

05.16.05
К 2.03

На правах рукописи

КАПЛИНОВ Борис Григорьевич

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ПЛАМПОВКИ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск-1998

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете (Челябинском государственном техническом университете).

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Блинов Ю.И.
доктор технических наук,
профессор Вайсбурд Р.А.,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Коновалов А.В.,

Ведущее предприятие - ОАО "Челябинский тракторный завод"

Защита состоится " 11 " марта 1998 г. в 14 часов в ауд. 244 на заседании диссертационного совета Д 053.13.04 по присуждению ученых степеней при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г.Челябинск, пр.В.И.Ленина,76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан " ____ " февраля 1998 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Д.А.Мирзаев

05.16.05
1103

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основой развития производства заготовок деталей машин горячей объемной штамповкой остается создание и применение ресурсоэкономных процессов на базе универсального и специального оборудования. Прогрессивными методами изготовления поковок тел вращения, составляющих значительную часть номенклатуры изделий горячештамповочных цехов и всей продукции кольце- и колесопрокатных производств, являются закрытая штамповка, комбинированное (штамповка-прокатка) формоизменение. Несмотря на то, что эти процессы имеют определенное распространение, ряд нерешенных научно-технических задач не позволяет полностью реализовать их технологические возможности.

Перспективы применения указанных способов ОМД связаны с расширением научной базы процессов путем углубленного исследования пластических деформаций современными методами. Потенциальные резервы имеются и в традиционных технологиях облойной штамповки, выявление которых требует оптимизации условий деформирования.

Для развития научных основ принятия технических решений, направленных на совершенствование формообразующих операций, необходимы знания о напряженно-деформированном состоянии (НДС) обрабатываемого металла. Достоверная информация о скоростях и напряжениях позволяет на этапе проектирования технологии прогнозировать дефекты формоизменения, выбирать рациональные по энергозатратам схемы штамповки и оптимальные по расходу металла параметры штампов. Эффективный метод определения НДС - компьютерное моделирование деформаций на основе численных методов расчета при использовании сложных моделей сред.

В связи с отмеченным проблема разработки обобщенной численной модели расчета пластических деформаций для класса процессов горячей объемной штамповки и принятия на основе информации о НДС практических решений по созданию новых прогрессивных и совершенствованию традиционных технологий производства заготовок тел вращения методами ОМД является актуальной и требующей решения.

Работа выполнялась в соответствии с межвузовским координационным планом по проблеме "Точная объемная горячая и полугорячая штамповка в закрытых штампах"; межвузовской научно-технической программой: "Товары народного потребления" (тема 73ПБЭТ); координационным планом Минчермета по проблеме "Разработка и внедрение

Южно-Уральский
гос. университет
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

новых конструкций, марок стали и эффективных процессов производства цельнокатанных колес, бандажей и осей для вагонов и локомотивов" (задания 2.08 -ТП и 3.28); научным направлением университета: "Совершенствование оборудования и технологий в машиностроении", тематикой хозяйственных работ с предприятиями.

Цель работы. Комплексное изучение и теоретическое обобщение закономерностей пластических деформаций в ресурсосберегающих процессах горячей объемной штамповки типовых групп поковок тел вращения на основе новой численной математической модели, а также разработка и применение технических решений по совершенствованию действующих и созданию новых технологий путем использования данных о НДС для решения научно-технической проблемы повышения эффективности горячештамповочного производства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- создание обобщенной математической модели расчета осесимметричных пластических деформаций для класса процессов горячей штамповки поковок тел вращения на основе применения численного метода решения полной системы уравнений пластического течения и экспериментально обоснованной модели среды;
- тестирование программной реализации модели, в т.ч. путем численного исследования НДС заготовки при горячем обратном выдавливании и сопоставления результатов с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными при одновременном получении новых знаний о процессе, повышающих качество полых изделий;
- моделирование НДС и разработка на основе информации о скоростях и напряжениях методик технологического проектирования, повышающих эффективность процессов штамповки кольцевых заготовок в закрытых и открытых штампах с компенсатором на прессах и молотах, а также в производстве крупногабаритных кольцевых изделий на кольцепрокатных линиях;
- расчет пластических деформаций с учетом специфики изготовления фланцевых поковок в закрытых штампах с монолитными и разъемными матрицами, обобщение с применением методов математической статистики данных о напряженном состоянии и силовом режиме деформации для интенсификации технологий закрытой штамповки;
- обоснование по информации о характеристиках НДС новых и совершенствование действующих технологических схем штамповки заготовок колес рельсового транспорта для повышения их качества при изготовлении на агрегатах прессопрокатных линий;

- экспериментальное исследование формоизменения и измерение усилий деформаций в изучаемых процессах штамповки для уточнения граничных условий расчетных задач, подтверждения достоверности и дополнения результатов численного моделирования;
- создание с использованием результатов исследования и освоение в производстве новых и усовершенствованных технологических процессов и конструкций штампов для их реализации.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на основе известных соотношений механики пластических деформаций и численного метода их решения. В работе использовались методы линейного программирования, планирования экспериментов и факторного анализа. Эксперименты выполнены с применением методов координатных сеток, тензометрирования и металлографии.

Достоверность научных результатов обеспечена использованием математического аппарата теории пластичности, применением апробированного метода численного исследования НДС и экспериментально обоснованной модели деформируемой среды, тестированием программ для ЭВМ, статистической проверкой адекватности регрессионных моделей, данными лабораторных и производственных экспериментов, сопоставлением с опытными и теоретическими результатами других исследователей, внедрением в производство.

Научная новизна работы:

1. Впервые создана на основе метода численного решения полной системы уравнений пластического течения обобщенная математическая модель расчета осесимметричной деформации, позволяющая выполнять анализ напряженно-деформированного состояния обрабатываемого металла для класса процессов горячей штамповки стальных поковок тел вращения.

2. Установлены новые и уточнены известные закономерности пластической деформации при открытой, полузакрытой и закрытой горячей объемной штамповке кольцевых, фланцевых и колесных заготовок, обеспечивающие возможность управления НДС и применение ресурсосберегающих технологий.

3. Получен ранее отсутствовавший числовой материал о распределении характеристик НДС по объему заготовки при штамповке поковок ряда типоразмеров в различных деформационных условиях.

4. На основе обобщения информации о скоростях и напряжениях спрогнозирован характер формоизменения, установлены оптимальные

параметры инструмента, выявлены условия образования дефектов и определены пути повышения качества горячештампованных заготовок.

5. Получены новые научные данные о силовом режиме горячей штамповки прогрессивных заготовок: контактных напряжениях на гравиюре ручья, усредненных локальных нагрузках на элементы штампа, удельных и полных усилиях деформации; построены регрессионные модели силовых характеристик, учитывающие конструктивно-технологические факторы процессов.

Практическая ценность работы.

В результате решения поставленной научной проблемы развития теоретических подходов к исследованию технологических задач и поиска новых практических решений созданы математическая модель и ЭВМ-программа, с помощью которых изучены и улучшены действующие, обоснованы новые процессы штамповки.

На основе обработки и обобщения информации о характеристиках пластической деформации методами факторного анализа и оптимизации разработаны новые расчетные инженерные методики и даны рекомендации для комплексного проектирования технологий и штампов.

С использованием научных результатов работы определены рациональные технологические схемы, режимы деформирования и параметры инструмента, разработаны новые процессы горячей штамповки.

С позиций научного подхода, на уровне изобретений, созданы новые способы штамповки и конструкции инструмента, способствующие освоению ресурсозаконочных технологий горячей объемной штамповки.

Реализация результатов работы в промышленности определяется их применением на машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях:

АО "Курганмашзавод" – при освоении процессов точной горячей штамповки на кривошипных прессах, совершенствовании переходов закрытой высадки фланцевых поковок на ГММ, при разработке и применении новой технологии штамповки кольцевых изделий на молотах, при опытно-промышленной отработке закрытой штамповки в штампе с компенсатором, для автоматизированной технологической подготовки горячештамповочного производства (пакет программ ПЛАТФОР);

Нижнеднепровском трубопрокатном заводе (НДТЗ) – в колесопрокатном производстве при совершенствовании действующей технологии формовки заготовок штампокатанных железнодорожных колес и обосновании перспективных технологических схем их изготовления, в новом кольцепокатном производстве при освоении пусковой и серийной но-

менклатуры кольцевых изделий и штамповке заготовок колес для металлургических машин, для технологической подготовки этих производств (ПП ПЛАСТФОР);

По "Пензкомпрессормаш" - при создании новой ресурсоэкономной технологии для изготовления поковки кольцевой детали "фланец" молотовой штамповкой с фасонированием заготовки на съёмном бойке;

Челябинском кузнечно-прессовом заводе (ЧКПЗ) - для совершенствования процессов закрытой штамповки на ГМ фланцев полуосей;

Опытном заводе путевых машин (ОЗПМ, г. Челябинск) - при разработке технологий и создании участка горячей штамповки точных заготовок на базе новой конструкции штампа с разъемной матрицей.

Результаты работы в виде методик конструкторско-технологического проектирования процессов горячей штамповки приняли к использованию: НИИтяжмаш-УРАЛМАШ, ЦНИИМ, НИИтракторсельхозмаш и др. организации и предприятия.

Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составил (долевое участие) более 1,2 млн. рублей (в ценах на 01.92г.)

