактирующих элементов исследуемых штампов для разделительных операций на основе разработанной математической модели.

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

Обзор методов численного и экспериментального исследования стойкости, точности, прочности и жесткости элементов штамповой оснастки. Штамповая оснастка, в зависимости от вида выполняемых операций, охватывает горячую и холодную, объемную и листовую штамповку, вытяжку, гибку и вырубку-пробивку. При этом штампы служат для базирования заготовки, для осуществления формообразующих операций и последующего удаления или транспортирования готовых деталей или заготовок.

Однако, несмотря на многообразие выполняемых операций, разнообразие конструктивных решений и отличие в уровнях габаритов, толщин и силовых воздействий, все виды штамповой оснастки встроены в технологическую систему "пресс – штамп – формообразующие (режущие) элементы – заготовка", являясь центральной ее частью и воспринимая силовые потоки, с одной стороны, – от прессы, а с другой, – со стороны заготовки через формообразующие (режущие) элементы. С этой точки зрения общий анализ силовых потоков, кинематических связей, стойкостных и точностных параметров можно проводить на примере любых штампов. В данном случае в качестве базового были выбраны разделительные переналаживаемые штампы (РПШ) для холоднолистовой штамповки.

Анализ конструкций и методов расчета разделительных штампов (РШ) предоставил основу для определения существующих проблемных

вопросов и, соответственно, – направлений дальнейших исследований.

Конструктивные особенности разделительных штампов. Рассмотрим конструкцию разделительных штампов на примере переналаживаемых штампов для вырубки-пробивки с точки зрения формирования в дальнейшем на этой основе их расчетных схем для анализа напряженно-деформированного состояния как определяющего фактора стойкости, прочности и точности работы проектируемых штампов.

Определенное представление о конструктивных особенностях и расчете разделительных штампов дает многочисленная справочная литература, статьи и диссертации [1–12].

Как отмечается в [1, 2], на сегодняшний день разработанная и внедренная в производство система переналаживаемых штампов включает три основных типа конструкций, сохраняющих, однако, основной общий принцип универсальности и переналаживаемости: универсально-сборные переналаживаемые штампы (УСПШ); специализированные переналаживаемые штампы (СПШ); универсальные переналаживаемые штампы с механизированным креплением пакетов (УПШ-М). В свое время в ГП "Харьковский НИИ технологии машиностроения" разработаны разделительные переналаживаемые штампы различных габаритов. В комплект универсально-сборных переналаживаемых штампов входит один из семи типоразмеров разработанных универсальных блоков и десять соответствующих переналаживаемых пакетов многоцветного использования. Предназначен для штамповки деталей из листовых материалов на предприятиях с многономенклатурным мелкосерийным и серийным характером производства. Закрепление инструмента в пакетах УСПШ производится путем заливки посадочных частей пластмассами холодного отверждения типа АСТ-Т с армированием объемным металлическим каркасом. Конструкция переналаживаемых пакетов позволяет легко извлекать рабочие элементы вместе с пластмассовыми держателями и заменять их новыми, обеспечивая многократную переналадку и использование пакета.

В работах [1, 2] приведены, в частности, основные показатели технической характеристики УСПШ, СПШ, УПШ (см. рис. 1–3).

Для изготовления элементов штампов используются стали 45, 20Х, 40Х (базовые плиты, колонки, толкатели, съемники и т. п.), Х12М, У8А, У10А (пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы).

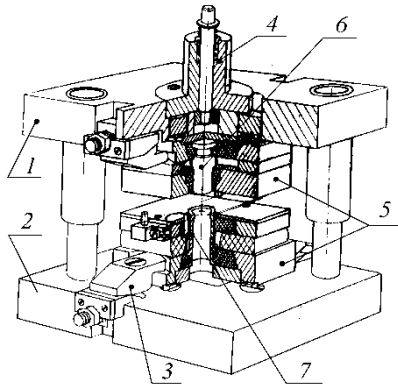


Рис. 1 – Конструкция УСПШ совмещенного действия:
1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – прихваты;
4 – хвостовик; 5 – пакет; 6 – пуансон; 7 – матрица

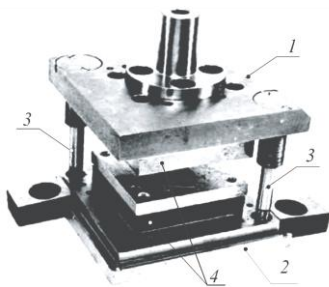


Рис. 2 – Специализированный штамп с прихватами:
1 – верхняя плита;
2 – нижняя плита; 3 – направляющие колонки; 4 – сменный пакет

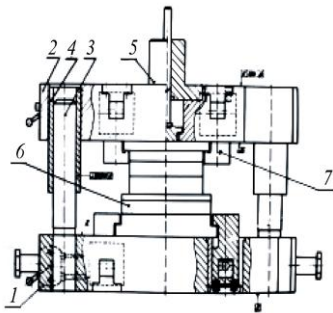


Рис. 3 – Конструкция перенастраиваемого штампа с механизированными прихватами:
1 – нижняя плита; 2 – верхняя плита; 3 – втулки;
4 – направляющие колонки; 5 – хвостовик; 6 – сменный пакет; 7 – механизированные прихваты

В работе [2] для формирования расчетных схем элементов разделительных штампов предложено исходить из анализа силовых потоков во всей технологической системе листовой штамповки. Действительно (рис. 4), при этом можно выделить различные уровни подсистем технологической системы "пресс – штамп – режущие элементы – заготовка", которые как-бы "вложены друг в друга". В то же время предложенная идея не нашла в этой работе завершения: основной объем исследований был замкнут на 3-м, нижнем уровне подсистемы (см. рис. 4).

Действительно, можно согласиться с тем, что пуансоны, матрицы и пуансон-матрицы подвергаются непосредственному воздействию усилий штамповки, которые, как показывают исследования [3–9], сконцентрированы в зоне режущих кромок. Такая концентрация приводит к локализации напряжений в зоне режущих кромок.

Однако следует принять во внимание, что инструментальные стали имеют более высокие механические характеристики, а, соответственно, выдерживают повышенные напряжения, присутствующие в зонах режущих кромок. Но в силу их высокой стоимости остальные элементы штампов, в первую очередь – базовые плиты, изготавливают из обычных конструкционных сталей с умеренными механическими характеристиками [10, 11].

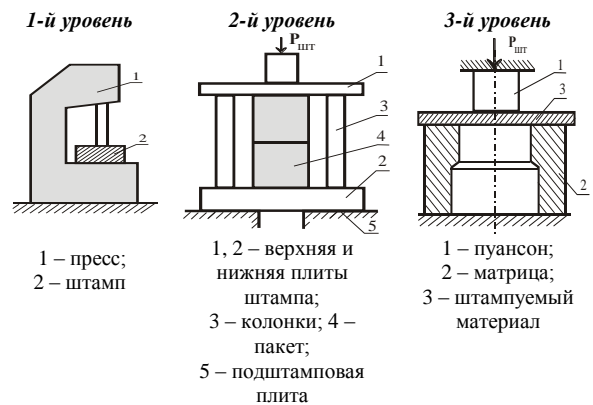


Рис. 4 – Структура технологической системы тонколистовой штамповки

Вместе с тем базовые плиты и другие детали являются элементами, обеспечивающими работоспособность не только одного пакета, а всего блока в целом, и притом – с различными сменными пакетами, причем на существенно более длительном периоде эксплуатации. Таким образом, получаем проблемную ситуацию: необходимо обеспечить прочность и жесткость элементов штампов, встроенных в многослойную конструкцию взаимодействующих путем контакта деталей, однако основными неизвестными являются законы их нагружения. В свою очередь, напряженно-деформированное состояние исследуемых элементов штампов оказывает влияние на распределение контактных давлений между различными элементами штампов. Таким образом, получаем связанную задачу анализа множественного контактного взаимодействия и НДС системы тел, составляющих собственно конструкцию штампа.

Следует заметить, что при вырубке деталей из низкопрочных материалов усилия вырубке-пробивки имеют невысокий уровень, однако при этом требуется повышенная точность геометрических размеров сопрягаемых деталей и их достаточная жесткость. При обработке же высокопрочных материалов основными являются требования прочности.

Основываясь на анализе значительного [1–14] массива информации, можно отметить, что в результате анализа ЭШО как сложной механической системы получаем множество взаимодействующих при штамповке тел, подверженных действию усилий штамповки и

контактирующих между собой. В итоге необходимо провести построение таких математических моделей, которые естественным образом объединяли бы эти два взаимосвязанных фактора: определение закона распределения контактных давлений между сопряженными элементами штампов, с одной стороны, и их напряженно-деформированное состояние, – с другой. Это вынуждает провести анализ методов и моделей для математического и численного решения получаемой сложной комплексной задачи.

Математические и численные методы и модели для определения прочностных и жесткостных характеристик элементов штамповой оснастки.

Большое количество публикаций посвящено исследованию процессов и состояний элементам технологических систем штамповки.

Различные вопросы теории, конструкций, методов расчета элементов технологических систем и проблемы связанные с проектированием, исследованием, эксплуатацией и внедрением перенастраиваемой оснастки, а также вопросы прочностных и жесткостных отдельных элементов штампов, изложены в работах [10–18].

Напряженно-деформированное состояние ЭШО сводится, как отмечалось выше, к решению связанной задачи, причем связанность ряда элементов реализуется путем механического контакта системы взаимодействующих тел по поверхностям сопряжения. Для решения возникающих задач подобного типа существует целый ряд методов и моделей. В частности, значительное место среди них занимает метод граничных интегральных уравнений (МГИУ) [19–25]. Основным преимуществом данного метода является снижение физической размерности создаваемой модели на единицу (в частности, вместо трехмерной модели приходим к модели на двухмерном многообразии – на границах взаимодействующих тел). Вместе с тем этому методу присущи и недостатки: сложность применения для тел неканонической формы, а также для тел, составленных из различных материалов; кроме того, он не может напрямую быть распространен на задачи, описывающие различные типы нелинейностей. В дополнение, еще одним важным препятствием на пути широкого применения данного метода является отсутствие популярных компьютерных программ, реализующих МГИУ и составляющих ощутимую конкуренцию, например, конечно-элементным пакетам. Тем не менее, метод граничных интегральных уравнений в варианте метода граничных элементов имеет значительные перспективы развития.

Одним из вариантов решения контактных задач с одновременным определением НДС является метод вариационных неравенств [26, 27]. С его применением, как один из вариантов, эта задача сводится к минимизации функционала полной

внутренней энергии исследуемой системы на множестве функций, удовлетворяющих условиям непроникновения тел друг в друга, которые имеют вид неравенств.

С использованием метода конечных элементов (МКЭ) для решения контактных задач применимы и другие постановки: метод множителей Лагранжа, метод штрафа, методы с введением слоя контактных элементов, передающих только сжимающие усилия [28–30]. Метод конечных элементов [31] реализован во многих пакетах для анализа НДС [www.ansys.com и др.]. Эти пакеты (ANSYS, Abaqus, Femap) имеют прямые интерфейсы с системами геометрического моделирования (Creo, SolidWorks, Catia и т. п.). Таким образом, и при автономном использовании, и в сопряжении с САД-системами можно создавать параметризованные геометрические и конечно-элементные модели различных элементов машиностроительных конструкций, в т. ч. – штампов. В свою очередь, это дает возможность варьировать исследуемый объект, организуя процесс целенаправленного изменения его основных параметров с целью удовлетворения тем или иным критериям и ограничениям. В то же время прямое применение такой технологии имеет ограниченное применение при необходимости пополнения или урезания множества основных проектно-технологических параметров. В этом случае для решения данной проблемы целесообразно применение метода обобщенного параметрического моделирования [32], который дает возможность оперировать с различными факторами, параметрами, распределениями.

Соединяя данный метод и МКЭ, а также адаптируя их к исследованию напряженно-деформированного состояния ЭШО, можно синтезировать проектно-технологические решения, обеспечивающие удовлетворение выдвигаемых требований к тем или иным конструкциям, в т. ч. – штампам, за счет целенаправленного изменения варьируемых параметров и анализа результатов многовариантных решений задач определения их НДС с учетом контактного взаимодействия. При этом необходимо разработать специализированную модель исследуемого объекта, адаптированную к его варьированию. Этот дополнительный этап предоставляет качественно новые возможности в процессе проектных исследований.

Подытоживая, можно сделать вывод, что в настоящее время наиболее адаптированным для исследования прочностных и жесткостных характеристик сложных механических систем с учетом контактного взаимодействия является МКЭ в сочетании с методом обобщенного параметрического моделирования. Этот подход и предлагается в работе для обоснования проектно-технологических параметров разделительных штампов по критериям

прочности, жесткости, стойкости и точности выполнения технологических операций.

Анализ результатов обзора литературных источников дает основание для следующих выводов.

1. Штамповая оснастка является центральным элементом технологической системы "пресс – штамп – формирующие элементы – заготовка". Она замыкает на себе силовые потоки в данной системе, должна обеспечивать стойкость, прочность, жесткость и точность выполнения технологических операций. В связи с этим необходимо определять расчетным путем на первых этапах проектных разработок штамповой оснастки ее НДС под действием усилий штамповки.

2. Анализ разделительных штампов для холоднолистовой штамповки позволяет сделать вывод о том, что конструктивно они состоят из набора контактирующих друг с другом под действием усилий штамповки многочисленных элементов блоков и пакетов. Для анализа НДС этих деталей штампов требуется определить контактное давление, действующее между данными деталями, которое, в свою очередь, зависит от НДС исследуемых деталей. В результате получаем связанную задачу о множественном контактно-взаимодействии и определении НДС системы упругих деформируемых тел.

3. Среди всей совокупности аналитических и численных методов решения задач о контактно-взаимодействии наиболее предпочтительным является соединение возможностей МКЭ и обобщенного параметрического моделирования. Такое соединение дает возможность интегрировать различные параметры в математическую и численную модель НДС, в частности, ЭШО, а, соответственно, решать задачи синтеза, т.е. обоснования проектно-технологических параметров по критериям стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций штамповки.

В качестве обобщающего вывода можно сделать заключение о том, что в настоящее время задача разработки методов анализа НДС ЭШО с учетом контактно-взаимодействия и обоснования рациональных проектно-технологических решений при проектных исследованиях штампов решена не в полной мере. Соответственно, это направление составляет актуальную научно-техническую задачу, решение которой составляет цель данной работы.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов при множественном контактно-взаимодействии. Для определения характеристик стойкости элементов штамповой оснастки и точности выполнения технологических операций выбивки-пробивки необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние 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 (СПМК).

