

ДЕМИН ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ НА ОСНОВЕ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ**

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2003

Работа выполнена в Московском государственном индустриальном университете.

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Овчинников А.Г.

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Яковлев С.П.

доктор технических наук, профессор
Филиппов Ю.К.

Ведущая организация –

Институт машиноведения РАН РФ



Защита состоится "14" мая 2003 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

Телефон для справок 267-09-63

Автореферат разослан "10" апреля 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доц. Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Практическое значение листовой штамповки как важнейшей составляющей машиностроительных производств общеизвестно, поэтому теоретические исследования в этой области развиваются весьма интенсивно. При этом, несмотря на то, что при листовой штамповке деформируется заготовка, толщина которой значительно меньше двух других характерных размеров, реальные процессы пластического течения чрезвычайно сложны для аналитических исследований.

Поэтому при постановке и решении технологических задач на деформации накладывается ряд ограничений. Основное из них, кинематическое, предполагает, что прямые элементы, нормальные к срединной поверхности до деформации, остаются прямыми и нормальными к той же поверхности после деформации и их длины не изменяются. С позиций математической формулировки задачи это означает, что толщина заготовки не изменяется, все силы относятся к срединной поверхности, в направлении толщины напряжения осредняются. Дополнительно к этому допускается, что напряженное состояние плоское. Такие предположения вполне приемлемы для тонкостенных оболочек. Однако существует целый ряд технологических процессов, таких как: гибка на малый радиус, вытяжка толстостенных изделий, рельефная формовка, формовка ребер жесткости, отбортовка под резбу, реверсивная отбортовка и т.п., в которых толщина и радиус кривизны представляют собой величины одного порядка. Поэтому использование гипотезы прямых нормалей существенно снижает точность получаемых результатов и фактически делает трудноосуществимым исследование технологических эффектов, связанных с локальными характеристиками напряженно-деформированного состояния.

Особое место в технологии листовой штамповки занимают процессы получения изделий из толстолистовых заготовок. Наибольшие технологические трудности возникают при изготовлении крупногабаритных толстостенных деталей типа днищ, штампуемых в горячем состоянии. К тому же, условия эксплуатации предъявляют повышенные требования к подобным деталям по разнотолщинности, структуре и механическим свойствам материала. Следует подчеркнуть, что в случае горячего деформирования многопереходные процессы практически исключаются из-за необходимости промежуточных подогревов и сложности установки полуфабриката в штамп. Поэтому штамповка толстолистовых заготовок осуществляется практически на предельных режимах, приводящих к возрастанию вероятности возникновения брака по причине либо чрезмерного утонения стенки, либо разрушения, либо образования складок.

Отмеченные особенности пластического деформирования листового материала делают необходимым выделение в области листовой штамповки класса процессов толстолистовой штамповки, для которых напряженное со-

стояние нельзя рассматривать как плоское; и недопустимо использование основных приведенных выше упрощающих предпосылок. Повышение точности теоретических решений технологических задач является необходимым условием получения изделий заданного качества, сокращения сроков подготовки производства, снижения материалоемкости и трудоемкости изготовления продукции.

В связи с вышесказанным разработка метода проектирования технологических процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов является актуальной и направлена на решение задачи, которая имеет важное народно-хозяйственное значение, и вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Цель работы. Разработка метода проектирования технологических процессов, управляемых на основе прогнозирования технологических отказов, что позволит существенно ускорить внедрение передовых технологических процессов на производстве и повысить его эффективность.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработка методик проведения технологических испытаний листовых материалов на единой базе экспериментальных данных и исследования предельной формоустойчивости и разрушения толстого листа;
- выявление закономерностей контактного трения при штамповке толстого листа для обоснованного выбора величины коэффициента трения с целью приближения математической модели к реальному процессу пластического течения;
- развитие теории деформаций при конечном нелинейном деформировании в части разработки метода определения конечных деформаций, основанного на суммировании перемещений, что научно обосновывает применение предложенной методики прогнозирования потери устойчивости в процессе пластической деформации;
- исследование основных закономерностей пластического течения в толстолистовой заготовке и создание научно обоснованной методики проектирования технологических процессов, управляемых на основе прогнозирования технологических отказов;
- разработка алгоритма расчета и пакета программ для решения прикладных задач деформирования толстолистовых заготовок, позволяющих изучать процессы пластического деформирования с использованием их математических моделей при минимальном объеме экспериментальных исследований;
- разработка и промышленное освоение технологических процессов, управляемых на основе прогнозирования технологических отказов, что позволит существенно повысить эффективность производства.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- предложены методики построения диаграмм предельных устойчивых деформаций и разрушения, позволяющие значительно сократить объем экспериментальных исследований;
- предложена методология определения контактного трения при листовой штамповке, учитывающая зависимость коэффициента трения от нормального напряжения на границе между заготовкой и инструментом;
- поставлена и решена задача определения конечных деформаций в процессах нелинейного деформирования;
- обобщена тензорная модель накопления повреждений на случай многоосевных процессов малой кривизны;
- дана математическая формулировка двумерной задачи пластического течения в процессах толстолистовой штамповки, учитывающая выявленные закономерности контактного трения и возникающие технологические отказы;
- поставлены и решены трехмерные задачи для частных случаев толстолистовой штамповки;
- получены новые решения задач, касающихся основных формоизменяющих операций толстолистовой штамповки, качественно и количественно оценены напряженно-деформированное состояние и эффекты, связанные с немонотонностью деформации.

На защиту выносятся:

- методика определения предельной формоустойчивости толстого листа;
- результаты исследования закономерностей контактного трения при штамповке толстого листа;
- методика определения конечных деформаций при нелинейном деформировании;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов формовки при немонотонном деформировании толстолистовой заготовки;
- результаты теоретических исследований процессов толстолистовой штамповки, управляемых на основе прогнозирования технологических отказов, без использования гипотезы прямых нормалей и предположения о плоском напряженном состоянии, а также решения характерных задач и обнаруженные технологические эффекты;
- алгоритм расчета и пакет программ для решения прикладных задач деформирования толстолистовых заготовок в двумерной и (для некоторых частных случаев) в трехмерной постановках;
- результаты теоретических исследований и внедрения разработанных технологических процессов, алгоритмов и методов расчета в практику проектирования технологической оснастки и процессов в производстве, а также в учебный процесс.

Работа выполнена на кафедре "Машины и технология обработки металлов давлением" Московского государственного индустриального университета в соответствии с планами научно-технических и хозяйственных работ с ОАО ВНИИ Кабельной промышленности, ГНЦ ЦНИИТМАШ, ОАМО ЗИЛ и рядом других предприятий и организаций. Отдельные разделы работы выполнены в соответствии с заданиями Российского Фонда фундаментальных исследований №97-01-00742 (1997 – 1999 г.), №99-01-00092 (1999 – 2001 г.), а также по программе Академии транспорта России "Транспорт России".

Практическая ценность работы

Применение разработанного пакета прикладных программ и созданных на базе выполненных исследований методик позволило научно обосновать расчетные параметры проектируемых технологических процессов толстолистовой штамповки, ускорить подготовку производства и повысить качество выпускаемой продукции.

Результаты диссертационной работы реализованы:

- в ОАО ВНИИ Кабельной промышленности в виде нового технологического процесса штамповки коконообразных гофрированных волноводов со значительным экономическим эффектом, достигнутым за счет снижения производственных затрат и повышения эксплуатационных характеристик изделий;

- в ГНЦ ЦНИИТМАШ в виде рекомендаций по расчету технологических параметров толстолистовой штамповки крупногабаритных деталей, позволяющих прогнозировать возможные технологические отказы и виды брака уже на стадии проектирования, повысить эффективность производства и качество изделий ответственного назначения;

- рекомендованы:

- Академией транспорта России для использования в качестве методических материалов на автотракторных заводах отрасли;

- в Московском государственном индустриальном и Воронежском государственном техническом университетах в виде учебных материалов программного комплекса.

Методы исследования. Разработка метода проектирования технологических процессов толстолистовой штамповки проведена с использованием методов математического моделирования процессов пластического деформирования, основанных на фундаментальных положениях механики твердого деформируемого тела и общих законах пластического течения. Для решения поставленной задачи использовался метод конечных элементов (МКЭ), который является одним из наиболее совершенных на сегодняшний день. Решение строилось с использованием экстремальных принципов для жестко-пластической среды, движение которой описывается уравнениями теории течения. Прогнозирование технологических отказов

проводилось по теоретически обоснованным и экспериментально проверенным критериям. Исследование теплообмена осуществлялось на основе общих соотношений теории теплопроводности с учетом теплопередачи в окружающую среду.

Экспериментальные исследования проведены с использованием современных испытательных машин и приборов. Для обработки результатов использовались методы математической статистики и планирования экспериментов. Для экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния применяли метод сеток. Учитывали также экспериментальные данные, полученные другими исследователями.

