

1548427

На правах рукописи

ГОЛЬНИК Эдуард Рувимович

**МЕТОДЫ ДИСКРЕТНОЙ
МЕХАНИКИ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ
ПРЕССОВ**

Специальности:

01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов
и аппаратуры
05.03.05 — Процессы и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Воронеж — 1995

Работа выполнена
в Воронежском государственном техническом университете

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Л. И. Живов,
доктор технических наук, профессор Б. Г. Попов,
доктор технических наук, профессор Н. Н. Шапошников.

Ведущее предприятие:

Воронежское акционерное общество
по выпуску тяжелых механических прессов.

Защита состоится 2 ноября 1995 г. в 14 ч. 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 053.15.08
Московского государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана (107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
технического университета.

ноября 1995 г.

1548427

В. В. Дубинин

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1548427

Гольник Э.Р. Методы дискре

Объем 2,0 п. л. Тир. 100.
Баумана.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность темы данной диссертации определяется в широком смысле объективной необходимостью приоритетного развития в России и в ведущих промышленных странах мира машиностроения и родственных отраслей, образующих классический базис современной техники и технологии. Достижение этой стратегической цели требует решения комплекса научных, конструкторских и технологических проблем.

Проблема, которой посвящена настоящая работа, является остроактуальной и универсальной для большинства промышленных отраслей, в которых основные технические объекты представляют собой *системы деформируемых твердых тел*. К таким объектам относятся: технологические, прежде всего, металлообрабатывающие машины и машиностроительные комплексы, объекты аэрокосмической техники, транспорта, строительства, энергетики и т.п. Все многообразие такого рода объектов техники объединяет в исследуемый класс машин и конструкций то, что:

они проектируются с учетом решающей роли *механики* в анализе их состояний и работоспособности;

их механические *состояния* и функциональные *возможности* принципиально зависят от контактных взаимодействий деталей, совместно работающих в твердотельных системах.

Ключевая проблема проектирования машин и конструкций этого класса заключается в существовании серьезных трудностей математического моделирования указанных систем, именуемых далее *контактными*.

Необходимость высокоточного учета контактных взаимодействий представляется наиболее существенной при конструировании и прогнозировании качества работы металлообрабатывающих машин, в первую очередь, машин обработки давлением, среди которых особенно широко распространены механические *прессы*. К началу 1980-ых годов в технической политике в области машиностроения становится общепризнанной целесообразность опережающего выпуска тяжелых и уникальных прессов.

Между тем, к этому времени реальный уровень теоретического и программного обеспечения проектирования важнейших технологических машин, в том числе, кузнечно-штамповочных, уже явно не соответствует уровню высших мировых и отечественных достижений в таких передовых отраслях техники, как аэрокосмическая, судостроительная и т.п.

Анализ современной литературы по механике конструкций, применяемых в тех или иных отраслях техники, показывает, что уровень математического моделирования оказывается выше там, где с учетом специфики выпускаемых объектов соответственно развита компьютерная механика машин и конструкций определенного назначения.

Современные достижения в механике конструкций и машин обеспечили отечественные ученые А.В. Александров, В.М. Александров, Н.А. Алфутов, Л.И. Балабух, Н.В. Баничук, В.Л. Бидерман, И.А. Биргер, В.В. Болотин, Э.И. Григолюк, И.В. Демьянушко, В.С. Зарубин, А.В. Кармишин, В.П. Когаев, К.С. Колесников, М.С. Корнишин, Б.Я. Лашеников, О.В. Лужин, Р.Р. Мавлютов, Б.П. Макаров, Е.М. Морозов, В.В. Москвитин, В.И. Мяченков, В.В. Новожилов, И.Ф. Образцов, Я.Г. Пановко, В.Б. Петров, Е.П. Попов, В.А. Постнов, Л.А. Розин, В.А. Светлицкий, А.Г. Угодчиков, В.И. Усюкин, А.П. Филин, Н.Н. Шапошников и др.

Зарубежными лидерами в этой области являются Дж.Аргирис, К.Бреббия, Б.Ф. де Вебеке, Р.Галлагер, О.Зенкевич, С.Келси, Р.Ливсли, С.Лукаевич, Дж.Робинсон, К.Флетчер, Э.Хог, И.Ямада и др.

Многообразие машиностроительных конструкций делает вряд ли целесообразным создание универсальной компьютерной механики машин. Более эффективным представляется путь идентификации основных классов машин и разработки для каждого из них соответственно ориентированной механики. Согласно такой концепции в диссертации рассматривается проблема развития компьютерной механики контактных систем и на ее основе – компьютерной механики прессов.

В современную механику прессов и других машин обработки давлением внесли основополагающий вклад А.Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров, В.И. Власов, Н.С. Добринский, Л.И. Живов, А.И. Зимин, Е.Н. Ланской, И.Б. Матвеев, Г.А. Навроцкий, А.Ф. Нистратов, А.Г. Овчинников, Е.А. Попов, Г.Н. Ровинский, Б.В. Розанов, В.Е. Свистунов, Е.И. Семенов, М.В. Сторожев, А.И. Сурков и другие специалисты.

С середины 1970-ых годов в прессостроении наблюдается *парадокс*: наиболее ответственные и сложные детали автомобилей, самолетов, ракет проектируются с применением *высокоточных* численных методов, но при этом штампуются на прессах, которые рассчитываются на моделях значительно более *низкого* уровня, хотя от точности работы прессов зависит точность поковок штампуемых деталей.

Современные требования к технологическим машинам диктуются новейшей тенденцией: конкурентноспособность определяется не только традиционными показателями производительности, прочности, надежности, долговечности, экономичности машины, но и – главным образом – *качеством* выполняемой работы. Заданный уровень качества должен быть заложен на стадии проектирования. В прессостроении это сводится, в основном, к прогнозированию возможной (для проектного варианта конструкции) *точности размеров* получаемых поковок.

Специфика конструкций прессов заключается в том, что они представляют собой *замкнутые* системы деталей сложной формы, циклически работающих в условиях разнообразных, изменяющихся и подлежащих определению контактных взаимодействий, от которых решающим образом зависит распределение сил, действующих на детали.

Технологическая и конструкторская цели проектирования машин рассматриваемого класса приводят к необходимости единого системного подхода и создания на его основе специализированной ветви механики – компьютерной механики прессов, развиваемой в данной диссертации.

Предмет, цели и задачи компьютерной механики прессов должны относиться к области, входящей как в механику систем деформируемых твердых тел, так и в теорию расчета кузнечно-прессовых машин. Построение подобной *двуединой* научной дисциплины является комплексной проблемой, для решения которых должны быть созданы соответствующие эффективные методы. Настоящая диссертационная работа посвящена разработке таких методов и их целенаправленным приложениям.

Цели работы предусматривают:

создание – на уровне современных требований – *теоретического и программного обеспечения* высокоточного моделирования контактных систем деформируемых твердых тел, отражающих специфику конструкций и нагруженных состояний тяжелых технологических машин типа прессов;

внедрение программного обеспечения в САПР кривошипных прессов и численные *исследования закономерностей* распределения контактных сил, деформаций и напряжений во всех основных деталях с разработкой и реализацией методики совершенствования (приближенной оптимизации) проектируемых конструкций.

Методы исследования включают: метод конечных элементов (МКЭ) в перемещениях применительно к упругим телам; вычислительные методы линейной алгебры; методы программирования на алгоритмических языках высокого уровня; тензометрические измерения.

Научная новизна диссертации в целом заключается в том, что в ней впервые:

предложены методы, алгоритмы и программы компьютерной механики, предназначенные для *трехмерного моделирования упругих контактных систем* деталей в условиях, отражающих с требуемой для проектирования точностью реальные механические состояния и особенности конструкций тяжелых технологических машин;

решены задачи конечноэлементного анализа тяжелых кривошипных прессов в широком диапазоне – от применения структурного подхода к расчету деталей в автономных подсистемах до исследования закономер-

ностей работы единой контактной системы деталей пресса и штампового блока с целью повышения уровня обоснованности и качества принятия решений в процессе конструкторско-технологического проектирования.

Новизна конкретного содержания работы складывается из представленных к защите основных результатов.

На защиту выносятся:

теория трехмерного дискретного моделирования статических систем двух контактно взаимодействующих линейно-упругих тел на основе предложенного *смешанного метода контактных сил и переносных перемещений* с полным учетом всех возможных кинематических степеней свободы и *доказательством инвариантности решения* по отношению к выбору условных закреплений раздельно кодируемых тел при определении их податливости (по МКЭ или иным численным методом);

обобщение предложенного смешанного метода контактных сил и переносных перемещений на *класс статических контактных систем любого конечного числа упругих тел*, имеющих произвольные конфигурации, взаимные расположения, варианты технологического нагружения, начальные (проектные и иные) зазоры, натяги и их сочетания в больших и малых зонах контактов по различным поверхностям;

постановка и решение трехмерных задач статики контактных систем любого конечного числа упругих тел, взаимодействующих по *согласованным*, т.е. первоначально совпадающим (без зазоров) поверхностям с кулоновским трением, на основе предложенного *метода односторонних связей* и применения конечно- и суперэлементной аппроксимации тел;

постановка задач и методика эффективного моделирования по МКЭ *монокотловых упругих конструкций*, состоящих из массивных и тонкостенных частей, рассматриваемых в *различных напряженных состояниях*;

структура программного комплекса МАКС (*Моделирование и Анализ Контактных Систем*), проблемно-ориентированного на высокоточное моделирование по МКЭ совместно работающих деталей тяжелых технологических машин (при реализации в MS-DOS и UNIX);

результаты моделирования и *анализ специфики полей контактных сил, деформаций и напряжений* основных деталей тяжелых кривошипных горячештамповочных и листоштамповочных прессов, исследуемых на основе *структурного подхода*;

