

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Ларионовой Ольги Евгеньевны “Вязкопластическое деформирование диска из жаропрочного никелевого сплава в процессе изотермической раскатки”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 «Механика деформированного твердого тела»

Актуальность

Диски турбин современных авиационных двигателей работают в условиях изменяющихся в зависимости от параметров рабочих циклов центробежных нагрузок, высокотемпературного теплового состояния и давлений рабочих газов. Проектирование таких дисков выполняется методами оптимального проектирования с целью получения форм конструкций, обеспечивающих противоречивые требования заданного ресурса и минимума массы. Для изготовления дисков на этапах производства применяют различные технологические процессы обработки: резания на станках с ЧПУ, обработки давлением, порошковой металлургии. При этом на всех этапах технологического процесса изготовления дисков необходимо удовлетворять ряду требований, среди которых важными являются требования повышения коэффициента использования материала (КИМ), уменьшение износа инструмента и сокращение числа операций. Процессы обработки давлением являются наиболее перспективными для изготовления дисков турбин, так как высокий уровень механических свойств высокотемпературных никелевых сплавов ограничивает возможности применения операций резания. Раскатка дисков относится к процессам обработки давлением, позволяющим получить форму конструкции диска близкую к окончательной из заготовки масса, которой наиболее приближена к массе готовой детали. Это достигается за счет существенных перемещений материала детали в условиях высокотемпературного изотермического деформирования. Проектирование процесса раскатки требует применения современных методов расчета параметров технологического процесса.

В отличие от традиционных методов расчета процессов обработки давлением моделирование метода раскатки требует применения математических методов и моделей, учитывающих, как большие перемещения и большие деформации материала (модель геометрической нелинейности), так и модель нелинейного деформирования материала (модель физической нелинейности при больших деформациях). Постановке и решению этой **сложной актуальной проблемы механики** - математическое моделирование процесса раскатки дисков турбин посвящена диссертационная работа О.Е. Ларионовой.

Содержание

Диссертационная работа изложенная на 141 странице, включает: 112 страниц основного текста, 101 рисунок, 8 таблиц, 4 приложения на 12 страницах, список использованных источников 179 наименований на 17 страницах.

Во введении традиционно изложены, заявленные автором, положения об актуальности и цель исследования, структура диссертации и выносимые на зал

В первой главе приведено краткое описание оборудования и технологического процесса изотермической раскатки диска.

Во второй главе дан краткий обзор вариантов теории пластичности, которые можно использовать для моделирования процесса раскатки диска: на примере возможностей программного комплекса Abaqus - обсуждены варианты теорий термовязкопластичности, реализованных в коммерческих программных комплексах; варианты теорий Ж.Шабоша и аналогичных подходов, предложенных в работах Ю.Г. Коротких; вариант теории неупругости В.С. Бондаря. На основании обзора в диссертационной работе был сделан вывод, о том, что модель неупругости В.С. Бондаря наиболее приемлема для применения для моделирования процесса раскатки. Однако, вывод о том, что модель неупругости в формулировке В.С. Бондаря “...*позволит учесть...большие пластические деформации*” (стр. 31 диссертации), требует обоснования, возможно, выходящего за рамки этой диссертационной работы.

По этой главе необходимо сделать ряд замечаний *редакционного характера*. На стр.18 автор обсуждает разницу между истинными и условными(инженерными) напряжениями, вводя коэффициент пересчета λ . Читатель должен догадываться, как выглядит этот коэффициент, обратившись к зависимости (2.1.5). Подобные погрешности имеют место и далее в тексте диссертации с λ с различными индексами. На стр. 22-23 записан ряд соотношений с тензорами напряжений, но неясно, какие это напряжения истинные или условные (теория малых деформаций или напряженное состояния в состоянии геометрической нелинейности). Только на стр. 25 указано, “соотношения получены для теории малых деформаций”. В соотношении (2.3.44) не ясно, как множитель λ с точкой связан с множителем λ в (2.1.5). Графики на Рис. 2.3.1 понятны, но не ясно для какого материала и для какой температуры они приведены. При этом непонятно, как в (2.3.7) тензор приравняли скаляру, и почему зависимости на рис. 2.3.1 отличаются от зависимостей (2.3.8)

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке модели вязкопластического деформирования жаропрочного никелевого сплава при высоких температурах. Глава занимает 40 страниц диссертации и ее можно разделить на три части.

В первой части этой главы (раздел 3.1) приведены результаты испытаний образцов из дисковых жаропрочных никелевых сплавов ВВ751П и ЭП741НП при температурах, соответствующих диапазону температур процесса раскатки и различных скоростях деформирования. Механические свойства материалов сведены в таблицы, что позволило получить аналитические зависимости свойств материалов в зависимости от температуры и скорости деформирования. Сравнение этих зависимостей с результатами испытаний подтверждает возможность использования их в модели вязкопластического деформирования. Также в этом разделе приведены результаты испытаний материала ВВ751П при разгрузке и повторном нагружении и результаты испытаний жаропрочной стали 12Х18Н10Т при температуре 700°С и разных скоростях деформирования.

Полученные результаты стали основой второй части главы для получения: уравнений модели вязкопластического деформирования (раздел 3.2); соотношений модели для одноосного деформирования - (3.3); метода идентификации материальных параметров модели (3.4).

Третья часть главы 3 посвящена верификации модели вязкопластичности. Материальные параметры модели приведены в разделе 3.5. Для верификации модели выполнены сравнения диаграмм испытаний на растяжение и сжатие одноосных образцов из исследуемых сплавов с диаграммами, рассчитанными по программе моделирования испытаний одноосных образцов. Представленные в разделе 3.6 результаты сравнения подтверждают адекватность созданной модели, методов определения и идентификации ее параметров.

Следует отметить, что при дополнительной редакции материал глав 2-3 может стать основой учебного пособия для студентов университетов, обучающихся на специальностях прикладная механика или прикладная математика.

Четвертая глава посвящена разработке подпрограммы для коммерческого комплекса МКЭ, который будет применен для численного моделирования процесса раскатки диска с использованием встроенной в комплекс авторской модели вязкопластичности. Ряд коммерческих комплексов МКЭ предоставляет такую возможность, предъявляя встраиваемым авторским подпрограммам ряд требований. Для решения задач, подобных задаче моделирования раскатки диска необходимо применять шаговый процесс, рассматривая на каж-

дом малом шаге изменения нагрузок и кинематических граничных условий линеаризованную физически и геометрически нелинейную задачу. Для того, чтобы встроить собственную модель материала в программный комплекс SIMULIA Abaqus О.Е. Ларионова разработала пользовательскую программу UMAT. Принцип линеаризации модели приведен в разделах 4.2 и 4.3. В разделе 4.4 дано краткое описание подпрограммы UMAT и ее переменных. К сожалению, материал главы не структурирован. Аспирантка уделила внимание линеаризации уравнений модели материала на шаге и организации внутреннего процесса для определения параметров следующего шага, в частности, матрицы Якоби, связывающей приращения деформаций с приращениями напряжений. Она тщательно разобрала варианты расчета на шаге нагружения напряжений и деформаций в точке деформируемого тела для различных этапов активного деформирования или разгрузки, описав итерационный процесс поиска положения вектора активных напряжений и поверхности нагружения в конце шага и вычислении матрицы Якоби конечного элемента для последующего шага.

На наш взгляд *по этой главе следует сделать замечание*. Отсутствует четкая информация о входных и выходных параметрах авторской подпрограммы и как она включена в структуру коммерческого комплекса. В физически и геометрических задачах, к которым относится раскатка диска следует учитывать вклад геометрической нелинейности в матрицу Якоби, определяющую совместно с линеаризованной матрицей связи перемещений и деформаций общую касательную матрицу линеаризованной задачи на шаге. Кроме этого, в таких задачах необходимо указывать структуру вектора правых частей системы уравнений МКЭ. Причем, в зависимости от принципа учета геометрической нелинейности (получения уравнений МКЭ подходы Эйлера, Лагранжа или смешанный), структура подпрограммы UMAT и способ ее интеграции в комплекс МКЭ могут быть различным. Ответа на эти вопросы оппонент не нашел в текстах четвертой главы диссертации и автореферата. Создается впечатление, что метод решения задачи сведен к решению последовательности нелинейных задач на каждом шаге, в конце которого определяется новое положение тела - к текущим координатам точек которого суммируют приращения перемещений и вычисляют новые характеристики материала точек тела в конце шага. Далее решают новую задачу на следующем шаге для приращения параметров нагружения. Вопросы обеспечения точности и сходимости как итерационного процесса на шаге, так и шагового алгоритма остались открытыми.

