

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук,
Гаврюшина Сергея Сергеевича на диссертационную работу
Ларионовой Ольги Евгеньевны «Деформирование диска из жаропрочного
никелевого сплава в процессе термической раскатки», представленную на соискание
ученой степени
кандидата технических наук по специальности
1.1.8 — Механика деформируемого твердого тела

Оценка актуальности диссертационной работы.

Задача изготовления ряда ответственных изделий, использующих в качестве заготовок диски из жаропрочного никелевого сплава, требует предварительного нахождения рациональных параметров процесса с помощью моделей деформирования материала. В случае расчета процессов вязкопластической термической раскатки модели деформирования должны предоставлять возможность рассчитывать большие пластические деформации и учитывать эффекты, возникающие в материале, в условиях сложного циклического нагружения и высокой температуры.

Анализируя современное состояние теории сложных процессов деформирования, следует отметить, что наряду с теорией упругопластических процессов А.А. Ильюшина, свое развитие и активное внедрение получила теория пластического течения В.В. Новожилова. Теория течения послужила основой для создания ряда моделей, среди которых следует выделить вариант теории течения В.С. Бондаря, прошедший верификацию на ряде экспериментальных исследований в условиях длительного циклического нагружения.

В диссертационной работе используется модель деформирования жаропрочного сплава на основе никеля, основанная на теории неупругости В.С. Бондаря, позволяющая учитывать особенности процесса вязкопластической раскатки. Расчет процесса по используемой автором модели учитывает большие пластические деформации и изменения скорости деформации в условиях сложного знакопеременного деформирования и высокой температуры, что позволяет достоверно определять параметры материала в полученной после раскатки заготовке диска. Модель верифицирована по результатам испытаний и предназначена для расчета сложных процессов нагружения, таких как процесс раскатки заготовки диска.

Учитывая вышеизложенное, следует признать, что проведенные соискателем исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, являются актуальными и посвящены решению важной научно-технической задачи, обладающей значительной практической ценностью.

Структура, объем и краткое содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка источников из 179 наименований и четырех приложения. Общий объем работы составляет 141 страницу, в том числе 112 страниц основного текста, содержит 101 рисунок и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, определены объект и предмет изучения. Охарактеризована степень разработанности темы, ее научная новизна и достоверность, а также теоретическая и практическая значимость работы. Изложена методология и методы

исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, указаны опубликованные материалы и также отмечен личный вклад автора в реализацию научного исследования.

Первая глава посвящена описанию процесса изотермической раскатки диска из жаропрочного никелевого сплава. Необходимую форму диск приобретает в процессе вращения, предварительно нагретой до требуемой температуры заготовки, вокруг собственной оси, с одновременным деформирующим воздействием приводных консольных роликов. Раскатка, как правило, осуществляется за один переход роликов вдоль радиуса вращающейся заготовки. В процессе раскатки заготовки диска в материале возникает сложное напряженно-деформированное состояние. На процесс раскатки существенное влияние оказывают температура процесса и скорость деформации. Для анализа необходимо располагать моделями, описывающими большие пластические деформации, возникающие при сложном знакопеременном нагружении, с последующей возможностью доведения модели до численной реализации.

Вторая глава посвящена обзору моделей вязкопластического деформирования, учитывающих скорость деформации. Рассмотрены различные меры деформаций и напряжений и приведены соотношения, позволяющие в наглядном виде представлять результаты экспериментов. Рассматривается два основных подхода к моделированию процессов упругопластического деформирования с акцентом на описание теории пластического течения при различных комбинациях изотропного и кинематического упрочнений. Отмечается, эффективность применения при практических расчетах вариантов теории течения при комбинированном упрочнении, позволяющих описывать процесс упругопластического деформирования при разгрузке и повторным нагружением. На основе критического анализа четырех моделей, основанных на теории течения при комбинированном упрочнении, выбор делается в пользу варианта теории В.С. Бондаря и отмечается, что для учета различных скоростей деформации в процессе раскатки диска эта модель подлежит дополнительной модификации.