методика и результаты практического применения в САПР кривошипных прессов моделирования по МКЭ типовых конструкций и их *итерационного совершенствования* (неформальной оптимизации), в том числе, с учетом *технологических возможностей* изготовления деталей, по принципу равнонапряженности с исследованными прототипами;

постановка задачи двумерного моделирования по МКЭ *единой системы деталей* двухкривошипного пресса и результаты исследования характерных (для целой гаммы аналогичных машин) *закономерностей* влияния эксцентриситетов усилий штамповки и проектных зазоров на асимметрию и характер распределения в стыках пресса контактных сил, позволяющих приближенно определять – на основе *анализа чувствительности* машины – зависимость возможной точности технологических процессов от общей податливости системы деталей пресса;

результаты анализа по МКЭ *конструкторско-технологических особенностей* прессов исследуемого типа, в том числе, определение: нового, обобщающего представления о жесткости пресса как о множестве нелинейных параметров, зависящих от зазоров и эксцентриситетов нагружения; влияния деформируемости контуров штампового пространства, различного конструктивного исполнения штампов, несимметрии зазоров и т.п.;

постановка задачи и результаты *трехмерного моделирования* по МКЭ *единой контактной системы* деталей рассматриваемого двухкривошипного пресса при внецентренных технологических нагружениях, в том числе, определение вклада основных деталей в податливость пространственной системы с учетом предварительной затяжки станины, оценка уровней точностей исследований пресса на двумерной модели и правомерности выделения автономных подсистем.

Достоверность результатов подтверждается:

специальным теоретическим доказательством и численной проверкой инвариантности и корректности решений по смешанному методу контактных сил и переносных перемещений;

тестовым моделированием – на базе комплекса МАКС – контактных систем, для которых известны аналитические решения;

экспериментальными исследованиями лабораторных моделей и статическими испытаниями конструкций в цехе сборки прессов.

Практическая ценность работы определяется тем, что вследствие ее выполнения:

разработан и внедрен в практику проектирования отвечающий современным требованиям и не имеющий аналогов программный комплекс МАКС, необходимый для эффективного функционирования САПР кривошипных прессов и других тяжелых технологических машин;

стала возможной замена физических экспериментов на моделях проектируемых деталей более информативными и экономичными численными экспериментами, соответствующими методологии САПР;

развитие отечественного прессостроения получило импульс в направлении решения *важной народнохозяйственной проблемы*, связанной с

повышением качества научных и конструкторских разработок до уровня высших достижений в машиностроении.

Внедрение результатов диссертации осуществлено поэтапно, по мере последовательного завершения конкретных разделов, в 1981 – 1994 годы в Головном конструкторском бюро (ГКБ) Воронежского акционерного общества "Тяжмехпресс" (ВАО ТМП). В настоящее время в отделе САПР – при ежегодном расширении диапазона *систематического* применения программ комплекса МАКС – проводится моделирование и совершенствование конструкций практически *всех ответственных деталей* проектируемых кривошипных горячештамповочных, листоштамповочных и иных прессов в широком диапазоне номинальных усилий*. За счет повышения точности информации о напряжениях и деформациях получены конструкции, которые по экспертной оценке имеют *близкие к оптимальным* показатели прочности, жесткости и – зависящего от жесткости – качества технологических операций, а также надежности, долговечности и экономичности.

Реальный экономический эффект от внедрения в ВАО ТМП программного обеспечения, представленного в данной диссертации, составил в 1982 – 1987 годы около 1 млн. рублей (в масштабах цен указанного времени).

Некоторые основные результаты диссертации были использованы в конструкторских разработках реальных объектов аэрокосмической техники, мостостроения, робототехники и строительного машиностроения.

В настоящее время программный комплекс МАКС, получивший сертификат Госстандарта России (№ 00206839 ГОСТ Р.Р.U.CV02.1.4.0006), представлен на международный рынок промышленной информатики.

Теоретическое и программное обеспечение, содержащееся в диссертации, внедрено в учебный процесс в Воронежском государственном техническом университете (ВГТУ) при подготовке аспирантов, соискателей и студентов, обучающихся по индивидуальным планам.

Апробация работы проведена на следующих съездах и конференциях:

Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Алма-Ата, 1981.

Вторая Всесоюзная научная конференция "Смешанные задачи механики деформируемого твердого тела". Днепропетровск, 1981.

*) Номинальное значение равнодействующей технологических давлений, развиваемых прессом, определяется термином "усилие", обозначающим первый из основных параметров пресса, которые предписывает ГОСТ 6 809 – 87 Е "Прессы кривошипные горячештамповочные".

Восьмая Всесоюзная конференция по прочности и пластичности. Пермь, 1983.

Всесоюзное отраслевое научно-техническое совещание по основным направлениям развития кузнечно-прессового оборудования в 12-й пятилетке. Воронеж, 1986.

Шестой Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Ташкент, 1986.

Одиннадцатая Всесоюзная конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности. Волгоград, 1989.

Международная конференция и выставка по САПР "MICAD-90". Париж, 1990.

Международная научно-техническая конференция "Опыт и перспективы развития математического, программного и технического обеспечения САПР в прессостроении". Воронеж, 1990.

Международная конференция и выставка по САПР "MICAD - 91". Париж, 1991.

Международная выставка "Softtool - 93". Москва, 1993.

Пятая Международная выставка компьютерной техники, коммуникаций и конференций "КОМТЕК'94", Москва, 1994.

Второй Международный симпозиум по контактной механике, Марсель, 1994.

Основные результаты, вошедшие в данную диссертацию, были представлены также на различных научных семинарах по проблемам механики, машиностроения и САПР в ряде высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов.

В 1994 г. основное содержание работы было доложено и одобрено на выездном заседании (в г. Воронеже) Головного совета "Машиностроение" Госкомитета РФ по высшему образованию.

Публикации: результаты диссертации представлены в 31 печатной работе.

Структура и объем работы: диссертация состоит из двух частей, включающих введение, 7 разделов, заключение (общие выводы и перспективы), список литературы из 389 наименований, приложения. Основное содержание работы изложено на 345 страницах, включая 69 рисунков, 20 таблиц. Общий объем диссертации составляет 377 страниц.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕССОВ. НАПРАВЛЕНИЯ И ЦЕЛИ РАБОТЫ

Исследуемый класс конструкций идентифицируется как система упругих деталей сложной формы, контактирующих в условиях доминирующего влияния статических нагружений детерминированного характера.

Возможности получения высокоточной, в первую очередь, конечно-элементной информации о трехмерных полях напряжений и деформаций деталей тяжелых машин этого класса были выявлены из обзора литературы и анализа достижений в двух областях применения МКЭ – в прессостроении и в механике контактных систем.

Пионерские исследования по МКЭ деталей прессов, которые выполняли М. Гайгер, И. Шемперг, Э. Дёже, В. Вегенер, Г.П. Монахов-Ильин, А.И. Сурков, В.Б. Петров и др., выявили, с одной стороны, принципиально высокую точность конечноэлементных расчетов деталей при действии *заданной* нагрузки, но, с другой стороны, – отсутствие подходящего для машин обработки давлением и других технологических машин достаточно общего метода учета контактных взаимодействий.

Современную теорию контактных задач создали А. Синьорини, К. Джонсон, В.М. Александров, А.И. Биргер, И.И. Ворович, Л.А. Галин, Р.В. Гольдштейн, В.И. Моссаковский, Г.Я. Попов, А.С. Кравчук, Дж. Калкер, И. Кикучи, Л. Херрман, Т. Конри, А. Сейрег, Э. Хог, С. Чань, Я. Тьюба, В. Фредриксон, М.В. Блох, А.Г. Кузьменко, И. Главачек, Я. Гаслингер, А.Н. Подгорный, Л.Б. Цвик, П.С. Можаровский и др. Несмотря на разнообразие подходов и методов моделирования по МКЭ контактных систем, ни один из них к середине 1980-ых годов не был свободен от принципиальных трудностей, связанных с *трехмерностью* конструкций и включением *более двух* тел в системы деталей прессов и родственных машин.

Наиболее распространенный в мировой практике машиностроительных фирм *метод контактного слоя* предполагает введение в стыках тел специальных слоев элементов, моделирующих ту или иную принятую зависимость между контактными деформациями и напряжениями. Контактные элементы *объединяют* ансамбли тел в единую структуру, имеющую *наибольшую* (для данного варианта разбиения по МКЭ) суммарную размерность, что чрезвычайно осложняет итерационный поиск зон контактов.

Методы *шагового нагружения* сводятся к *позтапному* приложению нагрузки и кусочно-линейному описанию нелинейного процесса контактного деформирования с итерационной коррекцией совместности граничных условий на каждом шаге нагружения. Подобные методы практически дееспособны только в двумерных задачах.

Весьма эффективной представляется идея *метода сил*, однако применительно к контактным задачам этот метод не имел необходимого теоретического обоснования и экономичной процедуры реализации.

Таким образом, *первый* общий вывод, определяющий стратегию предлагаемого исследования, заключается в необходимости приоритетного решения соответствующей проблемы механики контактных систем с целью последующего применения созданной математической модели в конструкторских и технологических задачах проектирования прессов.

Из анализа особенностей идентифицированного класса машин, прежде всего, тяжелых прессов вытекает *второй* общий вывод: ввиду сложности конфигураций деталей прессов и контактного характера их совместной работы прямое применение к ним строго формализованных математических методов, тем более, оптимизации конструкций, сопряжено с чрезвычайно большими объемами вычислений; реальное использование высокоточных дискретных моделей требует в настоящее время *компромиссного* сочетания численных и экспертных решений.

