

ОТЗЫВ

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

1. Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 154 наименований. Содержит 255 страниц текста, включая 11 таблиц, 94 рисунка и 4 приложения. По объёму и структуре работа соответствует требованиям «Положения» к оформлению диссертации. Изложение диссертационной работы строго подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность темы диссертации. Актуальность работы К.С. Бормотина обусловлена как внутренней логикой развития соответствующего раздела математической физики в области обратных краевых задач применительно к механике твердого тела, так и внешней логикой развития, обусловленной практическими потребностями производства и инженерной практики. С теоретической точки зрения требуется разработка новых математических моделей для моделирования малоизученных (с точки зрения математики) технологических процессов обработки металлов при повышенных температурах, когда проявляются свойства ползучести, с заданным конечным полем перемещений, которое нужно получить за заданное время деформирования. В силу острой нелинейности уравнений состояния аналитические решения такого рода задач получить невозможно и поэтому естественным образом возникают задачи построения численных алгоритмов построения решений, обоснования существования, единственности и оценки погрешностей этих решений. Следует отметить, что в существующих вычислительных пакетах и системах кинематические и контактные задачи формообразования представ-

лены лишь для прямых (классических) краевых задач, а для решения обратных задач специализированных модулей не имеется, и их можно решать (приближённо) только с помощью многократной «прогонки» прямых задач в широком диапазоне изменения параметров, не имея к тому же априорной информации даже о существовании решения.

С точки зрения практики технологические задачи формообразования крупногабаритных изделий в режиме медленного деформирования во времени (в условиях ползучести) уже используются в современном отечественном и зарубежном авиастроении. В частности, до 50 – 70% деталей корпуса самолёта в фирмах Boeing и Airbus формируются в режимах сверхпластичности (ползучести). Однако строго теоретического обоснования управления силовыми и кинематическими параметрами такой технологии до настоящего времени не имеется.

Интерес к такого рода технологиям обусловлен тем, что деформирование ряда материалов (и элементов конструкций из них) приводит к меньшей их повреждаемости, чем при мгновенном упругопластическом деформировании до тех же величин необратимых деформаций. Здесь и возникают новые задачи ползучести, сводящиеся к классу обратных краевых задач математической физики и связанные с нахождением внешних воздействий и кинематических связей, необходимых для получения за наперед заданное время требуемой остаточной формы тела. Типичным примером является априорный расчёт параметров технологического оборудования для формообразования панелей в режиме ползучести, включая решение задач оптимального управления повреждённостью и определения рациональных путей деформирования, сочленения различных элементов конструкций (панель и ребро жесткости) при помощи технологической процедуры клёпки с сохранением требуемой геометрии всей конструкции.

Все перечисленные проблемы требуют своего строго математического решения. Существующие на сегодняшний день решения такого рода задач носят частный характер и разработаны для простейших объектов (Соснин О.В., Цвелодуб И.Ю., Горев Б.В., Банщикова И.А. и другие).

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод об актуальности рецензируемой диссертационной работы.

3. Анализ новизны проведённых исследований. Для решения основной задачи диссертационного исследования, состоящей в разработке теоретических и методологических основ дискретных математических моделей для анализа обратных задач формообразования в режиме медленного деформирования (ползучести) на основе численных итерационных методов для параметризации технологических процессов изготовления новых ответственных крупногабаритных изделий, автор выбрал хорошо разработанный в упругости и пластичности аппарат вариационного исчисления. Логика развития теории ползучести металлов, заимствующей основные вариационные принципы из теории пластичности, требовала формулировки аналогичных поступатов, приводящих к разумным ограничениям на множество возможных форм связи между напряжениями и деформациями и гарантирующих единственность решения (как правило – прямых) краевых задач. Что касается обратных задач формообразования в области реологического деформирования, то систематические исследования в этом направлении выполнены И.Ю. Цвелодубом, а также в работах ряда сотрудников Института Гидродинамики СО РАН, в которых изложены общие вопросы постановки задач, проблемы единственности решения прямых и обратных задач, решены некоторые простейшие задачи (однако общего универсального метода не предложено), проанализировано влияние некоторых ограничений на решение задач. Однако не затрагивались вопросы учета геометрической нелинейности, поврежденности, оптимальных путей деформирования в пространствах деформаций и напряжений. Кроме этого, не предложены универсальные численные процедуры для конструкций различной формы и не разработаны соответствующие программные продукты, совместимые с существующими мощными вычислительными пакетами и комплексами на основе МКЭ.

