

ьковское Конструкторское Бюро по Машиностроению им. А.А.Морозова. 4. Пономарев Е.П., Васильев А.Ю. К вопросу о проведении многовариантного анализа напряженно-деформированного состояния корпуса МТ-ЛБ // Механіка та машинобудування. – 2005 – №1. – С.289-294. 5. Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – 2002. – №1, С.6-13. 6. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Э.В., Ткачук А.В. Программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004.– № 31. – С.154-165. 7. Ткачук Н.А., Пономарев Е.П., Медведєва А.В., Миргородский Ю.Я., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д. Определение рациональных параметров элементов механических систем // Механіка та машинобудування. – 2001.– №1,2. – С.308-314. 8. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 9. Васильев А.Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств при действии ударных нагрузок // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 47. – С.42-50.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 539.3

Н.А. ТКАЧУК, докт.техн.наук, НТУ “ХПИ”,
Е.А. ОРЛОВ, Изюмский тепловозоремонтный завод, г. Изюм,
В.И. ГОЛОВЧЕНКО, Головной специализированный
конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь,
Н.А. ГОГОЛЬ, Таврийская государственная агротехническая академия,
г. Мелитополь

ЭКСПРЕСС - МОДЕЛИ И ЭКСПРЕСС - СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Описано технологію експрес-досліджень напружено-деформованого стану елементів складних механічних систем. Запропоновано технологію інтеграції експрес-моделей та експрес – систем у загальний ланцюг аналізу та синтезу машинобудівних конструкцій.

The technology of express-researches of stressed-deformed state of elements of complicated mechanical systems is described. Technology of integration of express-models and express-systems into general chain of analysis and synthesis of machine-building constructions is offered.

Введение. При проектировании элементов механических систем (ЭМС) в условиях дефицита времени, средств, вычислительных ресурсов, а также в силу естественной целесообразности во многих случаях существует потребность в “экспресс – моделях” (“ЭМ”) и “экспресс – системах” (“ЭС”) для оперативного решения возникающих задач анализа и синтеза. “Экспресс – модели” и “экспресс – системы” и могут создаваться в виде: аналитических зависимостей; баз данных, полученных на основе многовариантных расчетов

или экспериментальных исследований исследуемых ЭМС; встроенных компьютерных подсистем оперативного анализа и синтеза ЭМС; характеристик, полученных экспериментальным путем; таблиц; графических зависимостей.

Требования к “ЭМ” и “ЭС”:

1) Определять соответствие прочностных и жесткостных характеристик исследуемых ЭМС (при заданных конструктивных и технологических параметрах) задаваемому уровню этих характеристик.

2) Определять структуру и параметры элементов сложных механических систем, обеспечивающие заданный уровень прочности и жесткости.

3) Высокая скорость работы, т.е. возможность работы в режиме “запрос – ответ”.

Пути решения задачи создания “экспресс – моделей” и “экспресс – систем” на основе полного цикла исследований:

1) полная цепочка “специализированная система анализа и синтеза – расчетно-экспериментальное исследование – уточнение параметров численных моделей с применением разработанного программно-аппаратного комплекса – определение рациональной структуры и конструктивных параметров”;

2) на основе сокращенного (обоснованно) цикла исследований.

Отдельный случай – когда многопараметрическую модель (причем *семейства конструкций*) с большим количеством параметров, условий и связей между ними предлагается привести к одно- или двухпараметрической единой модели. В данном случае приходится применить подход по принципу “минимакса”: создаваемые “ЭМ” и “ЭС” должны выдавать в качестве выхода семейство моделей или конструкций ЭМС, наименее жесткие и точные из которых удовлетворяют наиболее жестким требованиям по данным параметрам. В этом случае, когда неизбежно создаются конструкции “с запасом”, важно определить область их применимости, по возможности очертив последнюю начальными проектными этапами.

Таким образом, актуальной и важной задачей является разработка структуры “экспресс – моделей” и “экспресс – систем” для оперативного анализа и синтеза элементов сложных механических систем.

1. Структура “экспресс - моделей” и “экспресс - систем” на основе сокращенного цикла расчетных или экспериментальных исследований. Исходя из общей схемы расчетно-экспериментальных исследований (на рис. 1 приведен так называемый “ромб” расчетно-экспериментального метода (РЭМ)), в силу спе-

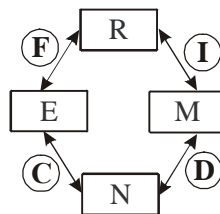


Рис. 1. Общая схема соотношения этапов исследования сложных механических систем:
R – реальный объект;
M – математическая модель; **N** – численная модель; **E** – экспериментальная модель; **F** – физическое моделирование;
I – идеализация;
D – дискретизация;
C – сопоставление

цифики отдельных задач, конструкций и сочетаний факторов при разработке специализированной системы автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем полный цикл исследований можно обоснованно сократить. При этом можно выделить несколько различающихся случаев.

Случай I. Экспериментальные и пробные численные исследования показывают, что дальнейшие численные исследования конструкций данного класса не требуются (т.е. для всего класса объектов аналогичного состава обеспечивается прочность, жесткость, а уменьшение, например, массы, нецелесообразно в силу конструктивных ограничений). Цикл экспериментальных исследований по сокращенному плану в некоторых случаях необходим для уточнения характеристик внешнего воздействия. При этом создание предварительной CAD/CAE-модели и проведение оценочных расчетов необходимо только для подтверждения порядка величин перемещений точек исследуемых ЭМС и действующих напряжений. “Ромб” РЭМ превращается в

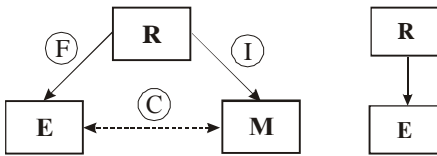


Рис. 2. Сокращенный цикл расчетно-экспериментальных исследований: *случай I*

треугольник” или даже отрезок. Опускается (или предельно упрощается) этап N и сравнение результатов N-E (рис. 2), этап M также упрощается.

Случай II. Для определенного класса конструкций требуется только получение распределения нагрузок на исследуемые объекты. При этом расчетные модели данных элементов или уже доведены до высокого уровня достоверности и точности, или проектировщик располагает эмпирическими соотношениями для оценки прочностных и жесткостных характеристик ЭМС. Например, данная ситуация особенно ярко проявляется при динамических воздействиях, когда возможны режимы обработки с частотным возмущением, близким к собственным частотам нагружаемой системы. Действительно, многие конструкции проектируются в основном исходя из требований превышения нижней границы спектра частот собственных колебаний над верхней границей спектра возможных нагрузок. При этом силовое нагружение можно считать квазистатическим.

В этом случае “Ромб” РЭМ превращается в “тре-

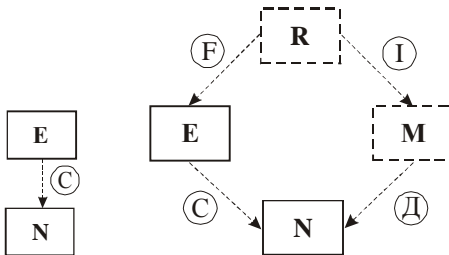


Рис. 3. К вопросу сокращения цикла расчетно-экспериментальных исследований: *случай II*

угольник”, причем опускается (или предельно упрощается), как и в *случае I*, этап **N**, а также сравнение результатов **N-E** (рис. 3), а сам этап **E** существенно сокращается, этап **M** также упрощается.

В некоторых ситуациях требуется просто показать несостоятельность того или иного конструктивного решения, для чего требуется демонстрация неудачной компоновки хотя бы на одном примере конструкции при одном или нескольких сочетаниях параметров.

Случай III. Для определенного класса конструкций требуется только уточнение граничных условий или условий сопряжения в зонах контактного взаимодействия. Схема исследований аналогична *случаю II* (см. рис. 3).

Случай IV. Обобщение *случаев I-III*.

При построении расчетных моделей элементов современных технологических комплексов необходимо использовать *сбалансированные* расчетные модели, которые характеризуются следующими особенностями: учетом всех значимых факторов; отсутствием избыточности; прогнозом чувствительности модели к изменению различных параметров.

Поскольку современные машиностроительные конструкции характеризуются возрастающей сложностью, а также условиями нагружения и сопряжения их элементов, и при этом широким разнообразием вариантов исполнения и эксплуатационных режимов, то удовлетворение требований к точности, надежности и минимальной материалоемкости предполагает проведение комплекса их экспериментальных и теоретических исследований. По традиционной схеме исследований на это требуется значительное время, что сдерживает сроки проектирования и подготовки производства.

За счет применения новой, интенсивной схемы исследований (ИСИ) [1] элементов сложных механических систем появляется возможность определить наиболее значимые факторы расчетных моделей ЭМС по результатам экспериментальных исследований. При этом существенно сокращается объем работы по оптимизации параметров ЭМС за счет снижения размерности пространства варьируемых параметров. В то же время определяется круг факторов, оказывающих определяющее влияние на характеристики элементов сложных механических систем, причем экспериментально устанавливается чувствительность реальных конструкций к их изменению. В результате удается строить сбалансированные модели исследуемых элементов для экспресс-анализа на первых стадиях проектирования.

Случай V. Когда нагрузки, граничные условия для исследуемого ЭМС известны или не возникает затруднений при их определении, но недостаточно ясен вопрос о конечно-элементной модели (тип элементов, форма, сетка конечных элементов (КЭ)), возможно расчетно-расчетное уточнение параметров численных моделей. В этом случае производится сравнение результатов численных исследований, выполненных на различных вариантах конечно-элементных моделей (КЭМ). Общая структура исследований в данном случае приведена на рис. 4. При этом различные конечно-элементные модели (см. рис. 4) или равноправны, или иерархизованы по степени сложности.

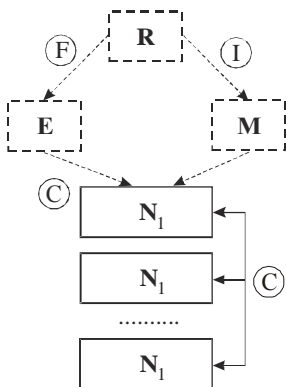


Рис. 4. К вопросу сокращения цикла расчетно-экспериментальных исследований: *случай V*

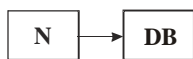


Рис.5. К вопросу сокращения цикла расчетно-экспериментальных исследований: *случай VI*

Случай VI. В ситуациях, когда требуется мгновенный ответ на вопрос об обоснованности тех или иных параметров ЭМС (особенно на первых этапах проектирования или при сравнении принципиально различающихся вариантов конструктивных решений), с учетом известных, определенных ранее или принятых (заданных) проектировщиком нагрузок, строится мини-экспертная система, основанная на аналитических зависимостях, на базах данных, полученных на основе многовариантных расчетов или на встроенных компьютерных моделях оперативного анализа и синтеза ЭМС. Могут быть также варианты табличного задания результатов исследований или графическое их представление (рис. 5).

2. Интеграция “экспресс - моделей” и “экспресс - систем” в подсистемы анализа, структурного и параметрического синтеза элементов сложных механических систем. Разработанный механизм обобщенного параметрического описания элементов сложных механических систем [2] позволяет проводить интегрирование достаточно широкого класса систем, подсистем в более общие системы автоматизированного проектирования, исследования и изготовления ЭМС. В частности, находят достаточно широкое применение предлагаемые “экспресс – модели” и “экспресс

– системы” элементов механических систем. При этом можно выделить 2 класса задач:

- анализ напряженно-деформированного состояния ЭМС при заданных конструктивных решениях и параметрах;
- структурный и параметрический синтез элементов сложных механических систем с учетом прочностных и жесткостных ограничений.

Интеграция “ЭМ” и “ЭС” в подсистемы анализа. Рассматриваются случаи, когда объект исследований достаточно сложен, но в то же время нет необходимости проведения полного цикла исследований. При этом возникают частные задачи определения параметров численных моделей или качественных сторон поведения отдельных конструкций. Для решения данных задач предлагается создание “экспресс-моделей” и “экспресс-систем” для анализа и синтеза ЭМС на базе КЭ моделей и САЕ-систем, которые встраиваются в специализированные интегрированные системы автоматизирован-

ного анализа и синтеза элементов машиностроительных конструкций (рис. 6).

Приведенная структурная схема позволяет создавать “экспресс – модели” и “экспресс – системы”, которые в свою очередь дают возможность решать самые разнообразные задачи.

Предложенный в статье подход позволяет решать не только задачи разработки достоверных численных моделей ЭМС или определения их напряженно-деформированного состояния, но и синтеза элементов конструкций, которые удовлетворяют определенным требованиям по критериям прочности, жесткости и надежности. На рис. 7 приведены схемы интегрирования “ЭМ” и “ЭС” в качестве подсистем анализа и синтеза в системы автоматизированного проектирования ЭМС.

При этом выходные данные на схеме (см. рис. 7) могут передаваться в специализированную интегрированную систему автоматизированного анализа и синтеза ЭМС или сразу после обработки в “ЭМ” и “ЭС” (путь №1 - задача анализа), или после обработки в подсистеме оптимизации (путь №2 - задача структурного или параметрического синтеза), или после экспертного решения (путь №3 - определение рациональных параметров на основе экспертных оценок).

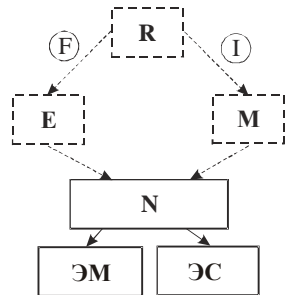


Рис. 6. Структура построения “экспресс – моделей” и “экспресс – систем” для использования в специализированных системах автоматизированного анализа и синтеза ЭМС

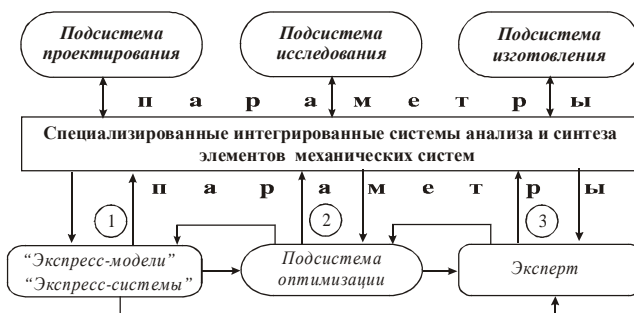


Рис. 7. Схема интегрирования “ЭМ” и “ЭС” в качестве подсистем анализа и синтеза в системы автоматизированного проектирования машиностроительных конструкций

Предложенный подход позволяет решать не только задачи разработки достоверных численных моделей ЭМС или определения их напряженно-

деформированного состояния, но и синтеза конструкций элементов сложных механических систем, которые удовлетворяют определенным требованиям по критериям прочности, жесткости и надежности.