С выходом из тупиков, в которые заводит многомерность моделей при возрастании сложности проектируемых объектов, связан и *третий* общий вывод: о целесообразности разработки, применения и сочетания структурного и системного подходов к моделированию машин.

Структурный подход основан на неформальном анализе специфики полной структуры заданной системы с целью ее *декомпозиции* на те или иные *автономные* подсистемы, т.е. такие, для которых возможно достоверное задание всех внешних – по отношению к подсистеме – силовых и кинематических граничных условий. При моделировании автономной подсистемы даже в трехмерном напряженном состоянии размерность конечноэлементной задачи может быть приемлемой для решения на серийных компьютерах.

Системный подход – в том смысле, в каком он понимается в данной работе, – предполагает моделирование и анализ *единой* контактной системы основных деталей машины с *двуетапной* целью:

высокоточное исследование напряженных состояний совместно работающих деталей с учетом эксцентриситетов технологических нагружений, проектных зазоров, натягов и их сочетаний на асимметричные распределения внутренних силовых факторов, влияющих на прочность, долговечность и оптимальные формы проектируемых конструкций;

прогнозирование достижимой на данной машине точности технологических операций, зависящей от упругой и контактной деформируемости системы деталей в целом.

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДИСКРЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ТРЕХМЕРНЫХ УПРУГИХ ТЕЛ

Постановка задачи исследования идентифицированного класса машин и конструкций проблемно-ориентирована на априорно устойчивые статические системы произвольного конечного числа линейно-упругих деталей, имеющих любые практически встречающиеся в машиностроении (и родственных отраслях) варианты конфигураций, взаиморасположения и контактирования при наличии начальных зазоров, натягов и их сочетаний в больших и малых зонах нелинейных взаимодействий тел.

В основу предлагаемой теории положен алгоритм моделирования системы двух тел (рис. 1), являющийся *базисным* для последующего обобщения на контактные системы любого конечного числа тел.

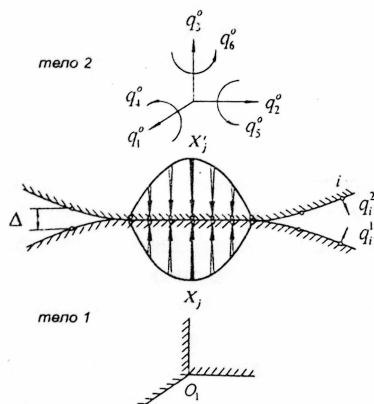


Рис. 1. Дискретная модель контактной системы двух тел

Два линейно-упругих трехмерных гладких тела произвольной формы контактно взаимодействуют при наличии начального зазора Δ между ними; *натяг*, если он есть, учитывается как отрицательный зазор. Тело 1 – по условию или предположению – не имеет кинематических степеней свободы; тело 2 имеет до шести таких степеней свободы.

Введены две системы отсчета: *абсолютная* с началом в действительно или условно закрепленной от перемещений точке тела 1 и *подвижная* с началом в произвольной точке тела 2. При деформировании

тел локальные окрестности точки – начала отсчета, а с ними и оси подвижной системы совершают как жесткое целое *переносное* перемещение, характеризуемое *обобщенными* координатами q_k^0 ($k = 1, \dots, s$), где $s \leq 6$. Координаты q_k^0 , зависящие от выбора начала их отсчета, определяют величины, понимаемые как кинематические, в данном случае, переносные перемещения, соответствующие представлению об условно недеформируемом теле, с которым жестко связана подвижная система отсчета. Перемещения точек тела относительно последней происходят за счет его деформирования и далее называются *относительными*.

На предполагаемых с запасом поверхностях контакта рассматриваются N пар сопряженных точек, каковыми при использовании МКЭ явля-

ются узлы элементов, сетки которых строятся с учетом практического обеспечения сопряженности, т.е. их "точного" вхождения в контакт при нагружении тел.

Абсолютные перемещения q_i^1 и q_i^2 сопряженных точек пары i по нормальям к поверхностям тел 1 и 2 не должны в сумме превышать зазора

$$q_i^1 + q_i^2 \leq \Delta_i. \quad (2.1)$$

Выражения q_i^1 и q_i^2 , записанные на основе метода сил, в варианте *раздельного кодирования* структурно различаются тем, что в перемещение q_i^2 , относящееся к кинематически подвижному телу, помимо *относительной компоненты* за счет деформируемости, входит заранее *неизвестное переносное перемещение* по нормали q_i^e узла i тела 2.

Условие контактирования сопряженных узлов пары i имеет вид:

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{ij}^1 + \xi_{ij}^2) X_j + \xi_{iP}^1 + \xi_{iP}^2 + q_i^e = \Delta_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.2)$$

где X_j – искомые нормальные контактные силы в узлах пары j ; ξ_{ij}^v – коэффициенты влияния (податливости) каждого из тел ($v = 1, 2$) в сопряженных узлах по нормальям; ξ_{iP}^v – перемещения узлов по тем же направлениям при деформировании тела v заданной нагрузкой.

Величины ξ_{ij}^v и ξ_{iP}^v зависят от заданных или выбранных условий закрепления тел, а перемещение q_i^e – от выбора начала отсчета осей тела 2. В диссертации выполняется (и далее – на уровне принципиального подхода – излагается) доказательство *независимости* получаемых результатов от вариантов условного закрепления кинематически подвижных тел.

Символически записанные члены q_i^e выражаются через координаты q_k^0 с помощью кинематической матрицы $[A]$, определяющей связь

$$\{q^e\} = [A]\{q^0\} \quad (2.3)$$

между вектором $\{q^e\}$, содержащим N компонентов q_i^e , и вектором $\{q^0\}$, состоящим из s координат q_k^0 . Из соотношения (2.3) следует выражение

$$q_i^e = \sum_{k=1}^s A_{ik} q_k^0, \quad (2.4)$$

раскрывающее смысл коэффициентов A_{ik} как перемещений узла i тела 2 вдоль соответствующей нормали при перемещении этого тела на $q_k^0 = 1$.

Система N уравнений формируемого метода, а именно – *смешанного метода контактных сил и переносных перемещений*

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{ij}^1 + \xi_{ij}^2) X_j + \sum_{k=1}^s A_{ik} q_k^0 = \Delta_i - \xi_{iP}^1 - \xi_{iP}^2, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.5)$$

содержит $N+s$ основных неизвестных: N искомым контактных сил X_j и s переносных перемещений $\{q_k^0\}$.

Для определенности решения задачи система N уравнений (2.5) дополняется s уравнениями равновесия тела 2, которым придается форма

$$\sum_{j=1}^N A_{jm} X_j = -P_m; \quad m=1, \dots, s, \quad (2.6)$$

где P_m – суммы проекций ($m=1,2,3$) и моментов ($m=4,5,6$) заданных сил по отношению к координатным осям.

Объединенная система уравнений (2.5) и (2.6) является основой алгоритма предлагаемого смешанного метода.

Для вычисления по МКЭ входящих в (2.5) коэффициентов ξ_{ij}^v и ξ_{ij}^w проводится частичное обращение глобальных матриц жесткости тел.

Контактные силы и, следовательно, узлы, где они действуют, находятся итерационным путем. Узлы, в которых по расчету на данном этапе получаются $X_i < 0$, остаются в числе контактных и на следующем этапе, где исключаются узлы с $X_i > 0$. На каждом этапе проверяются условия взаимного непроникания тел в узлах вне зоны контролируемого контакта.

Итерационный поиск завершается, когда очередной этап не выявляет необходимости изменения зоны контакта. От совместного действия заданных и контактных сил выполняется моделирование по МКЭ (с использованием уже построенных матриц жесткости) полей узловых перемещений и напряжений в телах контактной системы.

При построении смешанного метода в диссертации решается весьма важная проблема, актуальная для механики контактных систем, исследуемых по методу сил. Суть проблемы – в множественности вариантов уравнивания единичной силы, действующей на свободное тело, и, следовательно, в неоднозначности соответствующих значений коэффициентов влияния.

Доказательство инвариантности решения по смешанному методу производится на основе теоремы о взаимности работ. Без ограничения общности вывода рассматривается в двух состояниях линейно-упругое тело, контактирующее с абсолютно твердым телом (рис. 2).

В состоянии I тело закреплено в узле A связями, реакции которых приводятся к силе r_A' и паре сил с моментом m_A' , совместно уравнивающим силу $X_i = 1$, приложенную для определения коэффициентов влияния $\xi_{ji}' = \xi_{ij}'$ ($i, j=1, \dots, N$). В состоянии II тело аналогично закреплено в узле B, где r_B' и m_B' возникают от $X_j = 1$, определяющей $\xi_{ji}'' = \xi_{ij}''$.

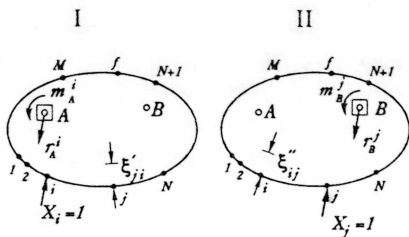


Рис. 2. Состояния контактирующего тела в двух вариантах единичных нагружений и условных закреплений

В состоянии I (в II) имеют место *линейное и угловое* перемещения узла B (узла A), на которых совершают виртуальную работу сила r_B^j и момент m_B^j (r_A^i и m_A^i). Компоненты перемещений в состоянии I по направлениям векторов r_B^j и m_B^j обозначены через ξ_{Bi}^j и ϕ_{Bi}^j ; в состоянии II направления r_A^i и m_A^i соответствуют ξ_{Ai}^j и ϕ_{Ai}^j .

