

На правах рукописи

УДК 621.98.044

Илинич Андрей Михайлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ОБРЕЗКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВЫХ ШТАМПОВАННЫХ
ЗАГОТОВОК, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ФЕРРИТНО-
МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ**

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



**Москва
2008**

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент Власов Андрей Викторович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Субич Вадим Николаевич кандидат технических наук, профессор Шпунькин Николай Фомич
Ведущая организация –	ОАО АвтоВАЗ

Защита состоится « » 2008 г. в ч. мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.
Телефон для справок 267-09-63.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

На фоне постоянно дорожающих энергоносителей и обостряющейся конкурентной борьбы между автомобильными компаниями, проблема уменьшения веса современного автомобиля с улучшением, при этом, показателей безопасности становится более актуальной. Это подталкивает автомобильную промышленность к поиску новых конструкционных материалов. Одним из таких перспективных материалов является двухфазная ферритно-мартенситная сталь (ДФМС), характеризующаяся сочетанием прочности и пластичности, недостижимым для однофазных сталей. Это свойство позволяет значительно снижать массу деталей с сохранением прочности, изготавливая их при этом обычными методами листовой штамповки. Несмотря на это и другие преимущества, производство, использующее этот материал, сталкивается с рядом трудностей. Примером тому являются разделительные операции, где основным дефектом является образование заусенца, который снижает качество, и точность штампуемых деталей, а также является источником появления развивающихся от поверхности разделения поперечных трещин в дальнейших технологических операциях. В традиционной практике листовой штамповки, выполнение требований по отсутствию заусенца, волосков и других дефектов, осуществляют регулировкой зазора между ножами, который должен быть меньше чем 10% толщины материала. Проблемы наблюдаются при обрезке крупногабаритных листовых деталей, которыми, к примеру, изобилует кузовное производство автомобильной промышленности. Так, у наружных облицовочных кузовных деталей, выполненных из ДФМС, 10% толщины материала соответствует зазору меньше 0.06 мм. Высокая прочность разрезаемого материала и большие габариты деталей приводят к упругим деформациям и перекосам инструмента, зачастую превышающим указанную величину. Высокая прочность ДФМС также является причиной повышенного износа и преждевременного затупления ножей. Указанные проблемы приводят к завышенным ценам на оснастку и, часто, их решение превышает возможности инструментального производства обрезных штампов крупногабаритных деталей, что ведет к появлению заусенца. Поэтому, для удовлетворения требований качества и внешнего вида, приходится вводить дополнительную операцию по удалению заусенцев, которую в большинстве случаев выполняют вручную. Еще один, применяемый в этом случае подход - лазерная резка, но она дорога и малопроизводительна.

В случае если разделительная операция не является последней в технологической цепи, и на последующих операциях вдоль линии реза прикладываются растягивающие напряжения, материал заготовки должен деформироваться под действием этих напряжений без разрушения.

Примерами операций, в которых наблюдается растяжение кромки, являются: фланцовка некоторых видов криволинейных участков, отбортовка, вытяжка деталей, имеющих внутреннее окно, вытяжка заготовок имеющих по контуру участки отрицательной кривизны, гибка с растяжением. Известно, что для всех этих операций при работе с ДФМС наблюдаются проблемы, выражающиеся в появлении трещин, направленных от поверхности разделения (рис. 1).

Описанные выше проблемы усугубляются практически полным отсутствием исследований, публикаций и практических рекомендаций, касающихся разделительных операций ДФМС. В связи с этим, технологи вынуждены пользоваться рекомендациями, разработанными для обычных низкоуглеродистых сталей, что часто приводит к неудовлетворительным результатам.

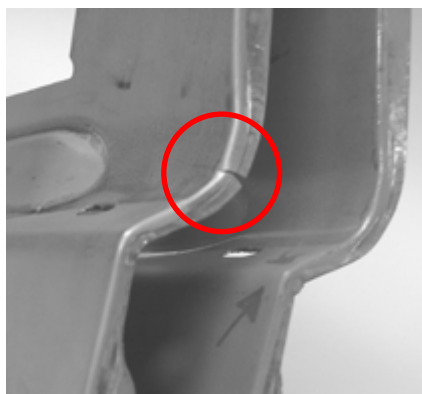


Рис. 1. Трещина, образовавшаяся при растяжении фланца ДФМС

Цель работы На основе теоретического и экспериментального исследования процессов разделения ДФМС, разработать новую технологическую схему обрезки, позволяющую получить качественную поверхность среза в широком диапазоне изменения технологического зазора между режущими кромками инструмента, а также улучшающую способность материала к удлинению вдоль линии реза в последующих технологических операциях. Разработать методику проектирования процессов обрезки листовых ДФМС, обеспечивающую оптимальный выбор технологического процесса и его параметров, для достижения необходимого качества при минимальных затратах на оснастку.

Методы исследований.

Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния заготовки при резке проведено с помощью конечно-элементного подхода, основанного на методе Уилкинса. Для прогнозирования возникновения очагов разрушения использовался критерий Колмогорова. Для экспериментального исследования применялся обрезной штамп с возможностью быстрой смены инструмента и регулировки зазора с помощью набора прокладок, который устанавливался на универсальную

испытательную машину INSTRON. Эта же машина использовалась в опытах на растяжение. Микрошлифы изучались под микроскопом, оборудованным цифровой фотокамерой.