Именно последнее (а МКЭ основан на вариационных принципах), по-видимому и послужило причиной того, что диссидентант в качестве основного математического аппарата использовал обобщение вариационных функционалов для решения поставленных задач. Такой подход обладает хорошо известным положительным моментом: вариационная постановка не привязана к конкретной физической модели (определяющим соотношениями между напряжениями и деформациями) и вариационные принципы применительно к

задачам оптимального проектирования позволяет исключить из рассмотрения дифференциальные уравнения.

С позиций вышеизложенного отметим основные фундаментальные научные результаты с точки зрения специальности 05.03.18. В первую очередь, отметим сформулированные в главе 2 функционалы (достаточно общего вида) обобщенных вариационных принципов для прямых и обратных задач формообразования в режиме ползучести, на базе которых и выполнялись решения всех частных (конкретных) задач. Используя достаточные условия единственности решения краевых задач, аналогичные сформулированным Хиллом, Ильюшиным, Друккером, Ивлевым и другими, диссертант доказал важные теоремы о единственности решения обратных краевых задач формообразования в геометрически линейной (теоремы 2.1 и 2.2) и нелинейной (теоремы 2.3 и 2.4) постановках. Приведенные в главе 2 решения задач «формообразования» растягиваемого стержня и изгиба балки вряд ли обладают новизной, пожалуй, они больше служат иллюстрацией предложенного вариационного подхода.

Ключевые результаты (по мнению оппонента) получены в третьей главе, в которой предложен и реализован итерационный метод решения обратных задач в режиме ползучести в геометрически линейной (формула (3.9)) и нелинейной (формула (3.19)) постановках, установлены условия сходимости разработанного численного алгоритма и доказаны теоремы о его сходимости. Таким образом, диссертант получил новый «рабочий» инструмент для решения конкретных задач, который он, во-первых, имплантировал в классический метод конечных элементов, во-вторых, разработал соответствующее программное обеспечение, совместное с комплексом инженерного анализа MSC.Mars, и в-третьих, с использованием этого математического и программного обеспечения решена достаточно сложная, «утяжелённая» дополнительными ограничениями (разные свойства ползучести на «растяжение – сжатие») задача о кручении квадратной пластинки. При этом диссертантом проделана тонкая работа по устранению вычислительной неустойчивости итерационного метода на основе вариантов регуляризации.

Аналогична была решена задача одномерного изгиба консольно закреплённой балки. Оба эти решения, безусловно, обладают определённой новизной.

В четвертой главе диссертантом предложены новые постановки обратных оптимизационных задач формообразования с ограничениями, во-первых, на кинематические и силовые граничные условия, во-вторых, предложены критериальные зависимости для минимизации повреждённости в материале и определения оптимальных путей деформирования конструкции в условиях ползучести. В данной постановке в качестве иллюстрации приведены решения в данных постановках обратных задач для растяжения стержня; изгиба балки, мембранны и пластины. При этом предложены новые алгоритмы численного решения задач рационального формообразования и разработан отдельно программный модуль для учёта накопленной диссирируемой работы (повреждаемости), который расширяет возможности MSC. Marc.