Из уравнения теоремы о взаимности работ в состояниях I и II

$$1 \cdot \xi_{ji}^j + r_B^j \xi_{Bi}^j + m_B^j \phi_{Bi}^j = 1 \cdot \xi_{ij}^j + r_A^i \xi_{Ai}^j + m_A^i \phi_{Ai}^j \quad (2.7)$$

следует выражение, определяющее ξ_{ij}^j .

Для выявления соответствующей зависимости между перемещениями ξ_{ip}^j *внешняя нагрузка* представляется системой *эквивалентных сил* P_f , приложенных в узлах f ($f=N+1, \dots, M$). Теорема о взаимности работ для состояния I и состояния под действием силы $P_f = 1$, реакции r_B^f и момента m_B^f связи B дает соотношение для ξ_{ij}^j , аналогичное (2.7), и далее ξ_{ip}^j .

Подстановка полученных взаимных зависимостей в условия контактирования (2.2) для вариантов со связями B и A условных закреплений позволяет получить уравнения с группировкой слагаемых, содержащих общие множители $\xi_{Bi}^j, \phi_{Bi}^j, r_A^i$ и m_A^i . Анализ коэффициентов при этих множителях приводит к доказательству имеющей место инвариантности.

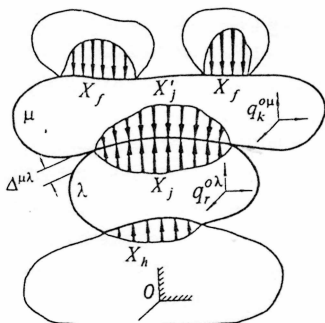


Рис. 3. Дискретная модель контактной системы конечного числа трехмерных упругих тел

Обобщение базисного алгоритма смешанного метода на систему любого конечного числа тел (рис. 3) порождает математическую модель, основой которой являются уравнения для двух любых взаимодействующих тел μ и λ и приложенных к ним контактных сил, в том числе со стороны "третьих" тел:

$$\sum_{j=1}^{N^{\mu\lambda}} (\xi_{ij}^{\mu} + \xi_{ij}^{\lambda}) X_j + \sum_{f=1}^{N^{\mu}} \xi_{if}^{\mu} X_f + \sum_{h=1}^{N^{\lambda}} \xi_{ih}^{\lambda} X_h + \sum_{k=1}^{S^{\mu}} A_{ik}^{\mu} q_k^{om} + \sum_{r=1}^{S^{\lambda}} A_{ir}^{\lambda} q_r^{ol} = \Delta_i^{\mu\lambda} - \xi_{ip}^{\mu} - \xi_{ip}^{\lambda}; \quad i = 1, \dots, N^{\mu\lambda}. \quad (2.8)$$

К системе N уравнений типа (2.8) присоединяются s уравнений *равновесия всех кинематически подвижных тел*. Уравнениям статики каждого такого тела придается форма, аналогичная (2.6). В частности, для тела μ

$$\sum_{l=1}^{N_r^\mu} A_{lm} X_l^\mu = -P_m; \quad m=1, \dots, s^\mu, \quad (2.9)$$

где N_r^μ — число всех граничных узлов тела μ , в которых приложены искомые контактные силы, действующие на него со стороны всех смежных тел ($N_r^\mu \geq N^{\mu\lambda}$).

Объединенная система N уравнений дискретных условий контактирования (2.8) и s уравнений равновесия (2.9) является *основой полного алгоритма* смешанного метода контактных сил и переносных перемещений, обеспечивающего моделирование исследуемого класса контактных систем.

Условия взаимного непроникания тел за пределами контролируемых зон их контактов записываются на базе общего условия (2.8). Так, для дискретной области границ контактирующих тел μ и λ на каждом n -ом этапе итераций строится неравенство

$$\sum_{j=1}^{N_n^{\mu\lambda}} (\xi_{ij}^\mu + \xi_{ij}^\lambda) X_j + \sum_{f=1}^{N_n^\mu} \xi_{if}^\mu X_f + \sum_{h=1}^{N_n^\lambda} \xi_{ih}^\lambda X_h + \sum_{k=1}^{S^\mu} A_{ik}^\mu q_k^{\text{ou}\mu} + \sum_{r=1}^{S^\lambda} A_{ir}^\lambda q_r^{\text{ou}\lambda} + \xi_{iP}^\mu + \xi_{iP}^\lambda < \Delta_i^{\mu\lambda} \quad (2.10)$$

и проверяется его выполнение во всех парах i , не вошедших в $N_n^{\mu\lambda}$, но способных, по предположению, вступить в контакт. Если для проверяемой пары узлов условие (2.10) не выполняется, то она вводится в зону контакта следующего приближения. Итерационный поиск завершается, когда очередной этап оставляет без изменений все зоны контактов.

Результатом решения задачи является информация, содержащая:

основные неизвестные метода — *контактные силы* во всех зонах взаимного прижатия тел и *переносные перемещения* всех кинематически свободных тел;

полученные по МКЭ — от действия найденных контактных и заданных внешних сил — *поля узловых перемещений*, характеризующие деформированные состояния, и *поля напряжений* в исследуемых телах моделируемой системы.

Значения напряжений могут быть использованы как *данные для прогнозирования прочности* по тем или иным известным критериям.

Принципиальным преимуществом смешанного метода является его направленность на *минимизацию* общего объема вычислений. Основная идея, ведущая к этой цели, связана с разъединением и раздельным кодированием контактирующих тел на этапах подготовки данных. При этом:

принят простейший вариант итерационного поиска зон контактов путем прямого решения последовательно корректируемых систем линейных уравнений минимально возможного порядка, практически равного общему числу пар сопряженных узлов (вместо известного подхода на базе квадратичного программирования, труднореализуемого в трехмерных задачах для систем многих тел);

при вычислении коэффициентов влияния, входящих в разрешающие уравнения смешанного метода, обращаются только соответствующие минимальные части матриц жесткости тел, для которых ширина ленты минимизируется по методу Катхилла-Макки;

Высокий уровень точности и широкий диапазон применимости смешанного метода подтверждается результатами его тестирования и анализа на ряде классических и иллюстративных контактных задач.

3. МЕТОД ОДНОСТОРОННИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕЛ С СОГЛАСОВАННЫМИ КОНТАКТНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Метод предназначен для конечноэлементного моделирования систем любого конечного числа тел, взаимодействующих по *согласованным* контактными поверхностям, под которыми понимаются геометрически совпадающие в недеформированных состояниях области контактов без начальных зазоров и натягов. Тела могут быть гладкими или иметь в зонах их взаимного прижатия кулоновские силы трения.

Специфика рассматриваемых систем состоит в том, что: первоначально не имеющие зазоров стыки при деформировании нагруженной системы могут в одних, заранее не известных зонах сжиматься, а в других – раскрываться; возможно взаимное проскальзывание тел в стыках, если этому не препятствуют силы трения; в отличие от нелинейного характера формирования зон контактного сжатия тел с начальными зазорами, процессы контактного деформирования гладких согласованных поверхностей являются *линейными*: контактные силы в зонах сжатия и зазоры в зонах раскрытия стыков линейно зависят от внешней нагрузки, причем при одномасштабном изменении модулей внешних сил границы зон сжатия и раскрытия стыков сохраняются.

Алгоритм итерационного поиска зон сжатия и раскрытия стыков основан на введении в модели первого этапа между всеми попарно сопряженными узлами односторонних связей, которые:

реализуются в виде условных сколь угодно жестких (на сжатие-растяжение) и коротких "стержней" с шарнирами на "концах";

включаются как вспомогательные элементы в единый ансамбль основных конечных элементов всех тел при их общем кодировании;

обеспечивают в зонах сжатия взаимное непроникание тел, но допускают их проскальзывание относительно друг друга;

несут на своих "концах" в зонах сжатия соответственно приложенные кулоновские силы трения;

сохраняются в модели лишь в тех случаях, когда по результатам расчета всего ансамбля на очередном этапе они оказываются сжатыми.

Цикл итераций завершается построением модели, в которой все связи-стержни на очередном этапе оказываются сжатыми.

На основе предложенной методики учета сил трения, не требующей увеличения общего объема вычислений, установлено, что в контактных системах исследуемого подкласса влияние кулоновского трения в стыках сводится к роли фактора, в целом *понижающего* уровень напряжений.

Метод односторонних связей математически *тождествен* применению в задачах нелинейного программирования *методу штрафных функций* с простейшим типом штрафа – бесконечным барьером. Это позволяет:

не рассматривать специально вопросы единственности и сходимости решений, поскольку метод штрафных функций имеет полное теоретическое обоснование;

взять за основу компромиссный подход к численной реализации метода барьеров, т.е. принимать жесткость односторонних связей достаточно, но не чрезмерно большой, чтобы практически обеспечить как взаимное непроникание тел, так и обусловленность глобальной матрицы.

Для выявления целесообразности применения метода односторонних связей или смешанного метода при моделировании той или иной конструкции из рассматриваемого подкласса предлагаются *критерии рационального выбора* одного из двух методов, сравниваемых по экономичности, т.е. по объемам требуемых вычислений.

4. КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИССЛЕДУЕМОГО КЛАССА

Для дискретного моделирования тел произвольных конфигураций выбран вариант *МКЭ в перемещениях*, соответствующий принципу виртуальных перемещений Лагранжа или, что то же самое, принципу стационарности потенциальной энергии. Предпочтение этой схеме перед другими отдано из-за фундаментальности и простоты ее теоретических понятий и наибольшей степени практической разработанности алгоритмов.

Концепция построения библиотеки элементов предусматривает, что:

в библиотеку первоначально включается в некотором смысле минимально необходимое число типов элементов;

типы элементов удовлетворяют требованиям простоты, универсальности, возможности расширения и обновления библиотеки;

15418428

элементы библиотеки образуют базис моделирования большинства деталей основных несущих машиностроительных конструкций.