Исходная цель проблемных вопросов порождается во многом самим характером проектных разработок штамповой оснастки. На этапе проектных работ учитывается не только номенклатура и объем штампуемых деталей, которые планируется производить на том или ином прессе, но и различные производственные, организационные, экономические и другие требования. Кроме того, во время быстро меняющихся условий даже в период проведения проектных работ и изготовления оснастки условия, требуемые характеристики, критерии и ограничения, предъявляемые потребителями, а также диктуемые рынком, могут варьироваться, причем существенно. Это резко отличает ситуацию от недавнего прошлого, когда можно было ориентироваться на большие серии и неизменную номенклатуру выпускаемых изделий.

Соответственно, требуется концепция изменяемости и адекватности ЭШО. Она на срезе конструкции нашла отражение в переналаживаемой штамповой оснастке. В частности, переналаживаемые разделительные штампы могут быстро перенастраиваться на новую номенклатуру. С экономической точки зрения это дает существенное снижение затрат за счет повторного использования блоков, т.е. требуется переделка только сменного пакета.

В то же время остается открытым вопрос изменчивости на этапе проектных исследований. Кроме того, в создаваемых моделях необходимо учесть наличие множественных контактов, а также построить на этой базе численные модели.

Все перечисленные задачи нашли свое описание далее в русле работ [33-36].

Параметрические математические модели напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки. Как уже отмечалось выше, ключевыми техническими характеристиками штампов являются точность выполнения технологических операций, а также стойкость на протяжении длительного срока эксплуатации и при большом объеме штампуемых деталей. В частности, отмечено, что с точки зрения обеспечения точностных и стойкостных характеристик наибольшее влияние имеет напряженно-деформированное состояние элементов штамповой оснастки с учетом их множественного контактно-взаимодействия. Исходя из этого, представлены математическая и численная модели для решения этой задачи. Однако, перед построением модели НДС, учитывающей, так сказать, "физическую" сторону процесса, необходимо создать инструмент

описания ЭШО с точки зрения проектной, т.е. как элемента широкого множества объектов. Базируясь на этом аспекте, на первом этапе рассмотрена методология параметризации при моделировании НДС элементов штамповой оснастки.

При описании математической модели напряженно-деформированного состояния ЭШО можно исходить из общего операторного представления:

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

где L – оператор начально-краевой задачи, u, σ – вектор перемещений и тензор напряжений элементов штамповой оснастки, f – массив внешних нагрузок, 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 :

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

где h – массив h_s , p – массив p_k , 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 элементы штамповой оснастки. В то же время гораздо сложнее обстоит дело в случае создания механизма варьирования, например, геометрической формы исследуемых объектов.

Для оперирования с такими параметрами, называемыми обобщенными, в наибольшей степени адаптирован метод обобщенного параметрического моделирования [32]. 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 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:

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

Первое из соотношений (5) фиксирует ограничения на контролируемые характеристики элементов штамповой оснастки (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 .

Естественно, что решение задачи (5) требует многократного решения задач анализа (3). Таким образом, базовой математической моделью также 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.

Моделирование напряженно-деформированного состояния с учетом многократного контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки. Соотношения для анализа НДС сегментов штамповой оснастки, представленные выше, записаны в общем виде. В то же время для решения задач для конкретных объектов необходимо их распisać, приняв во внимание основную особенность – наличие множественного контакта по поверхностям сопряжения ЭШО друг с другом.

Соотношения (1) в развернутом виде представляют собой систему уравнений и неравенств, описывающих контактное взаимодействие ЭШО [33].

Образуемая система разрешающих соотношений, как одним из наиболее эффективных методов, может быть удовлетворена с применением теории вариационных неравенств. Исходя из нее, возникающую краевую задачу можно свести к минимизации квадратичного функционала $I(u)$ на множестве ограничений типа неравенств K :

$$u : I(u) \rightarrow \min, u \in K. \quad (6)$$

В качестве замечания можно отметить, что при поиске минимума функционала (6) на выпуклом множестве возможно применение методов штрафа, множителей Лагранжа, сопряженных градиентов и т. п. В сочетании с методом дискретизации эти постановки затронуты далее.

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) задача определения напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия приводит в общем случае к начально-краевой задаче. Однако, как показывают экспериментальные и численные исследования [1], собственные частоты колебаний элементов штамповой оснастки, например, базовых плит, гораздо выше частоты приложения усилия штамповки

В связи с этим динамическими эффектами, возникающими при циклическом приложении усилий штамповки (рис. 5), которые действуют с частотой $\nu = 1/T$ и кратными ей, можно пренебречь для серийных кривошипных штампов.

Несмотря на принимаемое предположение о незначительном влиянии на напряженно-деформированное состояние ЭШО инерционных сил, этот тезис необходимо проверить. Если взять отдельный элемент штампа, то для него можно на основе создаваемой конечно-элементной модели записать разрешающую систему уравнений свободных колебаний

$$M\ddot{X} + CX = 0. \quad (7)$$

где M, C – матрица масс и жесткости [31], X – вектор узловых переменных, описывающих состояние исследуемого объекта.

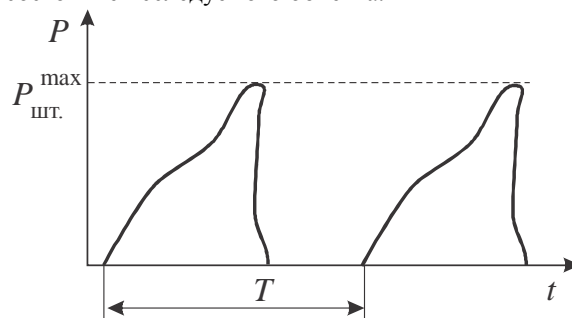


Рис. 5 – Циклическое приложение усилий штамповки к элементам штамповой оснастки

Условие совершения исследуемым элементом штамповой оснастки главного движения –

$$X = \lambda \sin \omega t, \quad (8)$$

где λ, ω – собственная форма и частота колебаний соответственно.

Будучи подставленным в (7), это дает систему уравнений для определения собственных форм колебаний:

$$(C - \omega^2 M)\lambda = 0. \quad (9)$$

где ω – собственные частоты, удовлетворяющие частотному уравнению

$$\text{Det}(C - \omega^2 M) = 0, \quad (10)$$

из которого определяется целый спектр собственных частот колебаний

$$\omega_i = 2\pi\nu_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

где N – количество степеней свободы конечно-элементного ансамбля, моделирующего тот или иной элемент штамповой оснастки ($\nu_i = 1/T_i$).

Решение задачи (11) предоставляет возможность оценить значимость динамических эффектов для напряженно-деформированного состояния того или иного элемента штамповой оснастки путем сопоставления нижней границы спектра собственных частот колебаний ν_1 с частотой работы прессы:

$$\nu = 1/T \ll \nu_1 = 1/T_1. \quad (12)$$

Полную оценку легко осуществить, имея в распоряжении спектр собственных частот колебаний ν_i , а он стандартным способом получается при использовании МКЭ. Кроме того, представляет также интерес набор собственных форм колебаний λ_i , получаемых из (9) после решения (10). Данные формы λ_i определяют зоны

ЭШО, наиболее или наименее чувствительные к возбуждению на частоте, близкой к ν_i .

Еще одним частным, но очень важным вопросом, является установление тенденции изменения решения контактной задачи при росте усилий штамповки $P_{шт}$. Как уже отмечалось выше, на величину $P_{шт}$ влияет толщина, свойства штампуемого материала, периметр вырубаемого (пробиваемого) контура. Отвлекаясь от вида этих зависимостей, рассмотрим один их срез: как влияет некоторый коэффициент увеличения $P_{шт}$ на получаемое решение. Для этого, как и выше, используем следующий алгоритм:

- пусть P_0 – некоторое номинальное значение $P_{шт}$;
- пусть, следуя теории вариационных неравенств, минимизируется квадратичный функционал, имеющий после дискретизации по методу конечных элементов вид:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i,j} C_{ij} u_i^0 u_j^0 - P_0 \sum_i \rho_i u_i^0 = a(u^0, u^0) - b(u_i^0), \quad (13)$$

- пусть, учитывая контактирование элементов штамповой оснастки по согласованным поверхностям (плоскостям), условия непроникновения имеют вид:

$$u_r - u_s = 0, \quad r, s \in J_c; \quad (14)$$

$$u_r - u_s > 0, \quad r, s \notin J_c, \quad (15)$$

где J_c – множество контактирующих пар узлов; C_{ij} – компоненты матрицы жесткости конечно-элементной модели ЭШО; P_0, ρ_0 – массив узловых нагрузок на эту модель; u_i^0 – массив узловых переменных, соответствующих решению задачи $I(u_i^0) \rightarrow \min$ при условии (13), (14).

Представляя u_i^τ как решение аналогичной задачи для $P_{шт} = \tau P_0$, замечаем, что

$$I(u_i^\tau) = \tau^2 a(u^0, u^0) - \tau b(u^0). \quad (16)$$

Тогда в сечениях функционала, не содержащих ограничений (2.31), получаем условия минимума

$$\frac{\partial I}{\partial u_k} = 0, \quad (17)$$

а, значит, $u_k^\tau = \tau u_k^0$.

В сечениях, где справедливы ограничения (14), решение $u_e^\tau = \tau u_e^0$ вследствие автоматического выполнения (14) при умножении на τ всех слагаемых, а также при выполнении условия проекции минимума I в направлении $u_r = u_s$ на ограничение, совпадает с (14).

Графически это можно представить в виде, приведенном на рис. 6 (введены следующие обозначения: O_0 – точка

безусловного минимума при $P_{шт} = P_0$; T_0 – точка условного минимума при $P_{шт} = P_0$; O_τ – точка безусловного минимума при $P_{шт} = \tau P_0$; T_τ – точка условного минимума при $P_{шт} = \tau P_0$).

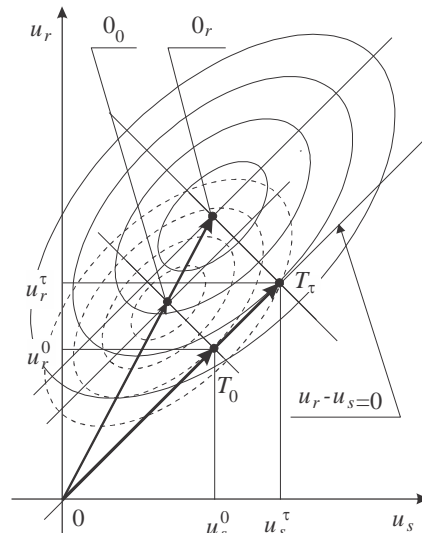


Рис. 6 – Линии уровня функции I в сечении $u_r - u_s$

Видно, что для случаев, когда отыскивается и безусловный минимум, и – условный, получаемые решения связаны соотношениями пропорциональности:

$$\frac{|O_r 0|}{|O_0 0|} = \tau; \quad \frac{|T_r 0|}{|T_0 0|} = \tau. \quad (18)$$

Кроме того, пара точек (u_r^τ, u_s^τ) либо принадлежит прямой $u_r - u_s = 0$, либо ей не принадлежит, и их статус не изменяется при изменении $P_{шт}$.

Таким образом, отсюда имеем два следствия:

1) если имеется для случая контакта по согласованным поверхностям некоторое решение задачи об определении НДС, то при ином усилии штамповки все компоненты решения увеличиваются пропорционально $P_{шт}$;

2) изменения множества J_c при $P_{шт} = \text{var}$ не происходит, т.е. зона контактного взаимодействия сохраняется, а контактные давления линейно возрастают.

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 варьруемость усилий штамповки, действующих на переналаживаемые штампы при вырубке-пробивке деталей различной толщины, размеров и

из различных материалов. Ниже описана численная реализация созданной математической модели.

Численная реализация разработанной математической модели. В настоящее время решение задач об определении напряженно-деформированного состояния тел сложной формы в большинстве случаев осуществляется численно, как правило, методом конечных элементов. Этот метод фактически стал стандартным инструментом исследований. В связи с этим единичный расчет отдельно взятой конкретной конструкции не представляет принципиальных трудностей. Однако ситуация может быть существенно осложнена, как, в частности, при исследовании НДС элементов штамповой оснастки. 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 разрешения конфликтных ситуаций, порожаемых первым фактором, необходимо создание специальных процедур. Они предназначены либо для обеспечения согласованного изменения геометрической модели ЭШО, 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. 7 представлена общая структура специализированного программно-модельного комплекса (СПМК) для исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия. Данный СПМК соединяет углубленные возможности универсальных систем (CAD – Creo, SolidWork, Catia и т.п., CAE-систем – ANSYS, Femap, Abaqus и т.п.) и специальных программных средств. На этапах I, III–V моделируются специфические особенности элементов штамповой оснастки, проводится генерация и целенаправленное варьирование их параметров, а этапы II, IV отвечают за создание моделей элементов штамповой оснастки и расчет их напряженно-деформированного состояния.

Предложенная блочно-модульная структура численных исследований является гибкой и "перенастраиваемой" на тот или иной тип штампа.

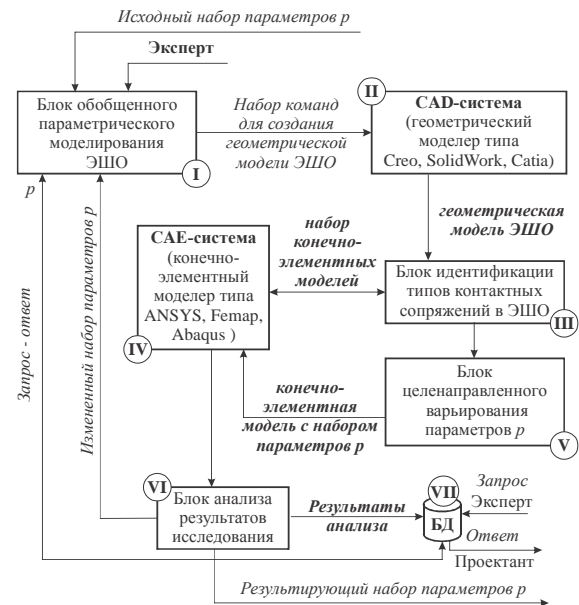


Рис. 7 – Структура специализированного программно-модельного комплекса для исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия

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" (т.е. 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 решается ряд прикладных задач исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки. В качестве входных данных может выступать набор проектно-технологических параметров, в качестве выходных – прочностные и жесткостные характеристики, служащие основой для принятия технических решений на этапе разработки штамповой оснастки.

Решение прикладных задач обеспечения

стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций в разделительных штампах. Разработанная и описанная выше комплексная математическая модель НДС элементов штамповой оснастки реализована в виде специализированного программно-модельного комплекса, с применением которого решен ряд прикладных задач обоснования проектно-технологических параметров элементов разделительных штампов, в первую очередь – базовых плит. В частности, определен спектр собственных частот колебаний (СЧК) элементов штампов и его изменение при варьировании проектно-технологических параметров, а также НДС базовых плит во взаимодействии с пакетом и, более подробно, – в зоне сопряжения направляющих колонок с базовыми плитами. В дополнение, выявлены закономерности изменения НДС, зон контактирования и распределения контактных давлений при варьировании проектно-технологических параметров штампов.

Следует отметить, что решение исследовательских задач нацелено на получение не столько конкретных результатов для конкретных штампов, а на установление общих закономерностей изменения компонент НДС при варьировании тех или иных параметров. В этой связи диапазон их варьирования может превышать реально наблюдаемые в практике проектирования ЭШО пределы. Это необходимо с точки зрения полноты картины устанавливаемых зависимостей, тенденций, реализуемых при их больших и малых значениях. При использовании разработанного СПМК в составе САПР оснастки они работают, как правило, в режиме "запрос – ответ". Тем не менее, учитывая приведенные аргументы, далее представлены результаты исследований в более широкой постановке.

Динамические характеристики элементов разделительных штампов. Как отмечалось выше, динамические эффекты неизбежно сопровождают процесс штамповки, поскольку сама природа этого технологического процесса предполагает развитие силового воздействия во времени на листовую металл путем, например, поступательного движения ползуна пресса, передаваемого на подвижные части пресса, от начальных этапов внедрения вплоть до окончательного разделения штампуемого материала. Однако речь идет о степени влияния динамических эффектов на НДС в элементах разделительных штампов. В работе [1] сделан вывод, базирующийся на экспериментальном определении спектра собственных частот колебаний, что влиянием динамических эффектов на НДС базовых плит можно пренебречь ввиду более низкого уровня частот возбуждений по сравнению с собственными частотами колебаний базовой плиты. В то же время данная аргументация относится только к конкретным вариантам ЭШО, исследованным на предмет определения спектра СЧК. Для более объективной аргументации необходимо провести многовариантные исследования реакции спектра

собственных частот колебаний на варьирование проектно-технологических параметров элементов штамповой оснастки. В связи с этим в работе были исследованы спектры собственных частот колебаний базовых плит и блоков при варьировании некоторых параметров с помощью МКЭ. На рис. 8 представлены 3 варианта расчетных моделей исследуемой конструкции: рис. 8, а соответствует отдельно взятой нижней базовой плите в виде сплошного параллелепипеда с размерами в плане $a \times b$ и толщиной h , в плите выполнено провальное окно размерами $c \times d$ с радиусом скругления r ; на рис. 8, б – та же модель, но в виде тонкостенной конструкции; блок в виде нижней и верхней базовых плит и диагонально расположенных направляющих колонок приведен на рис. 8, в. Закрепление осуществлено при помощи двух диагонально расположенных прихватов по области Г. В табл. 1 приведены варианты изменения представленных на рис. 8 параметров. Материал плиты – сталь 40Х.

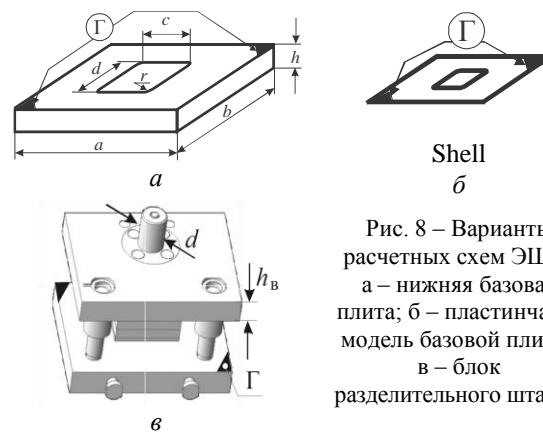


Рис. 8 – Варианты расчетных схем ЭШО: а – нижняя базовая плита; б – пластинчатая модель базовой плиты; в – блок разделительного штампа

Результаты расчетов спектров собственных частот колебаний базовых плит сведены в соответствующей базе данных. Естественно, что диапазон изменения варьируемых параметров может быть для реальных штампов шире, чем в приведенных данных. В соответствии с разработанным подходом это не является препятствием, т.к. этот диапазон можно расширять, равно как и проварьировать исследуемую конструкцию. При этом можно руководствоваться тем, что при наложении дополнительных связей (добавочные прихваты, колонки, пакеты), как правило, собственные частоты колебаний системы повышаются. Таким образом, в данном случае получаем нижнюю оценку спектра СЧК.

При этом из созданной базы данных можно выбрать любой срез и получить зависимости собственных частот колебаний $\nu_i = \nu_i(p)$, где p – массив варьируемых параметров. В частности, для блоков размерами 240x240 (мм), размеры провального отверстия в нижней плите $\varnothing 50$ мм,

толщина нижней базовой плиты $h = 40$ мм, расстояние между направляющими колонками $\varnothing 20$ мм – 180 мм, диаметр провального отверстия в подштамповой плите штампа – 100 мм, приведены в табл. 2 собственные формы колебаний базовых плит в Shell-постановке, а в табл. 3 – то же, но для базовых плит, рассматриваемых в пространственных конструктивах.

Таблица 1 – Варианты изменения конструктивных параметров разделительных штампов

№ п/п	Параметры	Минимальное значение, мм	Максимальное значение, мм	Примечание
1.	Диаметр провального отверстия D	0	$0,8 a$	*
2.	Длина a	80	320	
3.	Ширина b			$b \geq a$
4.	Длина окна c	0	$0,5 a$	*
5.	Ширина окна d	0	$0,5 b$	
6.	Толщина плиты h	$0,05 a$	$0,5 a$	

Примечание: * – без провального отверстия

Таблица 2 – Собственные формы колебаний нижней базовой плиты штампа (Shell-постановка)

Частота, кГц	Собственные формы колебаний
3,34 27,489 Max 24,495 21,381 18,326 15,272 12,217 9,1631 6,1087 3,0544 0 Min	
6,19 17,678 Max 15,714 13,75 11,786 9,8213 7,857 5,8928 3,9285 1,9643 0 Min	
10,16 14,699 Max 13,065 11,432 9,7991 8,1659 6,5327 4,8995 3,2664 1,6332 0 Min	

Видно, что наблюдается существенное отличие в полученных результатах: нижняя граница спектра на $3 D$ модели в 1,6 раза ниже, чем на $2 D$, хотя и остается достаточно высокой (более 2кГц, что на несколько порядков выше, чем частота приложения усилий штамповки). В связи с этим предлагается в дальнейшем использовать полную пространственную постановку, поскольку в настоящее время вычислительные мощности компьютеров позволяют решать задачу

анализа спектра СЧК достаточно оперативно

В табл. 4 представлены собственные формы колебаний отдельно взятой нижней базовой плиты и подштамповой плиты прессы в сопряжении с колонками и верхней базовой плитой (Shell-постановка), в табл. 5 – то же, но для Solid-постановки.

Таблица 3 – Собственные формы колебаний нижней базовой плиты штампа (Solid-постановка)

Частота, кГц	Собственные формы колебаний
2,09 22,323 Max 19,342 17,362 14,882 12,401 9,9212 7,4409 4,9606 2,4803 0 Min	
4,42 16,518 Max 14,683 12,847 11,012 9,1767 7,3413 5,506 3,6707 1,8353 0 Min	
10,49 19,36 Max 17,209 15,058 12,907 10,756 8,6046 6,4535 4,3023 2,1512 0 Min	

Кроме того, на рис. 9–12 представлены спектры собственных частот колебаний для базовых плит и блоков. Видно, что СЧК всего блока, соответствующие аналогичным формам колебаний для отдельно взятой плиты, повышаются. Соответственно, в качестве нижней границы спектра СЧК можно выбирать результаты для отдельно рассматриваемых плит.

Что касается общих закономерностей изменения собственных частот колебаний, то у блока РШ нижние собственные частоты на порядок ниже, чем у отдельно взятой базовой плиты. Это можно объяснить появлением в исследуемой системе низкочастотной составляющей – массивной верхней базовой плиты, соединенной с более жесткой закрепленной нижней базовой плитой податливыми направляющими колонками. В результате нижние собственные частоты колебаний снижаются на порядок, появляясь на ярко выраженных "стержневых" и "пластинчатых" формах, отвечающих изгибу колонок верхней плиты или их "крутильным" формам.

Таблица 4 – Собственные формы колебаний блока штампа (Shell-конструктивы)

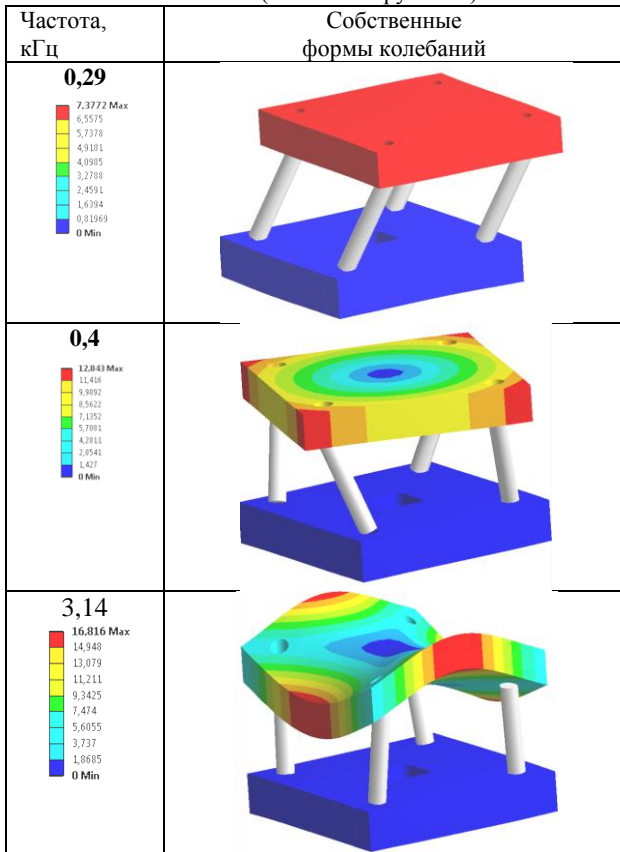
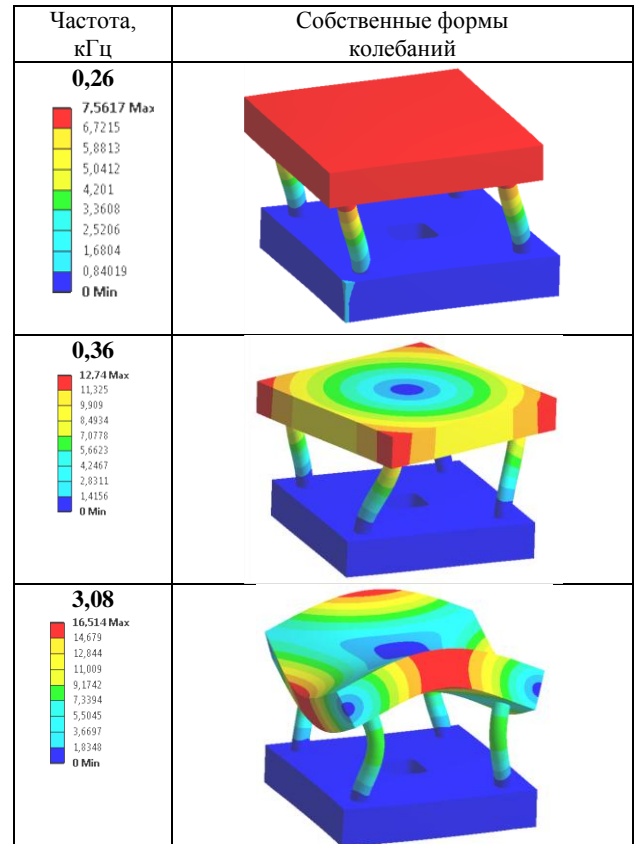


Таблица 5 – Собственные формы колебаний блока штампа (Solid-постановка)



Однако и в таком случае нижняя граница спектра собственных частот колебаний всей конструкции намного выше частоты возмущения от усилий штамповки. Кроме того, учитывая дополнительную связь с ползуном прессы, а также замыкание верхней и нижней базовых плит через сменный пакет и заготовку в процессе штамповки, следует ожидать дальнейшего роста СЧК блока. Соответственно, можно сделать вывод о правомерности квазистатической постановки задачи об определении НДС ЭШО.

Общим выводом из анализа представленных результатов следует, что собственные частоты колебаний базовых плит находятся на уровне 1÷2 кГц и выше, что существенно выше, чем основная частота приложения усилий штамповки $P_{шт}(t)$. Более высокие гармоники, как правило, характеризуются более высокими характеристиками демпфирования. Соответственно, при моделировании НДС элементов штамповой оснастки можно, как уже отмечалось, применять квазистатический подход, рассматривая $P_{шт}$ как временной параметр и не привязываясь к дополнительным инерционным эффектам.