В пятой главе диссертации модель материала и вычислительный алгоритм с использованием модифицированного комплекса SIMULIA Abaqus применены для решения задачи раскатки диска. Автор диссертации описала параметры заготовки и предполагаемую форму диска после раскатки. конечноэлементную модель диска и роликов, условия движения роликов и диска. Процесс расчета сведен к решению контактной задачи движения роликов относительно вращающегося диска. В результате моделирования получены распределения напряжений, деформаций и формы обрабатываемой детали на всех этапах процесса моделирования. Результаты расчета сопоставлены с результатами эксперимента. Сравнение показало, что рассчитанные размеры диска после раскатки отличаются не более чем на 10% от полученных в эксперименте. Можно согласиться с автором диссертационной работы, что полученные результаты подтверждают выбранную стратегию проведения исследования и применение разработанной модели вязкопластического деформирования материала.

Научная новизна. Результаты детального исследования механических свойств двух жаропрочных никелевых сплавов при действии температур, соответствующих уровню температур технологического процесса являются новыми, представляющими интерес для разработчиков технологические процессы обработки давлением. К новым результатам, полученным диссертанткой, следует отнести создание модели вязкопластического деформирования на основе модели неупругости В.С. Бондаря и включения в нее эффектов ползучести. Подготовка и организация вычислительного процесса для моделирования технологического процесса раскатки содержит элементы новизны.

Практическая значимость диссертационной работы несомненна. Автором предложена схема создания методики математического моделирования сложного технологического процесса, которая включает: разработку варианта теории вязкопластического деформирования материала; выполнение полного объема экспериментальных исследований образцов для получения необходимых параметров модели материала; способ и программный модуль для включения модели в коммерческий комплекс МКЭ; проведение численного моделирования процесса раскатки диска.

Достоверность результатов диссертации подтверждена высоким уровнем проведенных экспериментальных исследований, качеством проведения математического моделирования и уровнем теоретической подготовки соискателя ученой степени

Замечания

1. Замечания редакционного и дискуссионного характера сделаны в тексте отзыва при обсуждении содержания глав диссертации.
2. В тексте диссертации иногда появляются упоминания истинных деформаций и напряжений. Однако, по нашему мнению, при представлении экспериментальных результатов не указано для каких координат (истинных или условных) построены диаграммы. Если истинных, то как в эксперименте они были определены. Может быть, соотношений (2.1.3) и (2.1.6) недостаточно.
3. Для оценки конкурентоспособности предложенных в диссертации модели и метода расчета не хватает более подробного обзора эффективности применения существующих традиционных методов теории обработки давлением для решения задачи раскатки.

Заключение

1. Автореферат диссертационной работы дает представление о ее содержании.
2. Основные результаты работы доложены на ряде конференций и отражены в восьми научных работах, четыре из которых в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (Перечень ВАК). Также три из научных работ в изданиях, индексируемых в базе Scopus, одна из которых в издании, индексируемом в базе Web of Science.
3. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела»;
4. Ольга Евгеньевна Ларионова выполнила оригинальное исследование и получила результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическое значение.

Замечания не затрагивают общую положительную оценку диссертационной работы. Считаю, что диссертационная работа соответствует всем требованиям, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября

2013 г. №842, предъявляемым ВАК РФ, а ее автор, Ларионова Ольга Евгеньевна заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 - «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент,
доктор технических наук (01.02.06 Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры), профессор по кафедре прикладной математики, советник генерального директора по образовательной деятельности федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения» им. П.И. Баранова, 111116, Москва, Авиамоторная 2.


14.07.26
Темис Юрий Моисеевич

e-mail: ymtemis@ciam.ru

Телефон: +7 (495) 362 92 74 доб.58 87

Подпись Советника Генерального директора по образовательной деятельности ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова Темиса Ю.М. подтверждаю:

Ученый секретарь



 Е.В. Яemelina