В качестве *базисных* элементов приняты:

двумерные и трехмерные симплекс-элементы, аппроксимирующие массивные тела, а также элементы, совместные с симплексами и полученные за счет добавления к ним новых сторон или граней;

предназначенные для тонкостенных конструкций плоские элементы – пластинки, деформируемые силами в срединной плоскости и силами, вызывающими поперечный изгиб, при суперпозиции указанных состояний.

В дополнение к базисным элементам в библиотеку включены:

простейшие двумерные и трехмерные *изопараметрические* элементы; объемные элементы в форме *произвольных* пентаэдров и гексаэдров, а так же близких им шести- и восьмиузловых объемных фигур, представляемых различными совокупностями тетраэдров с теми же узлами при последующем *упорядоченном осреднении* компонентов матриц жесткости.

В предложенном конечноэлементном обеспечении предусмотрены возможности моделирования двух специальных подклассов деталей:

тонкостенных деталей с *произвольно* ориентированными пластинами (для предотвращения случаев вырожденности глобальной матрицы);

деталей, образованных из монолитно стыкуемых массивных и тонкостенных частей, с разработкой и реализацией методов (*упругого дискретного защемления* и – в общей постановке – *переходных элементов*), позволяющих рассматривать в едином ансамбле различные по конфигурации части в соответственно разных напряженных состояниях.

Основой программного обеспечения разработанных методов компьютерной механики контактных систем является *проблемно-ориентированный комплекс МАКС* (Моделирование и Анализ Контактных Систем), который:

алгоритмически построен на базе смешанного метода контактных сил и переносных перемещений и реализован на языках Си и Фортран ;

функционирует в MS-DOS и в OS UNIX на PC AT-386 и более мощных компьютерах;

имеет открытую архитектуру;

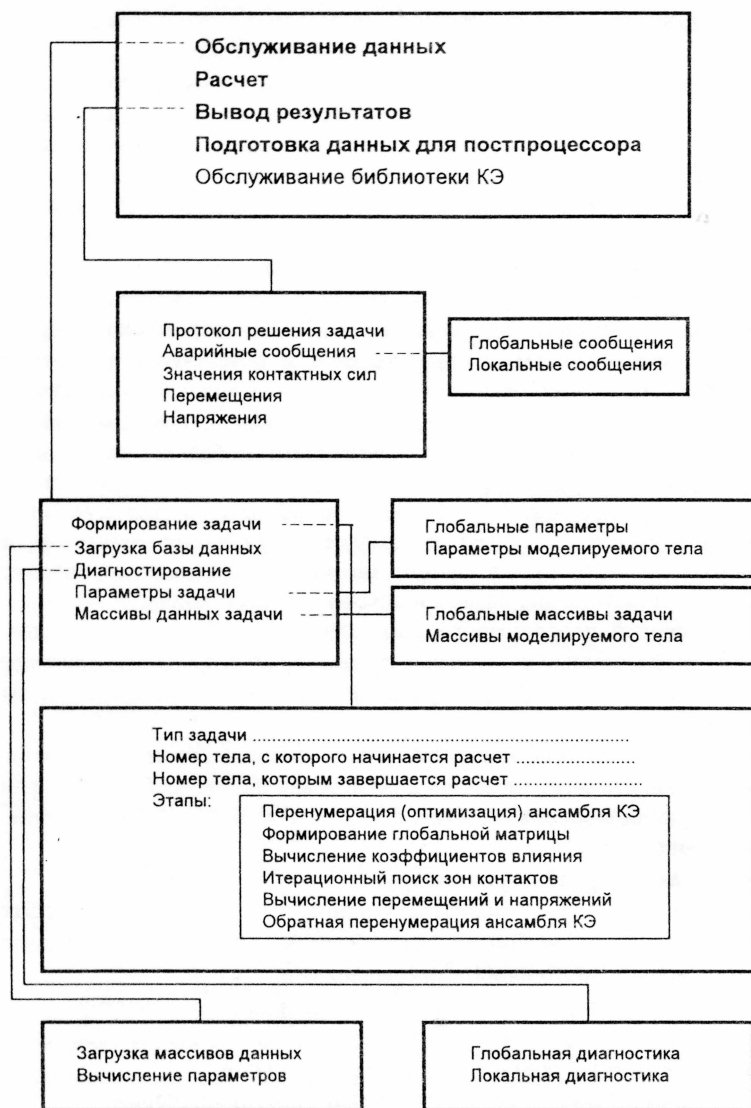
предусматривает подготовку данных специальным препроцессором и альтернативный выбор: текстового редактора и процедуры решения задачи – за один прогон либо с прерываниями;

выполняет функции, сведенные в иерархическую систему меню;

содержит сервисные средства: диагностики, ведения протоколов поэтапных решений и документирования результатов;

оснащен специальным графическим постпроцессором.

Система иерархически связанных меню комплекса МАКС имеет следующую структуру:



ЧАСТЬ II : КОНСТРУКТОРСКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МЕХАНИКИ ПРЕССОВ

5. СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД : МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ АВТОНОМНЫХ КОНТАКТНЫХ ПОДСИСТЕМ ДЕТАЛЕЙ КРИВОШИПНЫХ ПРЕССОВ

Структурный подход предусматривает обоснованную *декомпозицию* сложной единой системы деталей машины на более простые подсистемы, допускающие автономное моделирование с достаточной точностью на базе конечноэлементных ансамблей приемлемой размерности. Возможности такого подхода резко возрастают при симметрии конструкции и нагружения.

Методический принцип структурного подхода к машине в целом предполагает последовательный переход от одной автономной подсистемы к другой, имеющей с ранее рассмотренной общую деталь.

Методика и порядок декомпозиции иллюстрируются на примере *типовой конструкции* машин, признанных одними из лучших в современном прессостроении и образующих гамму двухкривошипных горячештамповочных прессов в диапазоне усилий от 16 МН до 160 МН. Последовательность шагов декомпозиции сконструированного пресса идет в направлении "от технологических нагрузок", однако само конструирование происходит в противоположном порядке: с подсистемы, содержащей наиболее напряженную и определяющую габариты всей системы деталь – эксцентриковый вал.

Анализ вариантов *подсистемы, содержащей эксцентриковый вал*, и выполненное исследование подсистем вала и стоек по смешанному методу, позволили установить, что:

контактные силы, приложенные к валу со стороны стойки, характеризуются эпюрой – поверхностью двоякой кривизны, причем распределение сил по верхней образующей шейки вала весьма близко к линейному "закону треугольника";

деформации подсистемы в целом складываются из общих и локальных, в том числе, контактных деформаций, более всего влияющих на podatливость конструкции;

в поле напряжений вала, умеренно зависящих от начальных зазоров, выделяются две зоны концентраций напряжений: в галтельных переходах (на максимальном уровне) и в зоне интенсивного контакта вала и стойки.

Исследование *подсистемы деталей составной станины* по методу односторонних связей позволило выявить следующие основные особенности нагруженных состояний стола, стоек и траверсы.

В состоянии затяжки:

стык стойки и траверсы неравномерно сжат по всей площади начального контакта, но стык стойки и стола частично раскрывается в цент-

ральной зоне прогибающейся вверх горизонтальной пластины-перемычки, соединяющей нижние торцы стоек;

наиболее напряженной оказывается зона рабочей плиты стола в области примыкания к ней изогнутых ребер стола;

стойка сжимается так, что в ее коробчатой колонне имеет место волнообразное выпучивание внутренней пластины вблизи конструктивного окна и круговой цилиндр опорной втулки деформируется в овальный.

В состоянии центрального технологического нагружения:

стык стойки и траверсы раскрывается не только в центральной части перемычки, как при натяжке, но и во внутренней области, где штамп воздействует на стол;

поле напряжений стола под совместным действием штампа и стяжных гаек имеет в целом более высокий уровень сжимающих напряжений, чем при натяжке;

опорная втулка стойки получает форму вертикального овала и стойка в целом несколько разгружается от напряжений сжатия;

деформации и напряжения траверсы, как и при натяжке, остаются на относительно невысоком уровне.

По схеме декомпозиции, предложенной для горячештамповочных прессов, проведено моделирование ряда типовых для листоштамповочных прессов *подсистем, содержащих тонкостенные ползуны и массивные плиты штампа*. Выявлено, что:

тонкостенные пространственные конструкции с различными нерегулярностями весьма чувствительны к особенностям конфигурации ползуна и способам его нагружения, из которых наиболее неблагоприятным оказывается непосредственное приложение сил к верхним и нижним листам;

промежуточная и верхняя плиты штампа при свободном контакте с ползуном и между собой ведут себя как нагруженные листы рессоры;

передача технологической нагрузки на ползун через промежуточную плиту значительно уменьшает местные изгибные напряжения и деформации нижнего листа; влияние верхней плиты штампа не столь значительно;

распределения контактных давлений на ползун и напряжений в различных зонах его конструкции существенно зависят от расположения вертикальных пластин, вблизи которых давления и напряжения так или иначе концентрируются.

Экспериментальная оценка уровня точности применяемой методики – на основе тензометрирования эксцентрикового вала, составной станины и тонкостенного ползуна, моделированных по МКЭ – подтверждает принципиальную достоверность результатов практического применения предложенных методов структурного анализа.

6. ОПЫТ РЕШЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКИХ ЗАДАЧ В САПР НА БАЗЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обобщается опыт, полученный в процессе проектировании уникального двухэксцентричного горячештамповочного пресса усилием 160 МН.