Научную новизну имеют следующие результаты:

- Математическая модель технологического процесса резки ДФМС, позволяющая прогнозировать возникновение очагов разрушения с использованием критерия Колмогорова, основанная на конечно-элементной модели упрочняющегося упругопластического материала на базе метода Уилкинса;
- Результаты теоретического анализа процесса разделения ДФМС, позволившие выявить механизм зарождения трещин в рассматриваемых технологических процессах;
- Экспериментально выявленный эффект анизотропии предельной величины воспринимаемой деформации удлинения кромки, проявляющийся у ДФМС после их обрезки;
- Технологическая схема обрезки ДФМС, позволяющая получить качественную поверхность среза в широком диапазоне изменения технологического зазора между режущими кромками инструмента, а также улучшающая способность материала к удлинению вдоль линии реза в последующих технологических операциях;
- Методика проектирования процессов обрезки листовых ДФМС, обеспечивающая оптимальный выбор технологического процесса и его параметров для достижения необходимого качества при минимальных затратах на оснастку;
- Расчетно-экспериментальная методика построения упрощенной диаграммы пластичности для анализа процесса резки в условиях плоско-деформированного состояния, состоящая в использовании соответствующей экспериментальной точки с диаграммы предельного формоизменения и подборе экспоненциальной кривой, проходящей через эту точку и обеспечивающей совпадение момента появления трещины в заготовке при моделировании предварительного эксперимента с аналогичной историей нагружения.

Практическую значимость имеют следующие результаты:

- Программное обеспечение, позволяющее предсказать появление трещины для различных технологических схем при разделительных операциях в условиях плоского деформированного состояния;
- Технологическая схема обрезки ДФМС, снижающая влияние технологического зазора между режущими кромками инструмента на качество поверхности среза и уменьшающая ограничения на пластические деформации в последующих технологических операциях;

- Практические рекомендации по выбору параметров технологических процессов обрезки ДФМС;
- Регрессионная модель влияния технологических факторов процесса обрезки ДФМС на максимальное удлинение вдоль линии реза;
- Диаграмма пластичности ДФМС с пределом прочности 500 МПа при плоском деформированном состоянии.

Апробация работы.

Основные положения и материалы работы доложены и обсуждены на

- Международной конференции "Advanced High Strength Steel Design & Manufacturing Conference", г. Дирбон, США, 2004 г;
- Международной выставке-конференции "ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Exhibition", г. Орландо, США, 2005 г;
- Международной конференции "North American Deep Drawing Research Group meeting", г. Ливония, США, 2006 г;
- На заседании кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Баумана, 2008 г.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и итогов по работе и списка литературы. Работа изложена на 214 страницах машинописного текста, содержит 130 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 126 наименований.

Автор защищает:

- Конечно-элементную математическую модель технологического процесса обрезки ДФМС, позволяющую прогнозировать возникновение очагов разрушения с использованием критерия Колмогорова;
- Результаты теоретического и экспериментального исследования процессов разделения листовых ДФМС;
- Технологическую схему обрезки ДФМС;
- Методику проектирования технологических процессов обрезки листовых ДФМС.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулирована ее цель.

В первой главе проведен анализ литературных источников, посвященных свойствам ДФМС. Изучением этого вопроса занималось большое число как российских, так и зарубежных исследователей. Из российских исследователей можно отметить С.А. Голованенко и Н.М. Фонштейн. В данной главе были изучены:

- Общие свойства и характеристики;
- Влияние структурных факторов на пластические свойства и максимальную деформацию удлинения;
- Механизм зарождения трещин и разрушения;
- Влияние свойств ДФМС на возможность воспринимать растягивающие напряжения, направленные вдоль линии реза.

Помимо обзора ДФМС и их свойств, был проведен анализ существующих методов и практических рекомендаций по разделительным операциям листовой штамповки и влиянию качества поверхности разделения на возможность материала воспринимать растягивающие напряжения, приложенные вдоль линии реза. В этой области можно отметить работы Е.А. Попова, В.П. Романовского, В.Д. Головлева, В.И. Залесского, Ф.П. Михайленко, В.Т. Мещерина, С.Ф. Головащенко и Ю.Г. Князева. Также был сделан обзор методов расчета разделительных операций листовой штамповки, в частности работ Тимошенко В.А., Кучера П.Н., Гаркави Я.Н., Крылова Н.И., Лисина Г.А., Князева Ю.Г., Brokken D., Goijaerts A.M. и др.

На основе проведенного анализа, были сделаны следующие выводы:

1. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на качество поверхности среза в разделительных операциях листовой штамповки, является зазор между режущими кромками инструмента. Для стали, в качестве оптимального, рекомендуют зазоры 2-10% от толщины материала. Увеличение зазора сверх оптимального или его неравномерность вдоль линии реза приводит к ухудшению качества поверхности разделения и возникновению торцевого заусенца.
2. В литературных источниках наблюдается разногласие по вопросу места зарождения трещины в разделительных операциях листовой штамповки.
3. Исследование технической литературы, посвященной влиянию качества поверхности разделения на максимальное удлинение кромки материала, показало, что для листоштамповочных разделительных операций, основным влияющим фактором является наличие и высота заусенца. Для отбортовки также имеет значение отношение толщины материала к диаметру оттортываемого отверстия и расположение заготовки относительно пуансона и матрицы.
4. Существуют два способа оценки максимальной деформации растяжения кромки. Первый основан на отбортовке, второй - на одноосном растяжении. Несмотря на разную оценку максимального удлинения, в

литературе отсутствует их сравнение и рекомендации по выбору наиболее подходящего метода и его параметров исходя из конкретной ситуации.