Апробация работы

Материалы работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: 6-th International Symposium on Creep and Coupled Processes. Bialystok Technical University, Bialystok (Poland). 1998г; Научно-техническая конференция. Современные аэрокосмические технологии. Воронеж, ВГТУ, 2000 г.; Международная научно-техническая конференция. "Прикладные задачи механики и тепломассообмена в авиационной технике". Воронеж, ВГТУ, 2000.; Современные проблемы прочности. 4 и 5-й международный семинар им. В.А. Лихачева. Старая Русса, 2000 г., 2001 г.; Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. УрО РАН, Пермь, 2001 г.; Международный научный симпозиум по проблемам механики деформируемых тел, посвященный 90-летию А.А. Ильюшина. Москва, 22-23 января, 2001 г., МГУ.; Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow I Konstrukcji. Augustow. (Poland). 23 – 26 Maja. 2001 г.; IV Международная научно-техническая конференция. "Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов". УлГУ, Ульяновск 10-12 декабря 2001 г.; V Всероссийская научно-практическая конференция. "Современные технологии в машиностроении", Пенза, 2002 г.; 2 International Conference "Research and development in mechanical industry" RaDMI 2002. 2–4 September 2002 г., Vrnjacka Banja, Yugoslavia.; XXXIX Международная науч.-практич. конф. ААИ. "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров". Москва. МАМИ, 2002 г.; в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре МТ-6, а также на научно-практических конференциях и научных семинарах кафедры "Машины и технология обработки металлов давлением" МГИУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 30 работ (в том числе 2 монографии), получен патент Российской Федерации.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 247 наименований, содержит 342 страницы машинописного текста, включая 184 рисунка, 14 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, определены научное содержание и новизна, практическая значимость, перечень положений, выносимых автором на защиту.

Первая глава посвящена анализу современных технологических процессов листовой штамповки, особенностей пластического течения в листовой заготовке, а также факторов и критериев, определяющих предельную деформацию.

Изучение широко применяемых в промышленности листоштамповочных операций позволяет заключить, что проблема предотвращения технологических отказов существует, причем актуальность ее возрастает в тех случаях, когда толщина деформируемой заготовки одного порядка с радиусом ее кривизны. Проведенный анализ показал, что подобные условия деформирования могут возникнуть при выполнении очень многих операций листовой штамповки, независимо от толщины исходного материала. Это относится к операциям: гибки на малый радиус, когда нейтральная поверхность существенно не совпадает со срединной; формовки гофр и несимметричных ребер жесткости; отбортовки; вытяжки с малыми радиусами, особенно с перетяжными порогами и т. п.

В работах Е.А. Попова, А.Г. Овчинникова, Е.Н. Мошнина и других авторов отмечается, что в таких процессах явно выражена неравномерность напряжений и деформаций по толщине, а само напряженное состояние нельзя рассматривать как плоское. На этом основании сделан вывод, что исследование подобных процессов с позиций тонкостенных оболочек приводит к большим погрешностям и, следовательно, необходимо выделить самостоятельный класс процессов толстолистовой штамповки.

Выполненный обзор работ показал, что совершенствование известных и создание новых технологических процессов листовой штамповки, прогнозирование возможных технологических отказов представляют собой проблему большой практической значимости, поэтому исследования в этой области развиваются весьма интенсивно.

Значительный вклад в создание общей теории листовой штамповки, методов решения технологических задач, подходов к прогнозированию потери устойчивости и разрушения внесли Г.Я. Гун, Г.Д. Дель, Е.И. Исаченков, Е. Зибель, А.А. Ильюшин, Л.М. Качанов, Ю.Г. Калпин, В.Л. Колмогоров, А.Д. Матвеев, Е.Н. Мошнин, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, Е.А. Попов, Ю.Н. Работнов, Л.Г. Степанский, М.В. Сторожев, А.Д. Томленов, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, Р. Хилл и другие.

Проведенный анализ работ показал, что достижения в построении теории листовой штамповки весьма значительны. С точностью, достаточной для практических приложений, исследованы основные формоизменяющие операции с учетом упрочнения, изменения толщины и действия изгибающих моментов. Однако тот же анализ показывает, что в связи с ис-

ключительной сложностью математического исследования реальных процессов штамповки, в известных решениях на деформированное и напряженное состояние используются большие ограничения, которые неизбежно приводят к осреднению характеристик напряженно-деформированного состояния по толщине. Как следует из работ А.А. Богатова, Г.Д. Деля, Ю.Г. Каплина, В.Л. Колмогорова, В.А. Огородникова, критериальные соотношения, относящиеся к локализации деформации и разрушению, особенно в тензорном их представлении, являются функциями точки, поэтому при исследовании процессов толстолистовой штамповки необходимо исходить не из осредненных, а из действительных полей напряжений, деформаций и температур. Результаты выполненного анализа показали, что при решении задач толстолистовой штамповки необходимо отказаться от упомянутых выше упрощений и, прежде всего, от гипотезы прямых нормалей и плоского напряженного состояния.

Из литературных источников также следует, что для рассматриваемого класса процессов более существенно моментное напряженное состояние, так как область его действия, оцениваемую характерным размером $\lambda = \sqrt{RS}$ (где R, S – радиус и толщина заготовки, соответственно), нельзя считать малой. Кроме того, недостаточно изучены предельное формоизменение при немонотонных процессах и особенности горячей штамповки листовых заготовок. На основе проведенного анализа сформулирована цель работы, установлены необходимые для ее достижения задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, а также положения, выносимые автором на защиту.

Во второй главе сформулированы общие положения проектирования процессов толстолистовой штамповки, управляемых на основе прогнозирования технологических отказов. Методологической основой этих положений является использование при прогнозировании технологических отказов трех диаграмм предельной формоустойчивости: диаграммы предельно-устойчивых деформаций (ДПУД), диаграммы разрушения (ДР) и диаграммы пластичности (ДП). Эффективность такого подхода несомненна, так как для одной и той же детали в ее различных зонах доминирующим отказом может оказаться либо разрушение вследствие исчерпания пластичности, либо локализация деформаций, либо локализация деформаций с последующим разрушением.

Для оценки степени использования запаса пластичности предложены и построены на базе усовершенствованной методики экспериментов по формовке полос Накасимы диаграммы для стали 08пс, алюминиевых сплавов Д16АМ, АМц в координатах $\alpha - e_o^*$ и $\alpha - e_o^{**}$, где $\alpha = e_2/e_1$ – параметр вида деформированного состояния, $e_1 \geq e_2$ – компоненты логарифмической деформации, e_o^* и e_o^{**} – интенсивности логарифмических деформаций в момент потери устойчивости и разрушения соответственно.

Применение разработанной методики обеспечивает возможность построения ДПД в широком диапазоне изменения параметра вида деформированного состояния ($-0,5 \leq \alpha \leq 1$), что позволяет описывать предельные деформационные свойства материала для большинства формообразующих операций толстолистовой штамповки: вытяжки ($\alpha = 0 \dots 0,5$), формовки ($\alpha = 0,6 \dots 1,0$), отбортовки и гибки ($\eta_k = \eta_2$), обтяжки ($\alpha = -0,4 \dots 0,1$) и др. (где η_2 – параметр Надаи-Лодэ).

Основными достоинствами разработанной методики построения ДПД по результатам испытаний полос Накасимы являются:

- максимальное приближение условий испытаний к условиям проектируемой технологической операции по трению и нагружению;
- создание на образце достаточно протяженной зоны с однородным напряженно-деформированным состоянием, что позволяет обеспечить в этой зоне условия простого деформирования, о чем свидетельствует постоянство параметра вида деформированного состояния α на протяжении всего процесса испытания, включая и разрушение;
- обеспечение одинаковых условий деформирования во всей области изменения параметра α , характерной для большинства формообразующих операций толстолистовой штамповки;
- использование одного и того же стандартного испытательного оборудования и технологической оснастки.

Так как предельные устойчивые деформации толстолистовых материалов зависят от условий прокатки листа, режимов исходной термической обработки, дефектов листа структурного и геометрического характера, то использование разработанной методики сводит к минимуму влияние этих факторов во всем диапазоне изменения α и тем самым повышает точность и стабильность построения ДПД.

С целью сокращения расхода материала на образцы и снижения трудоемкости испытаний, используемых при построении ДПД, разработана производственная методика, при реализации которой предусматривается проведение ограниченного числа испытаний (трех):

- формовка узких полос, $B = 40$ мм ($\alpha \approx -0,5$);
- формовка широких полос, $B = 95$ мм ($\alpha \approx 0$);
- формовка круглых образцов в условиях двухосного равномерного растяжения ($\alpha \approx 1$).

Проведение указанных видов испытаний позволяет охватить практически весь диапазон возможных изменений параметра α , характерный для формообразующих операций толстолистовой штамповки.

В некоторых операциях листовой штамповки разрушение формируемой заготовки может происходить без предварительной локализации деформации из-за недостатка пластичности ее материала. Такого рода браковочный признак встречается при реализации таких формообразующих операций, как формовка, вытяжка через перетяжное ребро, гибка на малые радиусы.

Он возникает, как правило, из-за несоответствия геометрических параметров штампуемой детали (радиусов перехода и их зон, толщины стенки и т. п.) характеристикам пластичности используемых материалов.

Диаграмма пластичности толстолистного материала имеет практическое значение в двух случаях:

1) когда деформация разрушения меньше предельной устойчивой деформации;

2) в силу особенностей деформирования потеря устойчивости в форме локализации деформации вообще не происходит, т.е. деформирование вплоть до разрушения является устойчивым.

Указанные случаи охватывают класс процессов толстолистовой штамповки немонокотного деформирования.

Диаграммы разрушения для исследованных материалов строили в координатах $\alpha - e_0^{**}$ по результатам испытаний, которые были проведены для построения ДПД. Накопленную к моменту разрушения образца интенсивность пластических деформаций e_0^{**} получали расчетным путем. Деформации разрушения e_1^{**} и e_2^{**} определяли по графикам, экстраполируя установленные методом делительных сеток зависимости $e_1(R)$ и $e_2(R)$ на край трещины. По рассчитанным значениям предельной пластичности e_0^{**} и определенным величинам $\alpha = e_2^{**}/e_1^{**}$ построены диаграммы разрушения для стали 08пс и алюминиевого сплава Д16АМ.

Предложенный подход требует знания не только истории изменения инвариантных характеристик напряженного и деформированного состояния в процессе формоизменения, но и оценки компонент тензора деформации. Однако при этом возникают проблемы, связанные с тем, что решение задачи в скоростях или приращениях относительных деформаций нельзя признать корректным из-за невозможности суммирования деформаций, не являющихся аддитивными величинами.

В работе предложен метод геометрической линеаризации, основанный на суммировании не деформаций и напряжений, а перемещений, сил и свободной энергии, т.е. аддитивных по своему определению величин.

Доказана справедливость следующей процедуры нахождения тензора деформаций. На первом шаге определяют перемещения материального волокна u_i и вычисляют матрицу оператора преобразования:

$$A_1 = \{a_{ij}^{(1)}\} = \left\{ \delta_{ij} + \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_j} \right\}. \quad (1)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

На втором шаге вновь определяются перемещения материального волокна $u_i^{(2)}$ и вычисляют матрицу:

$$A_2 = \{a_{ij}^{(2)}\} = \left\{ \delta_{ij} + \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_j} \right\}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) образуется матрица $A = A_1 A_2$ и проводится преобразование $A' A$ для исключения комплексных корней.

Тензор деформаций находят из соотношения:

$$E = \ln(A' A) = 2U_1 \begin{pmatrix} \ln \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ln \lambda_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \ln \lambda_{33} \end{pmatrix} U_1^{-1}, \quad (3)$$

где $E = \{\varepsilon_{ij}\}$; U — матрица ортогонального преобразования; $\lambda = 1 + \frac{\partial u}{\partial x}$.

Применяя функцию $\ln$ к симметричной части полярного разложения линейного оператора, получают главные значения деформаций, которые совместно с главными направлениями этой части образуют симметричный тензор деформаций второго ранга.

Таким образом, задача разбивается на n этапов, на каждом из которых деформации можно считать малыми, что позволяет решать задачу на каждом этапе методами механики деформируемого твердого тела при малых деформациях. Определяемые при этом перемещения и соответствующие производные позволяют на i -ом этапе сформировать матрицу A_i преобразования A_i . Результирующая матрица образуется путем последовательного умножения таких матриц, т.е.:

$$A = A_n A_{n-1} \cdots A_2 A_1. \quad (4)$$

Определение результирующего тензора деформаций производят аналогичным образом.

Разработанный метод геометрической линеаризации вместе с предложенными диаграммами предельно устойчивых деформаций дает возможность сформулировать критерий наступления неустойчивой деформации для процессов малой кривизны.

Для формулировки критерия потери устойчивой пластической деформации использован подход, предложенный Колмогоровым В.Л. В настоящей работе на основе предположения о достижении пластического разрыва некоторого критического состояния критерий потери устойчивости представлен в виде:

$$\Psi_{ny} = \int_0^{\bar{e}_0} \frac{de(\alpha)}{e_0^*(\alpha)} = 1, \quad (5)$$

где $\bar{e}_0$ – степень деформации, накопленная к концу процесса формоизменения.

Экспериментально доказано, что основное влияние на момент возникновения локализованной деформации оказывает отношение главных логарифмических деформаций $\alpha = e_2/e_1$ на поверхности листовой заготовки. Поэтому можно, используя предложенную в работе методику, построить диаграммы предельных устойчивых деформаций (ДПД) в координатах $\alpha - e_1^*$ при простом нагружении и осуществить прогнозирование локализации в технологическом процессе путем проверки условия:

$$\bar{e}_1 < e_1^*, \quad (6)$$

где $\bar{e}_1$ – максимальная логарифмическая деформация в момент, соответствующий окончанию процесса деформирования, e_1^* – максимальная логарифмическая деформация в момент, соответствующий началу локализованного пластического течения в условиях простого нагружения.

Однако для процессов малой кривизны более целесообразно использовать диаграмму предельных устойчивых деформаций (ДПД) $e_0^* = e_0^*(\alpha)$, где e_0^* – степень деформации, соответствующая моменту локализации при деформировании в условиях $\alpha = \text{const}$. Эта диаграмма есть аналог диаграммы пластичности, используемой в феноменологической теории разрушения. Зависимость $e_0^* = e_0^*(\alpha)$ является экспериментально устанавливаемой механической характеристикой листового материала. При наличии зависимости $e_0^* = e_0^*(\alpha)$ на основании условия (5) может быть записан критерий, определяющий устойчивую пластическую деформацию в процессах листовой штамповки:

$$\Psi_{ny} = \int_0^{\bar{e}_0} \frac{de_0(\alpha)}{e_0^*(\alpha)} < 1. \quad (7)$$

Если величина α является переменной во времени, то предельная деформация, при которой пластическое течение локализуется, может существенно отличаться от установленной в условиях простого нагружения. Это обстоятельство учитывает критерий (7). Если в процессе листовой штамповки выполняется условие $\alpha = \text{const}$, то критерий (7) становится эквивалентным условию (6).

Для оценки степени использования запаса пластичности материала при сложном немонотонном деформировании листовых заготовок разработана методика, учитывающая тензорный характер накопления повреждений и представляющая собой обобщенный вариант тензорно-линейной модели, предложенной Г.Д. Делем.

Показано, что если функцию повреждаемости аппроксимировать формулой:

$$f(\varepsilon_0, \eta_k) = \frac{1}{q \cdot \ln(1+a)} \sum_{\kappa=1}^q \ln(1 + a\omega^{n_\kappa}), \quad (8)$$

где $\omega = \varphi(\varepsilon_0, \eta_k)$ – зависимость, аппроксимирующая функцию повреждаемости; a, n, q – параметры аппроксимации, то значения $q=1$ и $q=2$ охватывают весь спектр физически допустимых функций, удовлетворяющих условию $\varphi'(\varepsilon_0, \eta_k) > 0$. При монотонном или близком к нему нагружении следует положить $q=1$, тогда $\varphi''(\varepsilon_0, \eta_k) > 0$. В процессах существенно немонотонных $q=2$, что допускает снижение скорости накопления поврежденности ($\varphi''(\varepsilon_0, \eta_k) < 0$) на некоторых этапах, согласующееся с известными экспериментальными данными; η_k – общее обозначение параметров, характеризующих схему напряженного состояния: $\eta_k = \eta_1$ при $k=1$, $\eta_k = \eta_2$ при $k=2$; $\eta_1 = 3\sigma / \sigma_{\text{и}}$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния; $\eta_2 = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ – параметр Надан–Лодэ.

Если обозначить компоненты направляющего тензора деформаций $\beta_{ij} = \sqrt{2/3} d\varepsilon_{ij} / d\varepsilon_0$ и сохранить структуру соотношений для компонент тензора повреждений, соответствующую двухэтапному простому нагружению, то в конце m -го этапа

$$\Psi_{ij}^{(m)} = \Psi_{ij}^{(m-1)} + \left[\int_{\varepsilon_0^{(m-1)}}^{\varepsilon_0^{(m)}} f_m(\varepsilon_0, \eta_k) \beta_{ij}^{(m)} \frac{d\varepsilon_0}{\varepsilon_{np}(\eta_k^{(m)})} \right] \quad (9)$$

при условиях: $\eta_k^{(m)} \neq \text{const}$; $\beta_{ij}^{(m)} \neq \text{const}$ при $\varepsilon_0^{(m-1)} \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon_0^{(m)}$.

При вычислении интеграла функция повреждаемости задается для $q=1$ или $q=2$ в зависимости от вида нагружения:

$$f_m(\varepsilon_0, \eta_k) = \frac{a \cdot n \cdot \omega^{n-1}}{(1 + a \cdot \omega^n) \ln(1+a)}, \quad (q=1); \quad (10)$$

$$f_m(\varepsilon_0, \eta_k) = \frac{a \cdot [n_1 \omega^{n_1-1} + n_2 \omega^{n_2-1} + a(n_1 + n_2) \omega^{n_1+n_2-1}]}{2 \cdot [1 + a(\omega^{n_1} + \omega^{n_2}) + a^2 \omega^{n_1+n_2}] \cdot \ln(1+a)}, (q=2). \quad (11)$$

Предполагается, что разрушение наступает при выполнении условия:

$$\Psi_{ij}^{(m)} \Psi_{ij}^{(m)} = 1. \quad (12)$$

Таким образом, при выполнении технологических расчетов следует принимать

$$\Psi_{ij}^{(m)} \Psi_{ij}^{(m)} = k_p, (k_p < 1), \quad (13)$$

где k_p – коэффициент запаса ресурса пластичности.