Поскольку в машиностроении все более необходимой становится оптимизация конструкций, которая, однако, является труднореализуемой при строго математическом подходе даже на суперкомпьютерах из-за сложности конфигураций деталей, тем более, контактных систем, то *искусственное решение проблемы требует разработки специальных компромиссных подходов к приближенной оптимизации.*

В основу предлагаемого подхода положены:

принцип преемственности, принятый в методологии САПР и состоящий в том, что новые конструкторские решения принимаются на основе анализа конструкций-прототипов, если таковые существуют и при этом несут в себе лучшие черты известных разработок;

методика итерационного совершенствования конструкции, предполагающая последовательный, начиная с первого варианта принятого прототипа, конечноэлементный анализ и адекватную модернизацию объекта вплоть до получения варианта, признаваемого на экспертном уровне *приближенно оптимальным* с учетом различных технологических факторов – от производственных до функциональных.

Приближенную оптимизацию *эксцентрикового вала* обеспечила итерационная методика обоснования его размеров, построенная по принципу равнонапряженности проектируемой детали с реальными прототипами при выполнении условий заданной жесткости и рациональной металлоемкости. Согласно этой методике:

разработана программа *автоматизированной адаптации* данных об

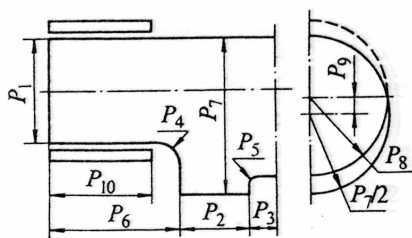


Рис. 4. Базисные параметры типовой конфигурации двухэксцентрикового вала

ансамбле элементов вала-прототипа (пресса усилием 125 МН) для построения ансамблей однотипных валов по варьируемым базисным параметрам (рис. 4);

проведен анализ по МКЭ валов ранее выпущенных прессов в последовательно рассматриваемых вариантах проектируемого вала;

принято экспертное решение об *окончательных размерах* проектируемого вала, имеющего показатели концентрации напряжений, податливости, металлоемкости и габаритных размеров на уровне прототипа, надежность и долговечность которого подтверждена в эксплуатации.

Итерационное совершенствование конструкций с учетом технологии производства реализовано при проектировании *стоек станины*, для чего:

внешние нагрузки автономно моделируемых стоек *введены* по результатам конечноэлементного анализа контактной системы деталей прессы-прототипа;

проведена конструкторская и конечноэлементная проработка трех последовательно совершенствуемых вариантов конфигурации стоек вплоть до получения конструкции с приемлемым уровнем концентрации напряжений и с рациональным числом и расположением технологических окон под крепежные стержни литейной формы.

Возможности совершенствования конструкций на базе конечноэлементного анализа не ограничиваются изменениями конфигураций детали-прототипа "в малом". Опыт проектирования *стола* рассматриваемого прессы показывает, что:

возможны также улучшения первоначального варианта конструкции "в большом", в том числе, за счет *принципиального изменения силовой схемы*, т.е. расположения несущих ребер (рис. 5);

новая силовая схема делает целесообразным переход на соответствующую ей *технологию производства*, в частности, со сварной конструкции стола на сварно-литую;

окончательный вариант стола *превосходит* вариант прототипа как по показателям прочности и жесткости, так и по металлоемкости и технологичности.

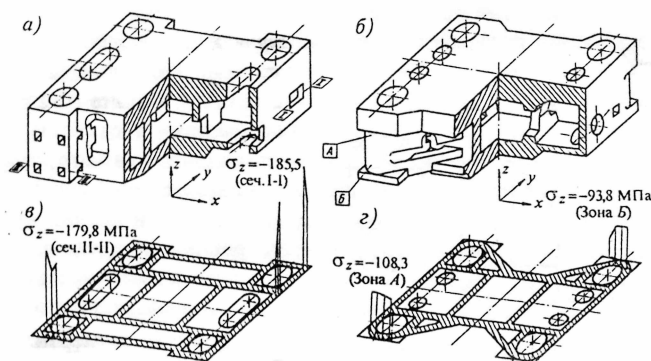


Рис. 5. Начальный (а, в) и окончательный (б, г) варианты конструкции стола (в горизонтальных сечениях показаны силовые схемы расположения вертикальных ребер и сжимающие напряжения в зонах их концентрации)

7. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД: НАГРУЖЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КРИВОШИПНОГО ПРЕССА КАК ЕДИНОЙ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ

В завершающем разделе отражаются *основы методологии, иерархически связанные задачи и возможности реализации системного подхода* в процессе автоматизированного конструкторско-технологического проектирования рассматриваемого класса машин. Результаты многоуровневого моделирования относятся к кривошипному горячештамповочному прессу усилием 125 МН. Обобщающий анализ охватывает всю *гамму однотипных прессов* и представляется полезным для многих других технологических машин.

При проектировании прессов принят *принцип приоритета качества* выпускаемых изделий, т.е. первичности технологии обработки давлением перед другими взаимосвязанными целями прессостроения. В направлении реализации этого принципа:

проблема *прогнозирования границ точности* штамповки, достижимой на конкретном проектируемом прессе, сводится к информации о деформативности единой контактной системы пресса, штампового блока и, строго говоря, самой поковки в условиях возможных технологических нагружений и зазоров между деталями;

для моделирования *деформаций* используются единая постановка и решения задач, в которых – по смешанному методу контактных сил и переносных перемещений – находятся и *напряжения*, необходимые при обеспечении прочности, долговечности и оптимизации формы деталей.

Постановка задач подчинена методологии *многоуровневого* исследования, выполняемого согласно принятой иерархии моделей:

теоретически *полная, но чрезмерно сложная* модель, включающая пресс, штамп и поковку, *заменяется* более простой моделью, в которой пластическое тело поковки представлено соответствующими давлениями на упругие детали штампового блока;

на *первых двух этапах* (из трех) исследуемые системы упругих деталей рассматриваются в *плоском* напряженном состоянии при обеспечении приближенной *эквивалентности* принятой двумерной модели и проектируемой пространственной конструкции;

в задаче *первого* этапа моделируется контактная система деталей пресса с введением сил, отражающих действие штампа на стол и ползун;

в задаче *второго* этапа в систему пресса включаются детали штампового блока, на плиты которого действуют давления со стороны поковки;

в задаче *третьего*, завершающего этапа контактная система деталей пресса исследуется в *трехмерном* напряженном состоянии.

Наиболее важные результаты исследования пресса на двумерной модели относятся к распределению контактных сил в стыках единой системы

деталей при эксцентричном и висцентричных технологических нагружениях (рис. 6, 7). Подтверждаются результаты, полученные ранее на трехмерных моделях автономных подсистем:

близкая к "закону треугольника" эвора контактных сил по верхней образующей опорной шейки эксцентрикового вала;

частичное раскрытие стыка между стойкой и столом.

Выявляются особенности асимметричной картины распределения контактных сил в стыках единой системы (рис. 7):

наибольшая асимметрия имеет место в стыках взаимодействий левого и правого шатунов с эксцентриками вала;

в стыках станины асимметрия существенно меньше.

Для обобщенной оценки конструкции исследуемого пресса (и гаммы однотипных машин) получены общие закономерности, отражающие чувствительность контактной системы к влиянию эксцентриситета e технологических нагрузок и начальных зазоров, среди которых доминирующим является зазор Δ_n в направляющих ползуна. При этом:

чувствительность характеризуется мерой асимметрии α , принятой в виде соотношения равнодействующих давлений на эксцентриковый вал со стороны левого и правого шатунов;

для 50 вариантов сочетаний e и Δ_n строятся семейства функций $\alpha(e)$ при разных Δ_n и $\alpha(\Delta_n)$ при разных e , несущие информацию, полезную при конструкторско-технологическом проектировании (рис. 8);

увеличение зазоров Δ_n (при любом значении эксцентриситета e) ведет к возрастанию асимметрии α по шатунам, но лишь до предельного (для данного e) значения зазора Δ_n , после чего возрастание α зависит только от эксцентриситетов e ;

в диапазоне вероятных эксцентриситетов e и проектных зазоров Δ_n номинальное усилие P_n пресса распределяется по шатунам примерно в соотношении $2P_n/3$ и $P_n/3$, что позволяет более или менее достоверно ввести эту нагрузку при автономном моделировании однотипных валов внецентрично нагруженных прессов.

Установленные закономерности, характерные для исследованной гаммы прессов, в то же время показывают перспективы аналогичного анализа функциональных возможностей различного рода тяжелых машин.