5. Численные методы являются в настоящий момент наиболее точными и широко используемыми методами решения задачи пластичности, позволяющие использовать упругопластическую модель материала с учетом упрочнения и трения. Разделительные операции листовой штамповки являются одними из самых сложных для моделирования задач из-за наличия разрушения, острого инструмента, большого гидростатического давления и очень больших неравномерно распределенных деформаций.

В соответствии с поставленной целью на основании проведенного литературного анализа сформулированы основные задачи исследования:

1. Разработать математическую конечно-элементную модель процессов резки ДФМС, использующую упругопластическую модель материала и учитывающую трение, упрочнение и разрушение.
2. Проверить и подтвердить адекватность разработанной математической модели.
3. Теоретически и экспериментально исследовать процесс разделения листовых ДФМС.
4. Обосновать выбор методики определения максимальной деформации растяжения кромки. Экспериментально выявить основные факторы, влияющие на максимальную деформацию растяжения в зависимости от качества поверхности разделения.
5. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать технологическую схему обрезки, позволяющую получить качественную поверхность среза в широком диапазоне изменения технологического зазора между режущими кромками инструмента, обеспечивающую отсутствие волосообразных дефектов (усов), а также улучшающую способность материала к удлинению вдоль линии реза в последующих технологических операциях.
6. Разработать методику проектирования процессов обрезки листовых ДФМС, обеспечивающую оптимальный выбор технологического процесса и его параметров для достижения необходимого качества при минимальных затратах на оснастку.

Во второй главе проведено теоретическое исследование используемых на производстве технологических процессов обрезки (рис. 2).

Для этого была построена математическая модель этих процессов, основанная на двухмерной плоско-деформированной конечноэлементной модели упрочняющегося упругопластического материала на базе метода Уилкинса с «мягким» контактном слоем и учетом трения по Амонтоу-Кулону. В данном подходе уравнение движения сплошной среды (1)

решается совместно с уравнениями связи напряжений и деформаций и с условием пластичности.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{v} dV = \oint_S \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{n} ds \quad (1)$$

где V – произвольный контрольный объем, \vec{v} – вектор скорости, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, S – наружная поверхность V , \vec{n} – вектор внешней нормали к S .

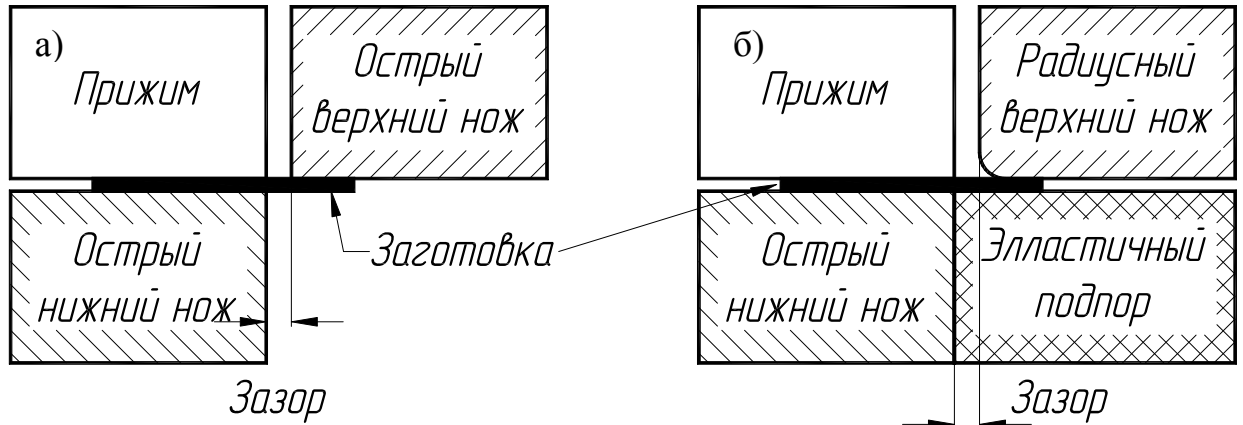


Рис. 2. Технологические процессы обрезки:

а – традиционная технология, б – технология с применением подпора

Связь напряжений и деформаций в упругой области брали в форме неогоковского закона:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{I}p + \mathbf{S}, \quad \mathbf{S} = \mu \mathbf{V}_D, \quad p = K(V/V_0 - 1), \quad \mathbf{V} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T \quad (2)$$

где \mathbf{I} - единичный тензор, p - гидростатическое давление, \mathbf{S} - девиаторная часть тензора напряжений, μ - модуль сдвига, K – объемный модуль упругости, V - текущий объем, V_0 - начальный объем $V_0 = V|_{t=0}$, \mathbf{V}_D - девиатор левого тензора Коши-Грина \mathbf{V} , \mathbf{F} - деформационный градиент.