Пятая глава носит прикладной характер, но при решении этих задач автор существенно расширил возможности существующих вычислительных пакетов за счёт создания подпрограмм пользователя. В частности, вычислительные пакеты дополнены новыми определяющими соотношениями с различными свойствами на «растяжение – сжатие». В данной главе поставлены и решены новые задачи формообразования на основе последовательного решения МКЭ трёхмерных квазистатических задач упругопластического деформирования, релаксации и разгрузки с учетом больших перемещений и поворотов, анизотропии и разносопротивляемости материала, в том числе, с определением граничных условий по заданным перемещениям. Здесь же выполнена частичная проверка результатов расчёта экспериментальным данным на «растяжение – сжатие» образцов, кручение цилиндра и прогиба пластины при кручении в условиях ползучести. Особо следует отметить решение обратной задачи формообразования панели крыла самолета в системе MSC.Marc.

Основной результат в плане информационных технологий состоит в том, что внедрение итерационного метода в систему MSC.Marc позволяет эффективно использовать схемы распараллеливания алгоритмов при реализации многопоточных вычислений на компьютерах с SMP-архитектурой, что обеспечивает сокращение времени расчёта задач формообразования.

Особняком стоят результаты главы 6, в которой, не нарушая центральной идеи диссертации, решена сложнейшая задача сочленения панели и ребра жёсткости при применении заклепочной технологии. Здесь при заданных

геометрических профилях этих двух элементов в реальном производстве при их сборке наблюдается существенное отклонение геометрических параметров сборной конструкции от требуемых по технологии. Для решения этой задачи диссертант разработал численный итерационный метод моделирования процесса клёпки (включая оптимальный маршрут – своего рода «дорожную карту»), обеспечивающего заданные геометрические параметры сборной конструкции.

Резюмируя, можно констатировать, что полученные научные результаты полностью соответствуют специальности 05.13.18 и обладают определённой общностью как в теоретическом плане, так и в прикладных областях исследований.

Все элементы специальности 05.13.18 хорошо отражены в диссертации в пункте «Заключение» и автореферате в пункте «Основные результаты...», и с ними можно полностью согласиться.

4. Обоснованность и достоверность результатов диссертации сомнений не вызывает. Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом целей. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок «физических» и математических задач, аппробированностью использованных математических методов и подходов их решения, использованием хорошо известных и разработанных диссидентом вычислительных процедур и технологий. Кроме этого, достоверность полученных соискателем научных результатов обеспечивается сравнением данных расчёта по математическим моделям, предложенных автором диссертации, с известными данными других авторов в некоторых частных случаях, а также частичной проверкой данных расчёта экспериментальным данным. Приведённые результаты расчётов допускают понятную с теоретической и практической точек зрения интерпретацию.

5. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с точки зрения внутренней логической завершённости работы диссидентом сделан серьёзный шаг в области разработки общих вариационных принципов для прямых задач реологического деформирования (определение остаточной формы) и обратных задач

формоизменения (получение заданной остаточной формы). Построенные на их основе новые итерационные вычислительные алгоритмы и созданное программное обеспечение существенно расширяют возможности решения краевых задач пластиности и ползучести (в узком смысле) и могут являться основой для решения новых технологических задач формообразования (формоизменения) при моделировании процессов обработки металлов давлением, формообразования в авиастроении, машиностроении и других отраслях промышленности (в широком смысле).

С другой стороны, с точки зрения внешней логической завершённости работы (её прикладного характера) очевидно, что результаты, полученные диссертантом, имеют ясные и прозрачные пути использования при решении соответствующих прикладных задач и их приложений и часть этих приложений убедительно изложена в диссертации, включая как модельные задачи, так и сложные задачи для элементов конструкций крыла самолёта и технологических процессов клёпки деталей, что, в свою очередь, подтверждено актами о внедрении.

6. Апробация работы. Основные положения рецензируемой работы в достаточной мере опубликованы в научных журналах (в том числе и в требуемом минимуме журналов из перечня ВАК) и в материалах ряда Международных и Всероссийских научных конференций. Работа выполнялась в рамках трёх проектов министерства образования и науки РФ, которые проходят тщательную экспертизу при их одобрении, имеются свидетельства о регистрации программного продукта. Поэтому считаю, что диссертационная работа К.С. Бормотина в достаточной мере опубликована и апробирована.