По предложенной методике проведены исследования чувствительности единой системы деталей пресса, а также пресса и штампового блока, на влияние широкого спектра конструктивных, производственных и иных факторов. Важнейшими среди полученных результатов являются:

обобщение понятия о жесткости пресса как о множестве параметров, нелинейно зависящих от эксцентриситетов нагружений и величин зазоров;

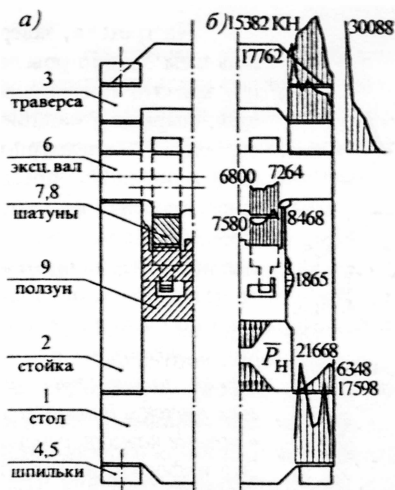


Рис. 6. Структура (а) и контактные силы единой системы деталей прессы (б) при центральном технологическом нагружении

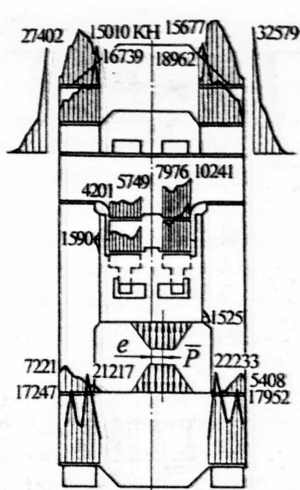


Рис. 7. Контактные силы в единой системе прессы при внецентренном технологическом нагружении

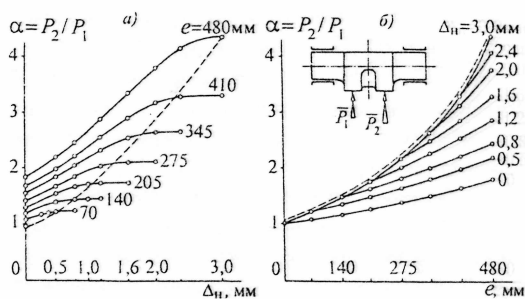


Рис. 8. Закономерности изменения асимметрии α : а – $\alpha(\Delta_H)$ при разных e ; б – $\alpha(e)$ при разных Δ_H

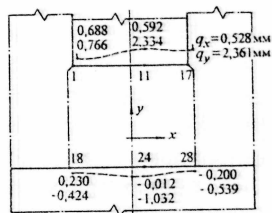


Рис. 9. Деформированный контур штампового пространства при внецентренном технологическом нагружении прессы

анализ влияния деформируемости контура штампового пространства на пределы точности поковки, достижимой на данном прессе (рис. 9); зависимость напряженно-деформированных состояний деталей прессы от несимметрии зазоров и других возможных отклонений в размерах; сравнение состояний деталей прессы без учета и с учетом штамповых блоков, в том числе, при различных конструктивных исполнениях штампа.

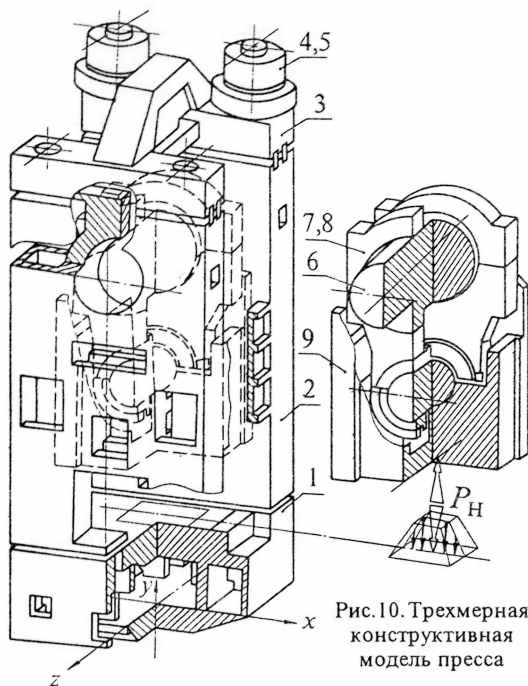


Рис. 10. Трехмерная конструктивная модель пресса

На третьем, завершающем этапе проведено, как это представляется, впервые в машиностроении, трехмерное моделирование пресса как машины в целом (рис. 10). На базе рационально генерированных трехмерных сеток получена полная, высокоточная и одинаково достоверная информация для всех точек и направлений в объеме каждой детали. Эта информация является основой экспертной оценки уровней точности и границ применимости выводов и закономерностей, выявленных на более простых двумерных моделях. Подтверждается доста-

точная точность выполненного анализа чувствительности пресса и раскрываются пределы возможностей структурного подхода, особенно эффективного при симметрии конструкции и нагрузки.

Трехмерное моделирование является *основой определения характеристик вертикальной податливости (жесткости) пресса*, зависящих, во-первых, от изгибных деформаций эксцентрикового вала и рабочих поверхностей стола и ползуна и, во-вторых, от контактных деформаций и кинематических – линейных и угловых – смещений деталей, образующих штамповое пространство. Обосновывается заключение, что любая методика выбора оптимальной обобщенной жесткости пресса должна предусматривать изъятие из общей податливости машины вертикального обжатия деталей станин, особенно составных, после предварительной затяжки.

Предложенный системный подход позволяет прогнозировать и оценивать влияние различного рода закономерных и случайных (производственных и т.п.) факторов на качество работы проектируемой машины, что в перспективе может быть положено в основу построения современных *сертификационных требований* к прессам и другим тяжелым машинам в рамках решения остроактуальных проблем качества.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

1. На основе анализа проблем современной механики прессоострoения идентифицирован весьма широкий класс тяжелых машин и для его исследования предложена *концепция* построения и промышленного применения компьютерной механики контактных систем, определяющая:

содержание и схему *приоритетов задач* разработки теоретического и программного обеспечения *компьютерной механики прессов*;

сущность и сочетание *системного и структурного* (подсистемного) подходов к моделированию квазистатических состояний деталей машин;

единство методики и экспертный характер принятия решений в процессе реального *конструкторско-технологического* проектирования.

2. Разработанный *смешанный метод контактных сил и переносных перемещений* представляет собой теоретическую основу эффективного дискретного моделирования априорно устойчивых статических контактных систем любого конечного числа линейно-упругих тел, имеющих от нуля до шести кинематических степеней свободы и произвольные конфигурации, взаимные расположения, варианты технологического или иного нагружения, начальные зазоры, натяги и их сочетания в больших и малых зонах контактов по гладким поверхностям различных форм.

Предложенный метод, корректность и точность которого подтверждены *специальным доказательством инвариантности* решений и проверкой в широком диапазоне тестовых задач, впервые позволяет осуществить системный подход в контактной механике машин, преследуя *двухединую цель*:

получение необходимой – для решения *проблем прочности* – информации о трехмерных напряженных состояниях деталей контактных систем;

анализ функциональных возможностей и *прогнозирование пределов точности технологических операций*, достижимых в зависимости от общей деформируемости проектируемой машины и соответствующих принципу *приоритета* требуемого качества выпускаемых изделий, в частности, точности размеров поковок, перед другими целями прессоострoения.

3. Созданный на базе предложенного смешанного метода и реализованный с применением конечноэлементной аппроксимации тел *программный комплекс* МАКС (Моделирование и Анализ Контактных Систем) является не имеющим аналогов промышленным инструментом автоматизированного проектирования: он *удовлетворяет основным требованиям современной промышленной информатики* и обеспечивает минимизацию общего объема вычислений при исследовании идентифицированного класса конструкций, что позволяет использовать его на доступных компьютерах.

Комплекс *сертифицирован* Госстандартом Российской Федерации.

4. В дополнение к теоретическому и программному обеспечению моделирования идентифицированного класса конструкций на основе указанного, в определенном смысле, универсального смешанного метода разработан *альтернативный* ему специальный *метод односторонних связей*, предназначенный для более узкого класса систем тел, взаимодействующих по согласованным (без начальных зазоров и натягов) контактными поверхностям и позволяющий в ряде случаев строить более экономичные, чем по смешанному методу, конечно- и суперэлементные модели, в том числе, с учетом кулоновского трения в контактных стыках.

5. В целях неформальной оптимизации уровней точности и сложности конечноэлементных моделей проектируемых машин предложен и реализован *структурный подход*, основанный на экспертном анализе специфики полной структуры заданной контактной системы и возможности ее последовательной *декомпозиции на те или иные автономные подсистемы*, каждая из которых имеет в качестве объекта исследования определенную деталь (или группу деталей) при условии, что могут быть достоверно заданы все внешние – по отношению к подсистеме – силовые и (или) кинематические граничные условия. В рамках структурного подхода:

впервые проведено – с достаточно высокой, подтвержденной *экспериментально*, точностью – моделирование полей деформаций и напряжений основных деталей кривошипных прессов с учетом сложности их пространственных конфигураций и специфики контактных взаимодействий;

разработана *методика конструкторско-технологического проектирования*, состоящая в поэтапном совершенствовании (неформальной оптимизации) проектируемых деталей, в том числе, с учетом технологии их производства, на основе конечноэлементного анализа последовательно рассматриваемых и улучшаемых вариантов вплоть до выбора окончательной конструкции *по принципу ее равнонапряженности с лучшими прототипами*.

6. Впервые в прессостроении – на основе предложенного системного подхода – получены *общие закономерности*, характерные для целой гаммы двухкривошипных горячештаповочных прессов и *отражающие чувствительность единой контактной системы деталей к влиянию эксцентриситетов е технологических нагрузок и начальных зазоров*, среди которых доминирующим является зазор Δ_n в направляющих ползуна. Для оценки чувствительности введена *мера асимметрии α* (соотношение равнодействующих давлений на эксцентрики вала со стороны шатунов) и на базе двумерных моделей системы, приближенно эквивалентных трехмерным конструкциям, построены *семейства функций $\alpha(e)$* при разных Δ_n и $\alpha(\Delta_n)$ при разных e , характеризующие присущие данному типу прессов *предельные* технологические возможности и создающие как бы *прецедент*, показывающий

перспективы применения механики контактных систем в анализе функциональных возможностей различного рода тяжелых машин.

В развитие предложенной методики анализа прессы на чувствительность проведены исследования его единой контактной системы, включая штамповый блок, на влияние различных конструктивных, технологических и иных факторов, в том числе, производственных несовершенств.