Для прогнозирования возникновения очагов разрушения использовался критерий Колмогорова, в котором каждой материальной частице тела сопоставлена характеристика поврежденности $\psi \in [0;1]$:

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{\dot{\varepsilon}_i}{\varepsilon_p(\Pi, \mu_\sigma)} dt \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}_i$ - интенсивность скоростей деформаций, $\varepsilon_p(\Pi, \mu_\sigma)$ - поверхность пластичности.

Для вычисления (4) использовалась следующая численная аппроксимация:

$$\psi^{n+1} = \psi^n + \Delta \varepsilon_{nn}^{n+1} / \varepsilon_p(\Pi^{n+1}, \mu_\sigma = 0) \quad (4)$$

где ψ^{n+1} - накопленное данным элементом повреждение на текущем шаге, ψ^n - накопленное повреждение на предыдущем шаге, $\Delta \varepsilon_{nl}^{n+1}$ - приращение пластической деформации на текущем шаге.

В качестве исходного материала для проведения расчетов была выбрана ДФМС марки DI-FORM T500 с электро-гальваническим антикоррозионным покрытием, выпускаемая металлургической компанией ArcelorMittal. Данный выбор обусловлен отсутствием в настоящий момент промышленного производства ДФМС в России. Соответственно использовались физические константы и кривая упрочнения предоставленные производителем.

Для построения диаграммы пластичности, необходимой для применения критерия Колмогорова, была предложена расчетно-экспериментальная методика, состоящая в использовании экспериментальной точки, соответствующей плоско-деформированному состоянию, с диаграммы предельного формоизменения и подборе экспоненциальной кривой, проходящей через эту точку и обеспечивающей совпадение момента появления трещины в заготовке при моделировании и в эксперименте. Построенная на основе данной методики диаграмма пластичности (рис. 3) для выбранной марки ДФМС имеет уравнение:

$$\varepsilon_p(\Pi) = 1.498 \cdot e^{-0.464\Pi} \quad (5)$$

где ε_p - интенсивность пластической деформации в момент разрушения, Π - коэффициент жесткости напряженного состояния, вычисляемый по формуле:

$$\Pi = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) / \sigma_i = 3\sigma_{cp} / \sigma_s \quad (6)$$

где σ_i - интенсивность напряжений, σ_s - напряжение текучести, $\sigma_{cp} = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) / 3$.

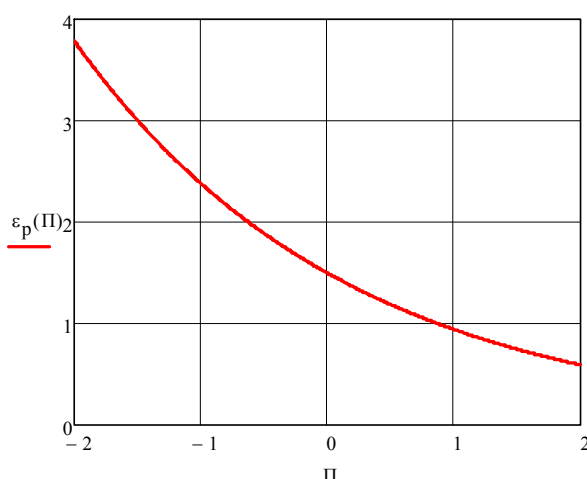


Рис. 3. Диаграмма пластичности для ДФМС DI-FORM T500

Результаты проведенных исследований показали, что в традиционной технологии обрезки, трещина зарождается у кромки верхнего ножа, а в процессе с подпором у кромки нижнего ножа. Также было установлено, что

изгиб – один из основных факторов, влияющих на место зарождения трещины. Показано, что при прочих равных условиях, трещина зарождается у того инструмента, со стороны которого наблюдается больший изгиб материала. Из сравнения результатов расчетов традиционной технологии и технологии с подпором был сделан вывод, что во втором случае разделение происходит при большей глубине внедрения ножей, а также, что в момент образования трещины у процесса с подпором значительно больше накопленная пластическая деформация у материальных частиц, лежащих вблизи линии, соединяющей режущие кромки ножей.

Моделирование операции отбортовки показало, что основной причиной наблюдающейся разницы максимального удлинения в опытах по отбортовке и одноосному растяжению, является искусственная локализация деформации на кромке, обращенной к матрице. При этом меры, направленные на увеличение этой локализации (увеличении градиента деформации по толщине заготовки), такие как увеличение отношения толщины к диаметру исходного отверстия s/D_0 , способствуют увеличению максимального удлинения кромки.

На базе проведенного анализа существующих методик экспериментального определения максимальной деформации растяжения кромки установлено, что методы, основанные на одноосном растяжении образца, дают наиболее консервативную и безопасную оценку максимального удлинения и больше подходят для операций, где градиент деформации по толщине заготовки отсутствует или мал. К последним относится отбортовка и гибка с растяжением. Для операций, в которых присутствует существенный градиент деформации по толщине заготовки, приводящий к ее локализации на кромке, лучше подходят методы, основанные на отбортовке. При этом опыты по отбортовке нужно проводить при условиях, наблюдаемых в оцениваемой операции. Использование неправильного значения s/D_0 и/или формы пуансона может дать существенно переоцененные значения максимального растяжения.

Помимо этого, в главе дается сравнение с широко используемой и общепризнанной программой конечно-элементного моделирования нелинейных процессов LS-DYNA, которое показало, что используемый подход и написанное на его базе программное обеспечение в рассмотренных задачах обеспечивает сопоставимую с указанной программой точность. Расхождение результатов не превышает 5%.

В третьей главе предложена методика комплексного экспериментального исследования операции обрезки, позволяющая исследовать различные технологии обрезки, с возможностью варьирования их параметров в широком диапазоне, используя универсальную штамповую оснастку и ограниченный набор сменного инструмента. Качество поверхности

разделения исследовалось путем изготовления микрошлифов поперечного сечения заготовки. Место зарождения трещин изучалось в опытах по частичному разделению, в которых подвижный инструмент останавливался в момент начала зарождения трещины. На базе опытов по одноосному растяжению отрезанных образцов, изучались основные факторы, влияющие на максимальную деформацию растяжения кромки в зависимости от качества поверхности разделения.

Было установлено, что образцы ДФМС демонстрируют три различные схемы разрушения при приложении растягивающих напряжений вдоль линии реза, в зависимости от применяемой технологии обрезки и ее технологических параметров (рис. 4). При этом наблюдалась четкая взаимосвязь между максимальным удлинением и механизмом разрушения заготовки. Было выявлено, что локальные деформации в момент разрушения для двух худших схем могут находиться в зоне «безопасного» формоизменения, под диаграммой предельных деформаций.

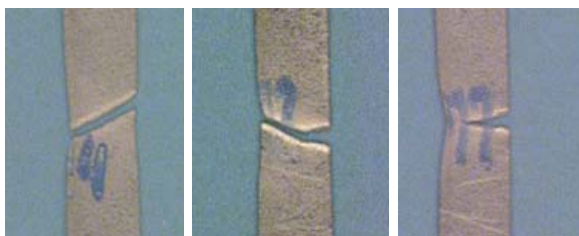


Рис. 4. Схемы разрушения при испытаниях образцов на растяжение

Проведенный эксперимент показал, что традиционный технологический процесс обеспечивает хорошее качество поверхности разделения для зазоров в интервале 5-15% от толщины разрезаемого материала. Начиная с зазора в 20%, на детали появляется торцевой заусенец значительной величины. Детали, отрезанные по этой технологии, демонстрируют большие значения максимального растяжения кромки для первого интервала зазоров, однако этот показатель начинает снижаться практически одновременно с появлением и ростом размеров заусенца. При этом большее снижение демонстрируют образцы с направлением прокатки перпендикулярным линии реза. К серьезным недостаткам данной технологии можно отнести образование на больших зазорах опасных волосообразных дефектов. Эксперименты по частичному разделению показали, что на всем исследованном диапазоне зазоров трещина зарождается у верхнего (подвижного) ножа. У нижнего ножа трещина не зарождается совсем, что связано с сильным изгибом отхода.

Представлены результаты исследования процесса обрезки с применением подпора и верхней радиусной режущей кромки, которые показывают, что эта технология обеспечивает отсутствие или сведение к минимуму заусенца для зазоров до 50% от толщины разрезаемого материала, однако даже на небольших зазорах наблюдается увеличенная утяжина и

неперпендикулярность поверхности разделения плоскости листа, что связано с радиусностью верхнего ножа. Предотвращение изгиба отхода, обеспечивает отсутствие волосообразных дефектов. Данные частичного разделения показывают, что трещина в данном процессе зарождается у нижнего ножа. По максимальному удлинению данная технология показала стабильные, слабо зависящие от зазора результаты, но с существенной, практически постоянной разницей между направлениями прокатки.

На основе результатов теоретического и экспериментального исследования был предложен новый технологический процесс обрезки (рис. 5), основная идея которого заключается в применении подпора, острого верхнего и углового нижнего ножей. Такая конфигурация позволяет избавиться от проблем немодифицированной технологии с подпором, связанных с радиусностью верхнего ножа. При этом угловой нижний нож обеспечивает разницу условий напряженно-деформированного состояния у верхнего и нижнего ножей, что обеспечивает зарождение трещины у кромки последнего.