3. Решение задач оперативного анализа и синтеза структуры и параметров расчетных моделей элементов сложных механических систем. Рассмотрим применение предложенных технологий исследований на примере систем автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния переналаживаемых штампов для листовой штамповки металла, корпусов рам ветроэнергетических установок и рам тепловозов 2ТЭ10М.

3.1. Интенсификация исследований классов конструкций. Система автоматизированного анализа и синтеза параметров переналаживаемых штампов в системе “САПР-ШТАМП”. Рассмотрим технологию интенсификации исследований целых классов конструкций при помощи создания типовых расчетных моделей на примере элементов штампов. Для современного машиностроительного производства характерна тенденция интенсификации процессов проектирования, технологической подготовки производства и изготовления. Это приводит к необходимости интенсификации также и процессов исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов сложных механических систем, используемых для изготовления продукции. В частности, актуальной является задача построения специализированных систем, сопряженных с существующими и разрабатываемыми САПР штампов для листовой штамповки. При этом их важнейшим свойством должен быть более полный учет специфики условий эксплуатации, нагружения и взаимодействия элементов исследуемых объектов.

При разработке комплекса методов, алгоритмов и программного обеспечения необходимо удовлетворить следующим требованиям: непосредственная связь с САД/САМ системами; работа в режиме реального времени; автоматизация всех этапов исследований; учет контактного взаимодействия в технологических системах.

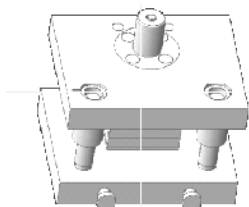
При этом схема решения задач в рамках систем автоматизированного анализа и синтеза (СААС) элементов технологических систем листовой штамповки (ЭТС-ЛС) предполагает решение следующего комплекса проблем:

- классификация объектов исследования;
- определение условий нагружения;
- определение условий сопряжения;
- идентификация расчетных моделей;
- расчет напряженно-деформированного состояния ЭТС-ЛС;
- обеспечение наглядности отображения;
- организация обратной связи в САПР.

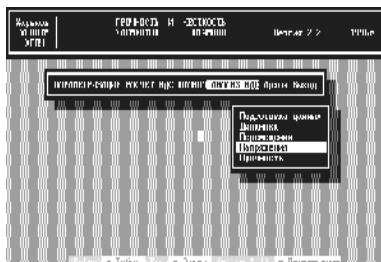
Данные этапы являются предметами самостоятельных исследований и оказывают существенное влияние на результаты исследований в целом.

Объекты исследования. Технологические системы листовой штамповки

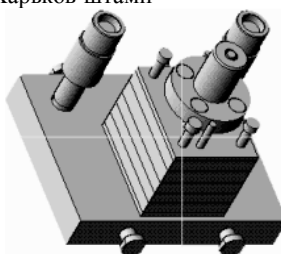
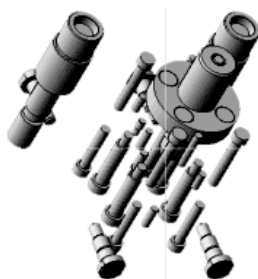
(ТСЛС) представляют собой замкнутые цепочки взаимосвязанных, взаимодействующих и взаимовлияющих элементов. Технологические системы операций листовой штамповки включают: прессы, штампы (включая формообразующие и режущие части) и заготовку (штампующий материал). На рис.8 – 9 представлены этапы создания и примеры моделей штампов, полученные в САПР-Ш.



Модель штампа
в графическом редакторе
САПР



Общий вид монитора подсистемы анализа
напряженно-деформированного состояния
элементов штампов “Штамп-НДС” в САПР
“Харьков-штамп”



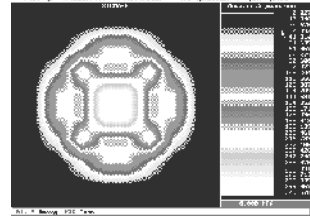
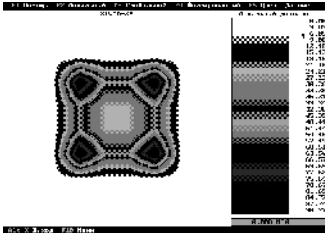
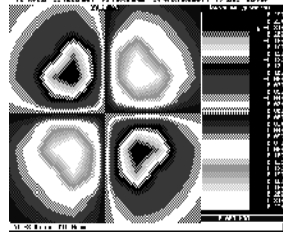
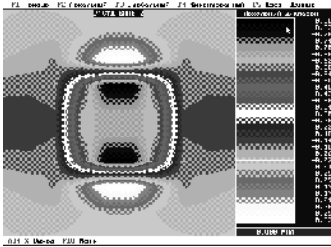
Модели отдельных элементов штампов

Рис. 8. Этапы моделирования и анализа в САПР “Харьков-штамп”

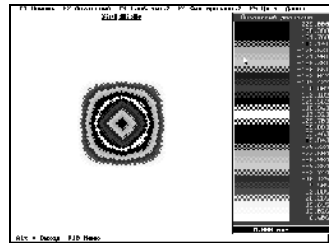
Наибольший интерес в качестве объекта исследований с точки зрения обеспечения прочности, жесткости, долговечности представляют: режущие элементы штампов (пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы); плиты штампов (верхняя, нижняя). Данные элементы представляют собой сложные конструкции, в состав которых входят тела вращения, пластины, стержневые конструкции и массивные тела. Соответственно выделяются 2 типа задач:

- расчет напряженно-деформированного состояния пуансонов, матриц и пуансон-матриц с целью обоснованного выбора технологических параметров процесса штамповки и прогнозирования ресурса инструмента;
- расчет напряженно-деформированного состояния плит с целью обоснованного выбора их конструктивных параметров.

Условия нагружения и сопряжения. На элементы штампов действуют усилия штамповки $P_{шт}$, распределенные по силовым элементам конструкции штампов. При этом не всегда возможно заранее установить закон распределения этих усилий, и это распределение становится искомым при решении задачи исследования напряженно-деформированного состояния элементов штампов.



Визуализация полей напряжений в подсистеме “Штамп-НДС”



Визуализация полей перемещений в подсистеме “Штамп-НДС”

Рис. 9. Визуализация результатов исследований нижней плиты штампов в подсистеме “Штамп-НДС”

На поверхностях сопряжения элементов штампов условия взаимонепроникновения тел представимы в виде

$$u_N^s - u_N^i \leq \delta^{st},$$

где u_N^p – перемещения точек p -го тела в направлении нормали к поверхности

в зоне контакта; $\delta^{\text{н}}$ – начальный зазор в сопряжении s -го и t -го элементов.

В местах жесткого крепления податливых тел к жестким элементам, упругим опорам или основаниям, а также в области приложения внешней нагрузки граничные условия носят классический характер.