Третья глава посвящена разработке модели вязкопластического деформирования. Для разработки модели вязкопластичности проведен анализ результатов испытаний образцов жаропрочного никелевого сплава ВВ751П на растяжение и сжатие при различных температурах и скоростях деформации. На основании анализа экспериментальных диаграмм сделан вывод о возможности аппроксимации зависимостей пределов текучести и прочности параметров от скорости деформации степенной функцией. Также выявлен ряд особенностей процесса деформирования материалов в условиях высоких температур и различных скоростях деформации, которые необходимо учитывать при разработке модели деформирования. На основании экспериментальных результатов внесены соответствующие дополнения и изменения в модель вязкопластичности, основанной на теории неупругости В.С. Бондаря. Приводится подробная сводка основных уравнений разработанного варианта для случая жесткого нагружения. Материальные параметры модели, связанные со скоростью деформации аппроксимируются степенными функциями, параметры которых могут быть определены экспериментально. Для идентификации материальных параметров разработан метод, основанный на анализе диаграмм деформирования при растяжении или сжатии образцов при различных скоростях деформации, реализованный в виде программы на языке Python. Для верификации разработанной модели проведено численное моделирование процессов растяжения и сжатия образцов материалов с различными скоростями деформации при разных температурах, которые показали хорошую корреляцию с результатами экспериментов.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма и программной реализации разработанной модели вязкопластичности для проведения численных расчетов процессов раскатки диска. Авторский выбор сделан в пользу метода конечных элементов и коммерческого программного комплекса ABAQUS, для которого с использованием программного модуля UMAT разработана авторская подпрограмма, описывающая уравнения состояния материала. Для интеграции модели в программный комплекс получены уравнения, связывающие изменение компонент приращения напряжения с изменением компонент приращения деформации. В процессе конечно-элементного решения реализуется пошаговый процесс с итерационным уточнением

Пятая глава посвящена методу и результатам расчета процесса раскатки диска. Разработанная модель вязкопластичности апробирована путем проведения моделирования процесса изотермической раскатки заготовки диска из жаропрочного сплава ЭП741НП при температуре 1130°C. Моделирование проведено в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. Для интегрирования модели вязкопластичности в программный комплекс разработана пользовательская подпрограмма «UMAT» на языке Fortran. Результаты конечно-элементного моделирования процесса изотермической раскатки заготовки диска из жаропрочного сплава ЭП741НП приводятся в виде графиков, характеризующих процесс деформирования и картограмм, показывающих распределение параметров напряжений и деформаций в конце процесса раскатки.

Приводятся зависимости пластических деформаций элемента диска, описывающие сложное знакопеременное деформирование материала с переменной скоростью деформации. В векторном пространстве А.А. Ильюшина представлена проекция траектории деформации, представляющая собой трехзвенную траекторию с двумя прямолинейными и одним криволинейным участками, что подтверждает сложный знакопеременный характер процесса деформирования. Приводится картограмма полных перемещений элементов диска и наложенные на неё формы заготовки до раскатки и диска, полученного экспериментальным путем. Сравнение расчетных и экспериментальных геометрических характеристик показывает, как качественное, так и количественное их соответствие.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

В приложениях представлены акты о внедрении результатов диссертационной в рабочий процесс отдела «Обработки металлов давлением и разработки нового технологического оборудования» филиала АО «ОДК» «НИИД» и в учебный процесс Московского политехнического университета.

Оценка новизны исследований и полученных результатов

Представленная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела» по следующим пунктам области исследований: П.2 - Теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой; П.3 - Анализ процессов деформирования упругих, пластических и вязкоупругих сред; П.12. - Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях.

Сопоставление с достигнутым в настоящее время уровнем исследований в этой области позволяет отметить следующие новые положения и результаты работы, обладающие признаками научной новизны.

1. Разработана новая модель, позволяющая исследовать процессы сложного знакопеременного вязкопластичного деформирования материала, учитывающая влияние скорости деформации.
2. Получены новые экспериментальные данные испытаний для жаропрочных никелевых сплавов и нержавеющей стали при различных скоростях деформации в условиях высоких температур.
3. Создана авторская модель варианта уравнений состояния, предназначенная для использования в конечно-элементном расчетном комплексе ABAQUS
4. Проведен расчет процесса изотермической раскатки диска с учетом сложного знакопеременного характера нагружения и переменной скорости деформации.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Научные положения, лежащие в основе диссертационной работы, базируются на классических положениях механики деформируемого твердого тела, соблюдении основных принципов построения математических моделей исследуемых физико-механических процессов. Достоверность результатов подтверждается сопоставлением расчетов на основе разработанной модели вязкопластичности и экспериментов по одноосному растяжению и сжатию. Сравнением геометрических характеристик диска, полученных по результатам расчета с результатами натурного эксперимента.

Практическая значимость результатов исследования подтверждается актами о внедрении результатов диссертационной работы в рабочий процесс отдела «Обработки металлов давлением и разработки нового технологического оборудования» филиала АО «ОДК» «НИИД» и в учебный процесс Московского политехнического университета.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации.

Автореферат логично структурирован, содержит сжатое изложение основных наиболее важных результатов работы. Все разделы автореферата соответствуют материалам диссертации, ее основным положениям и выводам.

Апробация диссертационной работы.

Основные результаты диссертации докладывались на шести научно-технических конференциях и семинарах, опубликованы 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 опубликованы в изданиях, индексируемых в базе Scopus, одна из которых в издании, индексируемом в базе Web of Science.

Замечания по диссертации

1. Задача расчёта раскатки диска рассматривается в конечно-элементных программах, в том числе российских QForm, DEFORM-3D и отчасти LOGOS, специализированных для конечно-элементного моделирования процессов обработки металлов давлением. Было бы полезно критически оценить возможности этих программ и обосновать выбор автора в пользу иностранного комплекса ABAQUS.