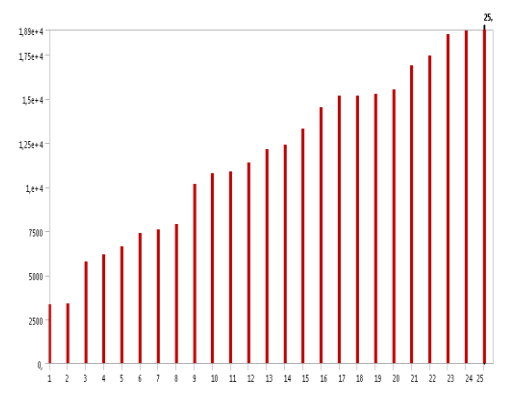


Рис. 9 – Спектр собственных частот колебаний нижней базовой плиты (Shell-постановка)

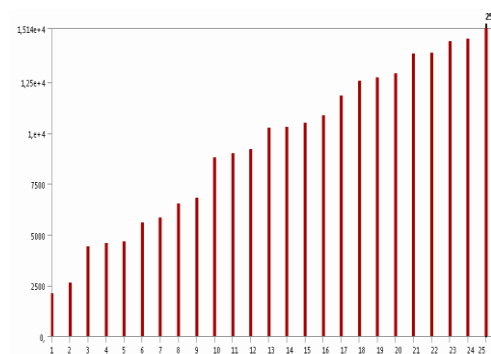


Рис. 10 – Спектр собственных частот колебаний нижней



Рис. 11 – Спектр собственных частот колебаний блока штампа (Shell-конструктивы)

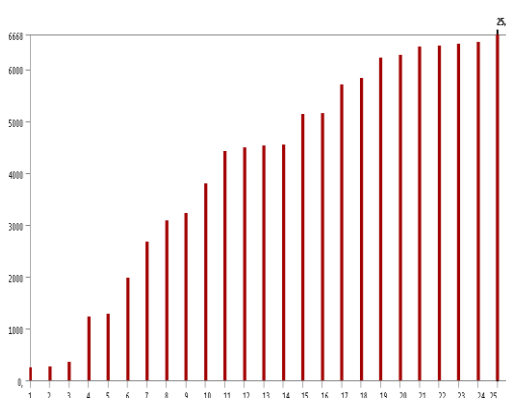


Рис. 12 – Спектр собственных частот колебаний блока штампа (Solid-постановка)

Исследование напряженно-деформированного состояния элементов штампов для разделительных операций. Во многих работах [6-9] исследуется напряженно-деформированное состояние элементов разделительных штампов. При этом, как уже отмечалось, расчетные схемы элементов исследованных штампов строятся либо на основе выделения отдельных деталей штампов (в данном случае действие остальных заменяется соответствующими граничными условиями и усилиями нагружения), либо на основе исследования отдельных групп деталей. Например, в работе [1] использованы "изолированные" расчетные схемы (то есть НДС исследуется для отдельно взятых матриц, базовых плит, съемников и т. д.). В работе [2] строятся низкоуровневые расчетные схемы, объединяющие условиями контактного сопряжения только 2÷3 соседние детали (например, матрицу и пуансон, взаимодействующие через штампуемый материал или нижнюю базовую плиту штампа в контакте с подштамповой плитой прессы). В то же время разделительный штамп характеризуется как раз комплексным взаимодействием всех деталей и сборок. В связи с этим актуальной задачей является разработка комплексных расчетных схем элементов штампов для разделительных операций, которые

интегрируют в себе все их основные сопрягаемые детали и узлы.

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 работе [2], рассмотрим разноуровневые подсистемы данной технологической системы. Однако, в отличие от подсистемы самого нижнего уровня (см. рис. 4), 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 РШ, вступающие в силовое взаимодействие (см. рис. 1-4).

Основные элементы штампа базируются на нижней и верхней базовых плитах. Определяющее 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 и плитой эпоксидным компаундом или иным твердеющим составом), деформируются, вступая в верхней части в зоне направляющих отверстий в контактное сопряжение с верхней базовой плитой. Во время такого взаимодействия возникают нормальные и касательные (от трения) усилия, включаемые в силовые потоки в технологической подсистеме "стол прессы – 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 прессы". На рис. 13 представлены элементы исследуемой технологической системы и соответствующие характерные зоны контактного взаимодействия.

k_1 – контакт "колонки – верхняя базовая плита";
 k_2 – контакт "колонки – фиксирующий слой – нижняя базовая плита";
 k_3 – плоскость опирания нижней базовой плиты на подштамповую плиту;
 k_4 – плоскость опирания пакета на нижнюю базовую плиту

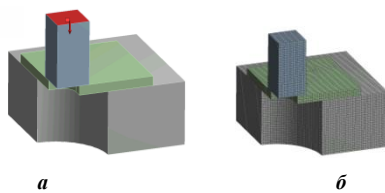
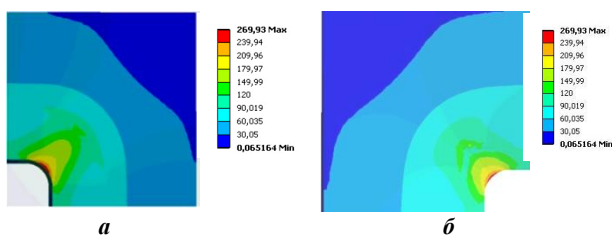
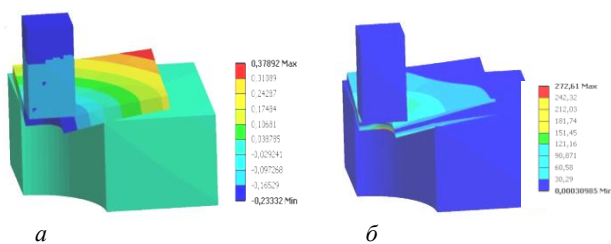
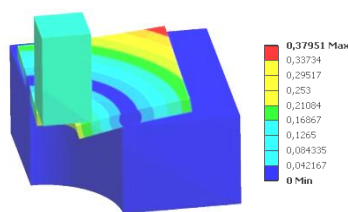


Рис. 15 – Результаты исследования НДС элементов штампа (задача 1):
распределение полных перемещений



плитой прессы

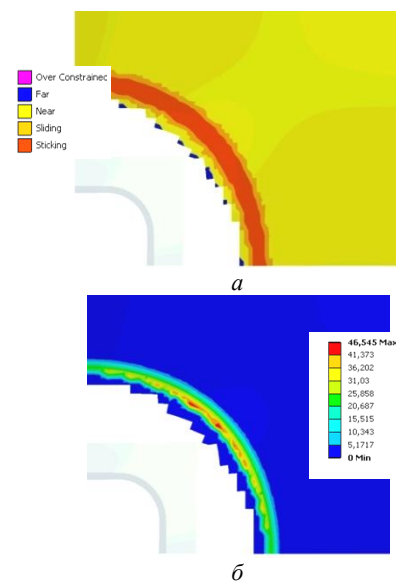
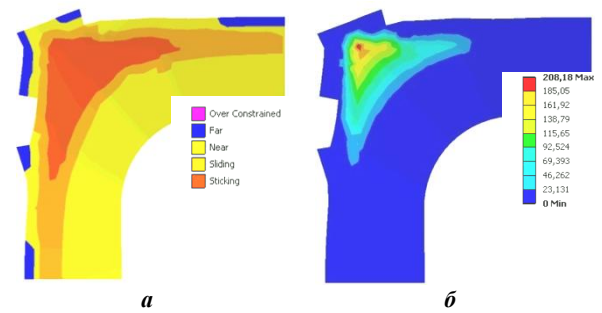


Рис. 19 – Результаты исследования НДС в сопряжении подштамповой плиты прессы и базовой плиты штампа (задача 1): а – распределение контактных зон; б – распределение контактных давлений

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

Задача 1. В качестве иллюстрации рассмотрим контактное взаимодействие тестовой конструкции, схема которой на рис.14: сменный пакет воздействует на нижнюю базовую плиту, опирающуюся на подштамповую плиту прессы. Варьируются: диаметр провального отверстия в подштамповой плите прессы – параметр p_2 (в диапазоне 160÷360 мм); толщина нижней базовой плиты штампа – параметр p_1 (в диапазоне 15÷90 мм). Усилие штамповки $P_{шт}$ (см. рис. 4) –

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.

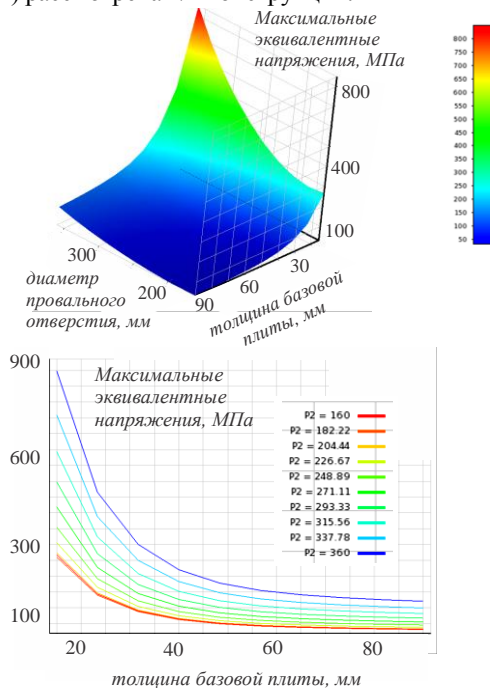


Рис. 20 – Зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров (задача 1): изменение максимальных эквивалентных напряжений в базовой плите штампа

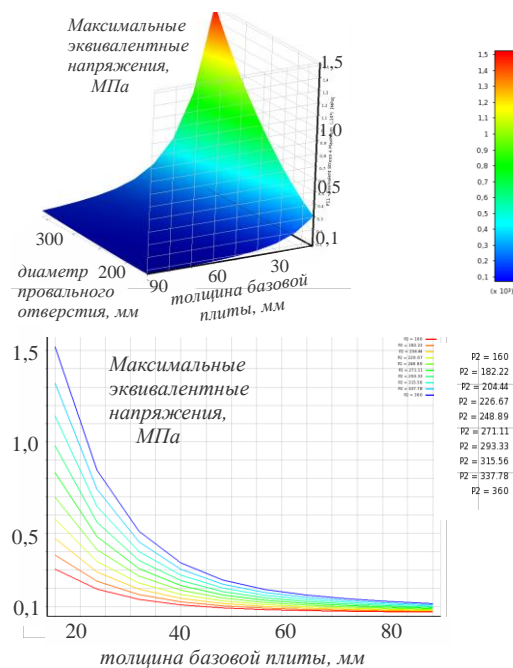


Рис. 21 – Зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров (задача 1): изменение максимальных эквивалентных напряжений в сменном пакете

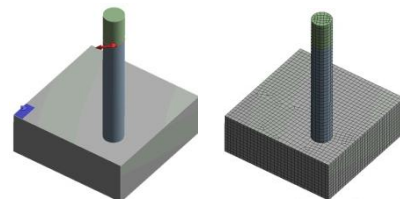


Рис. 22 – Геометрическая и конечно-элементная модели взаимодействия направляющей колонки с нижней базовой плитой штампа

На рис. 15-21 приведены характерные картины распределения компонент НДС элементов штампа. На рис. 20, 21 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 прессы" дают возможность сделать следующие выводы.

1. Интегральные зависимости характеристик НДС от варьируемых параметров (в данном случае – толщина базовой плиты и диаметр провольного 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.

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

3. Напряжения и контактные давления распределяются по площадям контактного сопряжения неравномерно.

Таким образом, полученные картины распределений характеристик напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки 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.

Задача 2. Для исследования взаимодействия элементов подсистемы "нижняя базовая плита штампа – направляющие колонки" рассмотрим контактное взаимодействие тестовой конструкции, схема которой – на рис. 22. Усилие штамповки, материал и размеры элементов штампа – те же, что и в задаче 1.

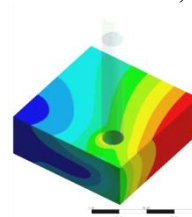


Рис. 23 – Распределение полных перемещений в нижней базовой плите штампа (задача 2)

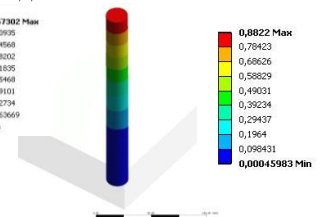


Рис. 24 – Распределение полных перемещений в колонке штампа (задача 2)

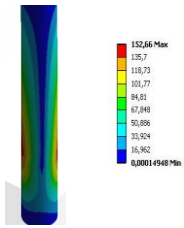


Рис. 25 – Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений в колонке штампа (задача 2)

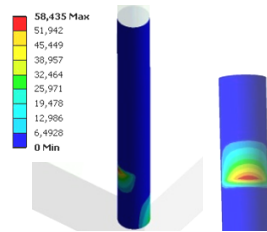


Рис. 26 – Распределение контактных напряжений в сопряжении колонки с плитой штампа (задача 2)

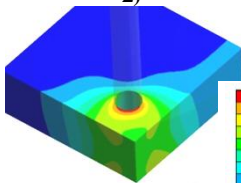


Рис. 27 – Распределения полных перемещений в нижней базовой плите штампа при натяге 0,1 мм (задача 2.1)

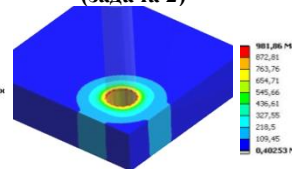


Рис. 28 – Распределения максимальных эквивалентных напряжений в нижней базовой плите штампа при натяге 0,1 мм (задача 2.1)

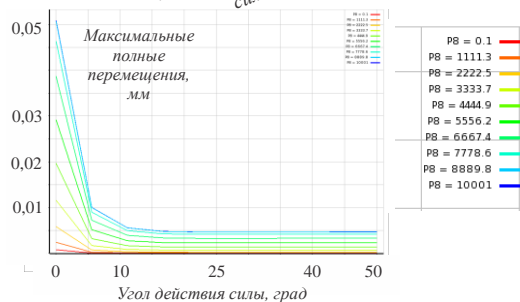
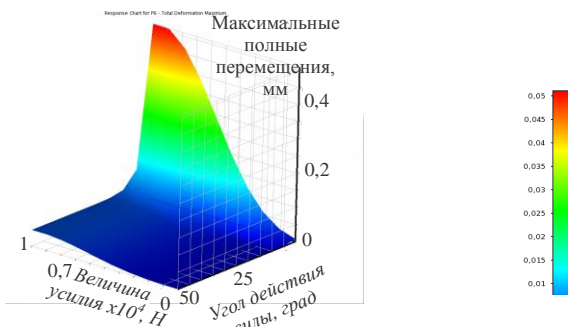


Рис. 29 – Зависимость полных перемещений верхнего среза колонки от параметров p_1, p_2 (задача 2.1)

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 НДС приведены на рис. 23–26, а на рис. 27–30 – зависимости характеристик НДС от варьированных параметров.