Создание конечно-элементных моделей. Для определения напряженно-деформированного состояния деталей штампов используется метод конечных элементов. Конечно-элементная разбивка данных деталей производится по следующему алгоритму: для исследуемой группы деталей определяется набор типов конечных элементов и общая схема построения модели; в графическом редакторе производится сканирование указанной области пространства, информация хранится в согласованном формате; запрашиваются у пользователя параметры разбивки (густота разбивки); производится построение конечно-элементной модели группы объектов.

Расчет напряженно-деформированного состояния ЭМС. В процессе решения определяется область контакта, закон распределения контактных давлений, зоны отрыва и напряженно-деформированное состояние всех сопряженных тел. Используется также схема решения с размещением в зоне контакта исследуемых тел слоя специальных стыковочных элементов.

Визуализация расчетов элементов штампов. Исследователям, конструкторам и технологам при работе с САА ЭТС-ЛС важно получать результаты расчетов в удобном виде. В связи с этим используются форматы вывода в виде схем деформирования и картин распределения искомым функций (перемещений, напряжений) по сечениям и слоям (см. рис. 8). Данные картины могут быть наложены на картины геометрических моделей штампов или их чертежи и давать возможность быстрой качественной и количественной оценки отдельных деталей, узлов и конструкции в целом.

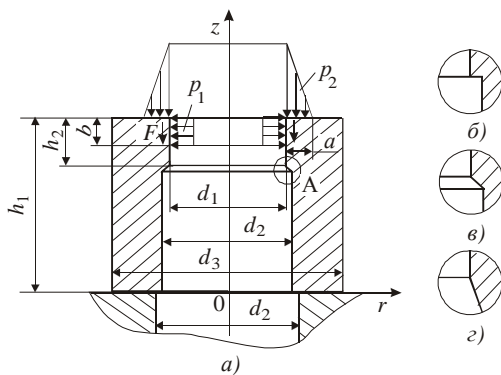
Важнейшим свойством САА, функционирующей как самостоятельно, так и в составе САПР особенно, является возможность структурной и параметрической оптимизации изделия. Предложенный подход позволяет осуществление целенаправленного выбора рациональной компоновки и параметров штампов. Этап 2 основывается на сведениях из баз данных по свойствам материалов, оборудованию и значениям параметров технологического процесса.

Анализ результатов. Исследование функционирования разработанных систем автоматизированного анализа прочности и жесткости ЭТС в САПР штампов показало высокую их эффективность для снижения металлоемкости оснастки, рационального подбора ее параметров и сокращения сроков и стоимости проектирования.

Встроенная система анализа дает возможность на оборудовании средней мощности производить серьезный анализ ЭТС-ЛС за счет специализации алгоритмов и программного обеспечения, учета реальных условий сопряжения данных элементов и взаимосвязи с основными модулями САПР в режиме реального времени без предъявления высоких требований к квалификации пользователя.

Для оперативного анализа напряженно-деформированного состояния

пуансонов, матриц и пуансон-матриц как элементов единой системы “режущий инструмент – заготовка” была проведена серия многовариантных численных расчетов с варьированием различных параметров и конструктивных схем исполнения инструмента, свойств и толщины штампуемого материала. На рис. 10, а приведены расчетные схемы вырубной матрицы штампа. Здесь p_1 – контактное давление на режущей кромке матрицы, распределенное по кольцу шириной a ; p_2 – распирающее давление, действующее на внутреннюю цилиндрическую поверхность высотой b до момента скола штампуемой детали; F - усилие проталкивания, равное по величине силе трения между матрицей и деталью. Значение p_1 можно определить из соотношения



$$\int_{d_1/2}^{d_1/2+a} p_1(r) 2\pi r dr + F = P_1 \quad (1)$$

Суммарная величина усилия вырубki P_1 определяется по классической формуле

$$P_1 = k\sigma_{cp}L^p t, \quad (2)$$

где k - коэффициент запаса, принимаемый обычно 1,2-1,3; σ_{cp} - сопротивление срезу штампуемого материала;

L^p - периметр вырубаемого контура, в данном случае равный πd_1 ; t - толщина штампуемого материала.

Значения ширины кольца контакта a штампуемого материала с матрицей и глубины его внедрения b до момента скола были ранее определены экспериментально [3]. Установлено, что эти величины зависят от толщины, марки штампуемого материала, относительного зазора между режущими кромками и т. д. Однако в среднем с достаточной для практики точностью можно записать $a = 0,5t$; $b = 0,1t$. Величину распирающего усилия p_2 , равного $0,35 p_1$ [4], можно определить из соотношения

$$\int_{h_1-b}^{h_1} p_2(z) \pi d_1 dz = 0,35 p_1 \quad (3)$$

Давление p_2 на стенки матрицы ввиду малости участка распределения принято равномерным, т. е. $p_2(z) = const$. Поэтому, принимая коэффициент

трения между внутренней поверхностью матрицы и проталкиваемой деталью равным 0,3 [5], можно записать $F = 0,3P_2$. На основании результатов экспериментов распределение контактного давления p_1 можно считать линейным, т. е. $p_1(r) = k_1 r + l$. Выполнив необходимые преобразования, можно найти коэффициент k_1 и свободный член l и, таким образом, полностью определить выражения (1) и (3).

При исследовании напряженно-деформированного состояния вырубных матриц изучали влияние относительной толщины стенки (внутренние диаметры принимали значения 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100 и 150 мм, для каждого из которых наружные варьировали от 1,03 до 5,0 d_1) конструктивного исполнения зоны A (см. рис. 10, δ, ϵ, ζ) и толщины штампуемого материала на законы распределения и величины напряжений и перемещений (исследования проводили на вырубной матрице с размерами: $d_1 = 30$ мм; $d_2 = 31$ мм; $d_3 = 50$ мм; $h_1 = 30$ мм; $h_2 = 10$ мм).

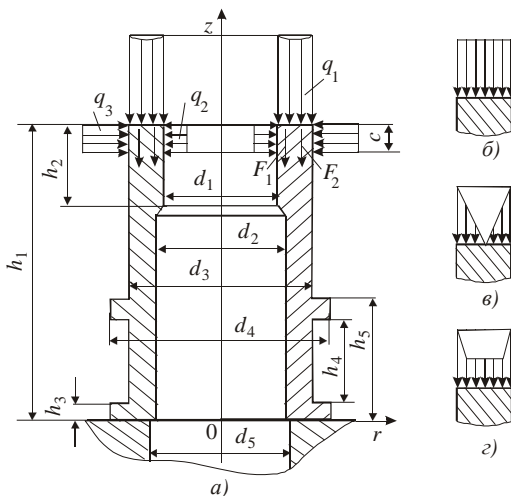


Рис. 11. Расчетные схемы пуансон-матрицы штампа

Расчетная схема типовой пуансон-матрицы показана на рис. 11,а, характерной особенностью ее является наличие в нижней части кольцевых буртиков высотой h_3 и $h_5 - h_4 - h_3$. Такая конструкция пуансон-матриц применяется в переналаживаемых штампах совмещенного действия, в которых режущий инструмент крепится при помощи композиционных материалов.

Для удобства применения полученных результатов для штампуемых листовых материалов с любыми механическими характеристиками и любых толщин все расчеты производили при $\sigma_{cp} = 100$ МПа и 1000 МПа, $t = 1$ мм. В

результате расчета получены все компоненты тензоров деформаций, напряжений и векторов перемещений для всех конечно-элементных моделей во всех рассмотренных конструктивных вариантах матриц и пуансон-матриц, т. е. полностью охарактеризованы их напряженно-деформированные состояния.

При проведении исследования матриц установлено, что форма полости матрицы в зоне *A* (см. рис. 10) практически не влияет на величины максимальных напряжений, возникающих в области режущей кромки. Концентратор в виде прямого угла лишь незначительно изменяет закон распределения и увеличивает напряжения именно в этой зоне, однако здесь их абсолютные значения намного меньше по сравнению со значениями в области режущей кромки. Что касается перемещений, то в случае варианта (см. рис. 10, б) несколько (на 20 – 25 %) увеличиваются их как осевые, так и радиальные составляющие. Конусное исполнение зоны *A* по варианту, приведенному на рис. 10, з, трудоемко в изготовлении, а особых преимуществ не имеет. Наиболее приемлемым для практики является вариант, приведенный на рис. 10, в.

Изменение толщины штампуемого материала от 1 до 10 мм в 10 раз и более увеличивает осевые и радиальные перемещения, нормальные и касательные напряжения по всему поперечному сечению, но практически не изменяет величины максимальных напряжений в зоне режущей кромки. Естественно, вне этой зоны напряжения увеличиваются пропорционально толщине, однако здесь они невелики по абсолютному значению. Эквивалентные напряжения вычисляли по энергетической гипотезе прочности.

На рис. 12 показаны графические зависимости относительных максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\Delta_{max}} (t=1 \text{ мм}, \sigma_{cp}=100 \text{ МПа})$ и максимальных осевых перемещений $u_{z_{max}} (t=1 \text{ мм}, \sigma_{cp}=1000 \text{ МПа})$ от относительной толщины стенки матрицы $\gamma = (d_3 - d_2) / 2d_2$, где 1-8 соответственно $d_1=5; 10; 15; 20; 30; 50; 100; 150 \text{ мм}$. Как следует из графиков, для уменьшения максимальных напряжений, возникающих в зоне режущей кромки, в большинстве случаев увеличивать толщину стенки матрицы имеет смысл лишь в

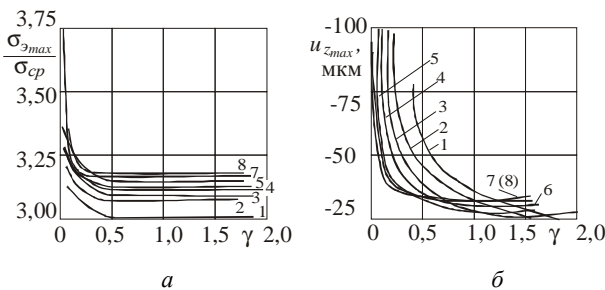


Рис. 12. Графические зависимости относительных максимальных эквивалентных напряжений и максимальных осевых перемещений $u_{z_{max}}$

интервале $0 < \gamma \leq 0,35$. Дальнейшее утолщение стенки лишь увеличивает габаритные размеры и металлоемкость матрицы.

В процессе исследования напряженно-

деформированного состояния пуансон-матриц установлено, что характер приложения нагрузки к верхнему торцу существенно влияет на характер распределения и абсолютные значения максимальных перемещений и напряжений, возникающих в зонах режущих кромок.

При удалении от верхнего торца пуансон-матрицы по оси Oz на 3-5 мм это влияние уменьшается, и закон распределения внешней нагрузки для общего напряженно-деформированного состояния практически уже не имеет значения. Однако здесь величины напряжений значительно меньше, поэтому прочностные расчеты следует проводить исходя из максимальных значений напряжений, возникающих при наиболее неблагоприятном характере нагружения. Численные эксперименты показали, что наиболее неблагоприятным законом распределения исходных нагрузок на верхнем торце пуансон-матриц для напряженного состояния зон режущих кромок является вариант, приведенный на рис. 11, в. В качестве основного конструктивного варианта для исследования распределения напряжений и перемещений рассматривали пуансон-матрицу со следующими параметрами: $d_1=60$ мм; $d_2=61$ мм; $d_3=80$ мм; $d_4=96$ мм; $h_1=70$ мм; $h_2=20$ мм; $h_3=6$ мм; $h_4=15$ мм; $h_5=24$ мм.

На рис. 13, а показано распределение эквивалентных напряжений по контуру пуансон-матрицы основного исполнения, а на рис. 13, б – схема ее деформирования при штамповке листового материала толщиной 1 мм с $\sigma_{cp}=100$ МПа и 1000 МПа соответственно. В скобках даны величины радиальных и осевых перемещений в микронах.

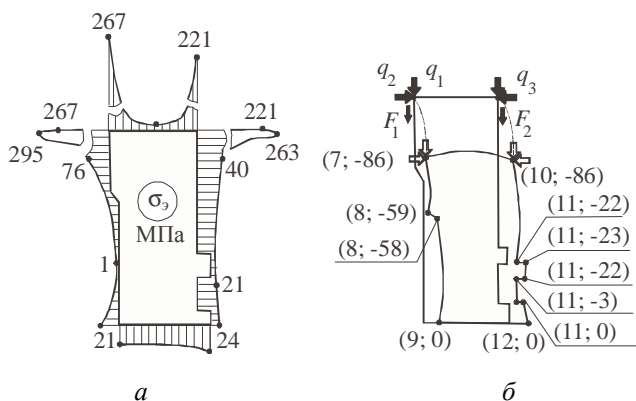


Рис. 13. Распределение эквивалентных напряжений по контуру пуансон-матрицы основного исполнения (а) и схема ее деформирования при штамповке листового материала (б)

Деформированное состояние пуансон-матрицы отличается от такового вырубной матрицы тем, что здесь радиальные перемещения во всем сечении направлены от центра, в то время как в матрице ее верхняя часть с режущей

кромкой под воздействием сформировавшейся системы сил перемещается к центру. Но как в матрицах, так и в пуансон-матрицах вертикальные перемещения верхнего торца значительно (в среднем на порядок) выше радиальных.

Анализ результатов расчетов на жесткость вырубных матриц и пуансон-матриц с учетом характера деформирования пуансонов показывает, что при определенных усилиях штамповки и конструктивных параметрах режущего инструмента в процессе вырубки деталей за счет радиальных перемещений режущих кромок изменяется назначенный конструктором рабочий зазор. Так, например, при вырубке шайбы из стали 50ХГ ($\sigma_{cp} = 1200$ МПа) толщиной 4 мм с наружным диаметром 80 мм и внутренним 60 мм радиальное сближение режущих кромок между матрицей и пуансон-матрицей составит около 65 мкм, т. е. 20 % величины одностороннего номинального зазора для данного случая, что изменит требуемую точность вырубки и ухудшит качество поверхности среза шайбы. Зазор между пуансоном и пуансон-матрицей увеличится на 7 мкм, т. е. на 2 % номинального значения.

Таким образом, при проектировании рабочего инструмента следует рассчитать его прочность и жесткость, определить величины радиальных смещений режущих кромок и скорректировать величину номинального зазора. Что касается осевых перемещений между матрицей и пуансон-матрицей, то они практически не влияют на точность штампуемых деталей, качество поверхности среза и величину зазора. В данном случае вся система пуансон-матрица – штампуемый материал – пуансон-матрица, сжимаясь, смещается вниз на величину абсолютной осевой деформации пуансон-матрицы.

Расчеты показали, что изменение толщины стенки пуансон-матрицы практически не влияет на максимальные значения напряжений в зоне режущих кромок, а на расстоянии 3-5 мм от верхнего торца в тонких стенках могут возникать напряжения, превосходящие допустимые (в зоне режущих кромок напряженное состояние, близкое к всестороннему сжатию, позволяет стенкам выдерживать величины напряжений, в несколько раз превосходящие допускаемые). В частности, конструкторам не рекомендуется назначать толщину стенки пуансон-матрицы, при которой отношение d_3/d_1 было бы меньше 1,2. В противном случае при штамповке листового материала толщиной $t \geq 3$ мм и $\sigma_{cp} \geq 400$ МПа, может разрушиться пуансон-матрица уже на первых циклах нагружения.

Разработанные “экспресс – модели” и “экспресс – систем” для анализа и синтеза элементов штампов позволяют оперативно решать весь комплекс задач, возникающих при проектировании данного типа оснастки. Кроме того, наличие такого инструмента дает возможность создать и расширить базу данных, получаемую при многовариантных расчетах НДС элементов штампов с варьированием конструктивных решений и параметров.

3.2. Определение характера напряженно-деформированного состояния, граничных условий и нагрузок на элементы механических систем.

Подсистемы автоматизированного исследования напряженно-деформированного состояния сварных рам ветроэнергетических установок (ВЭУ). При исследовании прочностных и жесткостных характеристик элементов сложных механических систем применяются различные подходы. Традиционная схема исследований состоит в анализе конструкции, условий ее эксплуатации, создании расчетной модели (или модели для лабораторных испытаний) и проведении собственно расчетов или испытаний. Более достоверные результаты дает использование многозвенных технологий. В этом случае перед началом исследований разрабатывается схема проведения исследований, которая предполагает выполнение ряда последовательных анализов, расчетов и экспериментов. На каждом этапе исследований по предложенной технологии проводится уточнение тех или иных параметров, условий, закономерностей. Например, после анализа конструкций и условий их эксплуатации проводится экспериментальное определение величины и закона распределения силовых воздействий на исследуемые объекты, определяются физико-механические характеристики материала, после чего на основе полученных данных строится соответствующая расчетная схема, производится расчет напряженно-деформированного состояния, и задача считается в основном решенной. Однако при обнаружении существенных качественных и количественных несоответствий (например, результатов, полученных численно и экспериментально) всю цепочку исследований приходится переосмысливать, а сами исследования повторять по новой схеме.

Недостатки, присущие линейным схемам проведения исследований, могут быть в значительной мере устранены при использовании многошаговых методов исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов сложных механических систем. Данные подходы предусматривают исследование напряженно-деформированного состояния исследуемых объектов в несколько взаимосвязанных этапов, результаты каждого из которых оказывают влияние как на параметры моделей и характер исследований на последующих этапах, так и на саму схему исследований. Таким образом организовывается система „обратных связей” в системе исследований, а также перенастройка структуры самой системы непосредственно в ходе исследований. Саму схему проведения расчетов и испытаний нельзя определить заранее, поскольку она „самокорректируется” в процессе исследований. Нельзя однозначно утверждать, что получаемая в конечном счете схема исследований является оптимальной. Однако при удачном и продуманном выборе начального варианта схемы она может приблизиться к оптимальному (в некотором смысле) варианту.

Факторы, определяемые в процессе исследований. При исследовании напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем очень большую роль играют в настоящее время мощные универсальные программные пакеты, позволяющие с большой точностью решать поставленные задачи. Основным условием получения достоверных результатов выступает в сложившихся условиях наличие точной расчетной

модели. Для построения достоверной расчетной модели необходимо проводить комплекс исследований, направленных на обоснование следующих моментов.

I. *Уточнение характера физического процесса в исследуемом объекте* - сводится в некотором смысле к определению структуры и параметров оператора краевой задачи L^* :

$$L^*(x, p, u) = 0, \quad x \in \Omega, \quad (4)$$

где x – координаты точек исследуемого тела, занимающего в пространстве область Ω ; u – массив параметров состояния объекта; p – массив характеристик свойств объекта.

II. *Уточнение характеристик расчетных моделей* (например, типов конечных элементов, их числа и характера распределения узлов конечноэлементной сетки) производится по результатам анализа распределения искомым величин, полученных расчетным или экспериментальным путем.

III. *Уточнение величины, характера и законов распределения внешних и внутренних нагрузок на исследуемые элементы* формально состоит в формулировке соответствующих силовых граничных условий

$$l_f(x, u) = f, \quad x \in S_f, \quad (5)$$

где l_f – оператор силовых граничных условий; f – массив соответствующих нагрузок; S_f – часть поверхности тела, через которую осуществляется приложение нагрузок.

IV. *Уточнение характера и законов распределения граничных условий* приводится к задаче описания на части поверхности S_u оператора краевых условий

$$l_u(x, u) \geq \mu, \quad x \in S_u, \quad (6)$$

где l_u – оператор краевых условий; μ – некоторая задаваемая функция, характеризующая закон распределения и параметры граничных условий.

Определение характера физического процесса, явления и его параметров. Речь идет об уточнении типа оператора начально-краевой задачи и констант, описывающих характеристики материалов.

Например, для исследования напряженно-деформированного состояния сварных рам ветроэнергетических установок (рис. 14) одним из важных вопросов является определение типа конечных элементов, которые могут быть использованы для моделирования НДС конструкции.

При использовании Shell-элементов (рис. 15) получаемая модель имеет на порядок меньше размеры по числу степеней свободы. Это позволяет с привлечением незначительных вычислительных ресурсов решать весь комплекс задач моделирования реакции конструкции на различные типы воздействий. Однако сравнение результатов решения тестовых задач с использованием

ем Shell- и Solid-элементов (рис. 16) сразу же указывает на недопустимое количественное и качественное несоответствие получаемых полей напряжений.

В связи с этим в процессе дальнейших исследований НДС сварных рам ветроэнергетических установок пришлось отказаться от элементов типа Shell. Получаемые модели, построенные на основе элементов типа Solid, и системы анализа, их использующие, строго говоря, нельзя назвать “экспресс – моделями” и “экспресс – системами” в силу сложности первых и вторых.