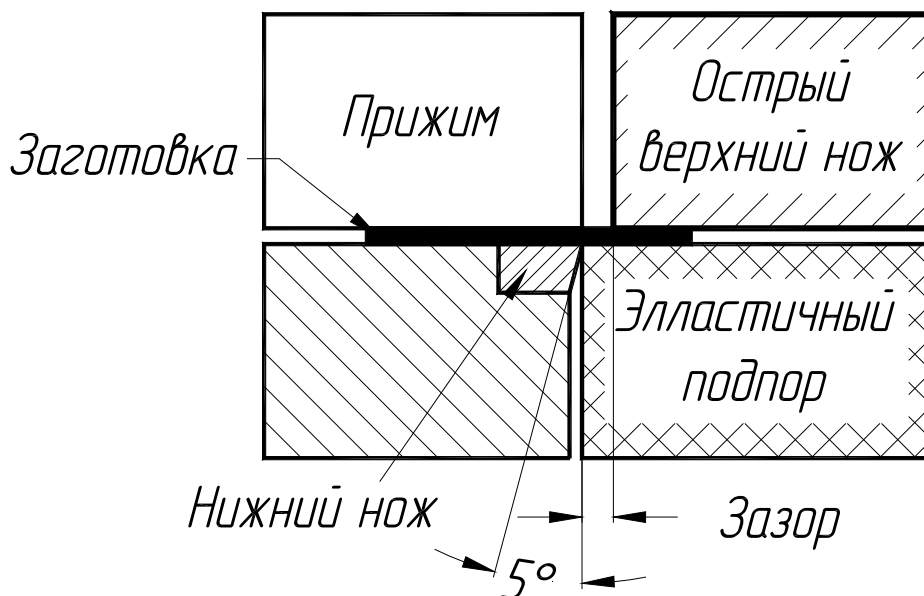


Рис. 5. Предложенный технологический процесс обрезки

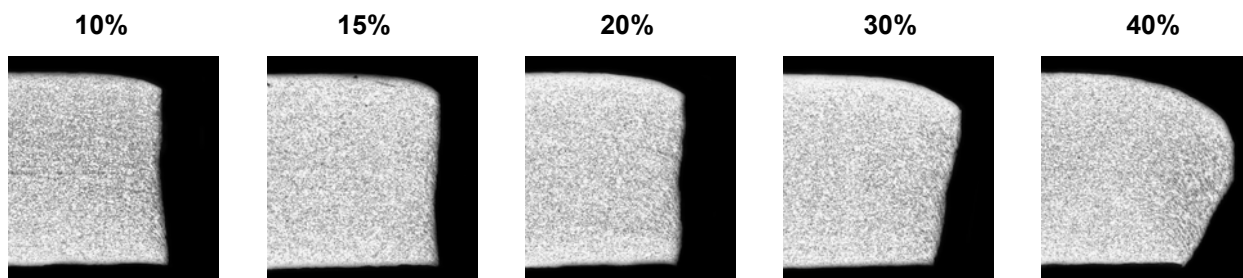


Рис. 6. Микрошлифы образцов ДФМС, отрезанные предложенным технологическим процессом

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования данной технологии, которые подтвердили, что на всем

исследованном интервале зазоров трещина зарождается у кромки нижнего ножа, обеспечивая отсутствие заусенца (рис. 6). При этом острый верхний нож существенно улучшает качество поверхности разделения, уменьшая утяжину и непараллельность.

