

На правах рукописи



ХАРСЕЕВ ВИТАЛИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ
ШТАМПОВКИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ**

**Специальность 05.02.09 - Технологии и машины обработки
давлением**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Петров Павел Александрович

Официальные оппоненты: Сосенушкин Евгений Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
профессор кафедры «Системы
пластического деформирования»

Травин Вадим Юрьевич
кандидат технических наук,
АО «НПО «СПЛАВ» (г. Тула),
заместитель главного конструктора

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Защита состоится «21» февраля 2017 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государст-
венный университет» (300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:
<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/harseev-ve/>

Автореферат разослан «23» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В современных экономических условиях, проблема создания высокотехнологичной продукции, конкурентоспособной на внутреннем и на внешнем рынках, является одной из наиболее важных задач машиностроительного комплекса, способствующей реализации стратегического социально-экономического плана развития страны, поставленного Президентом РФ. В связи с чем проблема предельного деформирования материалов в обработке металлов давлением (ОМД) приобрела большое значение.

Холодная листовая штамповка является широко распространенной разновидностью технологии ОМД. Для определения предельного деформирования в ней широко используются результаты технологических испытаний с условиями, моделирующими различные операции. Подобный подход требует наличия нескольких типов испытательного оборудования и большого количества приспособлений для проведения различных технологических проб, а, зачастую, и вовсе непригоден. Поэтому возник и получил распространение подход, основанный на определении диаграмм предельных деформаций, но исследования показывают и его неработоспособность в ряде случаев. Другим способом оценки предельного деформирования является применение макроскопических феноменологических теорий разрушения, из числа которых для анализа процессов ОМД распространение получили кинематические теории рассеянного разрушения, определяющие степень использования запаса пластичности материала заготовки. Тем не менее, их практическое применение сталкивается с трудностями экспериментального характера из-за необходимости определения, при использовании известных теорий и традиционных показателей, зависимости предельной величины показателя накопленной деформации (ПНД) от значений показателя напряженного состояния (ПНС) и показателя вида напряженного состояния (ПВНС) в широком диапазоне изменения последних. Так же применение кинематических теорий рассеянного разрушения ограничивалось необходимостью информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) материала заготовки в процессе формоизменения. Теория пластичности позволяет формулировать упомянутую задачу, но, зачастую, найти решение не удавалось. Однако это стало возможным, благодаря сочетанию развития численных методов с появлением быстродействующих и доступных ЭВМ, что создало предпосылки для развития математических моделей процессов ОМД и соответствующих программ.

Таким образом, разработка теоретической модели определения предельного деформирования заготовки вследствие исчерпания ресурса пластичности в операциях холодной листовой штамповки изделий, основанной на представлениях о накоплении дефектов деформационного происхождения, не вызывающей экспериментальные трудности, является актуальной научной задачей.

Цель работы состоит в повышении эффективности процессов холодной листовой штамповки путем увеличения точности оценки предельного деформирования материала изотропной заготовки.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

- выбор ПНД и ПНС, позволяющих минимизировать относительное отклонение диаграмм пластичности, соответствующих различным видам напряженного состояния;

- поиск среди известных или создание новых способов исследования пластичности материала листовых и объёмных заготовок на одном испытательном оборудовании, без применения специализированных приспособлений, обладающих широкими диапазонами варьирования ПНС и ПВНС;

- создание теоретической модели использования ресурса пластичности изотропного материала в процессах холодной листовой штамповки, основанной на представлениях о накоплении дефектов деформационного происхождения; её экспериментальная проверка и оценка эффективности;

- разработка расчетного аппарата оценки предельного деформирования заготовки с помощью созданной теоретической модели на основе имитационного моделирования;

- апробация полученных результатов работы при решении практических задач ОМД.

Объектом исследования являются процессы листовой штамповки изотропных металлов.

Предмет исследования. Предельное деформирование в процессах холодной листовой штамповки изотропных металлов.

Методы исследования. В работе применялись экспериментальные и теоретические методы исследования. Теоретическое исследование НДС рассмотренных в работе образцов выполнено численным методом – методом конечных элементов, путем решения дифференциальных уравнений термовязкоупругопластичности при заданных начальных и граничных условиях с использованием ЭВМ. Аналитическое исследование процесса радиального выдавливания в канал определенной формы выполнено с использованием основных уравнений механики деформируемого твердого тела и теории течения для случая идеально жестко-пластического тела. Теоретическое исследование использования ресурса пластичности материала выполнено с применением представлений о накоплении дефектов деформационного происхождения. Так же в работе применялись методы теории планирования эксперимента, математической статистики и оптимизации.

Экспериментальное исследование пластичности алюминиевого сплава АМгб выполнено способом растяжения/сжатия специальных полос. При проведении экспериментальных исследований использованы современные испытательные машины и регистрирующая аппаратура (испытательная машина INSTRON SATEC, экстензометр INSTRON genuine product 2630-113 и др.).

Результаты, полученные автором и выносимые на защиту:

- результаты исследования по выбору ПНД и ПНС, позволяющих минимизировать относительное отклонение диаграмм пластичности, соответствующих различным видам напряженного состояния;

- способ исследования пластичности листовых заготовок растяжением/сжатием специальных полос;

- результаты анализа способа исследования пластичности объёмных заготовок радиальным выдавливанием сплошных цилиндрических образцов в канал определенной формы;

- теоретическая модель использования ресурса пластичности материала изотропной заготовки при холодной листовой штамповке;

- подпрограмма, модернизирующая расчетное ядро программы DEFORM для определения степени использования ресурса пластичности заготовки из изотропного металла в процессах холодной листовой штамповки.