7. Диссертация и автореферат в целом написаны ясным и понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно и подробно раскрывает постановку, методы и результаты решения рассматриваемых задач. Автореферат в целом отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

8. Замечания по содержанию работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее по работе можно сделать нижеследующие замечания, которые можно классифицировать по существу работы и её оформлению.

По существу работы.

1. Автор решает задачи формообразования только до момента упругой разгрузки (после ползучести). Но, во-первых, ряд материалов (в том числе и алюминиевые сплавы) имеют обратную ползучесть, во-вторых, после разгрузки возникают объемные остаточные самоуравновешенные напряжения, которые могут вызвать «вторичную» ползучесть, что, в свою очередь, приведёт к дополнительному формообразованию (последействию). Количественных оценок такого рода эффектов в диссертации не имеется. Здесь же возникает вопрос: почему в качестве объектов для реализации численных процедур диссертант использовал конструкции из алюминиевых сплавов? Обоснований такого выбора не приведено.

2. Автор работы в главе 2 (пункт 2.3) сформулировал две теоремы о единственности решений для прямой и обратной задач формообразования в режиме ползучести. Однако уже в простейшем случае (пункт 2.4) для задачи одноосного растяжения стержня относительно растягивающей нагрузки $p = p(t)$ получено интегральное уравнение

$$\tilde{u}^* = \int_0^T B[p(t)]^n l dt, \quad (1)$$

где \tilde{u}^* , B , n , l – заданные постоянные величины, которое имеет бесконечное множество решений, смотря в каком классе функций выбирать $p = p(t)$ ($p(t) = \text{const}$, $p(t) = \sigma_0 \exp(\lambda t)$ (σ_0 и $\lambda - \text{const}$) и т.д.). Что же тогда автор имеет ввиду под единственностью решения? Аналогичное замечание относится и к задаче об изгибе балки, поскольку решение уравнения (2.32) относительно $\sigma(y, t)$ имеет бесконечное множество решений, а следовательно, и изгибающий момент $M = M(t)$ будет иметь бесконечное множество решений. Вообще уравнение (1) относится к уравнению Фредгольма 1-го рода и его единственность обеспечивается при крайне жёстких ограничениях на неизвестную функцию $p = p(t)$. Здесь нужны комментарии диссертанта.

3. Определённые противоречия вызывают выводы по главе 2. Автор утверждает, что он построил функционалы квазистатического принципа обратных задач формообразования (и это действительно так!). Но при решении простейших задач о растяжении стержня и изгиба балки в этой же главе он их использовал фактически лишь для сведения поставленных задач к класси-

ческой краевой задаче в дифференциальной постановке, которую можно было бы записать и сразу без вариационных формулировок.

4. На стр. 72 диссертации при решении задачи о изгибе балки автор вводит предположение о постоянстве распределения напряжений во времени (и это справедливо, например, на стадии установившейся ползучести при $t \rightarrow \infty$) и волевым решением принимает гипотезу для напряжений в виде $\sigma(y) = ay$ ($a > 0 - \text{const}$, y – координата по высоте балки). На такого (линейного) распределения напряжений в нелинейной ползучести (показатель нелинейности в законе Нортона $n > 1$) получить теоретически нельзя!

5. Следующие замечания касаются предложенного диссидентом итерационного процесса, задаваемого формулой (3.9) леммы 3.1. Им доказана сходимость процесса для величины $\alpha^k = \alpha < 2$ ($k = 1, 2, \dots$). Однако из диссертации непонятно, во-первых, каким образом выбирать величину α и, во-вторых, можно ли «подобрать» такую величину α , при которой скорость итерационного процесса (его сходимость) будет оптимальной? Имеются и другие вопросы по этой проблеме. Требует пояснения информация, представленная на рис. 3.11. Почему при $\alpha = 1,8$ метод расходится, хотя условие сходимости $0 < \alpha < 2$, и что вообще означает координата i на рис. 3.8 – 3.11? Каким образом выбираются параметры c и n при априорном задании коэффициента $\alpha_k = c(1+k)^n$ ($n < 0, c = \text{const}$) и параметра регуляризации $\varepsilon^k = (1+k)^n$ ($n < 0$) для конкретных задач? Имеются ли какие-либо теоретически обоснованные рекомендации по их выбору?

6. Имеются определенные логические противоречия (с точки зрения механики деформируемого твердого тела) в главе 4 при построении решений обратных задач оптимального управления. Автор в качестве параметра поврежденности использует величину относительной диссирируемой работы напряжений на деформации ползучести, а в качестве реологической модели (независимо!) использует степенной закон ползучести (модель Нортона), хотя в исходной энергетической модели О.В. Соснина уравнения состояния (для одноосного нагружения) записываются сразу для диссирируемой работы в виде

$$\frac{dA}{dt} = \frac{c\sigma^n}{A^\alpha (A_*^\alpha - A^{\alpha+1})^m} \quad (\alpha, m, n, c, A_* - \text{const})$$

и параметр повреждённости в них явно не вводится. При использовании же уравнений состояний (точнее системы уравнений) для реологических деформаций и параметра поврежденности степенной закон ползучести (в чистом виде) не может реализоваться теоретически, поскольку скорость ползучести (за счёт накопления повреждённости) будет все время возрастать при постоянном напряжении и никакой второй стадии здесь не наблюдается, а фактически сразу имеется третья стадия ползучести. Можно лишь говорить о минимальной скорости ползучести в момент времени $t = 0$ (при отсутствии первой стадии). Поэтому диссертант и получил прямолинейные зависимости для параметра повреждённости (диссилируемой работы) на рис. 4.2 и 4.4, в то время как в теории О.В. Соснина для материалов без первой стадии диссилируемая работа сразу имеет третью стадию (пусть и не явно выраженную в начальной стадии деформирования).

Хотя следует отметить, что с точки зрения формальной математики разработанные диссертантом в главе 4 методы оптимизации безусловно заслуживают внимания и обладают новизной, однако при их применении к моделированию реальных процессов ползучести необходимо проявлять осторожность.

7. Диссертант волевым решением вводит гипотезу о том, что прогиб пластины задаётся соотношением (4.32), т.е. представляет его в виде произведения функций времени и координат. Однако такое представление возможно лишь на развитой стадии установившейся ползучести (теоретически, при $t \rightarrow \infty$). Представление (4.32) не выполняется при наличии первой стадии ползучести), при учёте упругой деформации (процесс перераспределения от упругих полей напряжений до полей, соответствующих стадии установившейся ползучести), при наличии параметра повреждённости, поскольку его введение ориентировано (в первую очередь) на описание третьей стадии ползучести.

8. При обработке экспериментальных данных по сплаву АК4-1Т ($T = 200^\circ C$) автор использует потенциал установившейся ползучести, хотя из рис. 5.8, 5.9 и 5.11 следует, что кривые ползучести (особенно при высоких уровнях напряжений) имеют ярко выраженную третью стадию ползучести.

9. При доказательстве утверждений (например на стр. 58, 77, 80) диссертант часто использует алгебраическое суммирование функциональных

неравенств и анализирует в дальнейшем полученное (в результате суммирования) неравенство. Однако с неравенствами (особенно с функциональными) нужно работать крайне осторожно, поскольку в результате суммы нескольких неравенств можно получить неравенство, решение которого будет противоречить решению исходных неравенств: можно как потерять часть решения, так и приобрести решение, не соответствующее исходным неравенством. В диссертации эти вопросы не обсуждаются.

Замечания по оформлению работы и «подаче» материала.

10. В выводах главы 1 (пункт 1) отмечено, что обратным задачам уделяется большее внимание... Однако в основном автор привёл лишь работы отечественных учёных. Так из 154 источников в библиографическом списке диссертации всего 22 источника зарубежных авторов, причём они являются либо классическими монографиями 70 – 90 годов прошлого века, либо относятся к вопросам программирования, вычислительной математики и информационным пакетам, и лишь 2 из них (№153 и 154) имеют отношение собственно к проблеме формообразования. Но, например, в корпорациях Boeing и Airbus до 50 – 70 % деталей корпуса самолета изготавливаются в режиме сверхпластичности (ползучести). По всей видимости должно быть и теоретическое обоснование этих технологий в работах зарубежных ученых. К сожалению, в диссертации эта тематика отсутствует.