2. В работе отмечается, что процесс раскатки существенно зависит от скорости раскатки и учет этого фактора позволит достоверно определять форму и параметры материала в полученном после раскатки изделии. В рассматриваемом процессе раскатки участвует ряд скоростей (скорость вращения диска, скорости движения валков), поэтому для технологов важно понимать, как скорости технологического процесса связаны со скоростью пластического (неупругого) деформирования, и в каких диапазонах следует задавать их рациональные значения.

3. При достаточно подробном описании технологического процесса раскатки дисков (стр. 12 - 15), недостаточно четко излагается постановка начально краевой задачи раскатки, анализируемой методом конечных элементов. Отсутствует описание алгоритма конечно-элементного решения. Описана только часть, связанная с определением уравнений состояния, необходимая для вычисления матрицы жесткости конечного элемента.

4. На стр. 46 приводится утверждение: «Считается, что поле скоростей пластической деформации в пространстве напряжений имеет потенциал». Вместе с тем, для того чтобы функциональная зависимость могла использоваться в качестве потенциала необходимо выполнение ряда условий. В частности - **отсутствие диссипативных процессов**. Зависимость должна описывать консервативную систему, где энергия не рассеивается в виде тепла или других форм необратимых потерь. В реальных материалах с пластичностью или вязкостью такая зависимость невозможна, так как эти процессы связаны с диссипацией энергии. Учитывая вышеизложенное, требуется пояснение: «На каком основании функционал (3.2.8) считается потенциальной функцией?»

5. На стр.72 отмечается: «Для внедрения модели материала в современные комплексы расчетов процессов деформирования, основанные на методе конечных элементов, необходимо разработать подпрограмму, которая за один шаг вычисления (!?) по известным исходным данным будет определять необходимые параметры процесса деформирования материала к концу шага». Непонятно: «Ведь это будет не программа, а формула. О каком шаге идет речь? Как назначается размер шага?»

6. Рисунок 5.3.6, «Схема контакта модели раскатки заготовки», не дает необходимой информации для понимания используемой при расчете модели контакта. Схема нагружения (рис. 5.3.8), по мнению оппонента, схемой не является и требует пояснения, как и рисунки (5.3.9-11) и (5.4.11).

7. Стр. 110 «Сравнение геометрических характеристик диска, полученных на основе экспериментальной и расчетной изотермической раскатки диска, показывает как качественное, так и количественное их соответствие». Не объясняется на основании сравнения каких величин сделан вывод о 10% точности расчетной модели по сравнению с результатами эксперимента. Диск испытывает существенное изменение геометрии, однако в работе полностью отсутствует упоминание о геометрической нелинейности и способах ее учета.

8. При критическом анализе Вывода 3: «Разработан метод внедрения модели вязкопластичности в современные программные комплексы, позволяющие моделировать процессы изотермической раскатки, основанные на методе конечных элементов» (стр. 118), возникают вопросы: «Можно ли квалифицировать как «метод», прописанную в инструкции к программе ABAQUS процедуру использования модуля UMAT?»

9. Как известно итерационный процесс, реализуемый в пакете ABAQUS, сходится не всегда по причине сложности подбора необходимых настроек (грубая сетка, некорректные контактные условия, шаг по времени, нелинейности различной природы). В таких случаях требуется анализ настроек модели, параметров решателя и физической корректности постановки задачи. В этой связи в работе следовало бы провести проверку на сходимость решения при измельчении сетки.

Сделанные замечания не влияют на общую позитивную оценку работы.

Общее заключение по работе

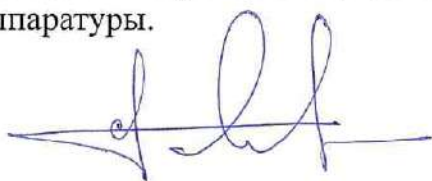
Диссертационная работа «Деформирование диска из жаропрочного никелевого сплава в процессе термической раскатки», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твердого тела является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, которая по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. 842, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям.

Автор диссертационной работы **Ларионова Ольга Евгеньевна** заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 — механика деформируемого твёрдого тела.

Согласен на включение в аттестационное дело моих персональных данных.

Официальный оппонент,

профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем автоматизации производства федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, доктор технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин приборов и аппаратуры.



Гаврюшин Сергей Сергеевич

«16» января 2026г.

Подпись Гаврюшина Сергея Сергеевича заверяю:

«ВЕРНО»

Контактная информация:
Российская федерация, 105005, г. Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
тел. +7 (499) 263-66-39,
E-mail: gss@bmstu.ru



Ведущий специалист по персоналу
ЛАРИОНОВА В.В.
ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЕДИНОЙ ПРИЕМНОЙ
УКСа
МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА