

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
**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»**

**Актуальность темы исследования**

Актуальность темы обусловлена возрастающими требованиями к качеству изготовления деталей трубопроводов и их размерно-геометрической точности. Критическое значение эти требования имеют в авиационном и ракетно-космическом производстве, но также они важны и в других отраслях машиностроения. Для получения высокой точности в штамповаготовительном производстве необходимо прогнозировать величину пружинения материала. В последние годы для этого активно и плодотворно используется конечно-элементный анализ. В представленной к защите работе предлагается моделирование технологии формообразования осесимметричных деталей из трубчатых заготовок в программном комплексе инженерного анализа MSC.Patran, MSC.Marc. Рассматриваются обратные задачи формообразования, в которых определяются перемещения поверхности матрицы, которые обеспечивают заданную остаточную форму детали после раздачи рабочим телом средней части трубчатой заготовки и разгрузки (извлечения детали из матрицы). В результате расчёта итерационным методом найдена форма поверхности матрицы для нескольких постановок задачи. Такой подход позволяет учесть неупругие свойства деформируемого материала, геометрическую, физическую и контактную нелинейность задачи. Методика определения предельных технологических возможностей, в свою очередь, позволяет спрогнозировать появление дефектов в детали при изготовлении. Следовательно, результаты представленных в диссертации исследований могут способствовать сокращению экспериментальных и доводочных работ на стадии технологической подготовки производства.

**Оценка новизны**

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Предложена математическая формулировка обратных задач по расчёту формы оснастки, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала заготовки в виде вариационных формулировок с контактными ограничениями для численного решения методом конечных элементов. На основе разработанной методики решены обратные задачи формообразования деталей из трубчатых заготовок.

2. Разработана методика расчета предельных технологических возможностей и прогнозирования дефектов процесса изготовления

тонкостенных деталей из трубчатых заготовок способом раздачи эластичным рабочим телом.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы состоит 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 упругопластических материалов.

Практическая значимость представленной работы связана с тем, что полученные результаты и разработанные методики могут быть использованы для определения формы оснастки и прогнозирования дефектов при производстве тонкостенных деталей в машиностроении. Это может способствовать сокращению экспериментальных и доводочных работ на стадии технологической подготовки производства.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных принципов механики деформируемого твердого тела, использованием прошедших многократную апробацию численных методов, корректным использованием общеизвестных пакетов инженерного анализа и совпадением результатов расчетов с экспериментами.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях, применяющих способы листовой штамповки для производства трубопроводных деталей, в том числе на предприятиях авиационной промышленности, где процент таких деталей достаточно высок.

### **Краткая характеристика основного содержания диссертации.**

Диссертация включает в себя введение, 4 главы основного текста и заключение. Объем диссертации 114 страниц, содержит 58 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 194 источников.

Во введении обоснована актуальность работы, обсуждается степень разработанности темы исследования. Определены цели и основные задачи. Отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современных способов изготовления деталей летательных аппаратов с помощью давления наполнителя. Обсуждается использование различных материалов для производства гидрогазовых систем. Указаны основные дефекты, наличие которых может приводить к разрушению трубопроводных конструкций. Приведены классификация деталей гидрогазовых систем самолета, изготавливаемых из трубчатых заготовок давлением наполнителя, и классификация основных

способов листовой штамповки. Проанализированы методики определения напряженно-деформированного состояния в материалах деталей, изготавливаемых листовой штамповкой, применяемые российскими и зарубежными исследователями. Особое внимание в обзоре уделяется использованию упругих (эластичных) рабочих тел и изучению различных аспектов операций раздачи труб. Отмечается рост количества работ, в которых для исследования процессов обработки металлов давлением используют метод конечных элементов. Отдельно отмечаются вариационные методы решения задач механики и методики расчета предельных деформаций с помощью диаграмм предельного формоизменения.

Во второй главе рассматривается обратная задача определения формы жесткой матрицы при раздаче средней части трубы эластичной средой, обеспечивающей теоретический контур тонкостенной детали с учетом пружинения материала заготовки. Форма матрицы, используемой для технологического процесса раздачи, должна задавать упреждающую форму трубчатой заготовки, обеспечивающую требуемую остаточную форму после разгрузки. В проведенном исследовании рассматривается три обратные задачи упругопластичности, сформулированные в виде вариационных уравнений:

- 1) кинематическая задача (в качестве задаваемых параметров используются перемещения узлов заготовки);
- 2) задача формообразования, в которой действие рабочего тела заменено однородным внутренним давлением;
- 3) задача формообразования, в которой воздействие на деформируемую деталь передаётся через рабочее тело посредством давления на него пуансоном.

Проведено моделирование процесса формообразования тонкостенной трубчатой заготовки из титанового сплава ОТ4-1 раздачей в матрице методом конечных элементов с использованием САЕ-системы MSC.Marc в осесимметричной постановке. В результате расчёта итерационным методом найдена форма поверхности матрицы для трех перечисленных постановок.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по раздаче средней части тонкостенных трубчатых заготовок из сплавов Д16, 12Х18Н10Т, ОТ4-1 с разными рабочими телами (резиноподобный материал; лёд в эластичной оболочке), в том числе с использованием подпора противодавления холодным пластическим деформированием. Установлено, что наличие подпора противодавления позволяет получать больший коэффициент раздачи. Проведено определение механических свойств материала эластичного рабочего тела в рамках трехпараметрической модели Муни-Ривлина по результатам испытаний на одноосное сжатие. Проведено сравнение экспериментов с результатами моделирования в пакете инженерного анализа ANSYS методом конечных элементов.

В четвертой главе проведено исследование предельных 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 выводы по диссертации.

### **Замечания по работе.**

К содержанию работы сделаны следующие замечания:

1. Уравнения равновесия относительно компонент тензора напряжений, приведенные на стр. 26, некорректно называть уравнениями Навье. В теории линейной упругости уравнениями Навье (или уравнениями Навье-Коши) обычно называют уравнения равновесия относительно компонент вектора перемещений.

2. Во второй главе диссертации приведена математическая постановка обратной задачи об определении формы жесткой матрицы. Предполагается, что материал приобретает пластические деформации, однако пластический потенциал и закон упрочнения не конкретизируются и в тексте диссертации в явном виде не приведены.

3. Деформации в рабочем теле предполагаются большими, однако в работе не приведена формулировка используемой модели конечных упругопластических деформаций. Автор ограничился лишь словесным описанием на стр. 45.

4. В работе используется модель линейного изотропного упрочнения, однако для многих конструкционных материалов закон упрочнения существенного отклоняется от линейного. Поскольку решение осуществляется с помощью метода конечных элементов, то использование моделей нелинейного упрочнения (например, степенного или экспоненциального) не представляет существенных сложностей.

5. В работах, посвященных исследованию разгрузки и упругого пружинения, отмечается, что накопленные пластические деформации оказывают влияние на упругие характеристики материала при разгрузке. В частности, с увеличением пластических деформаций модуль Юнга материала уменьшается, что в свою очередь может существенно влиять на итоговую конфигурацию детали после разгрузки. Данный эффект в диссертации не рассматривался.

6. Во многих технологических процессах разгрузка не является чисто упругой и сопровождается повторным (или обратным) пластическим течением. Возможно ли данное явление в исследуемых процессах раздачи?

7. Следует отметить достаточно высокий уровень подготовки диссертации, тем не менее, в тексте встречаются опечатки, например в таблице №13.

Указанные замечания не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Мин Ко Хлайнг.

### **Заключение**

Несмотря на отмеченные недостатки и замечания, представленная диссертация Мин Ко Хлайнг «Исследование процесса раздачи средней части трубчатой заготовки эластичной средой по жесткой матрице» выполнена на высоком научном уровне. Результаты диссертации опубликованы в 13-ти научных работах, из них 2 научные статьи в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий по заявленной специальности и отрасли науки, 4 публикации в изданиях, включенных в международные библиографические базы данных. Диссертационное исследование прошло апробацию на шести конференциях, в том числе международных.

Автореферат и опубликованные работы в достаточной мере отражают содержание диссертации. Содержание работы соответствует специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертационное исследование Мин Ко Хлайнг «Исследование процесса раздачи средней части трубчатой заготовки эластичной средой по жесткой матрице» является завершенной научно-квалификационной работой, которая по критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 26.09.2022), в том числе п. 9, поскольку в ней предложены новые научно обоснованные модели и методы расчетов, позволяющие повысить качество проектирования технологических процессов изготовления тонкостенных деталей в машиностроительных отраслях.

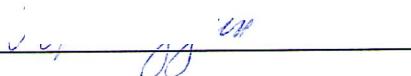
Считаю, что диссидентант Мин Ко Хлайнг заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Подтверждаю свое согласие на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата технических наук Мин Ко Хлайнг и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент: Кандидат технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела», ведущий научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Адрес организации:  
681005, Россия, Хабаровский край,  
г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, дом 1  
тел./факс +7 (4217) 54-95-39,  
тел. +7 (4217) 54-95-38,  
E-mail: [mail@imim.ru](mailto:mail@imim.ru)  
<http://www.imim.ru/>

Дата составления отзыва 12.12.2022 г.

 Прокудин Александр Николаевич

Подпись Прокудина А.Н. заверяю



Директор ИМиМ ДВО РАН

 М.П.

О.Н. Комаров