Результаты исследования применяются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 1204 "Машины и технология обработки металлов давлением" в ЧТУ.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно - техническом семинаре "Прогрессивные процессы горячей штамповки, повышение точности и качества продукции" (Челябинск, 1979); региональной научно-технической конференции "Прогрессивная малоотходная технология в производстве продукции сельскохозяйственного машиностроения" (Челябинск, 1983); зональной научно-практической конференции "Достижения и перспективы применения обработки металлов давлением в машиностроении" (Курган, 1984); научно-технической конференции "Интенсификация малоотходной технологии в кузнечно - штамповочном производстве" (Челябинск, 1985); конференции "Прогрессивные процессы производства и пути повышения качества цельнокатанных колес, бандажей и осей" (Днепропетровск, 1985); научно-техническом семинаре "Прогрессивные технологические процессы, средства автоматизации объемной и листовой штамповки" (Москва, 1986); российской научно-технической конференции "Наукоемкие технологии в машиностроении" (Рыбинск, 1994); Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "100-летие со дня рождения профессора А.И. Зимилина" (Москва, 1995); международной научно-технической конференции "Проблемы пластичности в технологии"

(Орел, 1996); международной научно-технической конференции "Ресурсосберегающие технологии, связанные с обработкой материалов давлением" (Владимир, 1996); I международной специализированной выставке "Машиностроение - 97. Прогрессивные технологии" (Челябинск, 1997); научных конференциях кафедры "Машины и технология ОМД" ЧТУ (1977-1997).

По диссертационной работе сделаны доклады на научном семинаре лаборатории математического моделирования технологических процессов Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (1994); объединенном семинаре кафедр "Машины и технология ОМД" и "Автоматизация кузнечно-штамповочного производства" ЧТУ (1996); семинаре кафедры "Обработка металлов давлением" ЧТУ (1997); объединенном научном семинаре Института машиноведения УрО РАН, кафедры "Обработка металлов давлением" и филиала кафедры "Прикладная геометрия и автоматизация проектирования" УГТУ-УПИ (1997), объединенном научном семинаре по специальности "Обработка металлов давлением" МГМА (1998).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 87 статей, издано учебное пособие, получено 16 авторских свидетельств и патентов, 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- научные основы нового подхода к изучению процессов горячей объемной штамповки в виде математической модели расчета напряженно-деформированного состояния и результатов ее численной реализации;
- новые закономерности и научные данные о характеристиках НДС при различных схемах осесимметричной пластической деформации;
- обобщенные зависимости кинематических и силовых параметров в виде инженерных методик для технологического проектирования ресурсосберегающих процессов горячей штамповки;
- новые и усовершенствованные технологии штамповки прогрессивных поковок тел вращения, способы и устройства для их реализации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 347 наименований и приложения. Содержит 293 страницы машинописного текста, 148 рисунков, 51 таблицу. В приложении представлены документы о внедрении и практическом использовании результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации и приведена общая характеристика работы.

В первой главе анализируется состояние проблемы повышения эффективности горячештамповочного производства, определяются цели и задачи исследования. В качестве ресурсосберегающих направлений развития технологий горячей объемной штамповки рассматриваются: формоизменение в закрытых штампах, оптимизация облойной штамповки, комбинирование штамповки с прокаткой. Следуя принятым направлениям, определяются процессы штамповки - объекты исследований.

Закрытая штамповка в наибольшей мере ориентирована на поковки тела вращения. Несмотря на известные преимущества процесса, должного распространения в отечественной производственной практике он пока не имеет, т.к. требует компенсации возможного избытка объема заготовки. Способ штамповки кольцевых поковок из заготовок обычной точности в закрытых штампах с центральной компенсационной полостью направлен на решение этого вопроса. Конструктивные параметры такого штампа должны обеспечивать заполнение полости ручья при одновременной компенсации избытка металла. Штамповка поковок типа фланцев в закрытых штампах без компенсационных устройств из заготовок повышенной точности может сопровождаться образованием торцового заусенца по разьему инструмента. Стадия доштамповки характеризуется наибольшими нагрузками и определяет возможность реализации процесса. Данная стадия практически необходима для получения качественных фланцевых поковок закрытой высадкой на ГМ. Штамповка точных заготовок в закрытых ручьях с разъемной матрицей наиболее полно отвечает требованию экономии металла и связана с применением специальных конструкций оборудования и штампов, для создания которых необходимы знания технологических нагрузок.

Интенсификация процессов открытой штамповки, остающихся сегодня основными, идет преимущественно по пути уменьшения отходов металла. Формообразование в открытых штампах с магазином (компенсатором) обеспечивает изготовление бездефектных кольцевых поковок. Оптимизация параметров облойных мостиков по расходу металла и нагрузкам на штамп, наряду с совершенствованием переходов штамповки, повысит эффективность процесса.

Технологии горячей деформации, сочетающие штамповку с прокаткой, применяются для производства крупногабаритных заготовок

колец, бандажей и колес рельсового транспорта на агрегатах прес-сепрокатных линий. Современное кольцепрокатное производство долж-но обеспечить изготовление кольцевых изделий высокой точности. Освоение новых мощностей связано с отработкой рациональных схем и режимов прессовых деформаций. Необходимость повышения эксплуата-ционной надежности колес подвижного состава требует постоянного совершенствования формовки – основного формообразующего перехода, в значительной мере определяющего качество колесных заготовок, поиска и обоснования перспективных технологических схем их произ-водства на колесопрокатных линиях.

Анализ технологий определил необходимость проведения исследо-вания для дальнейшего развития научной базы и применения про-цессов производства прогрессивных стальных заготовок тел вращения методом закрытой, полужакрытой и открытой горячей штамповки. Изу-чаются пластические деформации на уровне НДС при: закрытой и от-крытой штамповке кольцевых поковок в штампах с компенсатором на прессах (рис.1, схемы 1.1, 1.2) и молотах (с предварительным фа-сонированием) (1.3); прошивке кольцевых заготовок в закрытом штамп-пе, предварительной и окончательной формовке фасонных колец на гидропрессах (1.4, 1.5); штамповке фланцевых поковок в закрытых штампах с монолитными (2.1) и разъемными (2.3) матрицами, закры-той высадке на ГМ (2.2); формовке колесных заготовок по действу-ющей (3.1) и перспективной (3.2) технологиям.

Базой для проведения исследования служит научный вклад в изучение и развитие этих процессов, внесенный А.В.Ребельским, М.В. Сторожевым, А.З.Журавлевым, В.Т.Мещеринным, Е.Н.Ланским, Е.И.Семе-новым, А.Г.Овчинниковым, О.А.Ганаго, Р.А.Вейсбурдом, Л.И.Живовым, Л.Г.Степанским, Ю.А.Алюшиным, Л.Б.Аксеновым, А.Н.Левановым, А.М. Смуровым, Б.Д.Копыским, А.Э.Даммером, И.Л.Акаро, М.Ю.Шифриным, М.И.Староселецким, М.С.Валетовым и др., зарубежными учеными Т.Ал-тан, S.Kobayashi, K.Lange, K.Siegert, E.Doege, P.Johne, A.Malusek.

Исследование проводится с позиций общего теоретического под-хода к анализу деформаций при штамповке типовых групп поковок, в направлении их усложнения, опираясь на результаты тестирования и анализа деформаций при горячем обратном выдавливании (рис.1,а).

Аналитический обзор теоретических методов показал, что перс-пективы решения задач ОМД связаны с использованием численных схем реализации на ЭВМ. Для этого применяется метод конечных элементов, чаще в кинематической постановке, как более алгоритмичной. Однако,

Схемы горячей штамповки прогрессивных заготовок
 типовых конструктивных деталей

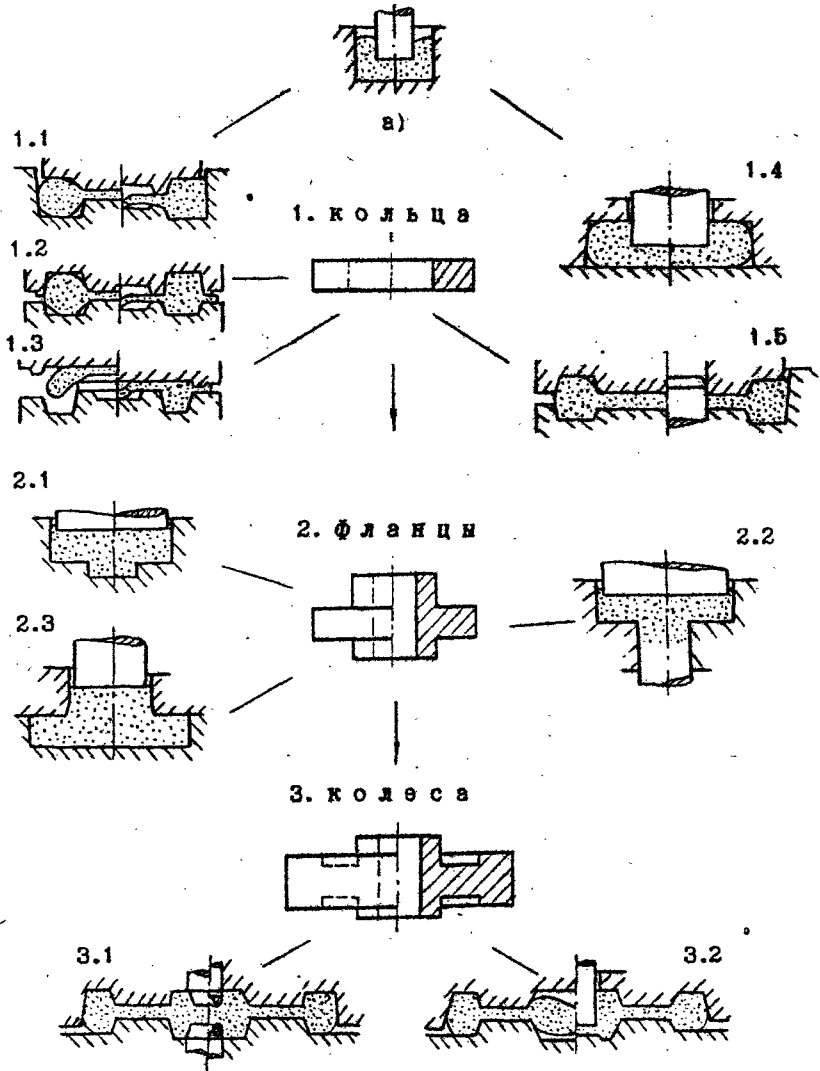


Рис. 1

при решении из-за неполного выполнения граничных условий для напряжений последние имеют различную со скоростями точность, аналогичное происходит и при использовании метода сил. Принцип возможного изменения напряженного и деформированного состояния, предложенный В.Л.Колмогоровым, обеспечивает определение скоростей и напряжений с одинаковой точностью, но сложен в реализации.

Для изучаемых процессов штамповки достаточно полную и точную информацию о НДС дает разработанный В.И.Одиноквым метод численного решения полной системы уравнений пластического течения, который относительно прост в постановке и применении. Выбор последнего в качестве основного метода исследования в работе определяется его возможностями для:

- одновременного вычисления с одинаковой точностью скоростей и напряжений во всем объеме деформируемого тела;
- построения общих расчетных схем решения классов задач;
- оперативного моделирования НДС при различных схемах деформации благодаря полноте задания (в скоростях и напряжениях) и простоте изменения граничных условий;
- экономичного выполнения процедуры решения системы нелинейных уравнений течения.

Эффективность численных методов решения задач пластичности определяется уровнем их программной реализации. Наряду с созданием сложных систем для анализа полного формоизменения, требующего значительных вычислительных затрат, актуальна разработка и менее сложных программ для расчета НДС на отдельных характерных стадиях нестационарных процессов деформации.

На основе анализа тенденций в развитии технологий и научных исследований процессов горячей объемной штамповки, а также теоретических методов определения НДС и программных средств моделирования пластических деформаций поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке обобщенной математической модели расчета осесимметричного НДС на основе метода численного решения полной системы уравнений пластического течения. Излагается постановка задачи, составляется общая численная схема и алгоритм решения, описывается программное представление и формальное тестирование модели.

Развитые пластические деформации и высокие температуры обработки позволяют использовать для теоретического исследования изучаемых процессов штамповки соотношения теории течения и численный

метод их решения. Нестационарные процессы анализируются в квази-стационарной постановке, сводящей задачу к решениям для мгновенных состояний скоростей и напряжений.

Рассматривается осесимметричное пластическое течение обобщенного тела вращения (рис.2), ограниченного поверхностями S_1 . Деформация происходит под действием инструмента, расположенного на S_1 и перемещающегося со скоростями V_1 , а также соответствующих давлений p_1 со стороны внешней среды. Принятая геометрическая схема расчетной области деформации приближенно описывает при ее трансформации ряд конфигураций поковок сложного осевого сечения.

Ставится задача определения полей скоростей перемещений v_1 ($i = r, z$) и напряжений σ_{1j} ($i, j = r, z$) по объему расчетной области в начальный момент изотермической пластической деформации изотропно упрочняющегося материала под действием внешних нагрузок p_1 и скоростей V_1 , приложенных к части поверхностей S_1 . Деформируемая среда принимается несжимаемой и неоднородной, а течение медленным. Внутри области деформации выполняются уравнения равновесия; на границе - соотношения Коши; при составлении уравнений состояния используется ассоциированный закон течения.

На расчетную область деформации накладывается сетка ортогональных конечных элементов (рис.3), размеры которых нормируются в долях размера R

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{R}{\Delta r_{IJ}}, & t_2 &= \frac{R}{\Delta z_{IJ}}, & t_3 &= \frac{R}{r_{IJ} - 0,5\Delta r_{IJ}}, \\ t_1^c &= \frac{2R}{\Delta r_{IJ} + \Delta r_{I+1J}}, & t_2^c &= \frac{2R}{\Delta z_{IJ} + \Delta z_{IJ+1}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Применительно к элементу рассматривается полная система уравнений пластического течения в конечно-разностном виде. Для принятых схем распределения скоростей, напряжений и индексация сетки (рис.3) эта система для элементе IJ в цилиндрической системе координат с учетом (1) и при исключении σ_r^{IJ} и σ_φ^{IJ} имеет вид

$$t_1(\sigma_r^{1j} - \sigma_r^{1-1j}) + B = 0 \quad (a)$$

$$t_2(\sigma_z^{\alpha\beta} - \sigma_z^{\alpha-1\beta}) + \Gamma = 0 \quad (б)$$

$$\sigma_r^{1j} + \sigma_r^{1-1j} - \sigma_z^{\alpha\beta} - \sigma_z^{\alpha-1\beta} = M \quad (в) \quad (2)$$

$$t_2(v_z^{\alpha\beta} - v_z^{\alpha-1\beta}) + \Delta = 0 \quad (г)$$

Общая геометрическая схема к построению модели

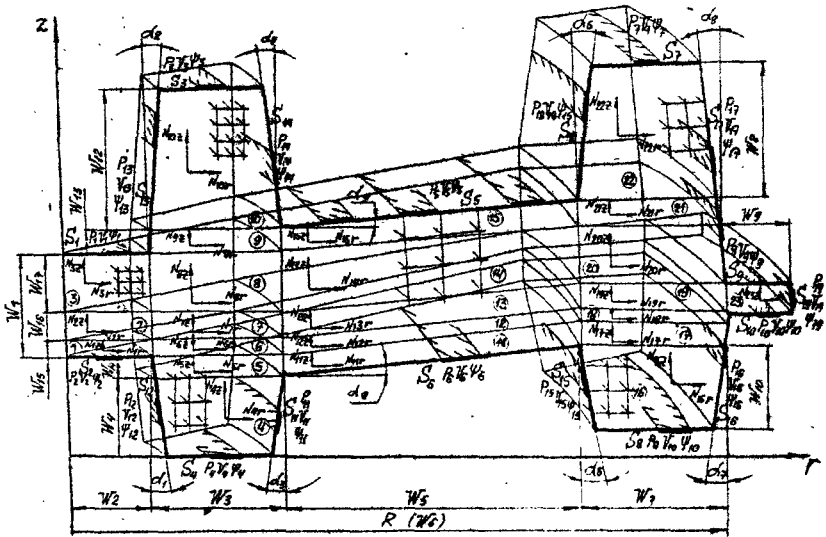


Рис. 2

Схемы распределения скоростей и напряжений (а),
индексации сетки конечных элементов (б)

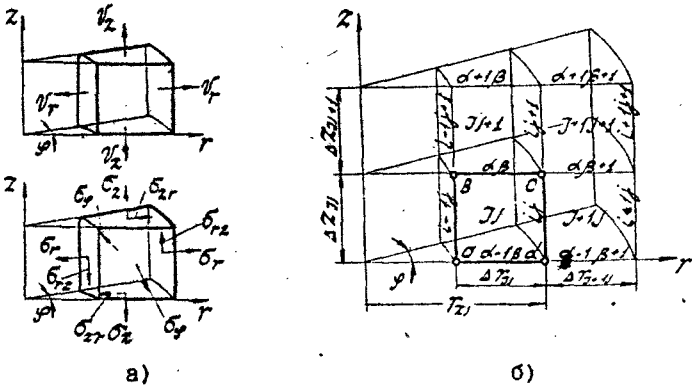


Рис. 3

$$\sigma_{rz}^c = \bar{\lambda}_{IJ}^* \left[t_1^c (v_z^{\alpha\beta+1} - v_z^{\alpha\beta}) + t_2^c (v_r^{1j+1} - v_r^{1j}) \right]. \quad (Л)$$

Здесь

$$B = t_2 (\sigma_{zr}^{\alpha\beta} - \sigma_{zr}^{\alpha-1\beta}) + \bar{\lambda}_{IJ} t_3 \left[2t_1 (v_r^{1j} - v_r^{1-1j}) - t_3 (v_r^{1j} + v_r^{1-1j}) \right],$$

$$\Gamma = t_1 (\sigma_{rz}^{1j} - \sigma_{rz}^{1-1j}) + 0,25 t_3 (\sigma_{zr}^{\alpha\beta} + \sigma_{zr}^{\alpha-1\beta} + \sigma_{rz}^{1j} + \sigma_{rz}^{1-1j}),$$

$$M = 4 \bar{\lambda}_{IJ} \left[t_1 (v_r^{1j} - v_r^{1-1j}) - t_2 (v_z^{\alpha\beta} - v_z^{\alpha-1\beta}) \right],$$

$$L = t_1 (v_r^{1j} - v_r^{1-1j}) + 0,5 t_3 (v_r^{1j} + v_r^{1-1j});$$

$$\sigma_{zr}^{\alpha\beta} = 0,5 (\sigma_{zr}^c + \sigma_{zr}^b), \quad \sigma_{rz}^{1j} = 0,5 (\sigma_{rz}^c + \sigma_{rz}^d);$$

$$\bar{\lambda}^* = 0,25 \sum_{IJ} \frac{1+1j+1}{IJ} \bar{\lambda}_{IJ}^*, \quad \bar{\lambda}_{IJ} = \frac{\lambda_{IJ} V^*}{\sigma_s R}, \quad \lambda_{IJ} = \frac{T_{IJ}}{N_{IJ}};$$

$T_{IJ} = g(N_{IJ})$ - интенсивность касательных напряжений в элементе IJ ;
 N_{IJ} - интенсивность скоростей деформаций сдвига в элементе IJ ;
 V^* - нормальная составляющая скорости деформирования, в долях которой выражены скорости в системе (2); нормальные и касательные напряжения в (2) выражены в долях σ_s .