Величина k_p зависит от колебаний механических свойств материала, ответственности конструкции, вида последующей обработки и поэтому должна устанавливаться в каждом конкретном случае.

Для обоснования принятого в работе при теоретическом анализе коэффициента трения предложена инженерная методика его определения по результатам формовки цилиндрическим пуансоном узкого образца из исследуемого материала.

Исследование процессов сложного немоного деформирования потребовало рассмотрения влияния вида деформированного состояния на величину коэффициента трения. Установлено, что при изменении параметра вида деформированного состояния в интервале, характерном для операций листовой штамповки: $-1 \leq \alpha \leq 1$, величина коэффициента трения μ остается примерно постоянной, что позволяет использовать найденные значения μ при расчете различных формообразующих операций толстолистовой штамповки.

Результаты выполненных исследований позволили дать математическую формулировку задачи пластического течения при толстолистовой штамповке.

Решение задачи основано на использовании вариационных принципов для жесткопластической упрочняемой среды, что позволяет выполнять решение, не прибегая к интегрированию дифференциальных уравнений.

Связь между тензором скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и девиатором напряжений σ'_{ij} задана в виде соотношений Сен-Венана–Леви–Мизеса. Принято условие пластичности Губера–Мизеса. Связь между скоростями точки и компонентами тензора скоростей деформаций задана в виде соотношений

Коши. Так как принята жесткопластическая модель материала, то использовано условие несжимаемости.

Структура известного функционала баланса мощности включает в себя скорость рассеяния энергии пластической деформации и мощность, развиваемую действующими на заготовку силами на скоростях смещений точек приложения этих сил. Для устранения трудностей, возникающих при определении среднего напряжения, применен метод штрафов, который позволяет построить модифицированный функционал Φ^* , учитывающий условие несжимаемости.

Решение задачи сводится к отысканию минимума модифицированного функционала на кинематически возможных полях скоростей, определяемых граничными условиями. В качестве граничных условий по поверхности контакта штамп–заготовка приняли, что на лист действуют деформирующие силы, которые можно разделить на нормальные n и касательные τ по отношению к поверхности штампа.

Анализ тепловой задачи проведен на основе численного решения уравнения теплового баланса. При моделировании нестационарных тепловых процессов учитывали внутренний тепловой поток, возникающий в процессе формоизменения.

За базовый пакет прикладных программ, с согласия авторов, принята программа моделирования двумерных процессов деформирования, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре МТ-6.

Для учета особенностей поставленных задач были разработаны и интегрированы в базовый комплекс программ следующие новые расчетные блоки, позволяющие выполнить:

1. Расчет накопленных компонент деформации в соответствии с разработанным методом геометрической линеаризации.

2. Учитывать контактное трение по закону Кулона.

3. Учтены особенности тепловой задачи при анализе процессов толстолистовой штамповки.

4. Расчет параметров, определяющих появление технологических отказов. Для этого в основную программу расчета методом конечных элементов добавлены новые модули:

- расчет степени использования запаса пластичности и коэффициента запаса по разрушению;

- расчет коэффициента запаса устойчивости.

5. Разработана трехмерная модель для анализа задач объемного формоизменения при толстолистовой штамповке методом конечных элементов, включающая в себя следующие модули:

- генерация сетки КЭ внутри заданного объема;
- решение геометрической контактной задачи;
- графическое представление результатов.

Разработанная трехмерная модель процесса толстолистовой штамповки позволила рассмотреть задачу моделирования складкообразования во время вытяжки.

Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей без прижима появляется вследствие потери пластической устойчивости под действием сжимающих напряжений в плоскости фланца. Как и все процессы потери устойчивости, данный эффект является следствием неоднородности исходной заготовки. Это может быть геометрическая неоднородность (разнотолщинность), физическая неоднородность (разница физических свойств в различных точках заготовки как по толщине, так и в плоскости листа, наличие микротрещин и т.п.), неоднородность тепловых эффектов, приводящих также к изменению физических свойств, и т.д. Именно неоднородности и являются теми возмущающими факторами, которые приводят к потере устойчивости. При этом дальнейшее развитие процессов, приводящих к появлению дефектов, в большинстве случаев является следствием положительной обратной связи и напрямую не связано с исходными неоднородностями. При моделировании с помощью МКЭ, в принципе, возможно моделирование как геометрической (простановка узлов сетки КЭ с некоторым случайно определенным в заданном диапазоне отклонением), так и физической неоднородности (случайным изменением вычисленных в некоторой точке напряжений текучести относительно номинального).

В данной работе ограничились лишь одним из указанных выше способов – заданием геометрически неравномерной сетки КЭ, включая неравномерность заготовки по толщине (разнотолщинность приводит к изменению требуемых для деформирования нагрузок в различных сечениях, что косвенно моделирует физическую неоднородность). Отклонение геометрии вводилось по равномерному закону в диапазоне $\pm 5\%$ от номинала.

При моделировании были применены прямоугольные шестигранные конечные элементы, которые удобны не только для разбиения исходной заготовки в данной задаче, но и позволяют для решения пластической задачи деформирования несжимаемых материалов полностью использовать постановку в виде метода штрафов и не требуют введения дополнительных неизвестных в узлах сетки конечных элементов (кроме трех компонентов смещений по осям координат).

Основные отличия модифицированного комплекса программ от базового комплекса, предназначенного для решения двухмерных задач, заключаются:

- в увеличении размерности числа неизвестных в узлах;
- в увеличении производных от них величин, таких, как тензоры скоростей деформаций и напряжений, представляемых векторами из шести независимых компонентов;
- в усложнении функций формы N для трехмерного КЭ, которые, в свою очередь, являются функциями трех координат, и в локальной системе (ξ, η, ζ) для линейных элементов в i -ом узле имеют вид:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i), \quad (14)$$

где ξ_i, η_i, ζ_i – координаты i -го узла в локальной системе координат.

Под решением геометрической контактной задачи имеется в виду возможность в любой момент времени определять положение точки (узла сетки КЭ) по отношению к гравюре штампа внутри инструмента, на его поверхности или вне ее, а также умение определять нормаль в точке контакта. Геометрия деформирующего инструмента применительно к проблеме формирования ребер представляет собой ограниченный набор простых поверхностей типа плоскость, цилиндр и тор, уравнения которых можно записать в виде набора функций типа

$$z = f(x, y) - v_D t, \quad (15)$$

где t – время, v_D – скорости движения рабочих частей штампа, что существенно облегчает решение контактной задачи.

Для графического представления результатов расчета использовались две возможности:

- вывод информации о напряженно-деформированном состоянии заготовки в сечениях, совпадающих с плоскостями симметрии, с помощью программы GRAPH, так как данные сечения остаются плоскими в процессе деформации;
- экспорт образа деформированной заготовки по шагам в графические редакторы в форматах STL и DXF для отображения трехмерных объектов, визуализацию которых можно производить с использованием других программ и приложений. Для STL-формата использовалась демонстрационная версия программы 3DView (Actify, Inc.), а DXF-формат является внешним форматом программы AutoCAD (Autodesk, Inc.).

Третья глава посвящена разработке алгоритма расчета и пакета программ для решения прикладных задач деформирования толстолистовых заготовок.

Задачу изгиба на малый радиус использовали как модельную для разработки алгоритма расчета и пакета прикладных программ.

Проведенное экспериментальное исследование и расчеты по предложенной модели показали, что нейтральная поверхность более интенсивно смещается в сторону зоны сжатия. Выполненные расчеты показали возможность отхода заготовки от пуансона при определенных параметрах процесса гибки, подтвержденную экспериментально. Таким образом, разработанная программа позволяет выявлять некоторые особенности пластического течения при толстолистовой штамповке, которые не обнаруживали в аналитических решениях.

Изгиб с растяжением рассмотрен более подробно, так как расчеты и экспериментальное исследование подтвердили целесообразность использования предлагаемой расчетной схемы для моделирования операции формовки длинных прямолинейных и криволинейных небольшой кривизны ребер жесткости в листовых заготовках.

По результатам расчета установлено, что при коэффициенте запаса устойчивости равном 1,1, и ходе ползуна 21 мм. расчетное значение $\varepsilon_0 = 0,29$ с точностью 4% совпадает с ее экспериментальным значением. Расчет, произведенный для дальнейшего движения ползуна, показал, что пластическая деформация сосредоточилась в области образовавшегося утонения, что также подтвердил эксперимент. Программа не позволяет визуализировать разрыв заготовки, поэтому расчет был остановлен при достижении степени использования запаса пластичности значения, близкого к единице. Этот момент соответствует накопленной деформации $\varepsilon_0 = 0,39$, что с точностью 7% совпадает с экспериментальным значением. Теоретический анализ развития НДС по ходу движения ползуна показывает, что при выбранных условиях трения в начале процесса накопленная деформация наиболее интенсивно возрастает в областях оси симметрии пуансонов (на противоположной свободной поверхности). Местоположение шейки во внеконтактной зоне обуславливается сдерживающим влиянием сил трения, а ее сосредоточение на границе с контактной зоной связано с тем, что в этой области происходит скачкообразное изменение кривизны поверхности заготовки.