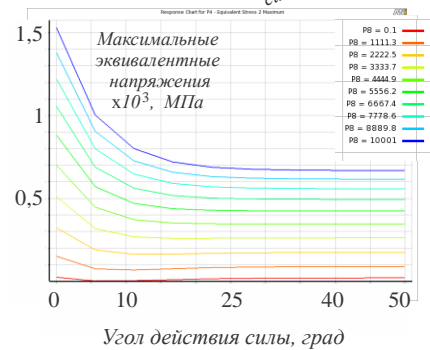
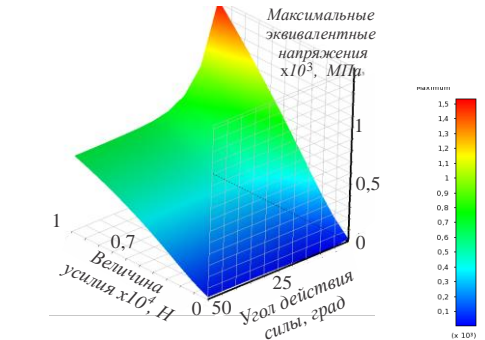


Рис. 30 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от параметров p_1, p_2 (задача 2.1)

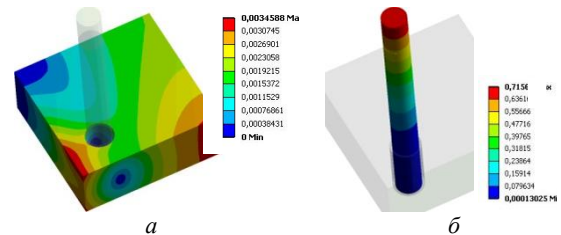


Рис. 31 – Распределение полных перемещений (задача 2.2): а – в нижней базовой плите, б – в колонке штампа

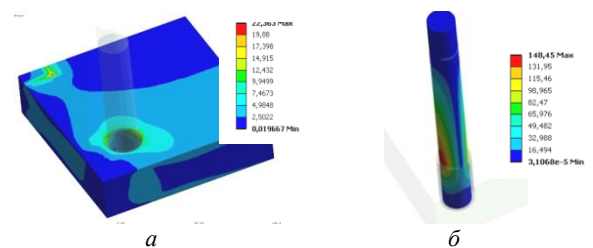


Рис. 32 – Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений (задача 2.2): а – в нижней плите, б – в колонке штампа

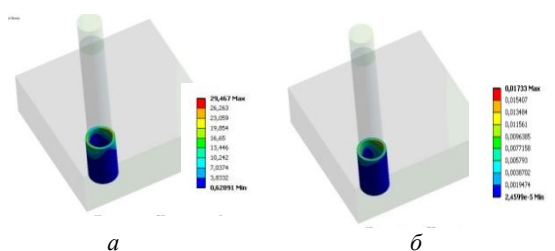


Рис. 33 – Распределение компонент НДС в фиксирующем слое (задача 2.2): а – полных перемещений, б – эквивалентных (по Мизесу) напряжений

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.

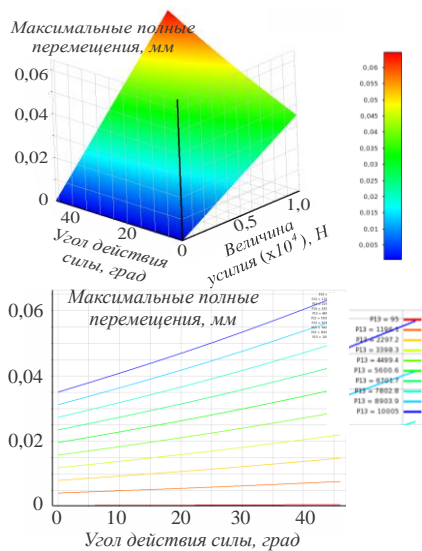


Рис. 34 – Распределение полных перемещений в нижней базовой плите штампа (задача 2.2)

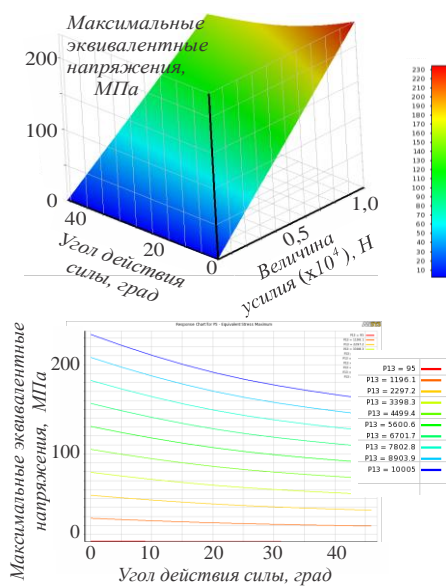


Рис. 35 – Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений в колонке штампа (задача 2.2)

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 клеевого состава (толщина слоя – параметр $p_3 = 2,0, 3,5, 5,0$ мм). В качестве фиксирующего материала применен состав на основе эпоксидной смолы ($E = 3,2 \cdot 10^3$ МПа, $\nu = 0,45$). На рис. 31–35 приведены результаты исследований.

На рис. 30–33, в частности, представлены распределения перемещений и напряжений в тестовой конструкции. Видно, что распределения контактного давления 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.

Как следует из анализа полученных результатов, напряженно-деформированного состояния 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 склеивающего слоя по сравнению со свойствами металла, из которого изготовлены колонка и плита.

5. Интегральные зависимости характеристик НДС данной подсистемы от всех варьируемых параметров носят примерно линейный характер.

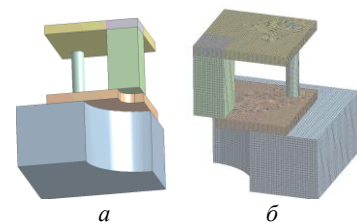


Рис. 36 – Разделительный штамп: а – геометрическая модель, б – КЭМ

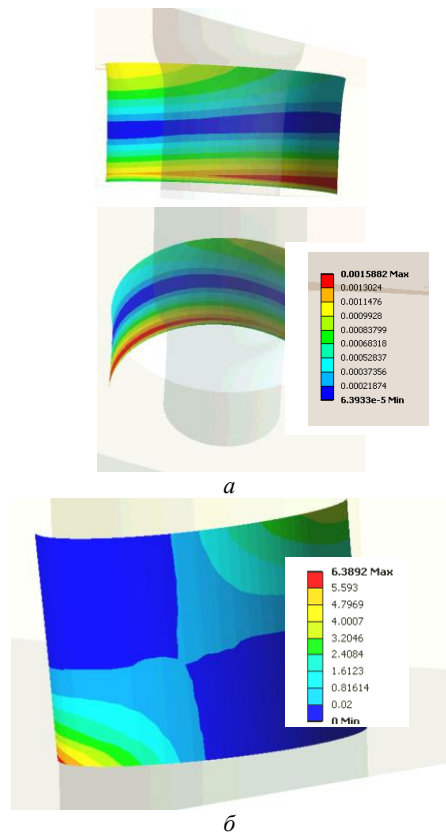


Рис. 37 – Картины распределения контактного давления в зонах ($P_{шт} = 10$ кН): а – k_2 , б – k_1

Таким образом, можно заключить, что в работе представлен подход к созданию комплексных расчетных схем элементов штампов. 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.

Параметрические модели со множественным контактом для исследования контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки. 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 напряженно-деформированного состояния ЭШО 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 НДС 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. 36, в силу симметрии рассмотрена 1/4 конструкции, усилие штамповки – 10 кН). На рис. 37 приведены картины распределения контактного давления в зонах k_1, k_2 (см. рис. 13), на рис. 38 – в k_2, k_3 .

Из представленных распределений видно, что выявленные на частных моделях (см. задачи 1, 2) закономерности, а именно относительно существенное неравномерное распределение контактного давления в сопряжениях ЭШО, целиком и полностью подтверждаются. То же можно сказать и о распределении полных перемещений, эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 39). Из всей системы можно вычлнить картины НДС отдельных элементов (рис. 40–54). Они также дают основание подтвердить прогнозируемые особенности НДС, обоснованные на более частных моделях: о концентрации напряжении в зонах контактного взаимодействия отдельных ЭШО 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 же 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. Полученные результаты дают основу для анализ закономерностей распределения контактных давлений в элементах штамповой оснастки. В монографии [25] отмечается, что для ряда механических систем, в которых реализуется первоначальный контакт по так называемым "согласованным" (т.е. совпадающим) поверхностям, а также при возможности изгиба, характерным является слабая зависимость площади контактных зон от величины действующих усилий. Кроме того, контактные давления являются пропорциональными действующим силам.

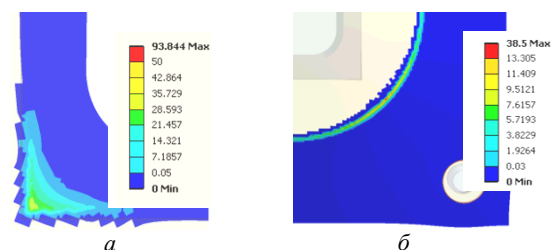


Рис 38 – Картины распределения контактного давления в зонах ($P_{шт} = 10$ кН): а – k_4 , б – k_3

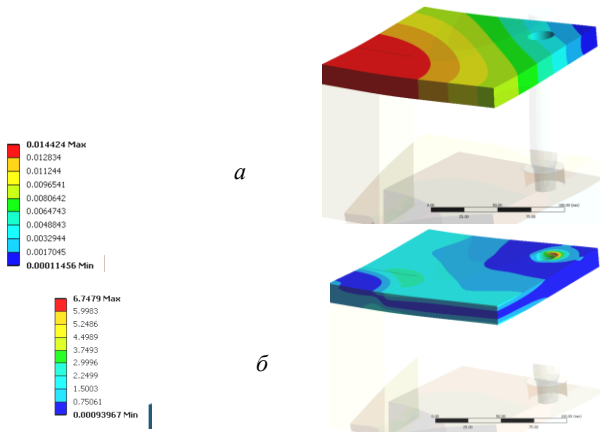


Рис. 39 – Картины распределения компонент НДС в верхней базовой плите ($P_{шт} = 10$ кН): а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

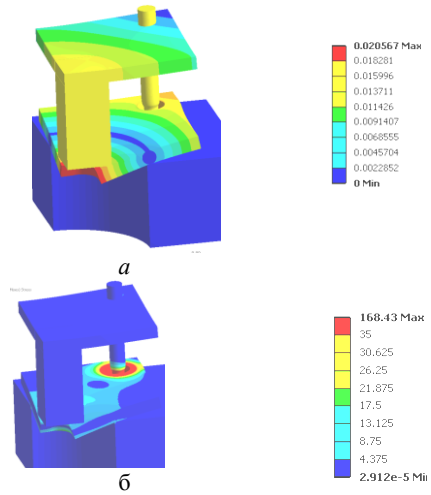


Рис. 40 – Картины распределения компонент НДС ($P_{шт} = 10$ кН): а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

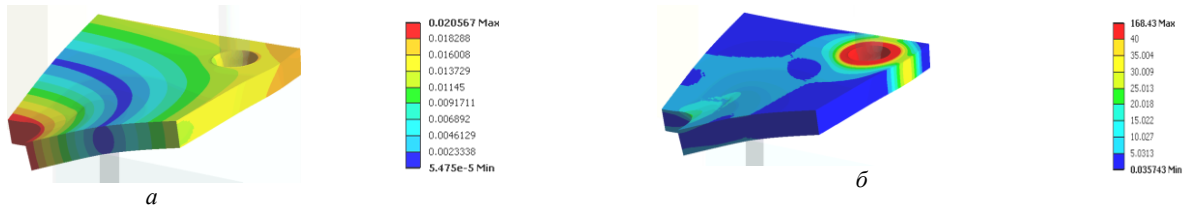


Рис. 41 – Картины распределения компонент НДС в нижней базовой плите ($P_{шт} = 10$ кН): а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

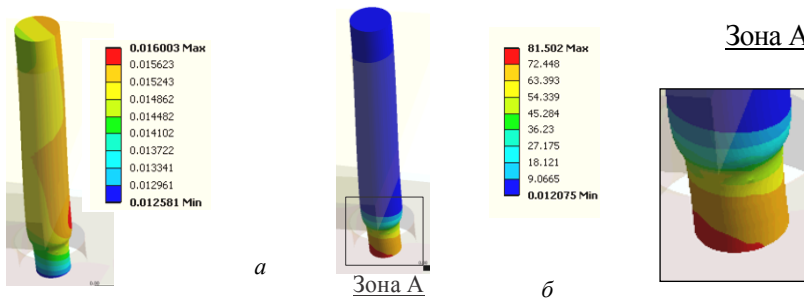


Рис. 42 – Картины распределения компонент НДС в направляющей колонке ($P_{шт} = 10$ кН): а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

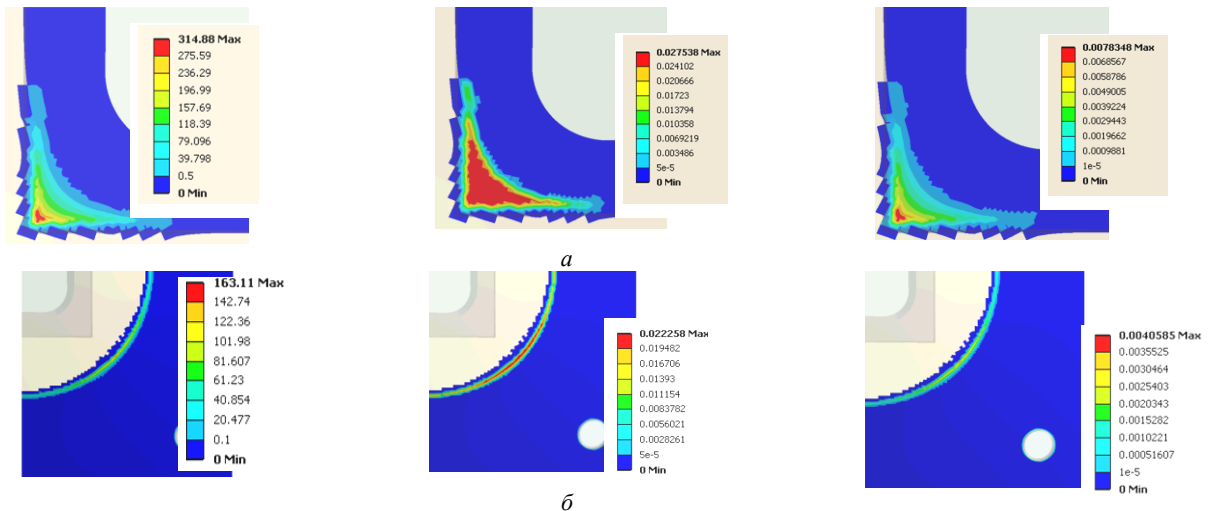


Рис. 43 – Картины распределения контактного давления в зонах ($P_{шт} = 100$ кН): а – k_4 , б – k_3

Рис.44 – Картины распределения компонент НДС ($P_{шт} = 100$ кН):
а – полные перемещения,
б – эквивалентные напряжения по Мизесу