Для обеспечения определенности (2) рассматривается система, состоящая из этих уравнений для каждого элемента IJ дискретной области деформации при учете граничных условий

$$\begin{aligned} v_r^{1j} &= 0, \quad v_r^{1j} \Big|_{(1j) \in N_q} = V_q^*, \quad v_z^{\alpha\beta} \Big|_{(\alpha\beta) \in N_k} = V_k^*, \\ \sigma_{rz}^{1j} &= \sigma_{rz}^{1j} \Big|_{(1j) \in N_q} = \sigma_{zr}^{\alpha\beta} \Big|_{(\alpha\beta) \in N_k} = 0, \\ \sigma_r^{1j} \Big|_{(1j) \in N_q} &= -P_q, \quad \sigma_z^{\alpha\beta} \Big|_{(\alpha\beta) \in N_k} = -P_k, \\ \sigma_{rz}^{1j} \Big|_{(1j) \in N_q} &= \sigma_q^*, \quad \sigma_{zr}^{\alpha\beta} \Big|_{(\alpha\beta) \in N_k} = \sigma_k^*. \end{aligned} \quad (3)$$

где V_m^* и σ_m^* ($m = q, k; m = 1, \dots, 19$) - заданные нормальные составляющие скорости деформирования и напряжения контактного трения на соответствующих поверхностях S_m ; N_k и N_q ($k = 1, \dots, 10; q = 11, \dots, 19$) - множества, состоящие соответственно из n_k индексов $(\alpha\beta)$ и n_q индексов $(1j)$, принадлежащих граням элементов, примыкающих к сво-

бодной поверхности, и множества N_k и N_q , состоящие из \bar{N}_k индексов ($\alpha\beta$) и \bar{N}_q индексов ($1j$) контактных граней.

Принималось, что на поверхностях контакта металла с инструментом имеет место скольжение, и закон трения выбран в виде

$$\begin{aligned} \sigma_m^* &= \sigma_{f1} = -\phi_c \tau_s (V_{ск}^c / V^*) \cos(n, l); \\ V_{ск}^c &= V_1^c - V_1^{*c}, \quad (m=q, k; f, l=z, r; z \neq r). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь: "с" - грань элемента, принадлежащая контактной поверхности; n - нормаль к поверхности контакта; $V_{ск}^c$ - скорость скольжения металла и условный коэффициент трения ϕ_c на грани "с", $\phi_c \geq 0$.

С учетом граничных условий (3) система, составленная из уравнений (2) по каждому элементу IJ дискретной области деформации, является определенной. Результатом ее решения являются средние значения безразмерных напряжений и скоростей перемещений по граням конечных элементов.

Для элементов со слабонаклоненными гранями, также применяемыми при дискретизации, осуществлена запись соответствующего уравнения несжимаемости, кинематических и контактных условий.

Составлена единая численная схема решения системы нелинейных алгебраических уравнений течения. Полагали, все $\bar{\lambda}_{IJ} = \text{const}$, и сокращали количество уравнений, используя очевидные для вертикальных граней элементов соотношения $(\sigma_r^{1j})_{IJ} = (\sigma_r^{1j})_{I+1j}$. Эти напряжения выражали из (2, а, в), и используя также уравнения (2, б, г), строили эквивалентную систему линейных уравнений.

Принимали, что в этой системе неизвестными являются

$$\begin{aligned} v_r^{1j} \Big|_{(1j) \in D}; \quad v_r^{1j} \Big|_{(1j) \in N_q} \quad (q=11, \dots, 19; 1=1, 1''); \\ v_z^{\alpha\beta} \Big|_{(\alpha\beta) \in N_k} \quad (k=2, 4, 6, 8, 10); \quad \sigma_z^{\alpha\beta} \Big|_{(\alpha\beta) \in \bar{N}_k} \quad (\bar{k}=1, 3, 5, 7, 9). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь: D - множество, состоящее из индексов $1, j$ и α, β , принадлежащих внутренним граням элементов дискретной области деформации $D = \{1, j; \alpha, \beta\}$. Обозначения индексов: $1=1'$ - на поверхностях $S_{12}, S_{13}, S_{15}, S_{18}$ (рис. 2); $1=1''$ - на $S_{11}, S_{14}, S_{16}, S_{17}, S_{19}$; $\alpha = \alpha'$ - на $S_2, S_4, S_6, S_8, S_{10}$; $\alpha = \alpha''$ - на S_1, S_3, S_5, S_7, S_9 .

Устанавливали последовательность вычислений, в процессе которой остальные параметры (2) определяются через (5). Из уравнения (2, г) находят $v_z^{\alpha\beta}$, $(\alpha\beta) \in N_k$ ($k = 2, 4, 6, 8, 10$). Касательные напряжения, не вошедшие в граничные условия (3), выражаются через

неизвестные (5) с использованием уравнения (2.д). Затем вычисляются B , Γ и M . Из уравнений (2,б) определяются $\sigma_z^{\alpha\beta}$, $(\alpha\beta) \in N_K$ ($K=1,3,5,7,9$).

Представляли эквивалентную систему в общем виде и численным методом определяли свободные члены и коэффициенты при неизвестных.

Понижение порядка системы указанным образом обеспечивает решение при числе уравнений в 4-5 меньшим, чем составленном непосредственно из уравнений (2).

Установлена следующая последовательность решения.

1. Задаются геометрические параметры расчетной области деформации: W_1 ($1=1, \dots, 17$), α_1 ($1=1, \dots, 9$).

2. Задаются сетка конечных элементов N_{1j} ($1=1, \dots, 23$; $j=r, z$).

3. В соответствии с плотностью сетки рассчитываются относительные геометрические параметры элементов

$$t_{IJ} = \{t_1(1=1, \dots, 3)\}_{IJ}, \quad I = 1, \dots, I^*; \quad J = 1, \dots, J^*;$$

$$t_p^c \quad (p = 1, 2; \quad c = 1, \dots, c; \quad c - \text{номера узлов}).$$

4. Задаются граничные условия (3).

5. В первом приближении принимается $\bar{\lambda}_{IJ} = \bar{\lambda}_{IJ}^0$, $I = 1, \dots, I^*$; $J = 1, \dots, J^*$.

6. Находятся численным методом коэффициенты и свободные члены формируемой эквивалентной системы линейных уравнений.

7. Решается прямым методом эквивалентная система для определения неизвестных (5).

8. В соответствии с установленной последовательностью вычисляются скорости $v_z^{\alpha\beta}$, $(\alpha\beta) \in N_K$ ($K=2,4,6,8,10$) и напряжения $\sigma_z^{\alpha\beta}$, $(\alpha\beta) \in N_{\bar{K}}$ ($\bar{K}=1,3,5,7,9$); σ_r^{1j} ($1=1, \dots, 1^*$; $j=1, \dots, j^*$). Для каждого элемента IJ рассчитываются значения σ_r^{1j} и σ_z^{1j} .

9. По принятой модели физического состояния деформируемой среды вычисляются через установленные скорости и напряжения $\bar{\lambda}_{IJ}$.

10. Производится сравнение значений $\bar{\lambda}^n$ и $\bar{\lambda}^{n-1}$:

$$\left| \bar{\lambda}_{IJ}^n - \bar{\lambda}_{IJ}^{n-1} \right| \leq \delta, \quad \bar{\lambda}_{IJ}^n = \{\bar{\lambda}_{IJ}(I = 1, \dots, I^*; J = 1, \dots, J^*)\}_{IJ},$$

где δ - точность решения системы уравнений; n - номер итерации.

Процесс итераций повторяется до достижения необходимой точности решения.

Для расчета полей скоростей и напряжений в исследуемых процессах штамповки использовалась разработанная в УИМ модель нели-

ньютоновской среды, которая в безразмерной записи имеет вид

$$T = \tau_m \frac{\bar{N}^\alpha}{\left(N_0 \frac{R}{V^*} \right)^\alpha + \bar{N}^\alpha}, \quad (6)$$

где $\bar{N}^\alpha = \left(N \frac{R}{V^*} \right)^\alpha$, $N_0 = 1 \text{ с}^{-1}$, $\tau_m = \lim_{N \rightarrow \infty} T$, τ_m и α - параметры, зависящие от марки стали, температуры и степени деформации.

Формула (6) построена аппроксимацией экспериментальных данных по испытанию различных марок стали при температуре 900-1200°C. Она применима для описания свойств сталей при горячей обработке давлением в диапазоне степеней деформаций $0 < \epsilon \leq 60\%$ и скоростей 0,05 - 150 с^{-1} , что соответствует температурно-деформационным условиям процессов горячей объемной штамповки. Применение среды (6) позволяет определять НДС с учетом скоростной неоднородности области деформации и скорости деформирования. Величина $\tau_m \approx \sigma_s$ по расчетной области принималась постоянной.

Математический аппарат расчета осесимметричного НДС, включающий принятую модель среды (6), реализован в виде пакета программ для ЭВМ под именем ПЛАСТФОР, имеющего исследовательско-технологическое назначение и получившего официальную регистрацию.

Расчетный эксперимент на модели ПЛАСТФОР по определению НДС при различной плотности сеток позволил сделать вывод об устойчивости решения и определить количество элементов, при котором достигается приемлемая точность, требующая минимальных вычислительных затрат.

В третьей главе численно моделируется НДС при осесимметричном горячем обратном выдавливании - относительно простой (тестовой) и изученной технологической задаче, имеющей характерную для процессов объемной штамповки схему деформации. Актуальным остается и дальнейшее исследование этой операции с целью повышения качества полых изделий.

