

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Бормотина Константина Сергеевича «Итерационные численные методы компьютерного моделирования оптимальной формовки и клепки тонкостенных панелей», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**1. Актуальность темы.** Актуальность темы диссертационной работы К.С. Бормотина связана с необходимостью применения численного моделирования при внедрении новых технологических процессов, режимов и материалов в процессе изготовления деталей сложно-конструктивных форм с высокими требованиями к размерной точности и эксплуатационному ресурсу, а также анализа априорных оценок технологических и эксплуатационных параметров изделий и конструкций. Эффективные аналитические и численные решения, обусловленные возможностями автоматизированных систем моделирования и проектирования, позволяют значительно сократить материальные и временные производственные затраты, что в современных условиях повышает рентабельность производства.

Экспериментальные исследования особенностей, например, алюминиевых сплавов в условиях ползучести показывают явно выраженную разносопротивляемость образцов растяжению и сжатию, анизотропию, что требует привлечения новых математических моделей ползучести при численном проектировании процессов изготовления деталей. Процесс ползучести сопровождается, как хорошо известно, накоплением в материале, начиная с третьей стадии ползучести, микроразрушений и поврежденности, что в конечном итоге приводит к его разрушению. В связи с этим актуальной является математическая постановка обратных задач формообразования в виде задач оптимального управления поврежденностью и задач определения наиболее рациональных путей деформирования. Численное решение обратных задач формообразования сводится в диссертационной работе к итерационному процессу, который реализуется в программе конечно-элементного анализа MSC.Marc с учетом особенностей свойств конструкционных материалов.

Итерационный метод в задачах приклепывания ребер жесткости затем трансформируется в численный метод.

**2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Автором диссертационной работы изучены и проанализированы известные достижения и результаты других авторов по математическим формулировкам обратных задач, численным методам решения некорректных

задач механики и математической физики, вариационным принципам механики и численным алгоритмам их решения. На основе проведенного анализа созданы усовершенствованные теоретические и методологические основы численного анализа обратных задач формообразования и клепки панелей для цифрового проектирования и отработки технологий изготовления новых изделий.

Основные положения диссертации обосновываются с помощью проведенных в работе доказательств целого ряда теорем. Для подтверждения теоретических положений и эффективности разработанных алгоритмов автором выполнено решение ряда задач, проведено сравнение расчетных, экспериментальных результатов и известных решений, полученных ранее другими авторами.

**3. Научная новизна результатов исследований.** Научная новизна проведенных исследований, в основном, заключается в следующем:

1. Предложены новые энергетические функционалы обобщенных вариационных принципов, касающихся прямых и обратных экстремальных квазистатических задач формообразования деталей в режиме ползучести и пластичности. Впервые, используя теорию вариационных неравенств, построен итерационный метод, доказываются единственность, устойчивость и сходимости решения обратных задач неупругого деформирования при достаточных условиях единственности решения в случаях бесконечно малой деформации и малой деформации, но больших перемещений и поворотов. Анализируются новые варианты итерационного метода решения обратных задач формообразования с учетом регуляризации.

2. Впервые дана математическая формулировка обратных задач оптимального формообразования в режиме ползучести с учетом минимизации повреждаемости и навязанных ограничений на напряжения и перемещения, с помощью которой решены задачи на минимизацию повреждаемости в условиях одноосного растяжения, чистого изгиба, при изгибе пластинки и гибкой мембраны; построены новые численные алгоритмы определения упреждающей кривизны тонкостенных конструкций с минимальной (и в этом смысле оптимальной) поврежденностью.

3. Представлен новый способ математического моделирования состояния заклепочного соединения панели и ребра жесткости, позволяющий учитывать и анализировать влияние маршрута клепки швов на остаточную конфигурацию панели. Разработана новая математическая постановка задачи определения кривизны стрингера при клепочной сборке обшивки крыла, обеспечивающей заданную остаточную конфигурацию панели. На основе данной математической модели, используя теорию вариационных неравенств, построен итерационный метод решения задачи и указаны условия сходимости метода.

4. Предложены новые вычислительные алгоритмы и программы, реализующие итерационные схемы решения рассмотренных обратных задач в программном комплексе конечно-элементного анализа MSC.Patran, MSC.Marc

посредством автоматического введения параметров расчета и вычисления этапов деформирования конструкции в разных режимах.

**4. Достоверность** результатов диссертационной работы определяется систематическим использованием принципов математического моделирования, широким применением апробированных методов вычислительной механики континуума, теории некорректных задач механики и математической физики, привлечением современных комплексов программ инженерного анализа, а также выполненным сравнением полученных численных решений с экспериментальными данными и промышленными испытаниями.

**5. Практическая значимость.** Разработанные общие вариационные принципы постановки и решения прямых задач определения остаточной формы и обратных задач, построенные на их основе МКЭ-алгоритмы решения позволяют корректно применять вычислительную теорию пластичности и ползучести в прикладных задачах. Результаты решения задач дают возможность выявить новые явления в процессах обработки металлов давлением. Приведенная вариационная постановка задач позволяет учитывать различные модели определяющих зависимостей между напряжениями и деформациями, что в итоге выступает как достаточно гибкий подход к решению прямых и обратных задач формообразования для новых материалов, в частности, со свойствами разносопротивляемости и анизотропной ползучести в сложных технологических процессах. Численные реализации итерационного метода позволяют вычислять необходимые параметры клепочной сборки панелей, обеспечивающие заданные допуски детали. Результаты диссертационного исследования имеют важное прикладное значение в авиационном машиностроении, в частности, в филиале ОАО "Компания "Сухой" "Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина".