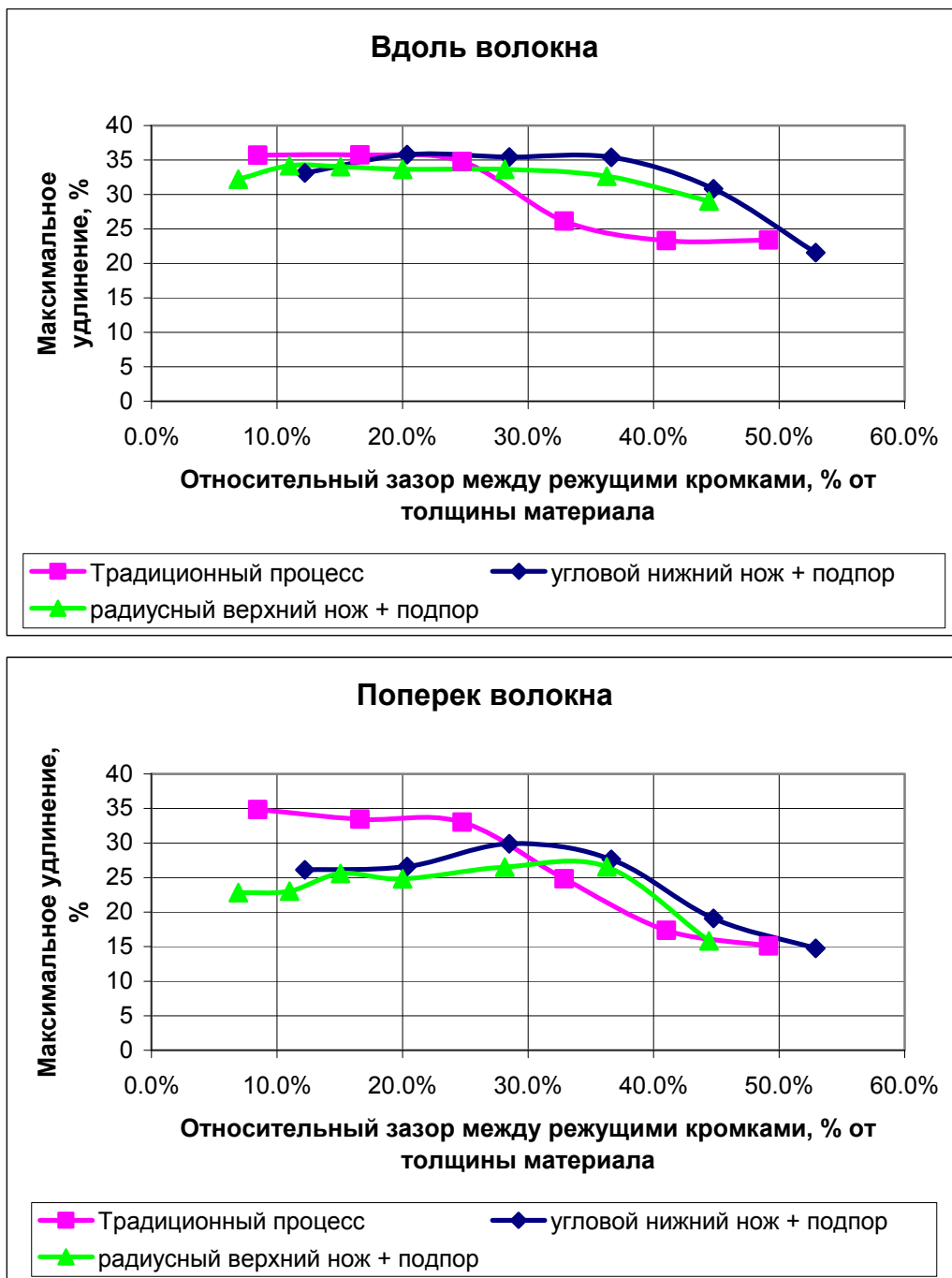


Рис. 7. Сравнение максимального удлинения образцов отрезанных различными технологическими процессами

Представлено сравнение результатов исследований технологических процессов обрезки, из которого сделаны следующие выводы:

- Из сравнения с традиционным процессом видно, что обе технологии с подпором показывают большее максимальное удлинение только на

больших зазорах. На малых зазорах они показывают такое же удлинение при продольном направлении волокна и значительно уступают при поперечном (рис. 7).

- Предлагаемая технология лучше немодифицированного процесса с подпором, как по качеству поверхности разделения, так и по максимальному удлинению.
- Предлагаемый процесс обеспечивает качество аналогичное традиционной технологии на малых зазорах и значительно лучшее на больших (начиная с 20%).

Сформулирована гипотеза, объясняющая причину возникновения анизотропии максимального удлинения кромки. Указанная анизотропия предположительно связана со сдерживающим эффектом, оказываемым волокнами материала на процесс развития и объединения микротрещин, зародившихся из-за предварительно накопленной пластической деформации и/или плохого качества поверхности разделения. В поддержку данной гипотезы были проведены дополнительные опыты и представлены их результаты.

В заключение главы приводятся результаты экспериментальной проверки, подтвердившие адекватность разработанной математической модели. Для всех исследованных технологических процессов правильно предсказывается место зарождения трещины. На примере технологии с подпором и радиусной верхней кромкой показано, что модель хорошо предсказывает форму заготовки в момент зарождения скалывающихся трещин, а величины геометрических показателей качества различаются в диапазоне 5-10%.

В четвертой главе построена регрессионная модель, позволяющая оценить максимальное удлинение кромки в зависимости от применяемой технологии, и ее параметров. Ее построение осуществлялось методом планирования эксперимента, используя который был поставлен и проведен полнофакторный эксперимент. В результате, для традиционного процесса была получена следующая формула:

$$y = 33.071 + 37.392x_1 + 1.357x_2 - 0.065x_3 + 1.184x_1x_3 - 170.811x_1^2 \quad (7)$$

где y – значение максимального удлинения, x_1 – относительный зазор, x_2 – направление волокна ($x_2 = 1$ для продольного и -1 для поперечного направления), x_3 – угол наклона заготовки в градусах.

Для предлагаемой технологии:

$$y = 24.96 + 69.845x_1 + 2.541x_2 + 0.213x_3 + 8.4x_1x_2 - 0.166x_2x_3 - 174.219x_1^2 \quad (8)$$

По результатам экспериментов, а также на базе накопленного опыта даны практические рекомендации по обрезке крупногабаритных деталей изДФМС. Основные из них кратко перечислены ниже:

- На стадии проектирования, после определения максимального удлинения вдоль линии реза, целесообразно развернуть исходную заготовку таким образом, чтобы зонам максимального удлинения кромки соответствовало продольное направление волокна материала.
- Для традиционного технологического процесса можно порекомендовать увеличить значение зазора до 10-15% от толщины материала на сторону. При таком увеличении зазора качество поверхности разделения и способность кромки к растяжению практически не изменяются, а износ режущих кромок ножей значительно снижается.
- При применении предлагаемой технологии, необходимо ориентироваться на зазор 15-20%.
- При обрезке, как по традиционной, так и по предлагаемой технологии важно поддерживать остроту режущих кромок ножей, при этом важнее острота нижнего ножа.
- Из-за высокой прочности разрезаемого материала, а также из-за важности поддержания остроты режущих кромок ножей, рекомендуется применять высоколегированные инструментальные стали, нацеленные на условия тяжелого нагружения, закаленные до твердости 60-64 HRC с дополнительной обработкой поверхности или твердосплавные вставки.