11. Для более адекватного восприятия величины погрешности по среднеквадратической норме лучше было бы использовать относительную величину

$$e = \frac{\|w^i - w_0\|}{\|w_0\|},$$

а не абсолютное значение $e = \|w^i - w_0\|$ (стр. 105 и далее), где w^i – вектор, полученный в результате итерационной процедуры, а w_0 – глобальный вектор заданных остаточных перемещений узлов.

12. Научную новизну результатов в автореферате нужно было подать «концентрировано», чётко, по пунктам, а не размыто и пространно. Перечисление краткого содержания диссертации по главам во введении самой диссертации излишне, это прерогатива автореферата. Крайне низка информативность на рис. 6.23, 6.24, 6.26, поскольку информацию, представленную на

них, «прочитать» ни один читатель не в состоянии. Имеются некоторые замечания по языку изложения. Так, в подрисуночных подписях 5.3 и 5.4 используется «литературный» оборот: «Диаграммы ползучести эксперимента и их аппроксимации ...» Автор диссертации не различает использование знаков «тире», «дефис» и «перенос»; во многих местах деепричастный оборот не выделяется запятыми, а некоторые обороты, например «однако», «в основном», наоборот, выделяются запятыми; имеются опечатки в тексте. Так, неизвестно о каком сплаве идёт речь на стр. 110 (В95очТ2), 182 и 183 (В95очТФ, В95пчТ2) и других. На стр. 48 не поясняются обозначения w_{**} и w_* .

Запись выражений (3.1) и (3.2) в диссертации (они же отмечены формулами (8) и (9) в автореферате) – некорректно, поскольку аргументом во всех трёх множествах должен быть один класс функций: либо переменная, либо деформация.

13. Наконец, рецензент считает, что название диссертации неудачное и вводит в заблуждение: создается ложное впечатление о том, что работа выполняется в области механики, хотя основные её достоинства лежат в области новых итерационных численных методов для решения обратных задач (формообразования) достаточно общего вида.

Отмеченные недостатки носят частный (в большей части – уточняющий и рекомендательный характер) и не влияют на положительное отношение к работе.

9. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация К.С. Бормотина является законченным научно - исследовательским трудом, выполненным соискателем самостоятельно и на достаточно высоком уровне, в котором содержится решение задачи, имеющей существенное значение в области математического моделирования процессов формообразования тонкостенных конструкций, сводящихся к обратным задачам, разработки алгоритмического и программного обеспечения. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы и базируются на достаточном объеме вычислительного эксперимента и строгом применении математического аппарата. Соответствие специальности 05.13.18 (математическое моделирование, численные методы, комплексы программ) не вызывает сомнений, поскольку основные результаты получены в области математи-

ческого моделирования, разработки новых итерационных процедур и программного обеспечения, а объекты из механики иллюстрируют «жизнеспособность» разработанных средств.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Бормотина К.С. «Итерационные численные методы компьютерного моделирования оптимальной формовки и клёпки тонкостенных панелей» является завершённым научным исследованием, выполненном на высоком научном и методическом уровнях, соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и имеет важное научное и прикладное значение. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук ВАК Минобрнауки, а её автор – Бормотин Константин Сергеевич – заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой «Прикладная математика и
информатика» Самарского государственного
технического университета
доктор физико-математических наук,
профессор

Радченко В.П.

Подпись В.П. Радченко заверяю
Ученый секретарь СамГТУ
доктор технических наук
профессор

Деморецкий Д.А.

25 августа 2014 года



Служебный телефон:
8(846)3370443
E-mail: radch@samgtu.ru

Служебный адрес:
443100, г. Самара
ул. Молодогвардейская, 244,
Главный корпус,
кафедра «Прикладная математика и информатика»