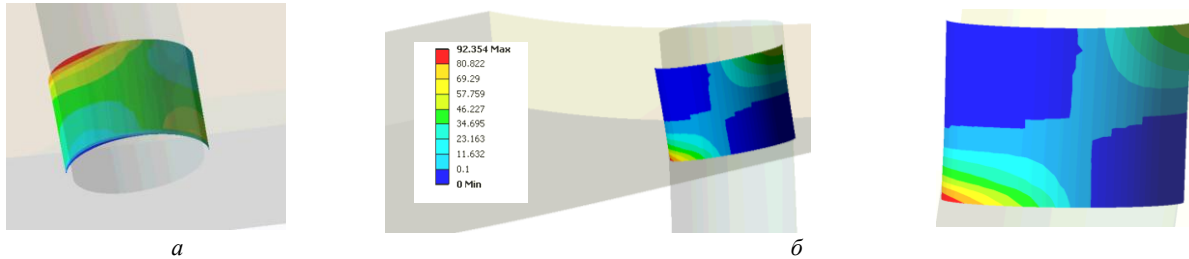
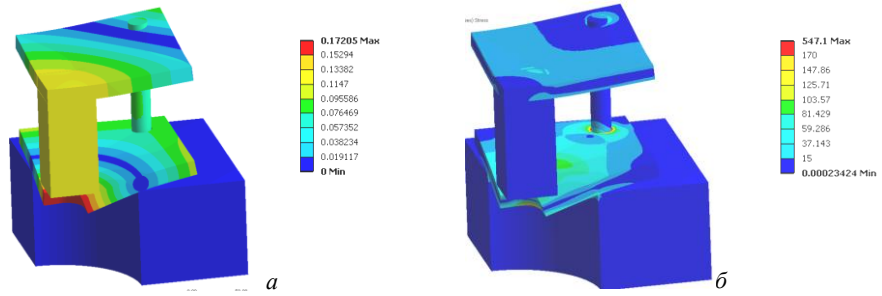


Рис. 45 – Картины распределения контактного давления в зонах ($P_{шт} = 100$ кН): а – k_2 , б – k_1

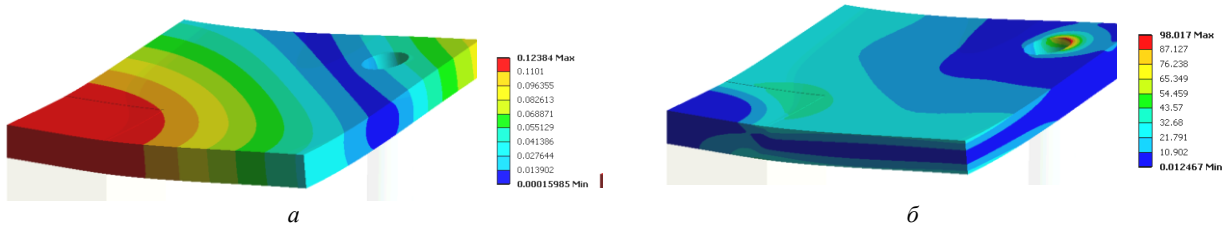


Рис. 46 – Картины распределения компонент НДС в верхней базовой плите ($P_{шт} = 100$ кН):
а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

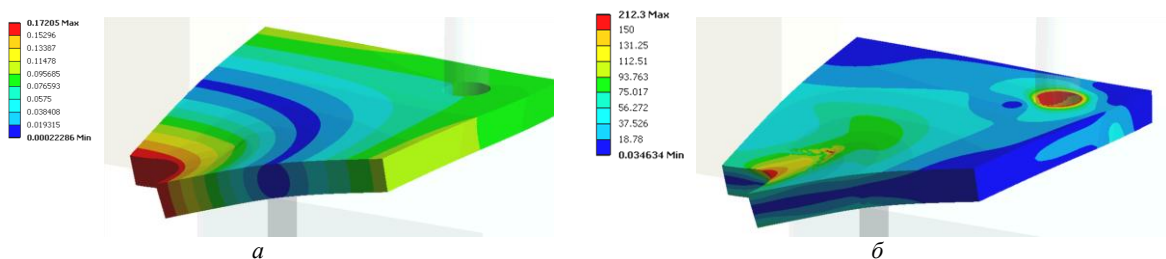


Рис. 47 – Картины распределения компонент НДС в нижней базовой плите ($P_{шт} = 100$ кН):
а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

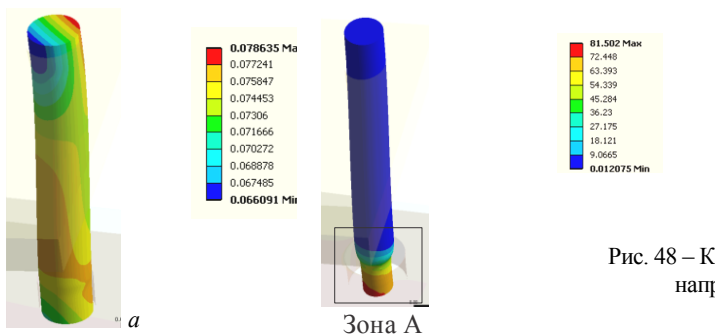


Рис. 48 – Картины распределения компонент НДС в направляющей колонке ($P_{шт} = 100$ кН):
а – полные перемещения,
б – эквивалентные напряжения по Мизесу

Рис. 49 – Картины распределения контактного давления в зонах :
а – k_4 , б – k_3
($P_{шт} = 1$ МН)



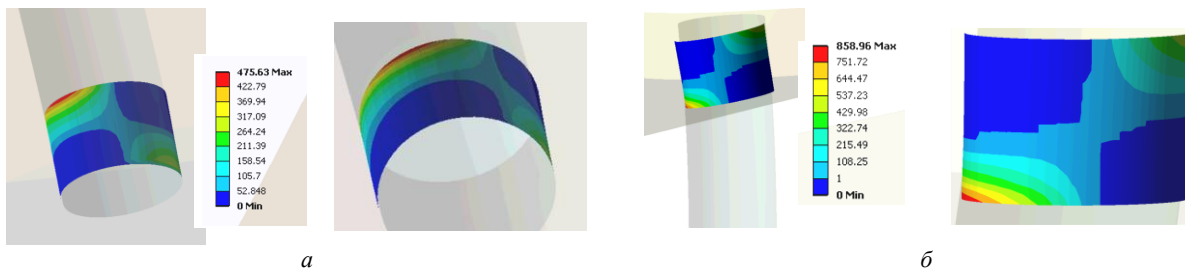


Рис. 50 – Картины распределения контактного давления в зонах ($P_{шт} = 1$ МН): а – k_2 , б – k_1

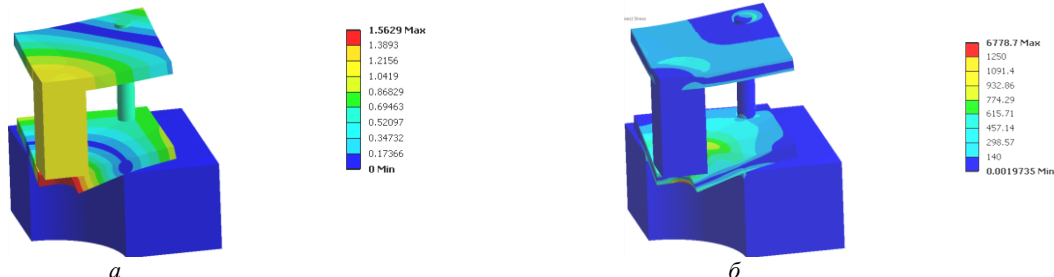


Рис. 51 – Картины распределения компонент НДС ($P_{шт} = 1$ МН):
а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

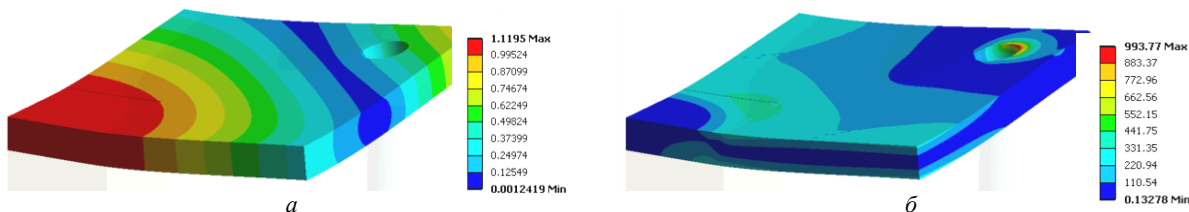


Рис. 52 – Картины распределения компонент НДС в верхней базовой плите ($P_{шт} = 1$ МН):
а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

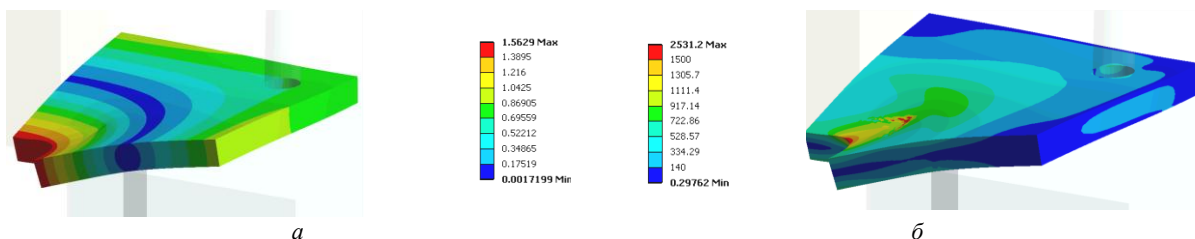


Рис. 53 – Картины распределения компонент НДС в нижней базовой плите ($P_{шт} = 1$ МН):
а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

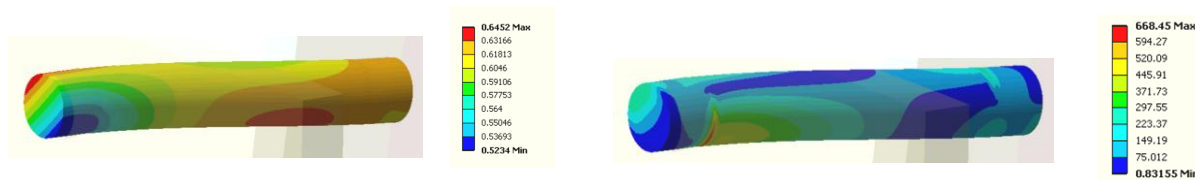


Рис. 54 – Картины распределения компонент НДС в направляющей колонке ($P_{шт} = 1$ МН):
а – полные перемещения, б – эквивалентные напряжения по Мизесу

Для проверки выполнения данных закономерностей для случая множественного контакта в элементах штамповой оснастки был проведен ряд исследований на примере расчетной модели (см. рис. 36) с варьированием усилий штамповки $P_{шт}$. На рис. 55 приведены полученные результаты. Видно, что с удовлетворительной для практики точностью (погрешность составляет около 2,5 %) отмеченная способность контактных давлений соблюдается. Это очень важное обстоятельство, т. к. напряженно-деформированное состояние при любом действующем усилии штамповки можно получить из результатов единичного расчета при заданном $P_{шт}$ по линейным зависимостям.

Анализ результатов и обоснование рациональных проектно-технологических решений разделительных штампов. Задача обоснования проектно-технологических решений разделительных штампов по критериям стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций базируется на результатах исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки (см. выше). Ниже рассматривается общий подход к решению этой задачи в методологическом плане.

Что касается требований к стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций, то они напрямую зависят:

- стойкость и прочность – от уровня напряжений в основных, наиболее нагруженных элементах штамповой оснастки:

$$\sigma_3^{\max} \leq [\sigma], \quad (19)$$

где σ_3^{\max} – максимальные эквивалентные напряжения в ЭШО, а $[\sigma]$ – допускаемые напряжения; их величина обуславливается либо необходимостью обеспечения усталостной прочности (выносливости) для базовых элементов блоков, либо – статической прочности (для элементов сменных пакетов при мелкосерийном производстве);

- жесткость и точность штамповки – от уровня перемещений и поворотов ЭШО

$$w_{\max} \leq [w]; w'_{\max} \leq [w'], \quad (20)$$

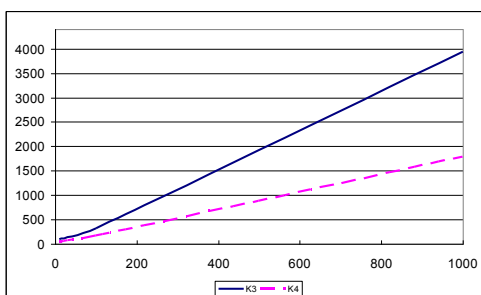


Рис. 55 – Зависимость максимальных контактных давлений в сопряжениях от величины усилия штамповки k_4, k_3

где w_{\max} , w'_{\max} – максимальные перемещения и углы поворота (например, для нижних базовых плит), а $[w]$, $[w']$ – их допускаемые значения, определяемые требованиями к штампуемой детали.

В работах [6-9] схожий подход был применен для частных случаев расчета ЭШО, причем на упрощенных моделях напряженно-деформированного состояния. В данной работе на основе совокупности результатов расчета НДС элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия (т.е. с применением более адекватных и точных моделей) предлагается строить соответствующую базу данных. В этой пополняемой базе данных хранится информация о зависимостях

$$\sigma_3^{\max} = \sigma_3^{\max}(p), w_{\max} = w_{\max}(p), w'_{\max} = w'_{\max}(p). \quad (21)$$

Заменяя в (20) левые части соответствующими допускаемыми величинами $[\sigma]$, $[w]$, $[w']$, можно найти решение совокупности соотношений (21). Таким образом, можно найти такие проектно-технологические параметры, которые удовлетворяют всем предъявляемым требованиям.

Преимуществом данного подхода (по сравнению с известными), является высокая оперативность и точность, что очень ценно в условиях сжатых сроков и ограниченных материальных ресурсов при проектировании технологической оснастки для штамповки деталей на предприятиях в условиях низкой серийности изделий и быстрого изменения их номенклатуры.

В частности, в данной работе использованы результаты исследований с применением комплексных моделей напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки, описанных в [33-36]. Получены результаты, позволяющие обосновать следующие выводы.

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

2. Разработан алгоритм повышения точности и оперативности численных исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой 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 элементов штамповой оснастки на этапах проектирования параллельно с остальными работами.

3. Созданный специализированный программно-модельный комплекс отличается от известных гибкой модульной структурой, сочетающей, с одной стороны, развитые средства геометрического и конечно-элементного моделирования универсальных CAD/CAM/CAE-систем, с другой 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 СПМК является наличие пополняемой базы данных, которая аккумулирует результаты предшествующих исследований, еще в большей степени повышает оперативность расчетов и снижает их объем, а также создает предпосылки для построения экспертных систем и баз знаний по обоснованию проектных решений ЭШО по критериям стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций.

