

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе ДВФУ

А.С. Самардак

« 6 » \_\_\_\_\_ 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ) на диссертацию Мин Ко Хлайнг «Исследование процесса раздачи средней части трубчатой заготовки эластичной средой по жесткой матрице», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **1.1.8 Механика деформируемого твердого тела (технические науки)**

**Актуальность темы диссертации.** В машиностроительных отраслях, и в частности при изготовлении летательных аппаратов, широко применяются технологические операции листовой штамповки. Применение таких операций сочетает высокую производительность, относительно низкую себестоимость и небольшой расход материала. Разработка технологического процесса изготовления каждой конкретной детали на практике приводит к большим объемам экспериментальных и доводочных работ на стадии технологической подготовки производства.

Для получения качественных деталей необходимо уметь рассчитывать предельные деформации, превышение которых приводит к появлению дефектов в деформируемой заготовке: образованию трещин, гофров, складок, локального утонения, неравномерного утонения заготовки, разрушению.

Для анализа предельных деформаций материала при листовой штамповке в настоящее время широко используются диаграммы предельного формоизменения (Forming Limit Diagram – FLD), которые устанавливают связь между компонентами главных деформаций в момент разрушения. Поэтому необходимо разрабатывать методики расчета предельного деформированного состояния заготовок в процессе изготовления

тонкостенных деталей, необходимо учитывать пружинение материала заготовки, которое приводит к отклонению геометрической формы формообразованной детали от теоретического контура. Прогнозирование формы оснастки для обеспечения теоретического контура детали позволяет сокращать сроки и затраты при подготовке производства в реальных условиях. Поэтому тема исследования является актуальной.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 194 наименований.

По основному содержанию работы можно отметить следующее.

**В первой главе** дан конструкторско-технологический анализ современных способов изготовления деталей листовой штамповкой, оговариваются проблемы эффективного использования алюминиевых и титановых сплавов и коррозионностойких сталей. Кратко рассмотрены методики определения напряженно-деформированного состояния при раздаче трубчатых заготовок, применяемые российскими и иностранными исследователями. Рассмотрены методики расчёта предельных деформаций с помощью FLD-диаграмм.

**Во второй главе** рассмотрены обратные задачи формообразования деталей из трубчатых заготовок. Рассчитывается форма оснастки, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали при раздаче с учетом пружинения материала заготовки. Решены три обратные задачи по определению перемещений поверхности матрицы, которые обеспечивают заданную остаточную форму детали после раздачи рабочим телом средней части трубчатой заготовки и разгрузки (извлечения детали из матрицы): кинематическая задача, где в качестве задаваемых параметров используются перемещения узлов заготовки; задача формообразования, в которой действие рабочего тела заменено однородным внутренним давлением; задача



формообразования, в которой воздействие на деформируемую деталь передаётся через рабочее тело посредством давления на него пуансоном.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований по раздаче средней части тонкостенных трубчатых заготовок из сплавов Д16, 12Х18Н10Т, ОТ4-1 с разными рабочими телами (эластичный материал; лёд в эластичной оболочке), в том числе с использованием подпора противодействия холодным пластическим деформированием. Приведены методика проведения эксперимента по раздаче и методика определения параметром Муни-Ривлина материала эластичного рабочего тела. Проведено сравнение эксперимента с результатами моделирования процесса раздачи в пакете МКЭ-анализа ANSYS.

**В четвертой главе** проведено исследование технологических возможностей процесса раздачи средней части тонкостенных трубчатых заготовок. Для образцов из титанового сплава ОТ4-1 и алюминиевого сплава Д16 на основе экспериментально определенных физико-механических свойств построены кривые предельного деформирования Хилла–Свифта и Сторена–Райса. В пакете инженерного анализа ANSYS проведены исследования процесса раздачи тонкостенной трубчатой заготовки однородным внутренним давлением с учетом контактного трения и без его учета. Определены технологические возможности процесса раздачи средней части, установлен предельный коэффициент раздачи.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

**Научная новизна результатов и выводов.** В диссертации получены следующие новые научные результаты: предложена вариационная формулировка обратных задач для расчёта формы оснастки методом конечных элементов, которая обеспечивает теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала; установлены предельные технологические возможности процесса формообразования при раздаче средней части тонкостенной трубчатой заготовки с целью прогнозирования дефектов

изготовления тонкостенных осесимметричных деталей на примере титанового сплава ОТ4-1; на экспериментальном уровне установлено, что использование ледяного стержня в эластичной оболочке в качестве рабочего тела при раздаче средней части трубчатой заготовки по жесткой матрице приводит к увеличению коэффициента раздачи по сравнению с эластичным стержнем.

#### **Достоверность и обоснованность научных положений и выводов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных принципов механики деформируемого твердого тела (в том числе теории упругости, теории пластического течения), обоснованностью принятых допущений, корректными математическими методами исследования решаемых задач, использованием апробированных численных методов, использованием общеизвестных и хорошо зарекомендовавших себя пакетов инженерного анализа, а также удовлетворительным совпадением теоретических расчетов и результатов вычислений с экспериментальными исследованиями и результатами компьютерного моделирования.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов.**

Теоретическая значимость диссертации заключается в дальнейшем развитии методов определения напряженно-деформированного состояния и основных технологических параметров процессов листовой штамповки тонкостенных трубчатых заготовок, а также в дальнейшем развитии численных методов решения обратных задач деформирования в упругопластичности.

Практическая значимость заключается в развитии методик расчета предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процессов изготовления тонкостенных трубчатых деталей, а также в развитии численных методов определения формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур детали в зависимости от физико-механических свойств материала, что повышает качество разработки технологического процесса и может сократить сроки технологической подготовки производства при внедрении новых деталей на промышленных предприятиях. Методика решения обратных задач упругопластичности на основе итерационной



процедуры адаптирована для решения осесимметрических задач формообразования и реализована в MSC.Patran, MSC.Marc.

**Апробация работы.** По теме диссертации опубликовано 13 научных статей, в том числе 2 статьи в рецензируемом журнале, включённом Высшей аттестационной комиссией России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, 2 статьи, индексируемых в международной базе Scopus и 3 – в WoS. Получен 1 патент РФ на изобретение.

**Замечания по содержанию работы.** Диссертация и автореферат написаны точным научным языком, полностью раскрывают постановку, методы и результаты рассмотренных задач. Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

По содержанию работы можно сделать следующие замечания:

1. Создается ощущение, что главы 1 и 3, посвящённые моделированию конечно-элементным методом прямой и обратной задачи, не вполне согласованы. Например, в Главе 2 никак не отражены ни технологические, ни остаточные напряжения в формируемой и сформированной заготовке при решении обратной задачи в MSC. Patran, поэтому не ясно, как оценить технологические и остаточные напряжения в заготовке при решении прямой задачи в ANSYS, приведённые в Главе 3. Почему в одном пакете не решена вся задача вместе с определением параметров модели Муни-Ривлина?

2. К сожалению, автор не проясняет по тексту работы условия проведения экспериментальных исследований раздачи заготовки из сплава Д16 эластичным стержнем и ледяным в эластичной оболочке: температура стержней, их деформационные характеристики, скорость нагружения и статистические показатели обработки экспериментальных данных. Не ясно, можно ли их сравнивать? Почему далее в главе оптимизированы показатели только для эластичного (резиноподобного) тела?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

**Заключение по диссертации.** Диссертация Мин Ко Хлайнг является законченной научно-квалификационной работой. Тема работы актуальна, диссертация обладает научной новизной, научной и практической значимостью. Все утверждения и выводы корректны и обоснованы.

Предложенные методики, основанные на решении обратных задач формообразования осесимметричных деталей в виде вариационных формулировок с контактными ограничениями для численного решения итерационной процедурой методом конечных элементов, в совокупности с методикой определения предельного коэффициента раздачи, повышают качество разработки технологического процесса и могут сократить сроки технологической подготовки производства при внедрении новых деталей на промышленных предприятиях.

Основные результаты работы опубликованы в российских и иностранных журналах, а также прошли апробацию на российских и международных конференциях. Автореферат и публикации соответствуют содержанию диссертационной работы.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ГОСТ 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а также п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 26.09.2022). Полученные научные результаты соответствуют специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (технические науки).

Автор диссертации Мин Ко Хлайнг заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв на диссертационную работу рассмотрен и одобрен на совместном семинаре лаборатории компьютерного моделирования Отделения

машиностроения, морской техники и транспорта Инженерного департамента и Международного научно-исследовательского центра геомеханики и геодинамики сильно сжатых горных пород и массивов Политехнического института (школы) ДВФУ под председательством д. ф.-м.н., профессора Любимовой О. Н. 25 ноября 2022 (Протокол № 03/22 от 25.11.2022).

Профессор Отделения машиностроения,  
морской техники и транспорта  
Инженерного департамента  
Политехнического института (школы)  
ДВФУ, доктор физико-математических наук  
доцент

Ольга Николаевна  
Любимова



Почтовый адрес ведущей организации:  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ  
Тел.: 8 (423) 265 24 29; 8 (423) 243 34 72, www.dvfu.ru  
Адрес электронной почты: rectorat@dvfu.ru