Инженерная постановка задачи проведена применительно к обратному выдавливанию гладким пуансоном с плоским торцом (рис.4,а). Общая геометрическая схема модели ПЛАСТФОР программно перестраивалась применительно к данному процессу деформации (рис.4,б). Границы расчетной области определялись контуром инструмента и распространялись в зону бокового зазора. Внешние факторы, опреде-

Схемы выдавливания (а) и расчетной области деформации (б)

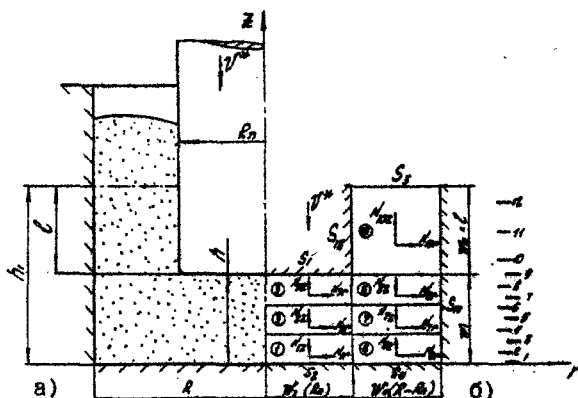


Рис. 4

Характеристики НДС

Графики предельной толщины дна

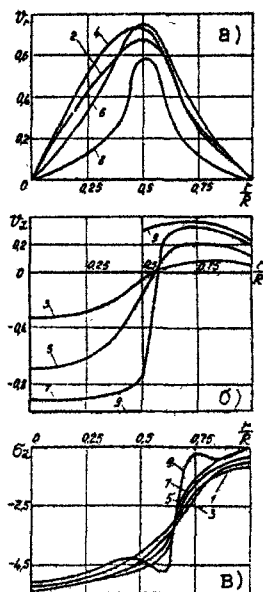


Рис. 5

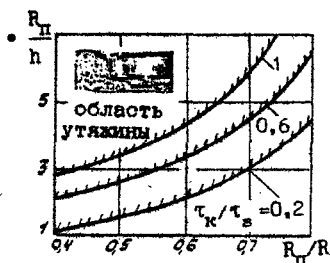


Рис. 6

Расчетная (а) и опытная (б) картины течения

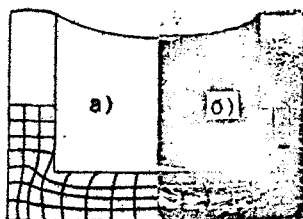


Рис. 7

лящие граничные условия численного моделирования, следующие:

$$\begin{aligned} v_r|_{r=0} = v_r|_{S_{13}} = v_r|_{S_{14}} = v_z|_{S_2, S_4} = 0; \quad v_z|_{S_1} = v^*; \\ \sigma_{rz}|_{r=0} = \sigma_z|_{S_3} = \sigma_{zr}|_{S_3} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Показатель α в модели среды (6) принимался равным 0,4, что соответствует деформации конструкционных сталей в температурном интервале 1100-1200°C. В рассматриваемый момент течения температура постоянна и одинакова по всей области деформации. Согласно принятому закону трения (4) величины ϕ_0 задавались такими, чтобы максимум эпюр напряжений трения на контактных поверхностях не превышал предельной величины $\sigma_m^* = \tau_k \leq \tau_s$.

Расчет НДС проведен для диапазона обжатий $R_{II}/R=0,4-0,9$ и относительных толщин дна изделия $h/R = 0,2-1,4$ в отдельные моменты внедрения пуансона. Анализировалось влияние геометрических параметров заготовки и инструмента, контактных условий и скорости деформирования на кинематику течения и распределение напряжений, силовой режим обратного выдавливания. Результаты решения - числовые массивы безразмерных значений характеристик деформированного и напряженного состояния - представляли графически в виде полей распределения и кривых их изменения в сечениях расчетной области (рис. 5, а-в). Обобщенное описание закономерностей НДС производили полиномиальными зависимостями. Для этого разработали универсальную ЭВМ-программу ПОЛИНОМ, пригодную для аппроксимации многочленом разнообразных данных, полученных пассивным или пассивно-активным математическим (вычислительным) или физическим экспериментом, прошедшую официальную регистрацию.

Результаты численного моделирования углубили известные сведения об основных сторонах стационарной и обеспечили новые знания о НДС на нестационарной стадиях обратного выдавливания. Выявлены локальные кинематические явления и эффекты напряженного состояния, определяющие качество изделий. Показано, что вовлечение угловой зоны выдавливаемой заготовки в интенсивную деформацию вызывает образование утяжки наружного угла полого изделия. Обработкой расчетных данных по программе ПОЛИНОМ получена новая графическая (рис. 6) и аналитическая зависимости для определения критической толщины дна. Рассчитаны противодавления, обеспечивающие изготовление бездефектных деталей с параметром дна, меньше предельного.

Установлено распределение контактных давлений на рабочие поверхности инструмента, в том числе впервые - расчетом на дне матрицы, при выдавливании изделий с соотношениями размеров ранее в решениях не рассматриваемыми. Осуществлено аналитическое описание закономерностей изменения силовых характеристик процесса от деформационных факторов.

Достоверность полученных результатов проверялась их сопоставлением с имеющимися теоретическими и опытными данными по кинематическим и силовым параметрам процесса, экспериментами автора по изучению формоизменения (рис. 6,7), измерению усилий, а также практическим использованием. Разностороннее подтверждение данных расчетов НДС при обратном выдавливании определило возможность применения модели ПЛАСТФОР для исследования более сложных процессов горячей объемной штамповки.

Четвертая глава посвящена исследованию и обобщению закономерностей пластических деформаций при горячей штамповке прогрессивных кольцевых заготовок.

На основе составленной классификации способов штамповки показано, что применение закрытых штампов с компенсационной полостью для изготовления кольцевых поковок $\varnothing 150-300$ мм на КГШП из заготовок обычной точности сокращает расход металла. Распространение процесса сдерживается отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору параметров облойного мостика компенсатора и величины торцового зазора закрытого штампа, обеспечивающих нормальное протекание стадии компенсации избытка металла. Для комплексного подхода к созданию технологии требуется уточнение силового режима на переходах закрытой штамповки.

Практически значимые вопросы решаются на основе информации о НДС, получаемой с применением модели ПЛАСТФОР. Граничные условия расчетных задач соответствовали конечному моменту предварительной и окончательной штамповки кольцевой заготовки в закрытых ручьях (рис.1, схема 1.1). Моделирование проводили для диапазона соотношений размеров ручьев при $V^* = 50$ мм/с, $\alpha = 0,4$ и условия предельного трения.

Установлено влияние основных геометрических факторов, включая форму меридионального сечения кольцевой полости, и контактного трения на тенденцию выхода металла в торцовый зазор. Определяющее влияние на создание режима компенсации оказывают: типоразмер кольцевой поковки, размеры торцового зазора и внутреннего облой-

ного мостика окончательного ручья. Для обобщенного описания закономерностей изменения кинематических и силовых характеристик процесса при сокращенном объеме расчетов применена методика планирования экспериментов, в данном случае вычислительных. По расчетным характеристикам НДС составлена функция скорости перемещения металла в торцовый зазор окончательного ручья. При ее использовании разработана методика выбора параметров закрытого ручья с компенсационной полостью, представленная в виде практической номограммы (рис.8). Рекомендуемые значения мостика и зазора обеспечивают штамповку кольцевой поковки заданных размеров в режиме компенсации избытка объема заготовки при прогнозируемой величине торцового заусенца. Одновременно построены регрессионные модели и соответствующие им номограммы для определения удельных усилий окончательной и предварительной штамповки (рис.9), усредненных нагрузок на мостик компенсатора и стенку закрытого ручья. Даны оценки влияния на усилия контактного трения, степени заполнения предварительного ручья.

Эффективность процессов изготовления кольцевых поковок в открытых штампах с магазином (компенсатором) может быть повышена за счет сокращения отхода металла в облой при рациональном силовом режиме деформации. Оптимизация параметров облойных мостиков по расходу металла и нагрузкам на штамп осуществлена на основе результатов моделирования НДС.

Изучение кинематики течения на стадии заполнения углов окончательного ручья позволило поставить задачу определения параметров наружного и внутреннего облойных мостиков, обеспечивающих минимальный отход металла в облой и перемычку при удовлетворительной стойкости штампа. Расход металла приблизительно оценивали через условную целевую функцию - мгновенный объем, вытесняемый из этого ручья. В качестве условий ограничений задачи линейного программирования принимались функции удельных нагрузок на облойные мостики и гравюру полости ручья. Указанные функции строили по результатам вычислительного эксперимента на модели ПЛАСТФОР для граничных условий, отвечающих соответственно стадии заполнения углов полости и доштамповки. Поиск минимума функции цели проводили симплекс - методом для трех групп обрабатываемой стали и диапазона соотношений размеров ручья. Оптимизированные значения относительных параметров мостиков представлены графическими зависимостями. Функции удельных усилий, имеющие самостоятельное значение для технологи-

Нограмма для выбора параметров закрытых ручьев
с центральным компенсатором

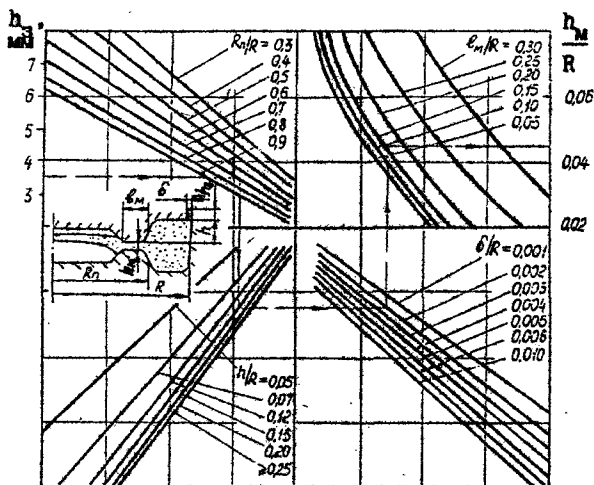


Рис. 8

Нограммы для определения удельных усилий штамповки
в предварительном (а) и окончательном (б) закрытых ручьях

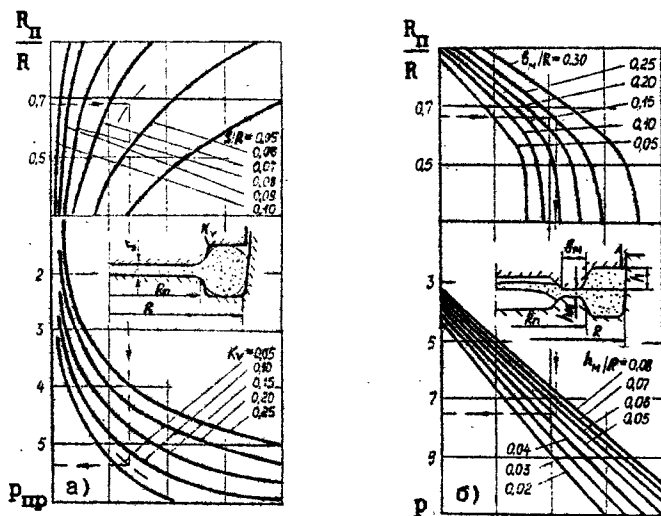


Рис. 9

ческой практики, приведены к виду номограмм.