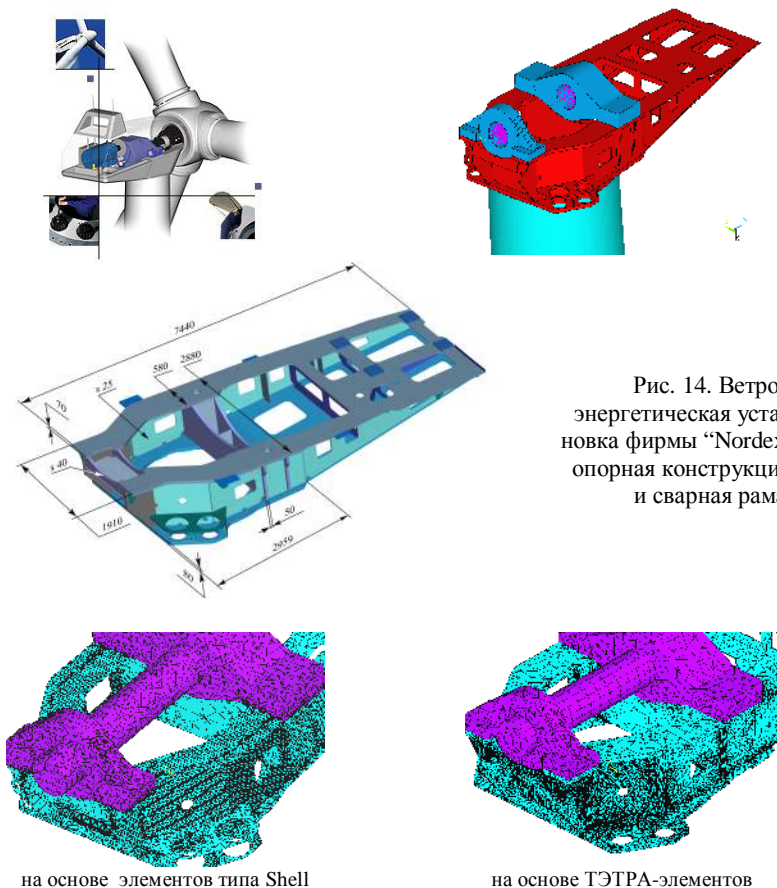


Рис. 14. Ветроэнергетическая установка фирмы “Nordex”, опорная конструкция и сварная рама

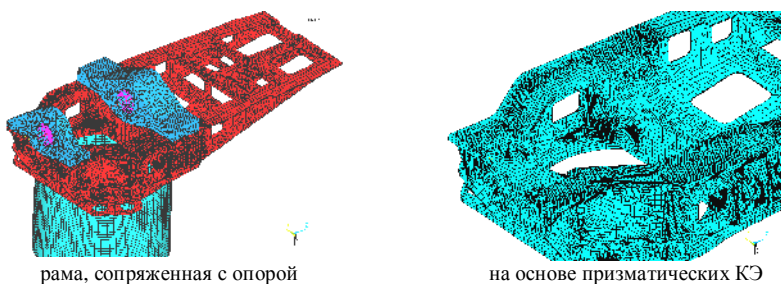


Рис. 15. Варианты конечно-элементных моделей рамы ветроэнергетической установки

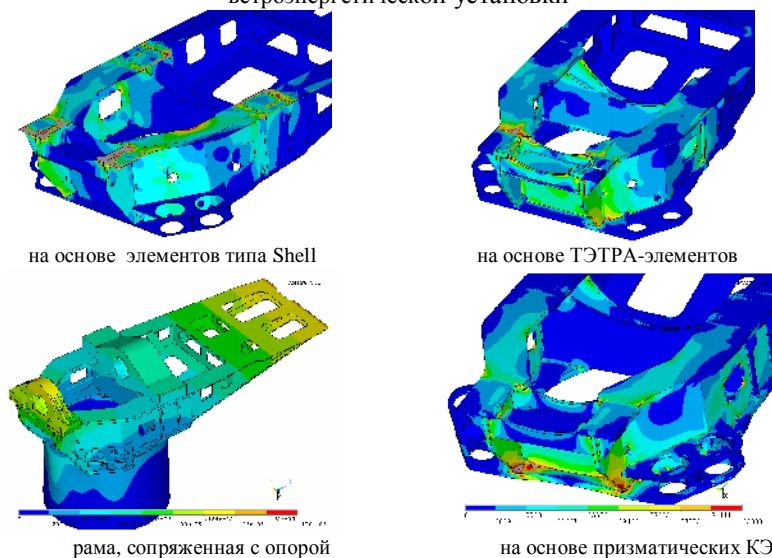


Рис. 16. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рамы ветроэнергетической установки

Однако в данном случае можно использовать следующий подход: с использованием сложных, но достоверных конечно-элементных моделей производится расчет напряженно-деформированного состояния от некоторых типовых силовых воздействий, а результат расчетов записывается в базу данных специальной структуры. Далее эта база данных используется как экспресс – система, поскольку практически мгновенно дает возможность получить ответ на вопрос о величине напряжений по заданной комбинации типовых воздействий (рис. 17).

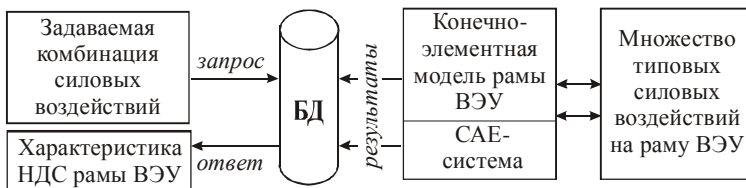


Рис. 17. Формирование и использование базы данных результатов исследования НДС рам ветроэнергетических установок для экспресс-оценки напряжений в конструкции

Более того, построенная таким образом экспресс – система позволяет подключить к оценке долговечности сварных рам ветроэнергетических установок различные теории и критерии, поскольку наиболее трудоемкий этап исследований напряженно-деформированного состояния “выносится за скобки”, т.к. осуществлен ранее. В дополнение к получаемым преимуществам такая организация исследований позволяет вычислительные средства большой мощности задействовать в одном исследовательском центре, а обработку результатов производить с применением компьютеров средней мощности в любом другом исследовательском центре.

3.3. Определение характера и закона распределения внешних нагрузок. Подсистема анализа напряженно-деформированного состояния рам тепловозов 2ТЭ10М. В данном случае речь идет об определении величины или закона распределения на-

грузок на исследуемый объект (во времени, в пространстве, в зависимости от режимов эксплуатации). В таком случае закон или неизвестен вообще, или аналитическое (численное) вычисление нагрузок сопряжено с затратами ресурсов, сопоставимыми или превышающими затраты на решение основной задачи. В частности, данная ситуация рельефно проявляется в ситуации, когда силовые параметры действующих нагрузок определяются по итогам решения другой задачи, которая описывает некоторый физико-механический процесс. Уточнение характера и величины воздействия в каждом конкретном случае требует экспериментального исследования. Однако зачастую возможно создание специальной подсистемы моделирования, не только в качественном отношении, но и количественно позволяющей проанализировать влияние тех или иных пара-

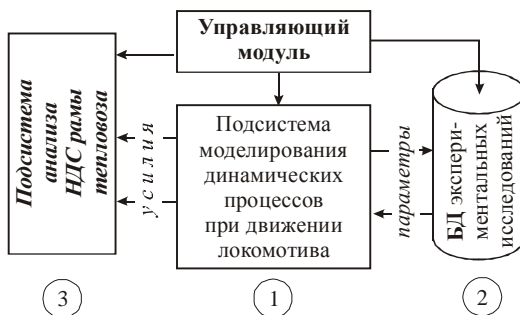


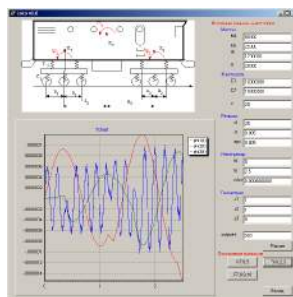
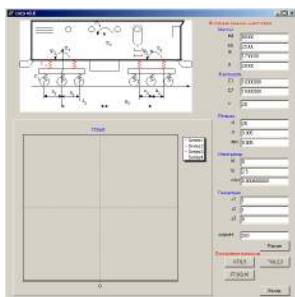
Рис. 18. Структура автоматизированной подсистемы анализа напряженно-деформированного состояния рам тепловозов серии 2ТЭ10