4. В работе представлен подход к созданию комплексных расчетных схем элементов штамповой оснастки. 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 напряженно-деформированного состояния 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 напряженно-деформированного состояния 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 специализированного программно-модельного комплекса технология исследований, дающая возможность проведения многовариантных

исследований НДС элементов штамповой оснастки с учетом контактного взаимодействия.

8. В созданный специализированный программно-модельный комплекс интегрирована специализированная база данных, в которой хранятся результаты исследований напряженно-деформированного состояния ЭШО.

9. В ходе моделирования НДС элементов разделительных штампов 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.

Заключение. В работе проиллюстрированы возможности обоснования проектно-технологических решений элементов штамповой оснастки по критериям стойкости, прочности, жесткости и точности выполнения технологических операций штамповки. Решены следующие задачи и получен ряд новых результатов.

1. На основе решения задачи об определении спектра собственных частот колебаний элементов штамповой оснастки установлено, что в силу их высоких значений при определении напряженно-деформированного состояния допустимо во многих случаях использовать квазистатический подход, пренебрегая динамическими эффектами.

2. Разработанные в работе подходы к параметризации и к учету множественного контактного взаимодействия при формировании математической и численной моделей напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки реализованы на примере разделительных штампов для вырубки-пробивки. Этими подходами обеспечивается более высокий, по сравнению с традиционными методиками расчета, уровень адекватности моделей, точности и обоснованности получаемых результатов.

3. На примере блока разделительного штампа проведено исследование влияния ряда конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние элементов штамповой оснастки. В частности, проанализировано влияние толщины базовой плиты, ее размеров в плане, диаметра провального отверстия на характеристики прочности и жесткости. Установлено, что добавление материала приводит к повышению прочностных и жесткостных характеристик базовых плит, однако, с некоторого значения,

дальнейшее утяжеление конструкции становится малоэффективным. Наоборот, при снижении массы элементов штамповой оснастки в определенный момент наступает резкое ухудшение характеристики прочности и жесткости. Это дает основание для выводов о том, что в зоне рациональных проектно-технологических решений характеристики прочности и жесткости, а, значит, стойкости и точности выполнения технологических операций, не должны слишком резко изменяться при варьировании проектно-технологических параметров, а также быть слишком чувствительными к такому варьированию.

4. В качестве альтернативного технологического решения при создании переналаживаемых разделительных штампов рассмотрена технологическая операция закрепления направляющих колонок при помощи твердеющих компаундов. Это дает возможность резкого ускорения и удешевления изготовления штампов. При этом выявлено, что в слое крепления реализуется чрезвычайно сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние. Таким образом, применение упрощенных моделей для расчета несущей способности и податливости колонок в таких соединениях приводит к недопустимым погрешностям, и необходимо проводить исследование НДС в полной пространственной постановке задачи определения напряженно-деформированного состояния в этих зонах.

5. Для обоснования проектно-технологических решений элементов штамповой оснастки предложен подход с применением пополняемой базы данных расчетов напряженно-деформированного состояния ЭШО. В отличие от упрощенных расчетных моделей или прямого многократного решения задач в полной постановке, предлагаемый подход обеспечивает и точность, и оперативность решения данных задач.

В заключении можно сделать вывод о работоспособности, точности и оперативности созданного в разделе инструмента исследования и обоснования проектно-технологических решений элементов штамповой оснастки по критериям прочности, жесткости, стойкости и точности выполнения технологических операций штамповки.

Список литературы

1. *Заярненко Е.И.* Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов: дисс... доктора. техн. наук: спец. 01.02.06 и 05.03.05 / *Е.И. Заярненко.* – Харьков, 1992. – 280 с.
2. *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.
3. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке / *В.П. Романовский.* – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
4. *Попов Е.А.* Основы теории листовой штамповки / *Е.А. Попов.* – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с.
5. *Фролов Е. А., Азарков В. В., Корнеев С. В.* Экспериментальное исследование напряженного состояния блоков универсально-сборных переналаживаемых штампов методом голографической

- интерферометрии / *Фролов Е. А., Азарков В. В., Корнеев С. В.* // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 3 (32). С. 218-223.
6. *Деміна Н.А.* Влияние конструктивных и технологических параметров на напряженно-деформированное состояние матриц штампов холоднолистовой штамповки / *Н.А. Деміна* // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2005. – № 60. – С.68-76.
7. *Деміна Н.А.* К вопросу о влиянии высоты матрицы штампа для вырубки-пробивки на ее деформированное состояние / *Н.А. Деміна, А.В. Ткачук, М.М. Пеклич* [и др.] // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2006. – № 33. – С.28-33.
8. *Деміна Н.А.* Контактное взаимодействие в сопряжении „пуансон – штампуемый материал – матрица” / *Н.А. Деміна, О.П. Назарова, А.Н. Ткачук* // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2007. – № 23. – С.39-48.
9. *Деміна Н.А.* Моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / *Н.А. Ткачук, Н.А. Деміна, Ю.Д.Сердюк* [и др.] // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 240-248.
10. *Тарасов А.Ф.* Влияние конструкции штампа на деформацию элементов блока и рабочего инструмента / *А.Ф. Тарасов, С.А. Короткий* // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 103-108.
11. *Заблоцкий В.К.* Способ повышения стойкости штампов холодного деформирования штампов / *В.К. Заблоцкий, М.Я. Белкин, А.И. Шимко* // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 109-113.
12. *Бень И. В., Яворовский В. Н.* Анализ вырубки прямоугольных пластинок методом конечных элементов // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4 (37). С. 28-35.
13. *Яворовский В. Н., Кальченко И. Н.* Исследование специфического характера вырубки тонколистовых материалов с помощью компьютерного моделирования // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4 (37). С. 45-51.
14. *Корнилова А. В.* Исследование рациональности применения сталей для изготовления инструмента холодной листовой штамповки на примере X12MФ // Обработка материалов давлением. – 2010. – № 1 (22). С. 159-166.
15. *Львов Г.И.* Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки / *Г.И. Львов, Н.А. Ткачук* // Механіка та машинобудування. – 1997. – № 1. – С.34-39.
16. *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.
17. *Заярненко Е.И.* Испытания прочности и жесткости базовых плит переналаживаемых штампов / *Заярненко Е.И., Кузнецова Л.Г.* // Вопросы оборонной техники. – 1990. – Сер. 2. – Вып.10 (229).– С.61-65.
18. *Popat P.B.* Finite -element analysis of the blanking process // Journal of Mechanical Working Technology / *P.B. Popat, A. Ghosh, N.N. Kishore.* – Amsterdam. – 1989. – 18. – № 3. – PP.269-282.
19. *Ткачук Н.Н., Мовшович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В.* Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Постановка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел / *Н.Н. Ткачук, И.Я. Мовшович, Н.А. Ткачук, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко* // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт”. – 2014. – № 3. – С. 3-10.
20. *Ткачук Н.Н., Мовшович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В.* Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 3. Прямой и вариационный методы решения задачи негерцевского нормального контакта гладких тел. 4. Модель контакта шероховатых тел / *Н.Н.*

21. Ткачук, И.Я. Мовишювич, Н.А.Ткачук, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт“. – 2014. – № 4. – С. 3-8.
22. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт“. – 2014. – № 6. – С. 10-16.
23. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (продолжение) / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт“. – 2014. – № 7. – С. 11-20.
24. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (окончание) / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт“. – 2014. – № 8. – С. 6-8.
25. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
26. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
27. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А.С. Кравчук // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С. 308-310.
28. Кравчук А.С. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач / А.С. Кравчук, В.А. Суряков // Доклады АН СССР, 1981. – Т. 259. – № 6. – С. 1327-1329.
29. Wriggers P. Computational Contact Mechanics / P. Wriggers. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 518 p.
30. Belytschko T. Contact-Impact by the Pinball Algorithm with Penalty and Lagrangian Methods / T. Belytschko, M.O. Neal // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. – 1991. – Vol. 31. – P. 547-572.
31. Jiang Pledgers O. Combined Lagrangian Multiplier and Penalty Function Finite Element Technique for Elastic Impact Analysis / O. Jiang Pledgers // Computers and Structures. – 1988. –Vol. 30. – P. 1219-1229.
32. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Перев. с англ. под ред. Б.Е. Победри./ О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542.45.
33. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79.
34. Ищенко О.А., Ткачук Н.Н., Грабовский А.В., Ткачук Н.А., Демина Н.А., Зарубина А.А. 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 // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – №39 (1211). – С. 66-78.
35. Ищенко О.А. Базовые плиты разделительных штампов: напряженно-деформированное состояние с учетом контактного взаимодействия / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, А.В. Грабовский и др. // Вестник НТУ „ХПІ“. – Харьков: НТУ „ХПІ“. – 2011. – № 51. – С. 50-58.
36. Ищенко О.А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций / О.А. Ищенко // Моделювання процесів в металургії. – 2015. – № 1. – С. 93-96.
37. Ищенко О.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов / О.А. Ищенко, Н.А. Демина, А.В. Грабовский, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: ООО „Тисо Принт“. – 2012. – № 9. – С. 40-44.

References (transliterated)

1. Zayarmenko E.I. Razrabotka matematicheskikh modeley i raschetyi na prochnost razdelitelnykh perenalazhivaemykh shtampov: diss... doktora. tehn. nauk: spets. 01.02.06 i 05.03.05 / E. I. Zayarmenko. – Kharkov, 1992. – 280 pp.
2. Domina N.A. Udoskonalennya metodiv rozrahunku elementiv shtampovogo osnashchennya na osnovi analizu yih napryazhenodeformovanogo stanu: avtoref. dis. na zdotuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.03.05 „Protsezi ta mashini obrobki tiskom“ / N. A. Domina. – Kharkiv, 2011. – 20 pp.
3. Romanovskiy V.P. Spravochnik po holodnoy shtampovke / V.P. Romanovskiy. – Lutsk: Mashinostroenie, 1979. – 520 pp.
4. Popov E.A. Osnovni teorii listovoy shtampovki / E.A. Popov. – Moscow: Mashinostroenie, 1968. – 283 pp.
5. Frolov E. A., Agarkov V. V., Korneev S. V. Eksperimentalnoe issledovanie napryazhenno-ostoyevaniya blokov universalnosbornykh perenalazhivaemykh shtampov metodom golograficheskoy interferometrii / Frolov E. A., Agarkov V. V., Korneev S. V. // Obrabotka materialov davleniem. – 2012. – No 3 (32). P. 218-223.
6. Demina N.A. Vliyanie konstruktivnykh i tehnologicheskikh parametrov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie matritsi shtampov holodnolistovoy shtampovki / N.A. Demina // Vestnik NTU „KhPI“. – Kharkov: NTU „KhPI“. – 2005. – No 60. – P.68-76.
7. Demina N.A. K voprosu o vliyanii vyisoty matritsyi shtampa dlya vyirubki-probivki na ee deformirovannoe sostoyanie / N.A. Demina, A.V. Tkachuk, M.M. Peklich [i dr.] // Vestnik NTU „KhPI“. – Kharkov: NTU „KhPI“. – 2006. – No 33. – P.28-33.
8. Demina N. A. Kontaknoe vzaimodeystvie v sopryazhenii „puanson – shtampuemyy material – matritsa“ / N.A. Demina, O.P. Nazarova, A.N. Tkachuk // Vestnik NTU „KhPI“. – Kharkov: NTU „KhPI“. – 2007. – No 23. – P. 39-48.
9. Demina N.A. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodeystviya elementov shtampovoy osnastki / N.A. Tkachuk, N.A. Demina, Yu.D.Serdyuk [i dr.] // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2010. – no 2 (23). – P. 240-248.
10. Tarasov A.F. Vliyanie konstruktivnykh shtampa na deformatsiyu elementov bloka i rabochego instrumenta / A.F. Tarasov, S.A. Korotkiy // Udoskonalennya protsesiv i obladnannya obrobki tiskom v metalurgiyi i mashinobuduvanni. Tem. zb. nauk. prats. – Kramatorsk: DDMA, 2004. – P. 103-108.
11. Zablotskiy V.K. Sposob povysheniya stoykosti shtampov holodnogo deformirovaniya shtampov / V.K. Zablotskiy, M.Ya. Belkin, A.I. Shimko // Udoskonalennya protsesiv i obladnannya obrobki tiskom v metalurgiyi i mashinobuduvanni. Tem. zb. nk. prats. – Kramatorsk: DDMA, 2004. – P. 109-113.
12. Ben I. V., Yavorovskiy V. N. Analiz vyirubki pryamougolnykh plastinok metodom konechnykh elementov // Obrabotka materialov davleniem. – 2013. – No 4 (37). P. 28-35.
13. Yavorovskiy V. N., Kalchenko I. N. Issledovanie spetsificheskogo haraktera vyirubki tonkolistovyykh materialov s pomoschyu kompyuternogo modelirovaniya // Obrabotka materialov davleniem. – 2013. – No 4 (37). P. 45-51.
14. Kornilova A. V. Issledovanie ratsionalnosti primeniya staley dlya izgotovleniya instrumenta holodnoy listovoy shtampovki na primere H12MF // Obrabotka materialov davleniem. – 2010. – No 1 (22). p. 159-166.
15. Lvov G.I. Modelirovanie i analiz elementov tehnologicheskikh sistem listovoy shtampovki / G.I. Lvov, N.A. Tkachuk // Mehanska ta mashinobuduvannya. – 1997. – No 1. – P.34-39.
16. Borisevich V. K. Analiz razdelitelnykh protsessov listovoy shtampovki / V.K. Borisevich, V. V. Dragobetskiy // Kuznetchno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2009. – No 12. – P. 9-12.
17. Zayarmenko E.I. Ispytaniya prochnosti i zhestkosti bazo-vyih plit perenalazhivaemykh shtampov / Zayarmenko E.I., Kuznetsova L.G. // Voprosy oboronnoy tekhniki. – 1990. – Ser. 2. – Vol.10 (229). – P. 61-65.
18. Popat P.V. Finite -element analysis of the blanking process // Journal of Mechanical Working Technology / P.V. Popat, A.