Результаты расчетов НДС в процессах штамповки кольцевых поковок в штампах с компенсационной полостью проверялись лабораторными экспериментами на свинцовых образцах. Опыты по формоизменению подтвердили реализацию закрытой штамповки в режиме компенсации при установленных параметрах ручьев. Расчетные и экспериментальные поля перемещений для открытой штамповки достаточно хорошо согласуются. Точность зависимостей для определения силовых характеристик удовлетворяет требованиям инженерной практики.

Опытно-промышленное испытание технологии закрытой штамповки, разработанной на основе результатов исследования, показало возможность изготовления качественных кольцевых поковок при сокращении расхода металла более чем на 20%. Применению закрытой и сокращению расхода металла при открытой штамповке способствуют новые конструкции штампов, разработанные для обеспечения равномерной осадки и точной фиксации заготовок в ручьях.

Обобщенные данные исследования НДС в виде методик проектирования процессов штамповки кольцевых поковок в открытых и закрытых штампах на кривошипных прессах приняты к практическому использованию рядом предприятий и организаций.

Преимущества производства кольцевых заготовок в штампах с компенсатором и результаты исследования обеспечили распространение этого процесса на молотовую штамповку. Создана экономичная технология мелкосерийного производства кольцевых поковок $\varnothing 300-500$ мм на одном штамповочном агрегате. Технология основана на способе деформации (рис.1, схема 1.3), сочетающем предварительное фасонирование исходной заготовки на съемном бойке, устанавливаемом в ручье, и окончательную открытую штамповку при выполнении установочным гнездом функции компенсационной полости. Применению технологии в производстве способствовало создание экспериментально обоснованной методики назначения размеров съемных бойков и разработка ряда их новых конструкций. Модель ПЛАСТФОР использовалась для анализа кинематики течения при доштамповке с целью выявления тенденции к образованию прострелов.

Новая технология штамповки на ПЭИМ реализована в кузнечных производствах ОАО "Курганмашзавод" и ПО "Пензкомпрессормаш" для изготовления ряда габаритных кольцевых поковок. Обеспечено сокращение расхода металла на 10-20%, повышение точности высотных размеров на 15-20%, устранение коробления поковок при обрезке, сни-

жение требуемой мощности оборудования и количества ударов в 1,3-1,5 раза.

Современное производство крупногабаритных кольцевых заготовок $\varnothing 400-3000$ мм из углеродистых и легированных сталей основано на эффективной технологической схеме, включающей штамповку на гидропрессах и прокатку на кольцепрокатных станах. Освоение комбинированных технологий на новой кольцепрокатной линии НДТЗ потребовало расширения сведений о силовом режиме прошивки заготовок под раскатку, определения усилий формовки фасонных колец.

Моделирование НДС заготовки при прошивке на прессе двойного действия (рис.1, схема 1.4), реально завершающейся при недозаполнении полости закрытого штампа, проведено на основе ПИ ПЛАСТФОР. Граничные условия расчетной задачи уточнялись данными лабораторного эксперимента по конечному формоизменению. Вычисления проведены для диапазона размеров заготовок кольцебандажного производства, деформируемых на прессе усилием 40/20 МН.

Установлено появление растягивающих тангенциальных напряжений в угловых зонах прошиваемой заготовки. Даны рекомендации по их снижению технологическим путем. Аппроксимацией расчетных данных о контактных напряжениях построены регрессионные зависимости и номограммы для определения удельных усилий прошивки (рис.10,а) и раскрытия штампа, нагрузок на его стенки, отражающие типоразмер заготовки, толщину перемычки и степень заполнения полости. Расчетные усилия приближаются к имеющимся экспериментальным с погрешностью не превышающей 16%.

Для расширения технологических возможностей процесса получения кольцевых заготовок на прессах двойного действия расчетным моделированием определен необходимый силовой режим дополнительной осадки полуфабриката верхней плитой штампа с целью дозаполнения полости.

Подготовка производства фасонных кольцевых изделий - венцов, колец с полками и др. $\varnothing 700-2300$ мм - определяла поиск рациональных переходов деформации на прессах линии НДТЗ. Численным моделированием НДС, дополняемым экспериментальным исследованием формоизменения, обоснован выбор полужакрытой схемы предварительной формовки кольцевого полуфабриката на формовочно-прошивном прессе. Определены усилия необходимые для деформации заготовки детали "венец" с требуемыми для раскатки размерами при отсутствии выхода металла в разъем штампа. Достоверность расчетных усилий подтвер-

Номограммы для определения удельных усилий закрытой прошивки (а), предварительной (б) и окончательной (в) штамповки кольцевых заготовок

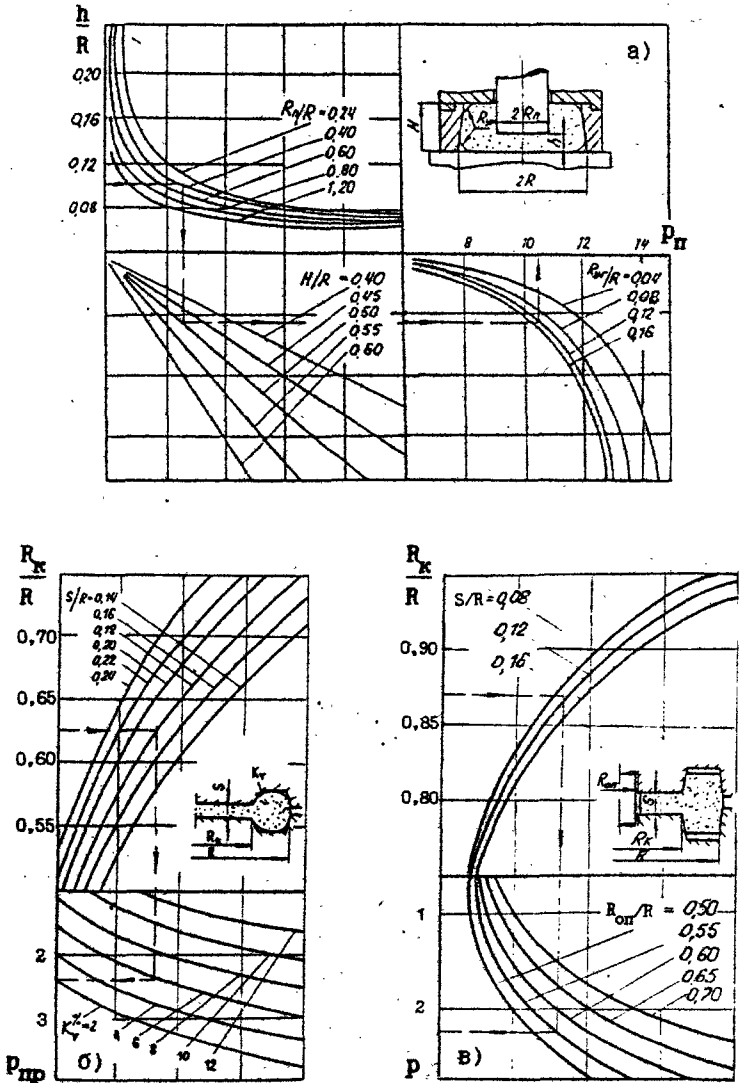


Рис.10

ведена лабораторными опытами автора и производственным опробованием перехода. Осуществлено обобщенное описание закономерностей силового режима полузакрытой штамповки типового фасонного полуфабриката с различным соотношением размеров и полнотой оформления обода (рис.10,б). По результатам моделирования НДС обоснован новый способ штамповки, расширяющий возможности гидропрессов двойного действия для изготовления крупногабаритных изделий.

Значительные диаметральные размеры и пониженная температура раскатанной фасонной заготовки при окончательной формовке на прессе 60 МН вызвали необходимость разработки энергоэкономной схемы деформации. Для этого моделировали НДС при закрытой и полузакрытой штамповке на оправке. Закрытая деформация при осевом центрировании раската характеризуется односторонним радиальным течением, определяющим высокий уровень напряжений. Полузакрытая формовка осадкой предусматривает фиксацию заготовки по внутреннему диаметру обода, раскатанного до конечной высоты. Расчетами показано, что здесь на протяжении всего обжата полки обеспечивается разностороннее течение, гарантирующее достижение требуемой ее толщины при меньших усилиях. Лабораторным экспериментом подтверждены расчетные характер деформации и усилия окончательной штамповки. По данным планируемого вычислительного эксперимента с использованием модели ПЛАСТФОР построены регрессионные модели и номограммы для определения удельных усилий (рис.10,в) и радиуса раздела течения металла при данной схеме окончательной деформации колец.

Результаты исследования прессовых деформаций в технологиях производства кольцевых заготовок на прессопрокатных линиях способствовали освоению номенклатуры изделий кольцебандажного цеха НДТЗ.

В пятой главе проводится теоретическое и экспериментальное изучение пластических деформаций при изготовлении фланцевых поковок в закрытых штампах.

Исходя из разработанной классификации применяемого оборудования и инструмента определены технологические возможности штамповки в закрытых штампах с монолитными и съемными матрицами. Показана практическая важность оценки влияния на НДС схемы деформации и образования торцового заусенца, знания предельных нагрузок и разработки расчетных методик для определения силового режима закрытой штамповки.