#### **6. Структура работы и основные научные результаты разделов.**

Рукопись диссертации состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, приложений. Объем диссертации составляет 282 страницы. Список литературы содержит 154 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору и анализу формулировок прямых и обратных задач механики деформируемого твердого тела и математической физики, численных методов, постановок задач оптимального управления, моделирования технологических процессов изготовления деталей.

Во второй главе формулируется квазистатическая вариационная постановка прямых и обратных задач формообразования в рамках теории ползучести и пластичности, доказывается единственность решения общего класса геометрически и физически нелинейных задач при выполнении достаточных

условий единственности решения Хилла, рассмотрены решения частных задач определения усилий, обеспечивающих заданную остаточную форму.

В третьей главе обратная задача представляется в виде вариационных неравенств, строится итерационный метод решения геометрически линейных и нелинейных задач, доказывается его сходимости, приводится МКЭ реализация итерационного метода и программная реализация в комплексе программ инженерного анализа, предлагаются варианты методов итерационной регуляризации, даны численные результаты решения прикладных задач разработанным итерационным методом, согласующиеся с условиями сходимости.

В четвертой главе строится функционал обратной задачи оптимального деформирования в условиях ползучести, находятся рациональные по траекториям деформирования решения ряда инженерных задач, предложен алгоритм численного решения обратной задачи наиболее рационального формообразования панели.

В пятой главе рассматриваются модели современных высокопрочных сплавов и учет их термомеханических свойств при решении задач в системе MSC.Marc, приводятся расчеты, относящиеся к задаче формообразования пластинки в режиме ползучести в кинематической и контактной постановках, расчет обратной задачи формообразования крыльевой панели.

В шестой главе рассматривается моделирование клепочной сборки обшивок и предлагается численный метод определения упреждений ребер, обеспечивающих заданные геометрические параметры обшивок.

Заключение содержит краткий обзор основных результатов, полученных в диссертационной работе.

В приложениях представлены разработанные программы и результаты промышленных испытаний по расчетным данным.

## **7. Замечания.**

1. В работе используется ряд терминов, которые не имеют того смысла, который вкладывается в них в современной математической физике. Так, на с. 28 речь идет об инвариантности функционалов механики относительно замен координат. В настоящее время это свойство обычно называется *эквивалентностью* функционалов, вычисляемых в различных (криволинейных) координатных системах. Понятие об *инвариантности* функционала, введенное Э. Нетер, значительно более сильное, чем просто их эквивалентность, является основой теории вариационных симметрий и законов сохранения.

2. Еще одно общее замечание касается правила множителей Лагранжа. Это действительно универсальный метод исчисления вариаций, позволяющий снимать навязанные двусторонние и односторонние ограничения. Тем не менее, его обоснование выполнено лишь для простейших задач вариационного исчисления. Насколько я могу судить по тексту диссертационной работы, вопрос об обосновании правила множителей Лагранжа в рассматриваемых проблемах автором работы не ставился и не исследовался.

3. Как следует из формулы (2.2) на с. 52 диссертационной работы остаточные деформации (точнее, их скорости) являются совместными поскольку выражаются через некоторые «остаточные перемещения». Наиболее интересен однако случай несовместных остаточных деформаций. Автор не указывает причин, по которым он а priori ограничивает исследование совместными остаточными деформациями.

4. На с. 53 диссертации автор, следуя Р.Хиллу, формулирует достаточные условия единственности решения общей краевой задачи для упругоползучего тела. Они имеют форму неравенств. Эти неравенства допускают также формулировку в виде ограничений на потенциал  $W$ . К сожалению, в тексте никак не описывается класс потенциалов, для которых можно было бы гарантировать выполнение упомянутых неравенств.

5. Раздел 2.2 диссертационной работы посвящен геометрически нелинейным задачам. Решения соответствующих краевых задач механики деформируемого твердого тела, как хорошо известно, существенно неединственны (в частности, существенно неединственны формы равновесия нелинейно-упругих тел при одних и тех же граничных условиях). При этом естественно не существует (в частности, нелинейно-упругих) потенциалов  $W$ , для которых были бы выполнены достаточные условия Хилла (в частности, все нелинейно-упругие потенциалы  $W$  заведомо не обладают свойствами выпуклости). Достаточные условия (2.18) при этом по-прежнему обеспечивают единственность, но вне использованных в диссертационной работе потенциальных законов, связывающих напряжения и скорости деформаций. Поэтому остается открытым вопрос о том, какими должны быть определяющие зависимости для геометрически-нелинейного упругоползучего тела?

## **8. Заключение.**

Диссертация Бормотина К.С., представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Основное содержание диссертации опубликовано в авторитетных научных изданиях, автореферат соответствует содержанию диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18.

Диссертационная работа соответствует критериям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, в том числе и п.9, поскольку в ней разработаны новые теоретические положения, касающиеся математических формулировок и численных методов решения обратных задач формообразования, изложены научно обоснованные алгоритмы и программные решения, обеспечивающие определение проектных и технологических параметров при изготовлении деталей сложно-конструктивных форм с высокими требованиями к размерной точности и эксплуатационному ресурсу, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроения страны.

Учитывая изложенное выше, считаю, что Бормотин К.С. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, в.н.с., лаборатория моделирования в механике деформируемого твердого тела, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Ю.Н. Радаев



Почтовый адрес: 119526, Москва, просп. Вернадского 101, корп. 1

Телефон: 8 495 434 35 92

E-mail: [radayev@ipmnet.ru](mailto:radayev@ipmnet.ru) [y.radayev@gmail.com](mailto:y.radayev@gmail.com)

подпись	<i>Ю.Н. Радаев</i>	ЗАВЕРЯЮ:
	Ученый секретарь ИПрМех РАН, к.ф.-м.н.	
<i>Е.Я. Сырцова</i>	<i>Е.Я. Сырцова</i>	2004 г.