Научная новизна работы заключается в выявленных закономерностях

предельных возможностей деформирования изотропных металлов от механических параметров режима обработки, основанных на применении представлений о процессе достижения предельного деформирования в виде накладывающихся стадий накопления дефектов деформационного происхождения различного масштабного уровня.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- развитие теории листовой штамповки в части анализа предельного деформирования заготовки применением представлений о использовании ресурса пластичности материала;

- выполненном анализе ПНД и ПНС, используемых при определении пластичности металлов.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- создан критерий, позволяющий оценивать предельное деформирование изотропной заготовки в процессах холодной листовой штамповки;

- создана подпрограмма, интегрированная в программу DEFORM, в которой внедрена разработанная модель использования ресурса пластичности материала изотропной заготовки, что позволяет моделировать достижение предельного деформирования в процессах холодной листовой штамповки;

- получены рекомендации по исследованию пластичности объемных заготовок радиальным выдавливанием сплошных цилиндрических образцов в канал определенной формы;

- получены рекомендации по исследованию пластичности листовых заготовок растяжением/сжатием специальных полос.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует п. 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки» и п. 3 «Технологииковки, прессования, листовой и объемной штамповки и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок» области исследования паспорта специальности 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением».

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов работы обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задач, применением сертифицированного и поверенного испытательного оборудования и регистрирующей аппаратуры и известных математических методов, в том числе строго обоснованного численного метода – метода конечных элементов, и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными.

Результаты работы были доложены и обсуждались на 77-ой международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров (г. Москва: Университет машиностроения, 2013 г.); III международной научно-технической конференции (г. Тула: ФГБОУ ВО «ТулГУ», 2014 г.); научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы обработки материалов давлением. Моделирование технологий ОМД» (г. Москва: Университет машиностроения, 2015 г.) и научных семинарах кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына» Университета машиностроения.

Реализация работы. Полученные результаты приняты к использованию на ФГУП «НПО «Техномаш», г. Москва, и в учебном процессе кафедры

«Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына» Университета машиностроения, о чем свидетельствуют акты внедрения.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 статей, из них 6, в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 3, в материалах и сборниках научных трудов конференций, общим объемом 4,96 печ. л. с авторским вкладом 2,91 печ. л.; получен один патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 101 наименования и 7 приложений, содержит 109 страниц машинописного текста, 54 рисунка, 7 таблиц. Общий объем работы – 166 страниц.

Автор выражает глубокую благодарность кафедре МТ-6 «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана, за оказанную помощь в проведение экспериментов и предоставленную возможность использования лицензионных программ Absoft Pro Fortran и MathCAD, а также инжиниринговой компании «ТЕСИС» (ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия) за предоставленную в опытную эксплуатацию лицензию на программное обеспечение DEFORM.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна, методы исследования, теоретическая и практическая значимость, приводятся данные об апробации результатов работы и подтверждающие их достоверность.

В первом разделе выполнен обзор феноменологических теорий разрушения; приведены аппроксимирующие функции, ПНД и ПНС, применяемые при построении диаграмм пластичности; определены диапазоны варьирования ПНС различных способов исследования пластичности металлов, не требующим применения специализированного испытательного оборудования и приспособлений; произведен обзор коммерческих программ моделирования процессов ОМД и их возможностей при оценке предельного деформирования.

Рассмотрение физических представлений о механизмах достижения предельного деформирования металла подтверждает справедливость общепринятого мнения о невозможности их применения в практике инженерных расчетов процессов ОМД и о целесообразности использования в качестве основы математического аппарата феноменологических теорий разрушения. В настоящее время созданы различные макроскопические феноменологические теории разрушения, из числа которых широкое распространение для анализа процессов ОМД получили деформационные теории.

Значительный вклад в развитие деформационных теории разрушения внесли А.А. Богатов, С.И. Губкин, Н.Н. Давиденков, Г.Д. Дель, А.А. Ильюшин, Ю.Г. Калпин, Л.М. Качанов, И.А. Кийко, В.Л. Колмогоров, В.М. Михалевич, А.А. Мишулин, В.В. Новожилова, В.А. Огородников, Ю.Н. Работнов, Г.А. Смирнов-Аляев, Л.Г. Степанский, В.Н. Субич, В.И. Трегубов, Я.Б. Фридман, Н.А. Шестаков, С.С. Яковлев, Y. Bai, T. Wierzbicki и др.

Деформационные теории основаны на феноменологической взаимосвязи явления разрушения и предельной деформации в зависимости от величины ПНС. В тоже время, согласно известным данным, большинству процессов ОМД соответствует широкий диапазон варьирования ПНС, включающий положительные и отрицательные величины. Обзор экспериментальных спо-

собов, не требующих применения специализированных оборудования и приспособлений, показал, что определять зависимость предельной деформации от величины ПНС в широком диапазоне варьирования, на сплошных цилиндрических образцах, позволяет метод радиального выдавливания в канал, форма которого обеспечивает постоянство ПНС в процессе формоизменения. Для листового материала такого способа нет.

Так же согласно опытным данным, диаграммы пластичности в традиционных координатах для испытаний с различными ПВНС не совпадают.

Обзор коммерческих программ моделирования процессов ОМД показал, что в качестве критериев оценки предельного формоизменения в них, как правило, реализованы либо мгновенные, либо энергетические модели.

Во втором разделе выполнено исследование по выбору ПНД и ПНС, позволяющих минимизировать расхождение между диаграммами пластичности, построенными для различных ПВНС; произведен анализ возможностей метода определения пластичности радиальным выдавливанием в канал, форма которого обеспечивает постоянство ПНС в процессе формоизменения; предложен способ исследования пластичности листового металла в широком диапазоне варьирования ПНС и ПВНС на одном испытательном оборудовании, без применения специализированных приспособлений.

При выборе ПНД и ПНС, рассматривались все известные выражения для их определения. Так, в качестве ПНД в момент достижения предельного деформирования ε_p принимались степень деформации ε_i , степень деформации сдвига Λ , максимальная главная деформация ε_1 , октаэдрический сдвиг $g_{\text{окт}}$; для определения ПНС η принимались выражения, предложенные В.А. Бабичковым, О.В. Грушко, С.И. Губкиным, М.А. Зайковым, В.Л. Колмогоровым, Г.А. Смирновым-Аляевым, Я.Б. Фридманом, Н. Dell, F.A. McClintock. Основываясь на выводах некоторых исследователей о незначительности влияния на пластичность среднего главного напряжения σ_2 и о выполнении гипотезы единой кривой, построенной в координатах максимальный сдвиг γ_{13} – максимальные касательные напряжения τ_{13} , в качестве ε_p так же рассматривалась величина $\gamma_{13}/2$, а в качестве η – упомянутые выше выражения со всеми возможными вариантами замены среднего нормального напряжения $\sigma_{\text{ср}}$ и интенсивности нормальных напряжений σ_i на нормальное напряжение в площадке с максимальным касательным напряжением σ_{13} и τ_{13} , соответственно.

В качестве экспериментальной основы исследования использовались результаты определения диаграмм пластичности стали 12Х1МФ из опытов на растяжение ε_{p_p} и кручение $\varepsilon_{p_к}$ в камере высокого давления [Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. М.: Металлургия, 1984. 144 с].

Теоретический анализ испытаний производился путем имитационного моделирования в QForm. Выходными параметрами моделирования являлись характеристики НДС при формоизменении в месте достижения предельного деформирования, необходимые для вычисления вышеупомянутых показателей. По результатам определения которых, были построены диаграммы ε_{p_p} и $\varepsilon_{p_к}$ в различных координатах. Расхождение ε_{p_p} и $\varepsilon_{p_к}$ оценивалось величиной δ :

$$\delta = (\varepsilon_{p_p} - \varepsilon_{p_к}) / \min(\varepsilon_{p_p}, \varepsilon_{p_к}). \quad (1)$$

Так как δ для всех η в виде произведения постоянного коэффициента на отношение σ_{cp}/σ_i одинакова, то при обработке результатов моделирования из данных показателей рассматривался только:

$$\eta = 3/\sqrt{2} \sigma_{cp}/\sigma_i. \quad (2)$$

В процессе обработки результатов испытаний по кручению образцов при рассмотрении изменения ε_p , из анализа были исключены ε_1 , $\varepsilon_{окт}$ и $\gamma_{13}/2$, так как они в процессе формоизменения не являются монотонно возрастающими функциями, а, следовательно, предельное деформирование может быть достигнуто после прохождения ими своего максимума, что вызывает неопределенность: какое значение принимать в качестве критического.

В результате определения среднего значения δ , для всего диапазона варьирования η , выяснилось, что минимальным расхождением для стали 12Х1МФ обладают диаграммы пластичности, построенные для η в виде:

$$\eta = \sigma_{cp}/\max(|\sigma_1|, |\sigma_3|). \quad (3)$$

где σ_1 , σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения.

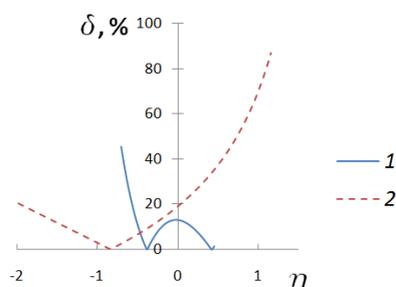


Рисунок 1 – Относительное отклонение диаграмм пластичности, соответствующее η в виде:
1 – (3); 2 – (2)

Среднее значение δ для η в виде (3) составило 11,3%, в то время как для η в виде (2) – 22,6%.

Из графиков, представленных на рисунке 1, очевидна необходимость учета вида напряженного состояния при исследовании пластичности материала. В дальнейшем в качестве ε_p , η и ПВНС χ использовались величины, позволяющие в полной мере описать НДС материала:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i|_{t=t_p}, \quad \eta = \sigma_{cp}/\sigma_i, \quad \chi = \mu_\sigma, \quad (4)$$

где t и t_p – время деформирования в рассматриваемый момент и в момент достижения предельного деформирования; μ_σ – параметр Надаи-Лоде.

Так как большинство технологий листовой штамповки относятся к процессам с плоским напряженным состоянием, область их определения найдена из условия попеременного равенства одного из главных напряжений нулю и имеет вид:

$$\eta = \begin{cases} (\chi - 3) / \left(6\sqrt{(\chi + 1)^2 / 4 + (\chi + 1)/2} \right), \\ (2 - 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 3} \right), \\ (1 + 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 1} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Для анализа возможностей метода определения пластичности металла радиальным выдавливанием в канал, форма которого обеспечивает постоянство ожидаемого ПНС η_0 в процессе формоизменения, следуя Ю.Г. Калпину [Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Ю.Г. Калпин [и др.]. М.: Машиностроение, 2011. 244 с.], была получена аналитическая зависимость для определения высоты канала h :

$$h = h_0(\rho/\rho_0)^{\frac{(2-3\eta_0^2-3\eta_0\sqrt{4/3-3\eta_0^2})/(2(3\eta_0^2-1))}{1}}, \quad (6)$$

где ρ_0 и ρ – радиус поперечного сечения заготовки и боковой поверхности фланца; h_0 – начальная высота канала.

Из уравнения (6) диапазон варьирования η , характерный для данного способа исследования пластичности, определяется как:

$$\eta \in (-1/\sqrt{3}; 1/\sqrt{3}) \quad (7)$$

Для проверки полученных результатов, и более точного исследования способа, был выполнен численный полный факторный эксперимент в программе DEFORM (см. таблицу 1). При проведении которого, исходя из уравнения (6), в качестве варьируемых факторов приняты: отношение ρ_0/h_0 и η_0 . Исследование проводилось для алюминиевого сплава Д16. Выходными данными являлись параметры НДС в месте достижения предельного деформирования.

Таблица 1 – План полнофакторного численного эксперимента

№ опыта	Уровень фактора		Результат моделирования		№ опыта	Уровень фактора		Результаты моделирования	
	η_0	ρ_0/h_0	$\eta_{\text{ф}}$	$\chi_{\text{ф}}$		η_0	ρ_0/h_0	$\eta_{\text{ф}}$	$\chi_{\text{ф}}$
1	-1/3	5/6	-0,5	0,5	7	-1/3	5/3	-0,2	-0,1
2	0	5/6	-0,7	1,0	8	0	5/3	0,3	-0,7
3	1/3	5/6	-0,6	1,0	9	1/3	5/3	-0,8	0,7
4	-1/3	5/4	-0,3	0,1	10	-1/3	5/2	-0,2	-0,1
5	0	5/4	-0,8	0,8	11	0	5/2	0,3	-0,7
6	1/3	5/4	-0,7	0,7	12	1/3	5/2	-0,2	0,2

Место и момент достижения предельного деформирования определялись с помощью разработанной пользовательской подпрограммы, которая, подключаясь к постпроцессору DEFORM, производит математическую обработку полей переменных, сохраненных в базе данных моделирования, и определяет распределение критерия В.Л. Колмогорова по объему заготовки в процессе формообразования. После чего определенные таким образом места назначались в качестве трассируемых точек, в которых производилось определение выходных параметров. Выходные параметры записывались в отдельный файл для последующей математической обработки. В процессе этой обработки были найдены величины ПНС $\eta_{\text{м}}$ и ПВНС $\chi_{\text{м}}$ в месте исчерпания ресурса пластичности при деформировании образцов. Так как, согласно моделированию, при формоизменении $\eta_{\text{м}}$ и $\chi_{\text{м}}$ изменяются, были найдены средние величины показателей за эксперимент $\eta_{\text{ф}}$ и $\chi_{\text{ф}}$. По результатам эксперимента были определены поверхности отклика, согласно которым радиальным выдавливанием в канал определенной формы можно исследовать пластичность алюминиевого сплава Д16 в следующих диапазонах показателей:

$$\eta \in [-0,9; 0,5], \chi \in [-1; 1] \quad (8)$$

Для определения пластичности листового металла в широком диапазоне варьирования η , включающем положительные и отрицательные величины, без применения специализированного оборудования и приспособлений был предложен способ, основанный на испытаниях растяжением/сжатием образцов типа «специальная полоса» (см. рисунок 2). Варьирование величины η достигается изменением угла наклона пропилов α , в результате чего в центре перемычки реализуются различные комбинации растяжения, либо сжатия и сдвига.

Локализация возникновения предельного деформирования в упомянутом месте перемычки достигается применением специальных проточек.

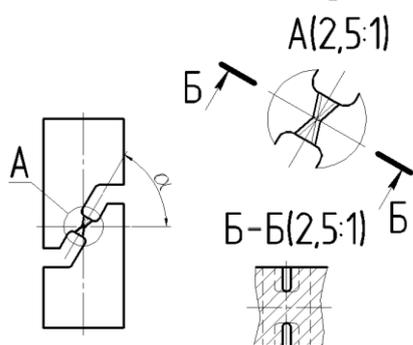


Рисунок 2 – Эскиз образца типа «специальная полоса»

Для нового способа справедливы следующие гипотезы:

- зависимости величин η и χ от α симметричны относительно 0° ;
- значения η и χ для одного из видов испытаний на образцах с $\alpha > 90^\circ$ равны η и χ для другого вида испытания на образцах с углом наклона пропилов $180^\circ - \alpha$.

Таким образом, максимальное варьирование η и χ , при проведении испытаний двух видов, достигаются изменением α в пределах от 0° до 90° .

В случае применения испытания одного вида, для увеличения диапазона варьирования, применяются образцы с α более 90° ; при этом, необходимо изменять габаритные размеры образца и геометрию пропилов для локализации деформации в центре перемычки.

Определение возможностей нового способа производилось с помощью численного полного факторного эксперимента (см. таблицу 2), выполненного с применением программы DEFORM. В качестве варьируемых факторов приняты вид испытания (растяжение, сжатие) и угол наклона пропила (от 0° до 90° с шагом в 15°). Исследования проводились для алюминиевого сплава Д16. Методика поиска выходных данных моделирования аналогична предыдущему исследованию. Так были определены величины показателей η_f и χ_f .

Таблица 2 – План полнофакторного численного эксперимента

№ опыта	Уровень фактора		Результаты моделирования		№ опыта	Уровень фактора		Результаты моделирования	
	$\alpha, ^\circ$	Вид испытания	η_f	χ_f		$\alpha, ^\circ$	Вид испытания	η_f	χ_f
1	0	сжатие	-0,6	0,7	8	0	растяжение	0,6	-0,8
2	15	сжатие	-0,6	0,5	9	15	растяжение	0,8	-0,9
3	30	сжатие	-0,6	0,5	10	30	растяжение	0,5	-0,9
4	45	сжатие	-0,4	0,8	11	45	растяжение	0,5	-0,9
5	60	сжатие	-0,2	0,5	12	60	растяжение	0,3	-0,8
6	75	сжатие	0	0	13	75	растяжение	0,4	-0,7
7	90	сжатие	0,2	-0,4	14	90	растяжение	0,2	-0,4

В третьем разделе разработана теоретическая модель использования ресурса пластичности материала изотропной заготовки при холодной листовой штамповке; представлены результаты её экспериментальной проверки и оценки эффективности; создана пользовательская подпрограмма, модернизирующая ядро программы DEFORM внедрением разработанной модели.

Разработка модели велась в рамках механики сплошной среды, в связи с чем из нее были переняты основополагающие гипотезы. Так же созданная модель базируется на представлениях о накоплении дефектов деформационного происхождения и достижение предельного деформирования в ней оценивается при помощи величины Ψ , характеризующей использованный ресурс пластичности, причем:

$$\Psi|_{t=0} = 0, \quad \Psi|_{t=t_p} = 1. \quad (9)$$

Выражение для определения Ψ принято в виде:

$$\Psi = \Psi_1 - \Psi_2, \quad (10)$$

где Ψ_1 , Ψ_2 – величины, характеризующие приращение дефектов деформационного происхождения и восстановленный ресурс пластичности.

Согласно известным данным, процесс достижения предельного деформирования можно представить в виде следующих накладывающихся стадий:

- деформация, сопровождаемая увеличением плотности точечных и линейных дефектов с их концентрацией и появлением микродефектов;
- рост и слияние микродефектов, с образованием макродефектов;
- рост и слияние макродефектов с появлением магистральной трещины.

Таким образом, величину приращения дефектов деформационного происхождения Ψ_1 можно представить как:

$$d\Psi_1/d\varepsilon = \psi_1\psi_2\psi_3, \quad (11)$$

где ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 – величина, характеризующая, соответственно, число зародышей микродефектов, скорость роста микродефектов и слияние микродефектов; ε – величина, характеризующая накопленную деформацию.

В результате применения известных фактов о величинах ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 , из уравнения (11) получили общий вид теоретической модели использования ресурса пластичности:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon} f_1(\varepsilon)f_2(\eta)f_3(\chi)(f_4(\eta)\sigma_3/(2\sigma) + \tau_{13}/\sigma)d\varepsilon - \Psi_2, \quad (12)$$

где $f_1(\varepsilon)$ – функция зависимости числа зародышей микродефектов от накопленной деформации; $f_2(\eta)$, $f_3(\chi)$ – функции, характеризующие влияние на скорость роста микродефектов показателей η и χ ; $f_4(\eta)$ – функция, регулирующая тип механизма, по которому протекает процесс слияния микродефектов; σ – величина, характеризующая напряженное состояние.

Для уточнения модели при холодной листовой штамповке были заданы входящие в неё функции и величины. Так в случаях монотонного деформирования, к которым приближенно относятся процессы листовой штамповки, залечиванием микродефектов можно пренебречь:

$$\Psi_2 = 0. \quad (13)$$

В качестве нормирующих величин напряженного состояния и накопленной деформации, согласно гипотезе единой кривой, приняты:

$$\sigma = \sigma_i, \quad \varepsilon = \varepsilon_i. \quad (14)$$

В соответствии с экспериментальными наблюдениями, представленными в литературных источниках, $f_1(\varepsilon)$ и $f_4(\eta)$ приняты в виде:

$$f_1(\varepsilon) = c_1\varepsilon, \quad f_4(\eta) = \begin{cases} 0, & \eta \leq c_2, \\ 1, & c_2 \leq \eta; \end{cases} \cap c_2 \geq 1/3, \quad (15)$$

где c_i – коэффициент; i – номер коэффициента.

Следуя J.R. Rice, в качестве $f_2(\eta)$, принята функция:

$$f_2(\eta) = c_3e^{c_4\eta}. \quad (16)$$

Функция $f_3(\chi)$ выбрана исходя из условия обеспечения наименьшего отклонения от экспериментальных данных:

$$f_3(\chi) = \cos^2(c_5\chi + c_6). \quad (17)$$

Таким образом, для определения величины Ψ в процессах холодной листовой штамповки получено следующее выражение:

$$\Psi = c_7 \int_0^{\varepsilon_i} \cos^2(c_5\chi + c_6) e^{c_4\eta} \varepsilon_i \tau_{13} / \sigma_i d\varepsilon_i. \quad (18)$$

Проверку и оценку эффективности теоретической модели (18) произвели сравнением следующей из нее зависимости величины предельной деформации ε_{cr} от η , и аналогичных результатов, полученных из энергетических моделей определения предельного деформирования и аппроксимирующих диаграмму пластичности функций, с экспериментальной для процессов с плоским напряженным состоянием.

Исследование производилось для алюминиевых сплавов АМг6 и АА2024 и стали А710. Согласно литературным данным, функция, аппроксимирующая поверхность пластичности, $\varepsilon_{pф}$ принята в виде:

$$\varepsilon_{pф} = \left[1/2(c_8 e^{-c_9\eta} + c_{12} e^{-c_{13}\eta}) - c_{10} e^{-c_{11}\eta} \right] \bar{\theta}^2 + 1/2(c_8 e^{-c_9\eta} - c_{12} e^{-c_{13}\eta}) \bar{\theta} + c_{10} e^{-c_{11}\eta}, \quad (19)$$

где $\bar{\theta}$ – ПВНС, определяемый как:

$$\bar{\theta} = 1 - 2/\pi \arccos \left[\chi(\chi - 3)(\chi + 3) / (\chi^2 + 3)^{3/2} \right]. \quad (20)$$

Значения коэффициентов уравнения (19) для сплава АА2024 и стали А710 известны из литературных источников, а для сплава АМг6 определены растяжением образцов; использовали полосы двух типоразмеров: 25x245x10 мм с $\alpha - 0^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 95^\circ$ и 35x245x10 мм с $\alpha - 110^\circ$ и 115° . Экспериментальные работы выполнялись на испытательной машине INSTRON. Параметры НДС материала образцов в процессе формоизменения найдены с помощью имитационного моделирования экспериментов в DEFORM.

В результате математических преобразований уравнения для определения зависимости ε_{cr} и ε_p в процессах с плоским напряженным состоянием были представлены в виде зависимостей от коэффициентов материала и показателя η . Проверка и оценка эффективности разработанной теоретической модели производилась определением максимальной δ_{max} и средней δ_{cp} относительных погрешностей. В результате чего получили, что из известных моделей и аппроксимирующих диаграмму пластичности функций минимальными погрешностями обладают выражения (21), (22) и (23). Величины δ_{max} и δ_{cp} для модели (18) и функций (21), (22) и (23) в приведены в таблице 3.

$$\varepsilon_{cr} = \begin{cases} c_{17} + c_{18}\eta + c_{19}\eta^2, & 0 \leq \eta, \\ c_{20} e^{c_{21}\eta}, & \eta \leq 0; \end{cases} \quad (21) \quad \varepsilon_{cr} = \begin{cases} \infty, & \eta \leq -1/3, \\ c_{26}(\eta + 1/3)^{c_{27}}, & -1/3 < \eta \leq 0, \\ c_{28}\eta^2 - c_{29}\eta + c_{30}, & 0 < \eta \leq c_{31}, \\ c_{32}\eta^{-1}, & c_{31} < \eta; \end{cases} \quad (22)$$

$$\varepsilon_{cr} = c_{22} + c_{23}\eta + c_{24}\eta^2 + c_{25}\eta^3. \quad (23)$$

Для создания прикладного расчетного аппарата оценки предельного деформирования заготовки из изотропного металла при холодной листовой штамповке на этапе проектирования технологического процесса, модель использования ресурса пластичности (18), средствами пользовательского программирования, была интегрирована в расчетное ядро программы DEFORM.

Таблица 3 – Результаты определения δ_{\max} и δ_{cp} для модели (18) и аппроксимирующих диаграмму пластичности функций (21), (22) и (23)

Уравнение, определяющее модель или аппроксимирующую функцию	Величина погрешности, %					
	алюминиевый сплав АМг6		алюминиевый сплав АА2024		сталь А710	
	δ_{cp}	δ_{\max}	δ_{cp}	δ_{\max}	δ_{cp}	δ_{\max}
(18)	3,3	10,4	5,5	12,1	1,2	5,8
(21)	4,7	25,8	10,2	31,5	2,9	11,0
(22)	4,8	24,6	9,0	43,3	2,7	11,0
(23)	5,0	34,4	10,9	35,0	2,2	10,0

Задание коэффициентов модели для конкретного материала производится с помощью полей ввода пользовательских данных в DEFORM и не требует изменения подпрограммы. В случае достижения при моделировании в конечном элементе критерием единицы, последний, по выбору пользователя, либо удаляется, либо напряжение текучести в нем снижается на определенную величину.

В четвертом разделе представлена апробация полученных результатов работы при решении практических задач ОМД: выполнена корректировка процесса ротационной вытяжки на основе определения степени использования ресурса пластичности материала заготовки в процессе формоизменения; исследовано влияние траектории перемещения гибочного ролика на этапе подгиба на использование ресурса пластичности материала заготовки в процессах гибки труб проталкиванием на трубогибочном станке.

В качестве исследуемой была принята деталь в виде усеченного конуса из алюминиевого сплава АМг6. С помощью расчета процесса по ОСТ 92–1634 была разработана технологическая схема ротационной вытяжки, согласно которой деталь получается за один переход. Тем не менее, полученные результаты моделирования свидетельствовали о превышении предельного деформирования заготовки при ротационной вытяжке по разработанной схеме. Для определения степени использования ресурса пластичности материала заготовки использовалась созданная подпрограмма, интегрированная в DEFORM. Для предотвращения превышения предельного деформирования предложено использовать ролик с меньшим радиусом скругления и изменить траекторию его перемещения в начале процесса. Из результатов моделирования по измененной схеме, получилось, что использованный ресурс пластичности снизился до значения 0,7.

Для проверки полученных результатов выполнены процессы ротационной вытяжки по рассмотренным схемам на универсальном давяльно-раскатном горизонтальном двухроликовом стане с ЧПУ СРВ-1200 ФГУП «НПО «Техномаш». Полученные полуфабрикаты представлены на рисунке 3.

С помощью теоретической модели (18) выполнено исследование влияния траектории перемещения гибочного ролика на этапе подгиба на использование ресурса пластичности заготовки в процессах гибки труб проталкиванием на трубогибочном станке, на примере детали из стали 12Х18Н10Т.

Процесс гибки проталкиванием на трубогибочном станке состоит из двух этапов: этап подгиба и этап догиба. В работе рассмотрены четыре известные схемы подгиба: диагональная встречная и попутная, прямоугольная и радиально-дуговая схемы. Этап догиба для всех схем одинаков. Для теоретического исследования НДС трубы при гибке выполнено имитационное компьютерное моделирование процессов в программе QForm 7.

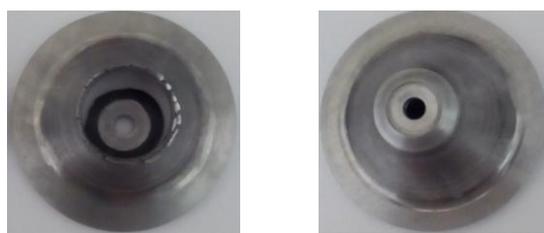
*a**б*

Рисунок 3 – Полуфабрикаты, полученные в результате ротационной вытяжки:

a – по технологической схеме, разработанной в соответствии с ОСТ 92–1634; *б* – по измененной схеме

Результаты моделирования показали, что для всех схем гибки опасные точки этапа подгиба и всего процесса гибки, не совпадают. На рисунке 4 представлены результаты определения величины критерия (18) в опасных точках заготовки при гибке по принятым схемам. Адекватность результатов исследования подтверждена аналогичными выходными данными, полученными при использовании критерия В.Л. Колмогорова.

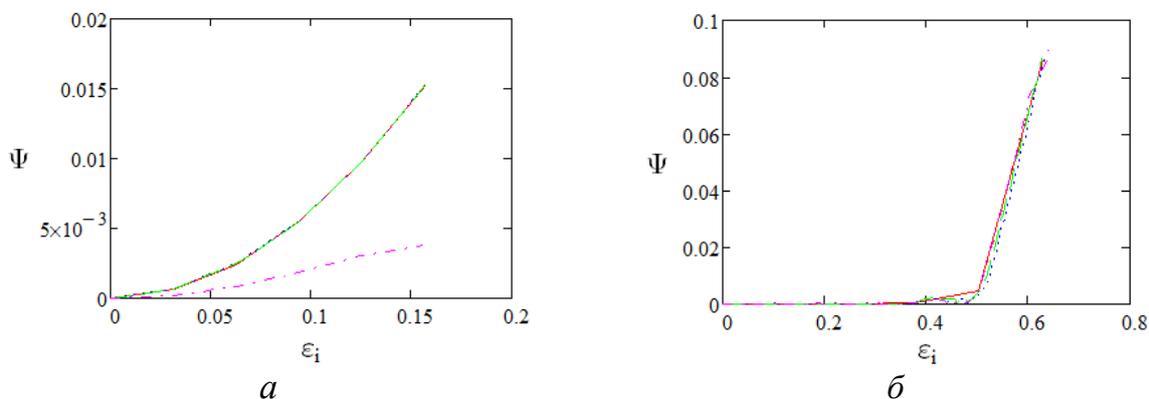
*a**б*

Рисунок 4 – График зависимости критерия (18) от степени деформации: *a* – на этапе подгиба; *б* – на протяжении всей гибки; — и — — диагональная встречная и попутная схемы; и - - - - - прямоугольная и радиально-дуговая схемы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Из исследования НДС сплошных цилиндрических образцов в месте возникновения предельного деформирования при кручении под внешним давлением установлено, что величины ε_1 , $g_{\text{окт}}$ и γ_{13} в процессе испытания изменяются немонотонно, в связи с чем, в качестве ПНД, из известных показателей, применимы только величины ε_i и Λ , отличающиеся постоянным множителем и поэтому равнозначные при определении относительного отклонения диаграмм пластичности для различных видов напряженного состояния.

2. В результате поиска ПНС, позволяющего минимизировать относительное отклонение диаграмм пластичности для различных видов напряженного состояния, установлено, что максимальное относительное отклонение диаграмм пластичности стали 12Х1МФ, построенных для ПНС в виде $\sigma_{\text{ср}}/\max(|\sigma_1|, |\sigma_3|)$, обладающего минимальной средней относительной погрешностью, может превышать 40%; для традиционно применяемого показателя в виде $3/\sqrt{2}\sigma_{\text{ср}}/\sigma_i$ и показателей, отличающихся от него величиной постоянного множителя - 80%, в связи, с чем при определении диаграмм пластичности помимо ПНС необходимо также рассматривать ПВНС.

3. Анализ известных способов исследования пластичности материала листовых и объемных заготовок на одном испытательном оборудовании, без применения специализированных приспособлений, показал, что только радиальное выдавливание сплошных цилиндрических образцов в канал

определенной формы обладает широкими диапазонами варьирования ПНС и ПВНС, для алюминиевого сплава Д16, соответственно, равными $-0,9...0,5$ и $-1...1$. Тем не менее, при применении метода, необходимо учитывать, что величина приведенной погрешности ожидаемого ПНС относительно теоретического диапазона варьирования ПНС в некоторых случаях более 98%.

4. Разработан способ исследования пластичности листового металла на одном испытательном оборудовании, без применения специализированных приспособлений, позволяющий варьировать в широких диапазонах величины ПНС и ПВНС (для алюминиевого сплава Д16, соответственно, равных $-0,6...0,8$ и $-0,9...0,7$), основанный на растяжении/сжатии специальных полос. Также установлено, что растяжение/сжатие специальных полос в некоторых случаях позволяет исследовать пластичность листового металла в условиях плоского напряженного состояния.

5. На основе математического описания в терминах механики сплошной среды процесса достижения предельного деформирования, базирующегося на представлениях о накоплении дефектов деформационного происхождения, с учетом факторов на него влияющих, сформулирован общий вид теоретической модели использования ресурса пластичности материала изотропных металлов в процессах ОМД, уточнением которой, за счет применения известных гипотез и экспериментально установленных фактов, получен критерий, который позволяет определять достижение предельного деформирования заготовок из изотропных металлов в процессах холодной листовой штамповки.

6. Произведены экспериментальная проверка и оценка эффективности созданной теоретической модели использования ресурса пластичности материала заготовки из изотропного металла в процессах холодной листовой штамповки на алюминиевых сплавах АМг6 и АА2024 и стали А710, в результате чего определены максимальная и средняя относительные погрешности диаграммы пластичности следующей из созданной модели от экспериментальной, для исследуемых материалов соответственно равные 10,4% и 3,3%, 12,1% и 5,5%, 5,8% и 1,2%. Установлено, что эти результаты меньше наилучших результатов известных критериев и аппроксимирующих диаграмму пластичности функций более чем в 1,4 и 1,7 раза.

7. В результате модернизации программного комплекса имитационного моделирования процессов ОМД DEFORM, заключающейся в его интеграции с разработанной теоретической моделью использования ресурса пластичности материала заготовки из изотропного металла в процессах холодной листовой штамповки средствами разработанной подпрограммы, создан расчетный аппарат, позволяющий прогнозировать предельное деформирование заготовки.

8. Проведена апробация разработанной теоретической модели использования ресурса пластичности материала заготовки из изотропного металла в процессах холодной листовой штамповки и созданного на её основе расчетного аппарата на процессе ротационной вытяжки конической детали и на исследовании влияния траектории перемещения гибочного ролика на этапе подгиба на использование ресурса пластичности материала трубной заготовки в процессах гибки проталкиванием на трубогибочном станке, в результате чего подтверждена их эффективность.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Харсеев, В.Е. Оценка степени использования запаса пластичности трубной заготовки в процессе гибки проталкиванием на трубогибочном станке

/ В.Е. Харсеев // Известия Тульского государственного университета: технические науки. – 2014. – № 10, Ч. 2. – С. 150–156.

2. Харсеев, В.Е. Выбор параметров напряженно-деформированного состояния для построения диаграмм пластичности посредством компьютерного моделирования / В.Е. Харсеев, П.А. Петров // Технология легких сплавов. – 2015. – № 2. – С. 131–143.

3. Харсеев, В.Е. Кинематическая модель рассеянного разрушения изотропных металлов при холодной листовой штамповке / В.Е. Харсеев, П.А. Петров // Известия Тульского государственного университета: технические науки. – 2015. – № 11. Ч. 1. – С. 20–35.

4. Харсеев, В.Е. Способ исследования пластичности металлов растяжением/сжатием специальных полос / В.Е. Харсеев, П.А. Петров // Известия Тульского государственного университета: технические науки. – 2015. – № 8. Ч. 1. – С. 123–132.

5. Харсеев, В.Е. Исследование способа определения пластичности металла методом радиального выдавливания в канал определенной формы / В.Е. Харсеев, П.А. Петров, А.А. Сидоров // Технология машиностроения. – 2016. – № 6 (168). – С. 44–50.

6. Харсеев, В.Е. Совершенствование технологии ротационной вытяжки тонкостенных деталей на основе моделирования разрушения / В.Е. Харсеев, В.В. Миронов, Г.Г. Кривенко, И.А. Захаров, Г.В. Лесных // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 7. – С. 31–36.

7. Патент №145529 Устройство для исследования пластичности металлов и сплавов // П.А. Петров, М.А. Петров, Ю.Г. Калпин, В.Е. Харсеев. 20.09.2014.

8. Харсеев, В.Е. Анализ разрушения образцов магниевого сплава МА2-1 с применением программного комплекса QForm 3D / В.Е. Харсеев, П.А. Петров // Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «АВТОМОБИЛЕ- И ТРАКТОРОСТРОЕНИЕ В РОССИИ: ПРИОРИТЕТЫ РАЗВИТИЯ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ». – 2012. – Книга 6. – С. 168–181.

9. Харсеев, В.Е. Прогнозирование возможности разрушения металла при гибке трубной заготовки / В.Е. Харсеев, Г.Г. Кривенко // Сборник научных трудов «Прогрессивные разработки ученых – новым изделиям ракетно-космической техники». – 2013. – С. 161–163.

10. Харсеев, В.Е. Макроскопические феноменологические модели и теории разрушения обработки материалов давлением / В.Е. Харсеев // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 3(36). – С. 90–96.

Харсеев Виталий Евгеньевич

**Совершенствование процессов холодной листовой штамповки
на основе оценки степени использования ресурса
пластичности материала заготовки**

Автореферат

Подписано в печать 14.12.16

Формат бумаги 60×84/16

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,15. Тираж 100. Заказ № 242

Издательство Московского Политеха

115280, Москва, Автозаводская, 16

www.mospolytech.ru; e-mail: izdat.mospolytech@yandex.ru; тел. (495) 276-33-67

Отпечатано в типографии издательства Московского Политеха