С применением ПП ПЛАСТФОР исследовали НДС фланцевых заготовок на стадии доштамповки в монолитном безкомпенсационном закры-

том штампе при деформации на кривошипных прессах. Установлено влияние относительных геометрических параметров поковки и торцового заусенца на кинематику течения и напряженное состояние. Характер распределения напряжений по объему поковки определяется толщиной фланца. Уровень напряжений существенно зависит от размеров образующегося заусенца. Аппроксимирующей обработкой расчетных значений контактных напряжений получены графические и аналитические зависимости, описывающие нагрузки на гравирку ручья, определяющие усилия закрытой штамповки при наличии торцового заусенца. Сравнение расчетных давлений на стенку закрытого ручья с имеющимися экспериментальными данными показало хорошее их согласование. Полученные результаты и программа ПЛАСТФОР использованы для анализа и управления силовым режимом закрытой штамповки, с целью повышения стойкости инструмента, при освоении технологий производства фланцевых поковок массой 0,2–0,6 кг на ОАО "Курганмашзавод".

Закрытая высадка фланцев на ГМ (рис.1, схема 2.2) сопровождается образованием торцового заусенца при частичном раскрытии полуматриц и проталкивании металла в зажимную часть ручья. Для оценки влияния этих явлений на НДС проведено соответствующее моделирование деформации на основе пакета ПЛАСТФОР. Экспериментальное исследование процесса высадки на ГМ В-112 позволило автору установить отвечающие расчетной задаче граничные условия в скоростях. Расчеты НДС отразили особенности кинематики течения и пониженные силовые характеристики деформации в закрытом штампе ГМ. По данным моделирования впервые разработана методика определения усилий закрытой высадки и раскрытия штампа при штамповке фланцевых поковок от переднего и заднего упоров, отражающая влияние на силовой режим торцового заусенца и скорости деформирования. Лабораторный эксперимент по измерению усилий закрытой высадки фланцев стальных поковок показал среднюю точность приближения расчетных значений к фактическим в пределах 12%.

Результаты исследования закрытой штамповки фланцевых поковок использованы для анализа силового режима при освоении и совершенствовании технологий высадки полуосей на ГМ в условиях ЧКПЗ. Одновременно расчетные данные проверялись и дополнялись производственным экспериментом по определению усилий штамповки. В итоге установлены и реализованы рациональные по усилию и расходу металла условия закрытой высадки фланцев полуосей, осуществлен перевод процесса на машину меньшей мощности.

Для изготовления точных поковок типа фланцев наиболее применима штамповка в закрытых штампах с разъемными матрицами. Определенными характеристиками процесса являются усилия выдавливания и раскрытия штампа. Имеющиеся рекомендации для их расчета получены на основе простых теоретических методов при ряде упрощающих допущений и требуют дальнейшего развития. С применением модели ПЛАСТФОР выполнен анализ НДС при горячем радиальном выдавливании осадкой сплошных фланцевых поковок (рис.2, схема 2.3). Рассматривался конечный момент штамповки при экспериментально обоснованной степени заполнения углов закрытой полости. Исследовано влияние на кинематику течения и силовые параметры процесса соотношений размеров инструмента деформации. Выявлены закономерности взаимосвязи усилий выдавливания и раскрытия полуматриц. Для определения которых проведены планируемые расчеты НДС и построены нелинейные регрессионные модели. Результаты исследования процесса обеспечили создание новой конструкции штампа с разъемными матрицами. При опытно и промышленном освоении конструкции изготовлены серийные партии фланцевых поковок массой 0,1-0,8кг, на базе штампа создан на ОЗИМ участок точной горячей штамповки.

В шестой главе численно исследуются прессовые деформации в комплексных технологиях производства колесных заготовок \varnothing 600 - 1150 мм для транспортного и металлургического машиностроения.

Наряду с преимуществами новых колесопрокатных линий по повышению точности штампованных заготовок железнодорожных колес выявлены технологические недостатки основного прессового перехода - формовки: попадание некачественной осевой зоны литой заготовки в ступицу колеса, возможность образования зажима на ободе.

С целью совершенствования серийной технологии выполнен анализ НДС при действующей схеме формовки колесных заготовок (рис.1, схема 3.1). Граничные условия моделирования деформации с применением ПП ПЛАСТФОР соответствовали формоизменению заготовки основного колеса \varnothing 950 мм на гидропрессе 100 МН. Расчетом установлены взаимно связанные кинематические и силовые характеристики двухоправочной формовки колес с различной шириной диска и полнотой оформления обода и ступицы. Моделирование деформации оправками с компенсационными полостями показало, что при этом происходит наиболее полная локализация ликвационной зоны исходной заготовки в удаляемой перемычке. Рекомендации по назначению размеров полых оправок использованы для изменения технологии формовки, обеспечи-

всего устранение брака по дефектам металла ступицы на колесопрокатной линии НДТЗ.

Потери от брака по раскатанному зажиму снижают экономические показатели колесного производства и требуют поиска варианта формовки, исключающего образование дефекта без снижения скорости деформирования. Изучение НДС на начальной стадии формовки выявило причину появления зажима. По расчетным картинам течения определена необходимость создания раннего радиального подпора выходу металла в полость обода со стороны формовочного кольца. Это обеспечивается изменением схемы укладки разогнанной заготовки в штамп. Опробование технологии, включающей кантовку заготовки перед формовкой, на НДТЗ показало отсутствие дефектов по зажиму и возможность устранения брака без снижения производительности линии.

Эксцентричность элементов колеса при изготовлении на новых линиях полностью не устраняется. На решение этой задачи направлен известный способ производства железнодорожных колес (рис.1, схема 3.2), предусматривающий последовательную формовку полномерного диска, а затем, исключая его раскатку по диаметру, ступицы, что уменьшает их смещение. Производственное опробование поэлементной технологии штамповки показало необходимость уточнения силового режима и обоснования перспективных технологических схем реализации способа. Моделирование НДС при формовке полномерного диска выявило усиление тенденции к образованию зажима, что делает обязательным для реализации процесса ранний подпор радиальному истечению металла при повышенном трении. Расчетами показано, что необходимое усилие формовки обеспечивается прессом 100 МН в температурном интервале 1150–1200° С. Для выдавливания ступицы требуется усилие не менее 8 МН. Поэтапное формообразование штамповкой всех элементов колеса и технологическое управление толщиной диска по новому способу формовки станет возможным с созданием гидропресса тройного действия 100/20/10 МН.

С использованием результатов расчетов НДС определены усилия формовки заготовок серийной и перспективной номенклатуры железнодорожных колес, включая цельноштампованные. Значения полных усилий отвечают применяемой схеме и температуре деформации, отражают степень заполнения штампа и согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Обобщение расчетной информации методом факторного анализа при погрешности аппроксимации не превышающей 16%, позволило автору построить новую аналитическую модель и практи-

ческому номограмму для расчета силового режима двухправочной формовки. Удельное усилие определяется типоразмером колеса и полнотой оформления его обода.

Заготовки колес рельсового металлургического транспорта формуются без прокатки диска на прессах. Производство таких изделий на колесопрокатной линии вызывает ряд технических сложностей. Более эффективные технологические схемы могут быть созданы на оборудовании современной кольцепрокатной линии.

Для разработки новой технологии штамповки колес ϕ 650 мм тележек мульд и изложниц (бегунов) на прессе двойного действия линии НДТЗ проведен анализ НДС заготовки на переходах поэлементной деформации. Граничные условия расчетных задач для модели ПЛАСТФОР при формовке диска с ободом и выдавливании ступицы уточнялись лабораторным экспериментом по формоизменению. Расчетом определены необходимые для осуществления процесса усилия деформации, включая силы смыкания штампа, установлена практически достижимая на прессе 40/20 МН степень оформления колеса. Теоретические картины течения и усилия подтверждены опытными данными автора. Результаты обоснования рациональной технологии штамповки бегунов приняты для подготовки производства.

С применением модели ПЛАСТФОР осуществлен анализ возможных вариантов изготовления на прессах кольцепрокатной линии заготовок колес ϕ 600–800 мм для коксовых машин. По результатам численного моделирования НДС разработаны переходы предварительной и окончательной деформации, обеспечившие освоение технологий штамповки этой номенклатуры изделий в кольцебандажном цехе НДТЗ.

Результаты комплексного исследования прессовых деформаций при производстве колесных заготовок приняты НИИтяжмашем для проведения проектно-конструкторских работ по созданию и реконструкции прессопрокатных линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленной научной проблемы создана обобщенная математическая модель расчета пластической деформации для класса процессов горячей объемной штамповки, и на основе ее применения осуществлено развитие теории и технологий прогрессивных процессов производства заготовок тел вращения, имеющих важное народно-хозяйственное значение.

Основные научные и практические результаты проведенной работы заключены в следующем:

1. С позиции общего теоретического подхода к рассмотрению проблемы создана новая численная математическая модель для расчета неоднородного осесимметричного НДС пластически обрабатываемого металла, обеспечивающая вычисление скоростей и напряжений с одинаковой точностью, ориентированная на класс процессов штамповки поковок тел вращения.
2. Составлен универсальный алгоритм реализации модели, позволяющий при небольших вычислительных затратах моделировать на ЭВМ напряженно-деформированное состояние при разнообразных схемах горячей штамповки стальных осесимметричных поковок и оформленный в пакет прикладных программ ПЛАСТФОР для современных компьютеров.
3. Получены новые научные знания о НДС и закономерностях его изменения в ресурсосберегающих способах горячей штамповки кольцевых, фланцевых и колесных заготовок в зависимости от конструктивно-технологических факторов процессов, полноты оформления поковок, контактного трения и скорости деформирования.
4. На основе информации о скоростях и напряжениях спрогнозировано формоизменение, выявлены локальные кинематические явления и эффекты напряженного состояния, обуславливающие причины образования дефектов, определены пути предотвращения брака изделий в действующих и новых технологиях штамповки.
5. Установленные во взаимосвязи с кинематикой течения силовые параметры: распределенные контактные нагрузки на инструмент, удельные и полные технологические усилия - обеспечили выбор рациональных по энергозатратам и оптимальных по расходу металла условий деформирования для современных и перспективных процессов изготовления горячештампованных заготовок.
6. Обобщением методами математической статистики расчетных характеристик НДС созданы новые инженерные методики проектирования, позволяющие выполнять научно обоснованный выбор параметров инструмента деформации, определять требования к мощности оборудования, обеспечивающие комплексный подход к созданию новых и интенсификации действующих технологий штамповки.
7. С позиций научного подхода, на уровне изобретений, разработаны новые способы штамповки и конструкции инструмента, способствующие освоению ресурсоэкономных технологий.