Операция формовки сферическим пуансоном применяется для производства широкой номенклатуры куполообразных изделий ответственного назначения типа днищ. Эта операция имеет также широкое применение в технологических процессах получения выступов под рельефную и точечную сварку и используется в случае необходимости для достижения наиболее высоких рельефов. Кроме этого она моделирует процесс испытания листового материала по Эриксену.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных при формовке сферическим пуансоном показало хорошую сходимость. На рис. 1 представлены расчетный контур меридионального сечения образца и изолинии использованного ресурса пластичности, соответствующие моменту его разрушения. Изолиния, определяющая значение $\Psi = 0,884$, расположена в области появления трещины. Сравнение изменений толщины заготовки по образующей показало, что разница между расчетными и экспериментальными данными не превышает 5%.

При проектировании операций вытяжки наиболее важным этапом является определение допустимого коэффициента вытяжки $K_d = D/d$ и распределения толщины по образующей заготовки. Проведенные расчеты и эксперименты показали близость полученных результатов. На рис. 2 показано изменение деформации по толщине заготовки вдоль ее образующей при $r_m = 10$.

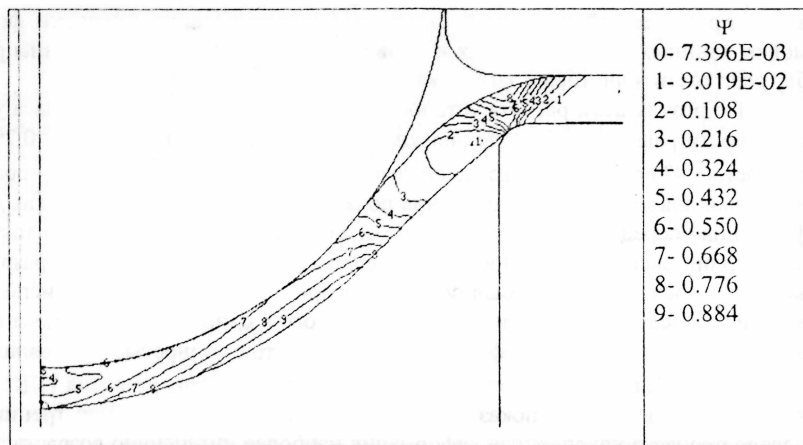


Рис. 1. Расчетный контур меридионального сечения образца и изолинии использованного ресурса пластичности, соответствующие моменту его разрушения

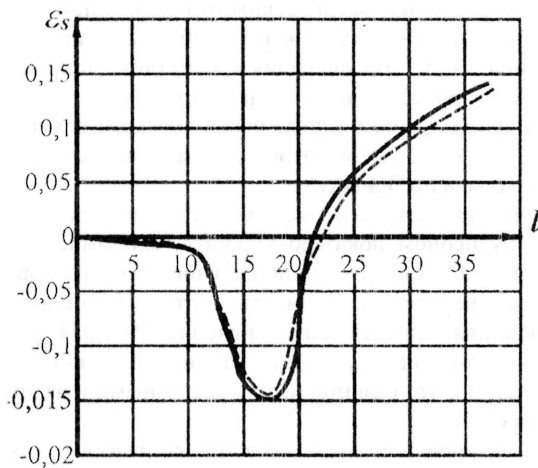


Рис. 2. Зависимости деформации по толщине от длины образующей срединной поверхности при $r_{\text{ж}}=10$ (отсчет от оси симметрии):
 — эксперимент, ---- расчет

Как видно, расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 7%. Анализ полученных данных показывает, что моделирование достаточно точно описывает местоположение области локализации деформации, момент начала локализации, характеризуемый коэффициентом запаса устойчивости n_* , а также накопление повреждений в материале, приводящих к его разрушению и характеризуемых степенью использования запаса пластичности Ψ . Также отмечено, что при выполнении операций вытяжки пуансоном с плоским торцом момент начала локализации деформации практически совпадает с моментом исчерпания пластичности.

Реверсивный изгиб широкой полосы моделирует применяемое в листовой штамповке технологическое испытание на перегиб и характеризуется существенно немонотонным характером нагружения. Для проверки расчетной модели было проведено сопоставление результатов испытания на перегиб в соответствии с ГОСТ 13813–68 и результатов расчета МКЭ.

На рис. 3 показана диаграмма пластичности $\varepsilon_{пр} = \varepsilon_{пр}(\eta_1)$ стали 10 и пути деформирования материала $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\eta_1)$ в опасных областях при реверсивном изгибе испытываемых образцов.

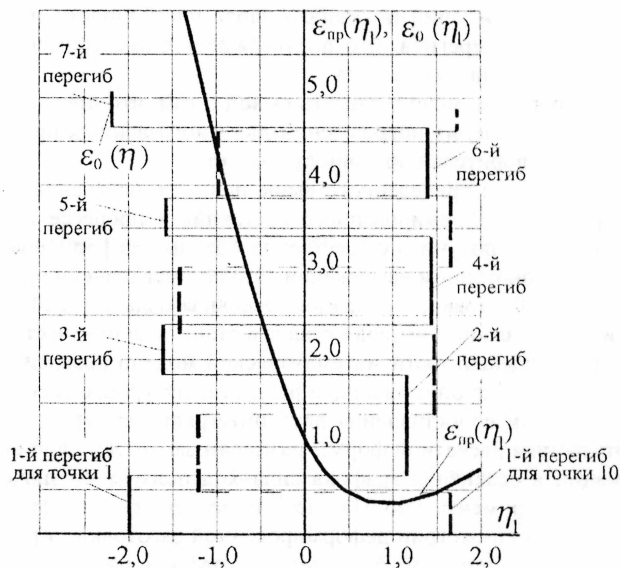


Рис.3. Диаграмма пластичности и пути деформирования в опасных зонах при реверсивной гибке образца из стали 10:

— — — для точки на внутренней стороне заготовки при первом перегибе,
 - - - для точки на наружной стороне заготовки при первом перегибе

Расчет степени использования запаса пластичности (СИЗП) производился по критерию (9) в двух вариантах: с использованием функции повреждаемости (10) и (11). При расчете с использованием (10) СИЗП достигла единицы на пятом перегибе, а при использовании (11) - на восьмом перегибе. В эксперименте разрушение произошло в конце седьмого перегиба, поэтому дальнейшие расчеты производили с использованием функции (11), которая обеспечивает ошибку по величине накопленной деформации в момент разрушения в пределах 8%. Этот результат косвенно подтверждает предположение о том, что скорость накопления поврежденности при пластической деформации материала может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от схемы напряженного состояния.

Анализ полученных результатов показывает, что накопленная деформация в момент разрушения существенно превосходит ее предельные значения, определяемые диаграммой пластичности. Однако запас пластичности материала исчерпывается лишь к началу восьмого перегиба. Если оценку предельного формоизменения проводить по скалярным критериям, то СИЗП на наружной стороне заготовки достигла бы единицы на третьем перегибе, а на внутренней стороне заготовки - уже на втором перегибе. Для исследованного процесса реверсивного изгиба на основе тензорной модели накопления повреждений показано - запас пластичности исчерпывается к началу восьмого перегиба, что подтверждается экспериментально и соответствует выполненному расчету.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенная тензорная модель накопления повреждений для многозвенных процессов обеспечивает удовлетворительную точность расчетов.

Как видно из приведенного выше примера, целенаправленное изменение напряженно-деформированного состояния в процессе деформирования может позволить получить существенно большие деформации без разрушения, чем при монотонном нагружении. Это подтверждено и при исследовании реверсивной отбортовки, - операции, основная цель которой состоит в обеспечении максимального набора металла в отбортованную часть заготовки.

Оценка адекватности математической модели реверсивной отбортовки, наиболее близко описывающей результат натурного эксперимента, была проведена путем сопоставления двух интегральных характеристик процесса: соответствия расчетной формы размерам заготовки на различных этапах деформации и сравнения графика сила-ход ползуна со значениями, полученными экспериментально. На рис. 4 приведена фотография шлифа, вырезанного по оси симметрии деформированной заготовки, и расчетная форма того же сечения, а на рис. 5 приведены графики зависимости силы отбортовки от хода ползуна, полученные экспериментально и расчетным путем. Установлено, что при угле конуса $\alpha = 10^\circ$, использованном в эксперименте, и $\mu = 0,1$ расчетные форма и размеры заготовки с точностью до 5% совпадают с фактическими, а отклонения расчетной силы от полученной экспериментально по ходу ползуна не превышают 3%.

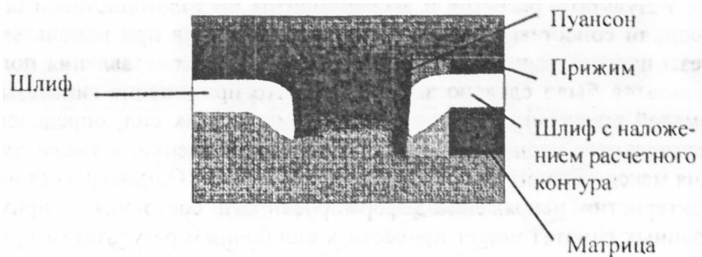


Рис. 4. Шлиф деформированной заготовки с наложением расчетного контура сечения (справа)

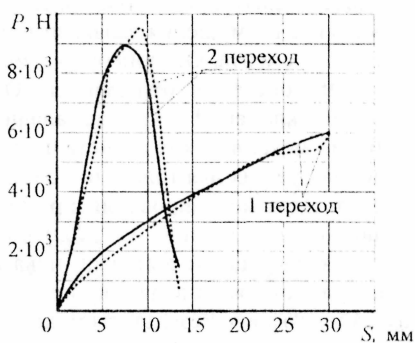


Рис. 5. Графики зависимости силы отбортовки от хода ползуна:
 — - эксп.; - расчет

Рассмотрена также формовка гофра конечной длины на плоском листе. Показано, что предложенная трехмерная модель формовки гофра конечной длины хорошо описывает реальный процесс штамповки. Установлена протяженность зон влияния концевых элементов на общую картину распределения НДС по заготовке, а также выявлены зоны максимального утонения и определены предельные параметры формовки.

Анализ результатов эксперимента и расчетов показывает, что возникновение технологических отказов в виде локализации деформации и последующего разрыва заготовки при формовке гофра конечной длины определяет кинематика течения в цилиндрической части гофра конечной длины, так как локализация деформации здесь наступает существенно раньше, чем в остальных частях гофра.

Результаты расчетов и экспериментов по толстолистовой штамповке позволили сопоставить результаты моделирования при использовании гипотезы прямых нормалей и без нее. На основе сопоставления полученных результатов было сделано заключение, что применение гипотезы прямых нормалей оправдано для расчета деформирующих сил, определения зоны максимального утонения и его приближенной оценки, а также для нахождения максимального напряжения в опасной зоне. Однако расчет локальных характеристик напряженно-деформированного состояния с применением указанных гипотез может привести к ошибочным результатам при прогнозировании технологических отказов в виде разрывов, а также исключает возможность прогнозировать возникновение зон критических деформаций.

Третью главу завершает исследование устойчивости фланца при вытяжке осесимметричных деталей. Разработанная трехмерная модель позволила отказаться от использования статического критерия и получить решение для оценки устойчивости сжатой пластины, имеющей начальные отклонения. При этом начальные возмущения задавали геометрически неравномерной сеткой конечного элемента. Отклонение геометрии вводилось по равномерному закону в диапазоне $\pm 5\%$ от номинала. Основанием для выбора указанного диапазона отклонений послужил анализ допусков на размер по толщине и колебаний механических свойств широкого ассортимента листовых материалов, используемых для толстолистовой штамповки.

Сопоставление результатов моделирования с расчетом по известному приближенному условию потери устойчивости: $(S/D)100 > 4,5(1-1/K_b)$, где D – диаметр заготовки, K_b – коэффициент вытяжки, показало, что принятый подход в основном правильно отражает величину предельных коэффициентов вытяжки без образования гофров. Результаты моделирования процесса с коэффициентами вытяжки $K_b=1,43$ и $K_b=1,53$ попадают в область допустимых значений. При этом в случае появления на первом этапе деформирования видимых признаков потери устойчивости в дальнейшем происходит разглаживание наметившихся гофров. Увеличение коэффициента вытяжки при тех же размерах инструмента приводит к возникновению неисправимых гофров, что соответствует области недопустимых значений.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию процесса штамповки брони для световодов и вытяжке днищ сферическим или эллиптическим пуансоном.

Принятая в работе модель процесса формовки криволинейного гофра была представлена в виде раздачи трубы в кольцевую щель жестким сплошным пуансоном, расширяющимся в радиальном направлении.

На рис. 6 приведен путь деформирования $\varepsilon_0(\alpha)$ металла в опасной зоне (в области схода листа с пуансона) при штамповке гофра на плоскости диаграмм ДПД – $e_0^*(\alpha)$ и ДР – $e_0^{**}(\alpha)$.

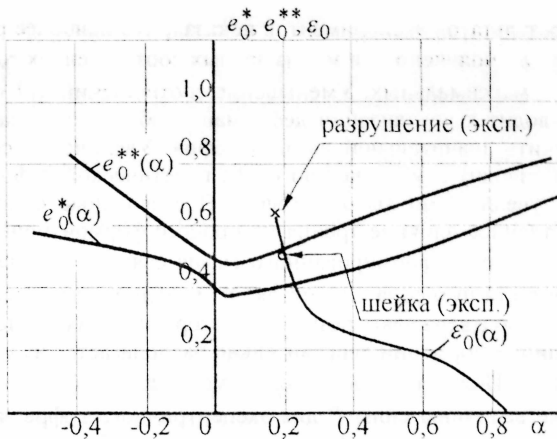


Рис. 6. Путь деформирования $\varepsilon_0(\alpha)$ на плоскости диаграмм ДПД – $e_0^*(\alpha)$ и ДР – $e_0^{**}(\alpha)$

В начале деформирования параметр $\alpha = e_2 / e_1$ принимает значение, равное 0,84. Затем параметр α начинает уменьшаться за счет развивающихся сил трения в продольном направлении гофра, и к моменту начала образования шейки $\alpha = 0,2$. При этом деформация $e_0^*(\alpha) = 0,4$. Однако расчет по критерию (5) и эксперимент (см. рис.6) показали, что локализация деформаций наступает при $\varepsilon_0 = 0,52$. Таким образом, подтверждена работоспособность критерия (5), учитывающего влияние истории деформирования на величину предельной устойчивой деформации.

Для проверки правильности принятых при теоретическом анализе допущений были проведены экспериментальные исследования с использованием методов планирования экспериментов.

В качестве варьируемых факторов были приняты следующие соотношения: $x_1 = r_m / s$ – относительный радиус скругления кромки матрицы; $x_2 = r_n / s$ – относительный поперечный радиус пуансона; $x_3 = L / s$ – относительное расстояние между центрами r_m и r_n ; $x_4 = r_\phi / s$ – относительный продольный радиус пуансона. Для изучения НДС в качестве регистрируемых параметров выбраны:

- 1) интенсивность накопленных пластических деформаций $\bar{\varepsilon}$;
- 2) деформации в плоскости заготовки e_1 и e_2 ;
- 3) деформации по толщине заготовки e_3 .

Для изучения деформированного состояния заготовки применялся метод делительных сеток. Сетка предварительно наносилась на поверхность заготовки в виде окружностей с диаметром 4 мм и шагом 5 мм.

Анализ результатов экспериментов показал, что наиболее равномерное распределение ε_0 получено при минимальных соотношениях r_m/s и L/h , а r_{Π}/s и r_{Φ}/s – максимальных. Уменьшение соотношений r_{Π}/s и r_{Φ}/s для пуансона приводит к локализации деформации вблизи полюса, что не позволяет получить значительной высоты гофра. Увеличение соотношений r_{Π}/s и L/s приводит к увеличению очага пластической деформации, что способствует увеличению высоты гофра. Поставленные опыты подтверждают существенное влияние трения на процесс формоизменения. Уменьшение ε_0 по центру деформированного гофра связано с увеличением поверхности контакта пуансона с заготовкой. Экспериментальные исследования штамповки подтверждают результаты теоретических расчетов, т.е. место локализации деформации действительно располагается на участке схода листа с пуансона. Получена хорошая сходимости для ε_0 (до 7%).

Расчетные величины силы P для эксцентричного гофра завышены до 20%, а для концентричного гофра – занижены приблизительно также на 20%. Расхождение расчетных и экспериментальных значений сил P объясняется упрощениями принятой схемы учета нагрузок. Однако в практике такой разброс значений вполне допустим.

Разработанный пакет программ позволяет моделировать тепловые поля в заготовке как в процессе штамповки при теплообмене с инструментом, так и в процессе охлаждения при переносе заготовки из печи. Таким образом, появляется новая возможность моделирования подхолаживания заготовки путем применения выдержки при остановленном ползуне в начальный момент деформирования и при остановке ползуна в конце процесса штамповки. Этот производственный прием оказывается эффективным для снижения величины наибольшего утонения стенки.

Применительно к процессам горячей штамповки крупногабаритных деталей типа днищ проводилось сопоставление результатов моделирования с учетом тепловых полей с экспериментальными данными, полученными в ГНЦ НПО ЦНИИТМАШ.

Температуру нагрева заготовки принимали, как и в эксперименте, равной 950 и 1100° С. Для расчета были приняты следующие параметры: плотность материала заготовки – 7850 кг/м³; теплопроводность материала заготовки – 27,7 Вт/(м·К); теплоемкость – 649 Дж/кг·К; степень черноты заготовки – 0,3; температура окружающей среды – 20 °С; коэффициент тепло-

отдачи окружающей среды – $30 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$.

Сопоставление показало, что отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 4-7 %, причем отклонения имеют систематический характер с направлением в верхнюю сторону. При моделировании тепловых полей для относительно тонких заготовок (менее 100 мм) отклонение увеличивается (до 8-10%) и также предсказывает более медленное остывание. Но в целом результаты моделирования тепловых полей при де-

формировании толстолистовых заготовок при охлаждении на воздухе можно признать вполне удовлетворительными.

Пятая глава посвящена практическому использованию результатов исследования. Представлен новый технологический процесс производства штампованных элементов брони для световодов и волноводов.

Технологический процесс включает два основных перехода: предварительная продольная гибка ленты и ее калибровка с последующим гофрированием цилиндрической поверхности половинки брони. Заключительным этапом технологического процесса является сборка двух половинок гофрированной брони с предварительно уложенным внутрь световодом и сварка по фланцам.

В процессе внедрения были спроектированы, изготовлены и переданы на производство инструментальные штампы для изготовления половинок брони; в лабораторных условиях изготовлена опытная партия изделий общей протяженностью около 2000 м.

Внедрение разработанного процесса в производство позволило получить значительный экономический эффект за счет сокращения затрат на подготовку производства, снижения расходов металла и повышения прочности и точности изделий, что существенно повлияло на их эксплуатационные свойства.

В пятой главе представлены также рекомендации по расчету технологических параметров штамповки крупногабаритных деталей типа днищ, которые позволяют прогнозировать возможные технологические отказы и виды брака на стадии проектирования технологического процесса.

Методика расчетов положена в основу проектирования групповых технологических процессов горячей штамповки деталей типа днищ и позволяет устанавливать без проведения модельных и натурных испытаний большинство технологических параметров процесса, геометрию инструмента и фактические размеры готового изделия. Перечень рассчитываемых величин включает:

- распределение температур по толщине в процессе охлаждения на воздухе и в условиях теплообмена с инструментом в зависимости от толщины исходной заготовки;
- допустимое время выполнения вспомогательных операций перед штамповкой;
- силу штамповки и нагрузки на инструмент,
- величину зазора между пуансоном и матрицей и характер его влияния на технологическую силу и разнотолщинность, распределение толщины в изделии, распределение зон критических деформаций.

На рис. 7 показаны изолинии накопленной деформации при штамповке крышки. Приведенные данные дают исходную информацию для оценки размеров и местоположения областей критической деформации, что позволит технологу определить необходимые технологические переходы и операции, обеспечивающие наиболее высокие эксплуатационные свойства изделия.

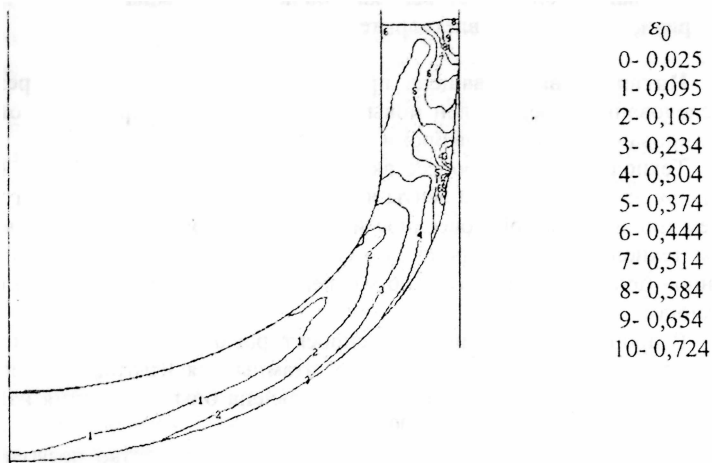


Рис. 7. Изолинии накопленной деформации при штамповке крышки

Получены новые данные о характере теплообмена между заготовкой и инструментом в процессе деформации. Показано, что при горячей штамповке толстых заготовок ($100S/D > 4$) тепловой эффект, связанный с интенсивными деформациями изгиба, весьма значителен и приводит к повышению температуры поверхности заготовки. Этот результат позволил более обоснованно подходить к выбору верхней границы температурного интервала при нагреве с учетом выявленных закономерностей теплообмена с окружающей средой и максимально допустимого времени вспомогательных операций.

В качестве базовых деталей приняты:

1. Днище корпуса – материал: сталь 15Х2НМФА, толщина листа исходной заготовки – 300 мм.
2. Крышка корпуса – материал: сталь 15Х2НМФА, толщина листа исходной заготовки – 330 мм.
3. Днище корпуса гидроемкости – материал: сталь 22К, толщина листа исходной заготовки – 84 мм.

Исследование процесса горячей штамповки днища корпуса гидроемкости, днища и крышки позволило установить следующие технологические параметры.

Время транспортировки заготовок к прессу не должно превышать:

- для днища и крышки – 5 мин;
- для днища корпуса гидроемкости – 3 мин.

Зазор между пуансоном и матрицей:

- для днища и крышки – 1,08 S;
- для днища корпуса гидроемкости – 1,06 S.

ВЫВОДЫ

1. В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований и обобщения опыта промышленного освоения процессов толстолистовой штамповки предложены научно обоснованные технологические и конструкторские решения, представленные методиками выбора доминирующего технологического отказа, расчета предельно-допустимых технологических параметров деформации и рекомендациями по выбору режимов штамповки, внедрением которых достигается ускорение научно-технического прогресса в листоштамповочном производстве за счет снижения сроков на подготовку производства, потерь от брака и повышения качества изделий.

2. Предложен комплексный недетерминированный метод оценки возможности бездефектного производства деталей из толстого листа, формуемых в условиях монотонного деформирования, основанный на применении диаграмм предельных устойчивых деформаций и разрушения. Метод исключает необходимость проведения пробных экспериментов по отладке технологического процесса.

3. Предложены инженерная методика построения предельных диаграмм толстолистовых материалов по ограниченному числу испытаний и методика проведения технологических испытаний листовых материалов. В результате на единой базе экспериментальных данных стало возможным получение всего набора предельных диаграмм: диаграмм предельных устойчивых деформаций, разрушения и пластичности.

4. Получены новые результаты, касающиеся суммирования деформаций, которые позволили дать научное обоснование предложенной методики прогнозирования одного из важнейших технологических отказов – потери устойчивости в процессе пластической деформации. Показано, что компоненты тензора деформации в процессах нелинейного деформирования могут быть определены путем последовательного решения геометрически линейных задач при малых деформациях. Предложено обобщение тензорно-линейной модели накопления поврежденностей для двухзвенных процессов простого нагружения на многозвенные процессы малой кривизны. Установлено, что по сравнению с известными скалярными моделями при немонотонном нагружении ресурс пластичности, рассчитанный в соответствии с тензорной моделью, лучше согласуется с экспериментальными данными в случае многозвенных процессов.

5. На основе представления процессов листовой штамповки, как управляемых путем прогнозирования технологических отказов, дана математическая формулировка задачи пластического течения при толсто-

листовой штамповке, разработан алгоритм решения и создан комплекс программ, расширивший базовое ядро общих соотношений теории течения за счет разработки модулей для нахождения НДС с использованием закона трения Кулона, компонент накопленной деформации, параметров, технологических отказов (степень использования запаса пластичности, коэффициент запаса потери устойчивости). Сформулированы трехмерные задачи деформации листовой заготовки при условии, что форма штампуемого изделия задается плоскостями и поверхностями второго порядка. Поставлена и решена трехмерная задача складкообразования при вытяжке осесимметричных деталей на основе исследования пластического течения в листовой заготовке при наличии начальных возмущений. Дополнительным результатом исследования является расширение методов анализа устойчивости заготовки по научно обоснованным критериям и, тем самым, повышение точности прогнозирования технологических отказов.

6. Установлено, что при гибке широкой полосы нейтральная поверхность интенсивно смещается в сторону зоны сжатия. Относительное смещение нейтральной поверхности достигает 10% при относительном радиусе изгиба, равном 2, что превышает значения, полученные в известных решениях, примерно в два раза.

Исследование формовки сферическим пуансоном показало, что схема напряженного состояния обуславливает относительно равномерное распределение утонения стенки вдоль образующей срединной поверхности. Поэтому основным технологическим отказом является разрушение без образования выраженной шейки. Это наблюдение дает теоретическое обоснование эффективности применения сферических пуансонов для получения особо глубоких рельефов в операциях формовки.

Рассмотрение осесимметричной вытяжки пуансоном с плоским торцом показало, что предельная величина коэффициента вытяжки быстро возрастает при изменении относительного радиуса от 1 до 3, а далее, при относительной толщине заготовки, большей 0,04, остается практически постоянной; при относительной толщине заготовки $0,02 < S/D < 0,04$ интенсивность роста предельного коэффициента вытяжки замедляется, приближаясь к общему предельному значению для всех толщин, равному 2,2 при $r_w/S=6$. Наибольшее влияние относительной толщины сказывается при отношении $r_w/S=2,5-3,0$; величина K_d увеличивается от 1,88 до 2,2 при изменении относительной толщины от 0,02 до 0,05. В результате установлено, что особенности процессов толстолистовой штамповки определяет не только относительный радиус изгиба r_w/S , но и величина относительного размера заготовки S/D .

7. Определено влияние зазора между пуансоном и матрицей на распределение деформации по толщине стенки и на величину технологической силы. При холодной штамповке заготовок толщиной менее 20 мм изменение зазора от наибольшего, равного толщине края фланца после штамповки, до наименьшего, равного начальной толщине заготовки, приводит к возрастанию технологической силы на 45%. Для заготовок большей толщины, штампуемых в горячем состоянии, максимальное утонение не превышает 5%, т.е. практически не зависит от зазора. Но величина и характер изменения технологической силы имеют свои особенности. Установлено, что характер зависимости сила–путь имеет два выраженных максимума, причем второй из них, соответствующий этапу утонения края фланца, может более чем в два раза превышать первый, по которому технологи, как правило, выбирают силу пресса. Полученные результаты позволили сформулировать критерий выбора оптимального зазора при вытяжке, а именно: при установлении величины зазора следует исходить из условия равенства максимумов сил на кривой сила–путь.

8. Выявленные закономерности пластического течения при толстолистовой штамповке позволили разработать новый эффективный технологический процесс штамповки брони волноводов и выработать рекомендации по расчету технологических параметров штамповки крупногабаритных деталей типа днищ, которые позволяют значительно снизить затраты на подготовку производства, сократить расходы металла и повысить прочность и точность изделий за счет прогнозирования возможных технологических отказов и предупреждения некоторых видов брака уже на стадии проектирования. Разработанный программный комплекс внедрен в учебный процесс, что повысило качество подготовки специалистов в области обработки металлов давлением.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Демин В.А. Проектирование процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов. – М.: Машиностроение, 2002. – 184 с.

2. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Демин В.А. Внешнее электронное и электростатическое воздействие на материалы. – М.: МГИУ, 2002. – 275 с.

3. Демин В.А., Громов В.Г., Символоков М.Ю. Применение метода конечных элементов к решению несимметричных задач формовки гофра // Сборник научных трудов МГИУ. – М., 1999. – Т.1. – С. 185 – 193.

4. Демин В.А., Громов В.Г., Символоков М.Ю. Применение метода конечных элементов к решению задачи формовки гофра гидростатическим давлением // Техника, технология и перспективные материалы: Сборник научных трудов (межвузовский). – М.: МГИУ, 2000. – Т.1. – С. 162 – 170.

5. Демин В.А., Локощенко А.М., Жеребцов А.А. Ползучесть длинной прямоугольной мембраны внутри криволинейной матрицы // Изв. вузов. Машиностроение. – 1998. – №4–6. – С. 41 – 46.

6. Demin V.A., Lokochtchenko A.M., Scherebtsov A.A. Creep of a Long Rectangular Membrane Under Transverse Pressure With Progressing Contact Conditions // 6-th International Symposium on Creep and Coupled Processes. – Bialystok (Poland), 1998. – L. 173 – 180.

7. Демин В.А., Локощенко А.М., Куприянов Д. Ю. Ползучесть длинной прямоугольной мембраны внутри клиновидной матрицы // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – №1. – С. 10 – 17.

8. Демин В.А., Локощенко А.М., Куприянов Д.Ю. Ползучесть и длительная прочность длинной прямоугольной мембраны внутри клиновидной матрицы // Современные проблемы прочности: Научн. тр. 5-го международного семинара. – Великий Новгород, 2001. – С. 172 – 177.

9. Демин В.А., Шарафутдинов Г.З. Прикладная теория конечных деформаций // Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике/ УрО РАН. – Пермь. 2001. – С. 227 – 228.

10. Демин В.А., Шарафутдинов Г.З. Метод геометрической линеаризации в задачах нелинейного деформирования // Mechanika. Zeszyt 24. – Bialystok, 2001. – L. 123 – 127.

11. Шарафутдинов Г.З., Демин В.А., Кайков К.В. Напряжения в деформируемых телах // Современные проблемы прочности: Научн. тр. 4-го международного семинара им. В.А. Лихачева. – Великий Новгород, 2000. – С.305-309.

12. Шарафутдинов Г.З., Демин В.А. Метод геометрической линейризации в технологических задачах нелинейного деформирования //Материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – С. 452 – 453.

13. Оценка возможности бездефектного производства деталей из листа / В.А. Демин, Ф.Х. Томилов, С.П. Попов, М.Ф. Томилов // Прикладные задачи механики и тепломассообмена в авиастроении: Сб. трудов ВГТУ. –Воронеж, 2000. – С. 112 – 122 .

14. Прогнозирование разрушения материала в операциях листовой штамповки / В. Демин, М. Томилов, С. Попов, Ф. Томилов // Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow I Konstrukcji. Augustow. 23 – 26 Maja. – Bialystok, 2001. – L. 73 – 77.

15. Определение коэффициента трения при пластическом деформировании металлов / М.Ф. Томилов, В.А. Демин, С.П. Попов, Ф.Х. Томилов // Современные аэрокосмические технологии: Тр. научно-тех. конференции. – Воронеж: ВГТУ, 2000. – С. 22 – 27.

16. Демин В.А. Особенности анализа процессов толстолистовой штамповки //Технология, экономика и организация производства технических систем: Межвузовский сб. науч. трудов – М.: МГИУ, 2002. – С. 18 – 24.

17. Демин В.А. Математическое моделирование процессов толстолистовой штамповки //Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: Труды IV международной научно-технической конференции / Под ред. проф. Ю.В. Полянского. – Ульяновск: УлГУ, 2001. – С. 63, 64.

18. Демин В.А., Калашников А.Е., Плотников А.Н. Особенности изготовления длинномерных гофрированных оболочек //Автомобилестроение: проектирование, конструкция, материалы, технология и производство: Тез. докл. межвуз. науч.-технич. конф. – М: МАСИ, 1989. – С. 5.

19. Демин В.А., Калашников А.Е., Плотников А.Н. Исследование формовки криволинейного гофра в инструментальных штампах //Обработка металлов давлением в автомобилестроении: Сб. статей. – М.: МАМИ, 1990. – С. 56 – 61.

20. Демин В.А., Калашников А.Е., Плотников А.Н. Исследование криволинейного гофра методом делительных сеток. Обработка металлов давлением в автомобилестроении: Сб. статей – М.: МАМИ, - 1991. - С. 91 – 97.

21. Демин В.А., Калашников А.Е., Плотников А.Н. Выбор гипотетической модели штамповки гофрированных оболочек //Технология, автоматизация и организация производства технических систем: Межвузовский сборник научных трудов. – М.: МАСИ, 1995. – С. 9 – 15.

22. Власов А.В., Демин В.А., Калашников А.Е. Математическое моделирование формовки криволинейного гофра // Изв. вузов. Машиностроение. – 1995. – №4–6. – С. 16 – 20.

23. Демин В.А. Методика расчета гибки широкой полосы //Технология, экономика и организация производства технических систем: Межвузовский сб. науч. трудов – М.: МГИУ, 2002. – С. 25 – 31.

24. Демин В.А. Методика решения задач процессов толстолистовой штамповки // Современные технологии в машиностроении: Сб. материалов V Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза, 2002. Ч.II. – С. 148 – 150.

25. Демин В.А., Савчинский И.Г. Моделирование вытяжки сферически-плуансоном //Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением: Сб. науч. трудов.– Тула: ТГУ, 2002. – Ч.1. - С. 186 – 192.

26. Демин В.А. Устойчивость пластического течения при толстолистовой штамповке //Изв. вузов. Машиностроение. – 2002. – №4. – С. 15-18.

27. Демин В.А. Горячая толстолистовая штамповка днищ //Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – №8. – С. 16 – 19.

28. Демин В.А. Потеря устойчивости пластического течения при толстолистовой штамповке // 2 International Conference “Research and development in mechanical industry“ RaDMI 2002. 2–4 September 2002, Vrnjaka Banja (Yugoslavia). – S. 147 – 151.

29. Демин В.А. Моделирование реверсивной отбортовки //Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров: Тез. докл. XXXIX Международ. науч.-практич. конф. ААИ. – М.: МАМИ, 2002. – С. 8-10.

30. Демин В.А. Моделирование разрушения в многоэтапных процессах толстолистовой штамповки //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2002. – № 4(49). – С. 58 - 66.

31. Пресс: Патент РФ RU2193969 МПК 7 B30B1/18 / Б.А. Степанов, В.А. Демин, В.С. Тимохин.– МГИУ. Заявл. 6.02.2001 Оpubл. 10.12.2002. Бюл. № 34.

Демин Виктор Алексеевич

**Разработка метода проектирования технологических процессов
толстолистовой штамповки на основе прогнозирования
технологических отказов**

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано к печати 08.04.03

Сдано в производство 09.04.03

Формат бум. 60х90/16

Бумага множ.

Усл. печ. л. 2,0

Уч.-изд. л. 2,1

Тираж 100

Заказ № 305

РИЦ МГИУ, 115280, Москва, Автозаводская, 16
тел.: 277-23-15