- Ghosh, N.N. Kishore. – Amsterdam. – 1989. – 18. – No 3. – P.269-282.
19. Tkachuk N. N., Movshovich I. Ya., Tkachuk N. A., Skripchenko N. B., Litvinenko A. V. Analiz kontaktного vzaimodeystviya gladih i sherohovatyih tel metodom granichnyih elementov: modeli i razreshayushchie sootnosheniya. 1. Postanovka zadachi. 2. Kinematische model kontakta gladih tel / N. N. Tkachuk, I. Ya. Movshovich, N. A. Tkachuk, N. B. Skripchenko, A. V. Litvinenko // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – Moscow: OOO „Tiso Print“. – 2014. – No 3. – P. 3-10.
20. Tkachuk N. N., Movshovich I. Ya., Tkachuk N. A., Skripchenko N. B., Litvinenko A. V. Analiz kontaktного vzaimodeystviya gladih i sherohovatyih tel metodom granichnyih elementov: modeli i razreshayushchie sootnosheniya. 3. Pryamoy i variatsionnyy metodyi reshe-niya zadachi negertersevskogo normalnogo kontakta gladih tel. 4. Model kontakta sherohovatyih tel / N. N. Tkachuk, I. Ya. Movshovich, N. A. Tkachuk, N. B. Skripchenko, A. V. Litvinenko // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – Moscow: OOO „Tiso Print“. – 2014. – No 4. – P. 3-8.
21. Tkachuk N.N., Chepurnoy A.D., Skripchenko N.B., Litvinenko A.V., Tkachuk N.A. Mnogourovnevyye modeli v zadache analiza kontaktного vzaimodeystviya slozhnoprofilnyih tel: algoritmyi, realizatsiya i analiz primenimosti / N. N. Tkachuk, A. D. Chepurnoy, N.B. Skripchenko, A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – M.: OOO „Tiso Print“. – 2014. – No 6. – P. 10-16.
22. Tkachuk N.N., Chepurnoy A.D., Skripchenko N.B., Litvinenko A.V., Tkachuk N.A. Mnogourovnevyye modeli v zadache analiza kontaktного vzaimodeystviya slozhnoprofilnyih tel: algoritmyi, realizatsiya i analiz primenimosti (prodolzhenie) / N. N. Tkachuk, A. D. Chepurnoy, N.B. Skripchenko, A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – Moscow: OOO „Tiso Print“. – 2014. – No 7. – p. 11-20.
23. Tkachuk N.N., Chepurnoy A.D., Skripchenko N.B., Litvinenko A.V., Tkachuk N.A. Mnogourovnevyye modeli v zadache analiza kontaktного vzaimodeystviya slozhnoprofilnyih tel: algoritmyi, realizatsiya i analiz primenimosti (okonchanie) / N. N. Tkachuk, A. D. Chepurnoy, N.B. Skripchenko, A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – Moscow: OOO „Tiso Print“. – 2014. – No 8. – P. 6-8.
24. Krauch S., Starfild A. Metodyi granichnyih elementov v mehanike tverdogo tela / S. Krauch, A. Starfild. – Moscow: Mir, 1987. – 328 p.
25. Dzhonson K. Mehanika kontaktного vzaimodeystviya / K. Dzhonson. – Moscow: Mir, 1989. – 510 p.
26. Kravchuk A.S. K zadache Gertsya dlya lineynoy- i nelineynoy-uprugih tel konechnyih razmerov / A.S. Kravchuk // Doklady AN SSSR, 1976. – T.230. –No 2.– p. 308-310.
27. Kravchuk A.S. Chislennoye reshenie geometricheski nelineynyih kontaktnyih zadach / A.S. Kravchuk, V.A. Sursyakov // Doklady AN SSSR, 1981. – T. 259. – No 6.– P. 1327-1329.
28. Wriggers P. Computational Contact Mechanics / P. Wriggers.– Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 518 p.
29. Belytschko T. Contact-Impact by the Pinball Algorithm with Penalty and Lagrangian Methods / T. Belytschko, M.O. Neal // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. – 1991. – Vol. 31. – P. 547-572.
30. Jiang Pledgers O. Combined Lagrangian Multiplier and Penalty Function Finite Element Technique for Elastic Impact Analysis / O. Jiang Pledgers // Computers and Structures. – 1988. –Vol. 30. – P. 1219-1229.
31. Zenkevich O. Metod konechnyih elementov v tehnikе. Perv. s angl. pod red. B.E. Pobedri./ O. Zenkevich. – Moscow: Mir, 1975. – 542.45.
32. Tkachuk N.A., Gritsenko G.D., Chepurnoy A.D., Orlov E.A., Tkachuk N.N. Konechno-elementnyie modeli elementov slozhnyih mehanicheskikh sistem: tehnologiya avtomatizirovannoy generatsii i parametrizovannogo opisaniya // Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2006. – No 1. – p.57-79.
33. Ischenko O. A., Tkachuk N. N., Grabovskiy A. V., Tkachuk N. A., Demina N. A., Zarubina A. A. Parametricheskie modeli dlya kompyuternogo modelirovaniya kontaktного vzaimodeystviya elementov shtampovoy osnastki / O.A. Ischenko, N.N. Tkachuk, A.V. Grabovskiy, N.A. Tkachuk, N.A. Demina, A.A. Zarubina // Visnik NTU "HPI". Seriya: Mashinostroyeniye ta SAPR. – Harkiv: NTU "HPI". – 2016. – No 39 (1211). – P. 66-78.
34. Ischenko O.A. Bazovyye plityi razdelitelnyih shtampov: napryazhenno-deformirovannoye sostoyanie s uchetoм kontaktного vzaimodeystviya / O.A. Ischenko, N.A. Demina, A.V. Grabovskiy i dr. // Vestnik NTU „HPI“. – Harkov: NTU „HPI“. – 2011. – No 51. – P. 50-58.
35. Ischenko O.A. Kontaktnoye vzaimodeystvie elementov shtampov dlya razdelitelnyih operatsiy / O.A. Ischenko // Modelyuvannya protsesiv v metalurgii. –2015. – No 1. – P. 93-96.
36. Ischenko O.A. Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya bazovyih plit razdelitelnyih shtampov / O.A. Ischenko, N.A. Demina, A.V. Grabovskiy, N.A. Tkachuk // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – Moskov: OOO „Tiso Print“. – 2012. – No 9. – P. 40-44.

Поступила (received) 05.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комп'ютерне моделювання контактної взаємодії елементів штапкової оснастки / О. А. Іщенко, Н. А. Дьоміна, М. М. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, А. В. Грабовський, Г. А. Кротенко, Г. В. Ткачук, А. О. Зарубіна, О. В. Кохановська // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Транспортне машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2017. – № 5 (1227). – С. 108-134. – Бібліогр.: 36 назв. – ISSN 2079-0775.

Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штапковой оснастки / О. А. Ищенко, Н. А. Демина, Н. Н. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, А. В. Грабовский, Г. А. Кротенко, А. В. Ткачук, А. А. Зарубина, О. В. Кохановская // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Транспортне машинобудування. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2017. – № 5(1227). – С. 108-134. – Библиогр.: 36 назв. – ISSN 2079-0775.

Computer modeling of contact interaction of dies tooling elements / O. Ishchenko, N. Demina, M. Tkachuk, N. Skripchenko, A. Grabovskiy, G. Krotenko, A. Tkachuk, A. Zarubina, O. Kochanovskaia // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport achine building. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No 5 (1227). – P. 108–134. – Bibliogr.: 36. – ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Ищенко Ольга Анатольевна - ст. преподаватель кафедры высшей математики и физики, Таврический Государственный агротехнологический университет, Мелитополь

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

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

Демина Наталья Анатольевна - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и физики, Таврический Государственный агротехнологический университет, Мелитополь.

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

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

Квачук Николай Николаевич - кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", докторант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел. : (057) 707-69-01; e-mail: mikolei@rambler.ru.

Tkachuk Mykola – 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.

Скріпченко Наталія Борисівна – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01; e-mail: negrobova@gmail.com.

Скрипченко Наталья Борисовна - кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел. : (057) 707-69-01; e-mail: negrobova@gmail.com.

Skripchenko Nataliia – Ph.D., NTU "KhPI", researcher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-69-01; e-mail: negrobova@gmail.com.

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

Грабовский Андрей Владимирович - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ "ХПИ", старший научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел. : (057) 7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Кротенко Галина Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, НТУ "ХПІ", доцент кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01;

Кротенко Галина Анатольевна - кандидат технических наук, доцент, НТУ "ХПИ", доцент кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел. : (057) 707-69-01;

Krotenko Galyna – Ph.D., Assistant Professor, NTU "KhPI" Associate Professor at the Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057)7076166.

Квачук Ганна Володимирівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри "Інформаційні технології і системи колісних і гусеничних машин ім. О.О. Морозова», тел.: (057) 707-63-35.

Квачук Анна Владимировна - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", старший научный сотрудник кафедры "Информационные технологии и системы колесных и гусеничных машин им. А.А. Морозова», тел. : (057) 707-63-35.

Tkachuk Ganna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher at Information Technology and Systems of Wheeled and Tracked Machines behalf of A.A. Morozov Department; tel.: (057) 707-63-35

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

Зарубина Алла Александровна - кандидат технических наук, доцент, НТУ "ХПИ", профессор кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и 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

Кохановська Ольга Владиславівна – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", провідний інженер кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01

Кохановская Ольга Владиславовна - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ведущий инженер кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел. : (057) 707-69-01

Kokhanovska Olga – NTU "KhPI", senior engineer at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-69-01

ЗМІСТ

АВТОМОБІЛІ ТА ТРАКТОРИ

Агапов О. М., Краснокутський В. М., Павлій Н. В., Галуцьких А. Д. Методика розрахунку динамічних навантажень, які діють на колеса тракторного потягу. Рівняння руху тракторного потягу....	3
Бондаренко А. І., Клец Д. М., Ткачов В. Ю. Наукове обґрунтування використання широтно-імпульсної модуляції при автоматизації процесу гальмування автомобілів.....	8
Кальченко Б. И., Редчиц В. В., Головина Е. В. Моделирование криволинейного движения двухзвенного автопоезда на примере маневра «переставка».....	14
Кожушко А. П., Агапов О. М. Теоретичне дослідження процесу розгону колісного трактора з безступінчастою гідрооб'ємно-механічною трансмісією при оранці.....	19
Назаров О. І., Назаров І. О., Назаров В. І., Абрамов Д. В. Стендові дослідження регуляторів гальмівних сил, що забезпечують розподіл гальмівної сили між бортами легкового автомобіля.....	26
Самородов В. Б., Мітцель М. О., Пелипенко Є. С. Обґрунтування розміщення кінематичного розриву в безступеневій гідрооб'ємно-механічній трансмісії колісного трактора.....	33
Самородов В. Б., Шевцов В. М. Результати експериментального дослідження гідрооб'ємної передачі.....	41
Сергиенко Н. Е., Медведева А. В., Сергиенко А. Н. Определение нагруженности гусеничного звена....	47

ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Ариан Р., Пылев В. А., Ткаченко С. А. Влияние особенностей учета геометрии поршня дизеля на его расчетную теплонапряженность.....	54
Осетров О. О., Кокуш В. А., Альохін Д. С. Експериментальне дослідження і математичне моделювання механічних втрат в автомобільному двигуні.....	59
Парсаданов І. В., Хиженяк В. О., Горохівський А. С., Артеменко А. К. Фактори та методи підвищення ефективності каталітичного впливу на згоряння в дизелі.....	64
Пильов В. О., Нестеренко І. О. Задание граничных условий теплообмена в зоне поршневых колец поршня транспортного дизеля на начальных стадиях проектирования.....	68
Триньов О. В., Карнаухов О. О., Кафтанов Ю. О. Розробка заходів з поліпшення теплонапруженого стану випускного клапана форсованого тепловозного дизеля.....	72

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Маслієв В. Г., Мартинов І. Е., Шовкун В. В. Удосконалення діагностики візків залізничних транспортних засобів.....	81
Петренко О. М. Визначення енергетичних параметрів руху електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном.....	89

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Гусєв Ю. Б., Шейченко Р. І., Граборов Р. В., Бондаренко М. О., Танченко А. Ю., Ткачук М. А., Набоков А. В., Луньов Є. О. Комп'ютерне моделювання у процесі обґрунтування технічних рішень при проектуванні інноваційних виробів.....	95
Ищенко О. А., Демина Н. А., Ткачук Н. Н., Скрипченко Н. Б., Грабовский А. В., Кротенко Г. А., Ткачук А. В., Зарубина А. А., Кохановская О. В. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки.....	108
Куценко С. В., Васильєв А. Ю., Мухін Д. С., Васильєв Ю. К. Дослідження міцності індивідуального спорядження шляхом комп'ютерного моделювання НДС, на прикладі карабінів.....	135
Ткачук Н. Н., Скрипченко Н. Б., Кохановский В. И., Зарубина А. А., Храмцова И. Я., Шейко А. И., Белов Н. Л., Малакей А. Н., Яцив С. С. Контактное взаимодействие элементов технологической оснастки: математическое моделирование, компьютерный анализ и экспериментальные исследования.....	141

ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

<i>Александров Є. Є., Костяник І. В.</i> Стратегічні напрямки розвитку об'єктів бронетехніки.....	157
<i>Волонцевич Д. О., Веретенников Е. А., Ефремова А. И., Яремченко А. С., Прокопьев М. И.</i> Тяговый баланс перспективного гусеничного многоцелевого транспортера–тягача с бортовой электромеханической трансмиссией.....	162
<i>Волонцевич Д. О., Веретенников Е. А., Мормило Я. М., Яремченко А. С., Карпов В. О.</i> Тяговый баланс перспективного колесного бронетранспортера с электромеханической трансмиссией.....	168
<i>Дущенко В. В., Маслієв А. О.</i> Дослідження керуючого магнітного поля та вибір конструкції пружного шарніра з втулкою із магнітореологічного еластомеру підвіски колісного бронетранспортера.....	174
<i>Епифанов В. В.</i> Определение резонансных зон поперечных колебаний верхней ветви упругого гусеничного обвода.....	178

ІСТОРІЯ НАУКИ ТА ТЕХНІКИ

<i>Зинченко Е. И., Кротенко Г. А.</i> Становление высшего технического образования в Харьковском технологическом институте	183
--	-----

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Транспортне машинобудування

№ 5 (1227) 2017

Наукові редактори канд. техн. наук, проф. В. В. Єпіфанов,
канд. техн. наук, доц. Воронцов С.М.
Технічний редактор канд. техн. наук, доц. Воронцов С.М.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Факультет транспортного машинобудування.
Тел.: (057) 707-67-62; e-mail: snvorontsov@gmail.com

Підп. до друку 06.03.2017 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0.
Тираж 100 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня «ФОП Стеценко І. І.»
Свідоцтво про державну реєстрацію ХК № 82 від 22.04.2003 р.
61019, Харків, пр. Ілліча, 103а, кв. 21, тел. (057) 758-17-35