8. Результаты работы реализованы в промышленности: в виде пакета программ ПЛАСТФОР, включенного в автоматизированные системы технологической подготовки производств, инженерных методов проектирования процессов штамповки, принятых к использованию рядом организаций, а также путем совершенствования действующих, создания и внедрения новых технологий и штампов на машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях.

9. Полученные результаты применяются в учебном процессе по дисциплинам: "Технологияковки и горячей штамповки", "САПР технологий кузнечно-штамповочного производства"; при проведении курсового и дипломного проектирования по тематике горячей штамповки.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Одинокоев В.И., Каплунов Б.Г. Расчет пластического течения цилиндрического тела при осесимметричной деформации // Прикладная механика, 1978.- Вып.14.- №5.- С.17-24.

2. Каплунов Б.Г., Одинокоев В.И., Скопечный А.И. Напряженно-деформированное состояние металла при горячей закрытой прошивке. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия, 1979.- №6.- С.48-51.

3. Каплунов Б.Г., Одинокоев В.И., Скопечный А.И. Напряженно-деформированное состояние металла при горячей закрытой прошивке. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия, 1979. - №10. С.30-32.

4. Каплунов Б.Г., Одинокоев В.И. Силовые параметры горячего обратного выдавливания // Известия вузов. Черная металлургия, 1982.- №4.- С.55-58.

5. Каплунов Б.Г., Одинокоев В.И., Староселецкий М.И., Валетов М.С. К расчету пластического течения металла при штамповке поковок железнодорожных колес // Исследование машин и технологии кузнечно - штамповочного производства. - Челябинск: ЧПИ, 1982.- №277.- С.53-58.

6. Каплунов Б.Г., Одинокоев В.И. Определение условий возникновения и устранения угловой утяжки // Известия вузов. Черная металлургия, 1983.- №5.- С.63-65.

7. Каплунов Б.Г., Фельде А.А. Напряженно - деформированное состояние металла при штамповке в закрытом штампе с компенсационной полостью // Известия вузов. Черная металлургия, 1985.- №6.- С.46-49.

8. Каплунов Б.Г., Крашевич В.Н., Староселецкий М.И., Валетов М.С., Фельде А.А. К выбору рациональной схемы штамповки колесных заготовок // Известия вузов. Черная металлургия, 1986.- №7.- С.95-98.

9. Фельде А.А., Каплунов Б.Г. К выбору параметров закрытых ручьев // Известия вузов. Черная металлургия, 1986.- №10.- С.57-62.

10. Каплунов Б.Г., Малюк Н.Н. Напряженно - деформированное состояние заготовки при операции прошивки в закрытом штампе // Актуальные проблемы механики сплошных сред.- Свердловск: СИПМ, 1988.- С.152-156.

11. Фельде А.А., Каплунов Б.Г. Оптимизация параметров открытых штампов и технологические нагрузки // Известия вузов. Черная металлургия, 1989.- №10.- С.33-38.

12. Каплунов Б.Г., Фельде А.А. Проектирование штампов с компенсатором /Учебное пособие.- Челябинск: ЧПИ, 1989.- 41с.

13. Каплунов Б.Г., Фельде А.А., Григорьев Г.Д. Методика проектирования съемных бойков для малотходной молотовой штамповки // Исследование машин и технологии кузнечно - штамповочного производства.- Челябинск: ЧПИ, 1990.- С.78-83.

14. Григорьев Г.Д., Каплунов Б.Г., Фельде А.А., Зуев С.П. Способ штамповки кольцевых изделий и инструмент для его реализации // Кузнечно - штамповочное производство, 1991.- №2.- С.30-32.

15. Каплунов Б.Г., Крашевич В.Н., Староселецкий М.И., Белущенко А.В. Прогнозирование и способ устранения образования зажимов при формовке колесных заготовок // Известия вузов. Черная металлургия, 1991.- №1.- С.55-56.

16. Каплунов Б.Г., Озимин В.М., Староселецкий М.И. Рациональная технология штамповки колесных заготовок // Известия вузов. Черная металлургия, 1993.- №3.- С.23-25.

17. Баев Ю.Д., Каплунов Б.Г. Нагрузки на инструмент при штамповке в разъемных матрицах // Исследование машин и технологии кузнечно - штамповочного производства: Темат. сб. научн. тр.- Челябинск: ЧГТУ, 1994.- С.22-29.

18. Каплунов Б.Г. Развитие теории и технологий объемной штамповки на основе численного моделирования // Исследование машин и технологии кузнечно - штамповочного производства: Темат. сб. научн. тр.- Челябинск: ЧГТУ, 1994.- С.10-16.

19. Каплунов Б.Г. Математическая модель расчета пластической деформации в процессах штамповки заготовок тел вращения // Известия вузов. Черная металлургия, 1994.- №2.- С.20-25.

20. Каплунов Б.Г. Развитие теории и технологий прогрессивных процессов горячей штамповки на основе моделирования пластических деформаций // Оборудование и процессы обработки давлением. Материалы Всероссийской юбилейной научно - технической конференции "100 - летие со дня рождения профессора А.И. Зими́на." - М.: МГТУ, 1995.- С.76-82.

21. Каплунов Б.Г. Развитие теории и технологий процессов горячей объемной штамповки на основе моделирования пластической деформации // Тезисы докладов международной научно-техн. конф. - Орел : ОГТУ, 1995.-С.40-41.

22. Каплунов Б.Г. Развитие теории и технологий горячей объемной штамповки //Машины и технологии прогрессивных процессов обработки давлением: Темат.сб.научн.тр.-Челябинск: ЧГТУ,1996.-С.18-39.

23. Каплунов Б.Г., Баев Д.Д., Фельде А.А., Ялов Б.Д. Штамп для изготовления точных заготовок в разъемных матрицах // Кузнечно-штамповочное производство, 1997.- №7.- С.30-31.

24. А.с. 927392 (СССР). МКИ В21 Н1/04. Способ поэлементной штамповки изделий типа колес / М.С. Валетов, В.К. Серяченко, Б.Г. Каплунов (СССР) // Открытия. Изобретения, 1982.- №18.- С.50.

25. А.с. 1281332 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для осадки заготовок /Б.Г. Каплунов, А.А. Фельде, П.А. Студницян, А.М. Дерябин (СССР) // Открытия. Изобретения, 1987.- №1.-С.35.

26. А.с. 1366272 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для осадки заготовок / А.А. Фельде, Б.Г. Каплунов, П.А. Студницян (СССР) // Открытия. Изобретения, 1988.- №2.- С.45.

27. А.с. 1368098 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для объемной штамповки поковок /П.А. Студницян, Б.Г. Каплунов, Г.Д. Григорьев, С.П. Зуев (СССР) //Открытия. Изобретения, 1988.-№3.-С.46-47.

28. А.с. 1423244 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для объемной штамповки / Д.Д. Баев, Б.Г. Каплунов (СССР) //Открытия. Изобретения, 1988.- №34.- С.54.

29. А.с. 1440596 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для горячей штамповки / Б.Г. Каплунов, А.А. Фельде, П.А. Студницян (СССР) // Открытия. Изобретения, 1988.- № 44.- С.54.

30. Пат. 1569072 (РФ). МКИ В21J 13/02. Штамп для изготовления изделий типа колец с массивным ободом/А.А. Фельде, Б.Г. Каплунов, Г.Д. Григорьев, С.П. Зуев (РФ) // Открытия. Изобретения, 1990.- №21.- С.39-40.

31. А.с. 1729674 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для объемной штамповки /Ю.Д. Баев, Б.Г.Каплунов, А.А.Фельде (СССР) // Открытия. Изобретения, 1992.- №16.- С.57-58.

32. А.с. 1731390 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для изготовления изделий типа колец с массивным ободом /П.А. Студинцын, А.А. Фельде, Б.Г.Каплунов, Г.Д.Григорьев, С.П.Зуев (СССР) // Открытия. Изобретения, 1992.- №17.- С.49.

33. Пат.1821283. МКИ В21J 13/02. Штамп для объемной штамповки /Ю.Д.Баев, Б.Г.Каплунов, А.А.Фельде (СССР) // Открытия. Изобретения, 1993.- №22.- С.34.

34. А.с. 1821285 (СССР). МКИ В21J 13/02. Штамп для изготовления изделий типа низких толстостенных колец /А.А.Фельде, Б.Г.Каплунов, Г.Д.Григорьев //Открытия. Изобретения, 1993.-№22.-С.34.

35. Пат. 1833239 (РФ). МКИ В21J 13/02. Штамп для изготовления изделий типа колец с массивным ободом /Г.Д. Григорьев, Б.Г. Каплунов, А.А. Фельде, С.П. Зуев (РФ) // Открытия. Изобретения, 1993.- №29.- С.116.

36. Пат. 2062172 (РФ). МКИ В21К 1/32, В21J 5/02. Способ штамповки крупных деталей типа дисков / Б.Г. Каплунов, А.А. Фельде, В.М. Озимин (РФ) // Открытия. Изобретения, 1996.- №17.- С.168.

37. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Рег. №960489. Программа для ЭВМ: "Расчет осесимметричной пластической деформации" ("ПЛАСТФОР"). Автор: Каплунов Б.Г. (РФ). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.11.96 г.

38. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Рег. № 960486. Программа для ЭВМ: "Построение аппроксимирующей полиномиальной модели" ("ПОЛИНОМ"). Автор: Каплунов Б.Г.(РФ). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.11.96 г.

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 02.02.98. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л.2,09. Уч.-изд. л.2.
Тираж 100 экз. Заказ 37/50.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.