7. В целях достижения наивысшей – для линейной теории упругости – точности исследования статических состояний объектов идентифицированного класса и подготовки экспертной базы их конструкторско-технологического проектирования *впервые в машиностроении проведено трехмерное моделирование единой контактной системы деталей тяжелой технологической машины, а именно, кривошипного горячештамповочного прессы, характерного для целой гаммы такого рода машин. Из анализа результатов следует, что трехмерное моделирование на базе рационально генерированных сеток обеспечивает полную, высокоточную и одинаково достоверную информацию для всех точек и направлений в объеме каждой детали, имеющей в пространственной модели конфигурацию, в разумной мере близкую к конструкции в металле. На этой основе получены:*

экспертные оценки уровней точности и границ применимости выводов и закономерностей, выявленных на двумерных моделях машин данного типа;

обобщающее представление о податливости (жесткости) прессы в целом как о дискретом множестве параметров, нелинейно зависящих от эксцентриситетов нагружения и величин зазоров;

данные о зависимости характеристик вертикальной податливости прессы, во-первых, от изгибных деформаций центральных областей эксцентрикового вала и рабочих поверхностей стола и ползуна и, во-вторых, от контактных деформаций и кинематических перемещений деталей, образующих штамповое пространство;

заклучение о том, что – с учетом последовательности нагружения прессы при затяжке и при технологических операциях – любая методика выбора оптимальной обобщенной жесткости должна предусматривать изъятие из общей податливости машины вертикального обжатия деталей станин, особенно составных, после предварительной затяжки.

8. Результаты диссертации, позволяющие прогнозировать и оценивать влияние различного рода закономерных и возможных (производственных и т.п.) факторов на качество работы прессы, могут быть положены в основу построения современных сертификационных требований, необходимых для решения проблем качества, в том числе, путем разработки *новых государственных стандартов, обобщающих опыт применения компьютерных технологий в проектировании тяжелых прессы.*

ПУБЛИКАЦИИ.

отражающие основное содержание диссертации

1. Гольник Э.Р. Специальные главы аналитической механики и теории колебаний. – Воронеж: Воронежск. политехн. институт, 1975. – 208 с.
2. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Равновесие упругих тел, взаимодействующих по заданным до деформаций поверхностям контакта // Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике: Аннот. докл. – Алма-Ата, 1981. – С. 117 – 118.
3. Гольник Э.Р., Рукин Ю.Б. Конечный элемент трапецевидной формы для расчета пластинок и оболочек // Расчет прочности, устойчивости и колебаний элементов инженерных сооружений. – Воронеж: ВГУ, 1981. – С. 68 – 77.
4. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Расчет на прочность и жесткость гидроопор предохранителей кривошипных прессов методом конечных элементов // Кузнечно-штамповочное производство (КШП). – 1983. – № 3. – С. 19 – 21.
5. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Суперэлементная методика решения одного класса пространственных контактно-прочностных задач // VIII Всесоюз. конф. по прочности и пластичности: Тез. докл. – Пермь, 1983. – С. 44 – 45.
6. Гольник Э.Р., Радченко И.Г., Смородина Л.В. Конечный элемент в форме пентаэдра и его применение в исследовании полей напряжений и деформаций упругих призматических тел // Исследование по строительной механике конструкции: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1984. – С. 115 – 126.
7. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Постановка и суперэлементное решение трехмерных контактно-прочностных задач о взаимодействии упругих тел по первоначально совпадающим поверхностям // Изв. вузов. Машиностроение. – 1985. – № 8. – С. 3 – 9.
8. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Конечноеэлементный расчет полей напряжений и деформаций шатунов как объектов подсистем деталей кривошипных прессов // КШП. – 1986. – № 3. – С. 25 – 27.
9. Gol'nik E.R., Radchenko I.G. Finite element method of calculating stress and strain fields for connecting rods as objects of subsystems of crankshaft-press parts // Soviet forging and shell metal stamping technology. – New York: Allerton Press, Inc. – 1986. – № 2. – P. 32 – 36.
10. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Корректность, точность и экономия времени ЭВМ при решении по МКЭ трехмерных контактно-прочностных задач для упругих тел сложной формы // Шестой Всесоюз. съезд по теоретической и прикладной механике: Аннот. докл. – Ташкент, 1986. – С. 207 – 208.

11. Гольник Э.Р., Рукин Ю.Б., Новокшенов Л.Т. Определение по МКЭ напряженно-деформированного состояния тонкостенного ползуна в условиях контактных взаимодействий с плитами штампа и гидроопорами // КШП. – 1986. – № 12. – С. 29 – 32.
12. Gol'nik E.R., Rukin Yu.B., Novokshchenov L.T. Using the finite element method to determine the state of stress and strain of a thin-walled slide which interacts in contact with die shoes and hydraulic cushions // Soviet forging and shell metal stamping technology. – New York: Allerton Press, Inc. – 1986. – № 6. – P. 106 – 113.
13. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Дискретное моделирование упругих тел, контактно взаимодействующих при произвольных статических нагрузках, зазорах и натягах // Изв. вуз. Машиностроение. – 1987. – № 12. – С. 11 – 19.
14. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Обобщение смешанного метода контактных сил и переносных перемещений на класс систем произвольного числа упругих деталей // Изв. вуз. Машиностроение. – 1988. – № 10. – С. 17 – 22.
15. Гольник Э.Р., Рукин И.Г., Павлов Г.Г. Автоматизированное конечноэлементное моделирование упругих оболочек в форме сектора тора с вырезами // Изв. вуз. Машиностроение. – 1988. – № 3. – С. 24–29.
16. Расчет по МКЭ подсистем трехмерных деталей кривошипных прессов / Э.Р. Гольник, И.Г. Радченко, М.М. Розенблат и др. // КШП. – 1988. – № 6. – С. 19 – 27.
17. Three-dimensional FEM calculation of crank-press subsystem / E.R. Gol'nik, I.G. Radchenko, M.M. Rozenblat // Soviet forging and sheet metal stamping technology. – New York: Allerton Press, Inc. – 1988. – № 3. – P. 84 – 90.
18. Гольник Э.Р., Радченко И.Г., Бобряшев А.В. Исследование по МКЭ эксцентрикового вала и стоек кривошипного пресса как трехмерных деталей, контактирующих при наличии проектных зазоров // КШП. – 1989. – № 1. – С. 20 – 22.
19. Gol'nik E.R., Radchenko I.G., Bobryashov A.V.. Finite element research on the eccentric shaft and coumns of a crank press as contracting three-dimensional parts with the design clearances // Soviet forging and sheet metal stamping technology. – New York: Allerton Press, Inc. – 1989. – № 1. – P. 31 – 37.
20. Обоснование размеров двухэксцентриковых валов горячештамповочных прессов на стадиях эскизного и технического проектирования / В.Н.Тынянов, Э.Р.Гольник, В.Н.Горожанкин и др. // КШП. – 1989. – № 1. – С. 5 – 7.
21. Типизация конструкций и конечноэлементных моделей кривошипных листоштамповочных прессов / Р.А. Бирбраер, В.И. Балаганский, И.Н. Филькин, Э.Р. Гольник и др. // КШП. – 1989. – № 11. – С. 13 – 15.

22. Гольник Э.Р., Горожанкин В.Н., Бобряшев А.В. Опыт совершенствования проектируемых конструкций кривошипного пресса на базе конечноэлементного моделирования // Машины и автоматизация кузнечно-штамповочного производства: Межвузовский сборн. научн. трудов. – М.: Изд. Московск. ин-та приборостроения, 1990. – С. 38 – 47.
23. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Исследование единой системы контактирующих деталей кривошипного пресса на двумерной модели МКЭ при внецентренных нагрузках // КШП. – 1990. – № 10. – С. 20 – 22.
24. Gol'nik E.R., Radchenko I.G.. Investigaton of a two-dimensional finite-element model of a unified system of contacting parts of a mechanical press with offset loading // Soviet forging and sheet metal stamping technology. – New York: Allerton Press, Inc. – 1990. – № 5. – P. 89-94.
25. Гольник Э.Р. Программный комплекс ПРЕСС-МКЭ как основа моделирования кузнечно-штамповочных машин методами вычислительной механики // Опыт и перспективы развития математического, программного и технического обеспечения САПР в прессостроении: Тезисы докладов международной научно-технической конференции (МНТК). – Воронеж, 1990. – С. 13 – 14.
26. Гольник Э.Р., Павлов Г.Г. Семейство переходных конечных элементов в форме треугольников и тетраэдров // Опыт и перспективы развития математического, программного и технического обеспечения САПР в прессостроении: Тезисы докладов МНТК. – Воронеж, 1990. – С. 14 – 15.
27. Бобряшев А.В., Гольник Э.Р., Горожанкин В.Н. Методика совершенствования конструкций станины кривошипного пресса на базе конечноэлементного моделирования // Опыт и перспективы развития математического, программного и технического обеспечения САПР в прессостроении: Тезисы докладов МНТК. – Воронеж, 1990. – С. 7 – 8.
28. Бобряшев А.В., Гольник Э.Р. Оптимизация формы упругих двумерных тел по методу зондирования с применением МКЭ // Расчет прочности, устойчивости и колебаний сооружений; Межвузовск. сборн. научн. трудов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990. – С. 31 – 38.
29. System Methods of Computer Mechanics and their Using in Computer Aided Design of Heavy Technological Machines / E.Gol'nik, I. Radchenko, V. Balagansky, R. Birbraer // 10th Int. Conf. on CAD/CAM. – MICAD-91. – Paris: Hermes, 1991. – P. 367 – 387.
30. Гольник Э.Р., Радченко И.Г. Трехмерное моделирование по МКЭ единой контактной системы деталей кривошипного пресса как основа решения технологических и конструкторских задач проектирования // КШП. – 1993. – № 10. – С. 16 – 19.
31. Gol'nik E., Radchenko I. Numerical Methods of Statics and Dynamics of Contact Systems with Arbitrary Number of 3D Elastic Bodies // 2nd Contact Mechanics International Symposium. Program and Abstracts – Marseille (Carry-Le-Rouet), 1994. – P. 46.