В заключение главы приведена разработанная методика проектирования процессов обрезки крупногабаритных деталей из ДФМС, обеспечивающая оптимальный выбор технологического процесса и его параметров для достижения необходимого качества при минимальных затратах на оснастку.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ИТОГИ

1. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования процессов обрезки крупногабаритных деталей из ДФМС, обеспечивающая оптимальный выбор технологического процесса и его параметров для достижения необходимого качества при минимальных затратах на оснастку.
2. Разработанная на основе численной модели упрочняющегося упругопластического материала, базирующейся на методе Уилкинса, конечноэлементной математической модели, позволяет моделировать процессы разделения и прогнозировать возникновение очагов разрушения с использованием критерия Колмогорова.
3. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность разработанной математической модели. Для всех исследованных технологических процессов правильно предсказывается место зарождения трещины. На примере технологии с подпором и радиусной верхней кромкой показано, что модель хорошо предсказывает форму заготовки в момент зарождения скалывающихся трещин, а величины геометрических показателей качества различаются в диапазоне 5-10%.

4. По результатам моделирования установлено, что изгиб – один из основных факторов, влияющих на место зарождения трещины. Показано, что при прочих равных условиях, трещина зарождается у того инструмента, со стороны которого наблюдается больший изгиб материала.
5. Моделирование операции отбортовки показало, что основной причиной, наблюдающейся разницы максимального удлинения в опытах по отбортовке и одноосному растяжению, является искусственная локализация деформации на кромке, обращенной к матрице. При этом меры, направленные на увеличение этой локализации (увеличении градиента деформации по толщине заготовки), такие как увеличение отношения s/D_0 , способствуют увеличению максимального удлинения кромки.
6. На базе проведенного анализа существующих методик экспериментального определения максимальной деформации растяжения кромки установлено, что методы, основанные на одноосном растяжении образца, дают наиболее консервативную и безопасную оценку максимального удлинения и больше подходят для операций, где градиент деформации по толщине заготовки отсутствует или мал.
7. Предложенная методика комплексного экспериментального исследования операции обрезки позволяет исследовать различные технологии обрезки с возможностью варьирования их параметров в широком диапазоне, используя универсальную штамповую оснастку и ограниченный набор сменного инструмента.
8. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана новая технологическая схема обрезки, позволяющая получить качественную поверхность среза в широком диапазоне изменения технологического зазора между режущими кромками инструмента, обеспечивающая отсутствие волосообразных дефектов (усов), а также улучшающая способность материала к удлинению вдоль линии реза в последующих технологических операциях. Основная идея данной технологии заключается в применении подпора, острого верхнего и углового нижнего ножей.
9. Показано, что образцы ДФМС демонстрируют три различные схемы разрушения при приложении растягивающих напряжений вдоль линии реза в зависимости от применяемой технологии обрезки и ее технологических параметров. При этом наблюдается четкая взаимосвязь между максимальным удлинением и механизмом разрушения заготовки. Было выявлено, что локальные деформации в момент разрушения для двух худших схем могут находиться в зоне «безопасного» формоизменения, под диаграммой предельных деформаций. Использование в конечно-элементном моделировании на стадии проектирования этой диаграммы в качестве основы для определения

опасных зон и возможности успешно отштамповать заготовку в этом случае неприемлемо. Поэтому необходимо избегать сочетаний технологических параметров обрезки ведущих к получению схем разрушения с наличием медленно раскрывающейся трещины, направленной перпендикулярно к поверхности разделения.

10. Результаты экспериментов показали, что при работе с ДФМС наличие и размер заусенца не является единственным фактором, определяющим максимальную деформацию растяжения кромки, так как в этом случае существует анизотропия этого параметра, предположительно связанная со сдерживающим эффектом, оказываемым волокнами материала на процесс развития и объединения микротрещин, зародившихся из-за предварительно накопленной пластической деформации и/или плохого качества поверхности разделения. В связи с этим образцы с направлением прокатки, совпадающим с линией реза (а, следовательно, и направлением растяжения), демонстрируют большее возможное максимальное удлинение в сравнении с образцами с поперечным направлением, даже несмотря на видимо лучшее качество поверхности разделения у последних.
11. Построенная путем математической обработки результатов эксперимента регрессионная модель, позволяет оценить максимальное удлинение кромки в зависимости от применяемой технологии и ее параметров.
12. Предложенные практические рекомендации по проектированию технологических процессов обрезки ДФМС позволяют снизить ограничения на пластические деформации в последующих технологических операциях, уменьшить затраты на изготовление штамповой оснастки и повысить ее стойкость.

Список работ по теме диссертации

1. Golovashchenko S.F., Ilinich A.M. Trimming of Advanced High Strength Steels // ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Exhibition. – Orlando, 2005. – P. 286-294.
2. Defensive Publication IPCOM000136742D. Trimming Process with Enhanced Stretching Performance of Trimmed Parts / S.F. Golovashchenko, A.M. Ilinich; Ford Motor Company (US). – 2006.
3. Головащенко С.Ф., Илинич А.М. Обрезка высокопрочных листовых двухфазных сталей // Известия ТулГУ. Машиноведение, системы приводов и детали машин (Тула). – 2006. – Спец. вып. – С. 445-453.
4. Илинич А.М., Головащенко С.Ф. Влияние технологических параметров обрезки на предельную деформацию удлинения высокопрочных листовых двухфазных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №6. – С. 18-24