метры. В частности, данная ситуация рельефно проявляется в ситуации, когда силовые параметры действующих нагрузок определяются по итогам решения другой задачи, которая описывает некоторый физико-механический процесс. Уточнение характера и величины воздействия в каждом конкретном случае требует экспериментального исследования. Однако зачастую возможно создание специальной подсистемы моделирования, не только в качественном отношении, но и количественно позволяющей проанализировать влияние тех или иных пара-

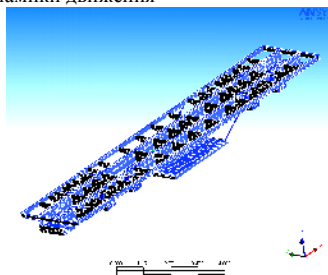
метров на силовые потоки в исследуемой сложной механической системе.

Например, для исследования напряженно-деформированного состояния рам тепловозов 2ТЭ10М (рис. 18) была разработана специализированная система автоматизированного конечно-элементного моделирования, включающая 3 этапа: моделирование силового воздействия на раму на основе динамической системы “рама – агрегаты – подвеска”; верификация параметров динамической модели при сравнении полученных результатов с экспериментальными данными; многовариантный анализ напряженно-деформированного состояния рамы тепловоза.

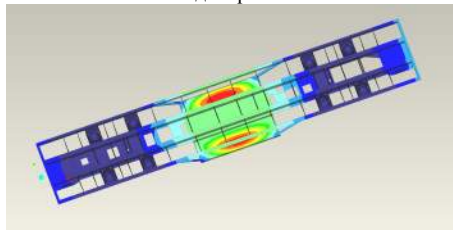
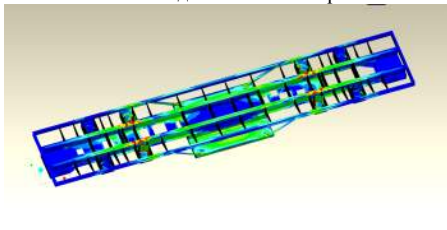
На рис. 19 приведены иллюстрации работы отдельных подсистем моделирования силового воздействия и напряженно-деформированного состояния исследуемых рам тепловоза 2ТЭ10М. Важно, что при этом уточняется и характер распределения нагрузок, и количественное распределение усилий в пространстве и во времени, что обеспечивает достоверность получаемых результатов расчетов.



Подсистема моделирования динамики движения



Подсистема геометрического и конечно-элементного моделирования



Подсистема анализа напряженно-деформированного состояния

Рис. 19. Иллюстрации работы отдельных подсистем моделирования силового воздействия и напряженно-деформированного состояния исследуемых рам тепловоза 2ТЭ10М

Выводы. В статье описаны различные варианты создания и функционирования “экспресс - моделей” и “экспресс - систем” для анализа напряженно-деформированного состояния сложных механических систем. Анализ опыта первоначальной эксплуатации предложенных подсистем и моделей позволяет сделать следующие выводы.

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

2. Как показала практика использования, применение “экспресс – моделей” и “экспресс – систем” позволяет рельефно показать влияние значимых факторов на прочностные и жесткостные параметры элементов сложных механических систем. При этом определяются как качественные стороны данных зависимостей, так и количественные характеристики.

3. Предложенная технология “ЭМ” и “ЭС” органически встраивается как в универсальные CAD/CAM/CAE-системы, так и в специализированные системы средней мощности.

4. Разработанные “ЭМ” и “ЭС” могут работать в автономном режиме, выступая в качестве мини – экспертной на ранних этапах проектирования элементов машиностроительных конструкций.

5. Предложенные технологии ускоренных исследований элементов сложных механических систем позволяют определять качественные стороны моделей, процессов, явлений, а также количественные характеристики внешних воздействий и граничных условий. Это дает возможность повысить достоверность расчетных моделей и точность результатов исследований.

6. Особую ценность предложенные в статье подходы демонстрируют при исследовании классов конструкций. В отличие от традиционных подходов, в которых в качестве результата выступает число, осциллограмма процесса или пространственное поле искомых величин, в разработанном методе основным результатом является достоверная (с точки зрения качественных особенностей и количественных значений параметров) расчетная модель.

7. Разработанные методы и построенные подсистемы позволяют организовывать базы данных по отдельным классам и типам конструкций. Кроме того, возможно создание соответствующих элементов баз знаний, позволяющих решать задачи определения вариантов проектных решений ЭМС, которые

обеспечивают заданные характеристики прочности, жесткости и надежности.

В качестве основного направления дальнейших исследований выступает задача интегрирования предложенных систем и моделей в мощные современные CAD/CAM/CAE-системы.

Список литературы: 1. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Сб. научн. тр. "Динамика и прочность машин". – Харьков: ХГПУ. – 1998. – вып.56.– С.175-181. 2. *Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.* Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – 2005. – № 1.– С.184-194. 3. *Мовшиович И.Я., Заярненко Е.И., Долгов В.А.* Исследование сопротивления срезу при штамповке листового материала // Технология и организация производства, 1975.– № 2.– С.28-30. 4. *Хмара С.М., Смолянинов В.П., Коломойцев А.А. и др.* О причинах выкрашивания твердосплавных вырезных матриц // Кузнечно–штамповочное производство, 1965. – №8.– С.21-23. 5. *Хмара С.М., Смолянинов В.П., Коломойцев А.А. и др.* К определению напряжений на режущих кромках вырезных твердосплавных матриц // Кузнечно–штамповочное производство. – 1966. –№ 6.– С.22-24.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 539.3

А.В.ТКАЧУК, канд. техн. наук, ***А.В.МАРТЫНЕНКО***, ***В.И.СЕРИКОВ***,
канд. техн. наук, ***Л.Н.БОНДАРЕНКО***, НТУ "ХПИ"

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

У статті описана технологія уточнення параметрів числових моделей елементів складних механічних систем на прикладі технологічного оснащення для механообробки та зварювальних операцій. На основі аналізу голографічних інтерферограм пристосовань виявлені характерні особливості деформування базових плит та призм, а також розраховані їх відносні переміщення.

In the article the technology of more precise definition of parameters of numerical models of elements of complicated mechanical systems is described on the example of technological rigging for mechanical and welding operations. On the basis of analysis of holographic interferograms of adaptations the characteristic features of deformation of base flags and prisms found out, and also their relative moving is calculated.

Актуальность. При численном моделировании напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем всегда остро стоит вопрос обоснования достоверных параметров и характеристик используемых численных моделей. Так, применение метода конечных элементов (МКЭ) [1] предполагает предварительное обоснование граничных условий, нагрузок, а также знание других существенных свойств исследуемого объекта.

В работах [2-5] предложены некоторые подходы к расчетно-экспериментальному обоснованию параметров численных моделей исследуемого объекта.