

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Чернышовой Дарьи Витальевны
«Моделирование деформирования цилиндрической и сферической
керамических оболочковых форм при затвердевании в них стальной
отливки», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
1.1.8 — Механика деформируемого твердого тела

Актуальность работы и состояние проблемы

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи литейного производства — проблеме растрескивания керамических оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям. Эта задача имеет практическую важность, так как разрушение форм на этапах заливки и затвердевания приводит к браку готовых отливок и означает для производства значительные экономические потери. Ответственные детали сложной геометрии, которые производят по этой технологии в авиационной, энергетической и медицинской промышленности, требуют высокого качества литья, а прочность форм при этом — критический показатель.

Автор проводит комплексный анализ факторов, влияющих на образование трещин. Работа рассматривает не только традиционные причины — термические напряжения при охлаждении, но и менее изученные явления: взаимодействие между слоями многослойной оболочки через трение, воздействие опорного наполнителя, влияние геометрии отливки на распределение температур и деформаций. Выбор цилиндрических и сферических форм обоснован: эти геометрии позволяют выявить принципиальные различия в механизмах разрушения и служат основой для понимания более сложных конфигураций.

Проблема растрескивания форм остается нерешенной в промышленности, несмотря на десятилетия исследований. Существующие решения часто эмпирические и порой не имеют расчетного фундамента. Представленное исследование стремится заполнить этот пробел, предлагая научно обоснованный подход к анализу и предотвращению трещинообразования.

Работа соответствует современным тенденциям в литейном производстве — развитию методов численного моделирования для оптимизации технологических процессов. Автор правильно предполагает, что современная промышленность требует не только экспериментальных данных, но и прогностических моделей, основанных на математическом описании

физических процессов. При этом исследование объединяет механику деформируемого твердого тела, теорию теплообмена и технологию литейного производства. Такой синтез разных направлений позволяет получить целостное решение поставленной задачи.

Диссертация Чернышовой Д.В. органично развивает научные традиции дальневосточных школ механиков и металлургов, основанные трудами профессоров А.И. Евстигнеева, Э.А. Дмитриева, В.И. Одинокова и др. Автор не только сохраняет преемственность в области методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и теории трещиностойкости форм, но и творчески развивает научный подход, впервые исследовав влияние межслойных взаимодействий в многослойных цилиндрических и сферических керамических оболочковых формах (КОФ).

Обоснованность научных положений и полученных результатов

Научная база работы построена на фундаментальных принципах механики деформируемого твердого тела и классической теории теплопроводности. Для описания поведения керамических материалов используется линейная теория упругости, что физически обоснованно в рассмотренном диапазоне температур и деформаций.

Математическая модель содержит систему уравнений, включающую уравнения равновесия, определяющие соотношения (законы состояния) и уравнение сплошности. Начальные и граничные условия сформулированы с учетом контакта между компонентами системы «металл — оболочковая форма (ОФ) — опорный наполнитель (ОН)». Автор уделяет должное внимание условиям на границах раздела между слоями оболочки и между оболочкой и наполнителем.

Базовая методология численного расчета НДС с использованием методов конечных разностей хорошо известна и была разработана еще проф. Одиноквым В.И. в работах конца XX века. Диссертация адаптирует эти методы к новым вариантам постановки задач. Разработанная схема учитывает специфику рассматриваемой задачи термоупругости, использует рекуррентные соотношения для снижения размерности системы уравнений. Такой подход позволяет эффективно решать краевые задачи сложной структуры. Алгоритмическая реализация изложена достаточно подробно, с описанием всех этапов: от дискретизации области до решения систем уравнений. Это обеспечивает воспроизводимость расчетов и может служить основой для дальнейших исследований.

Физическая адекватность модели проявляется в учете основных факторов: температурной зависимости механических характеристик

материалов, фазовых переходов в металле, контактных взаимодействий между компонентами системы. Оптимизационные исследования проведены методологически корректно, с надлежащей формулировкой целевых функций и ограничений.

Верификация моделей выполнена путем сравнения с известными теоретическими решениями и результатами предшественников. Совпадение качественных закономерностей с данными других авторов, а также с классическими аналитическими решениями термоупругой задачи для цилиндра и сферы (например, в известных книгах Н. И. Безухова или А. Д. Коваленко и др.) служит подтверждением адекватности применяемого подхода.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обеспечивается комплексом методологических и расчетных мер. Использование фундаментальных уравнений механики деформируемого твердого тела и теплопроводности, многократно проверенных в практике, служит гарантией теоретической надежности.

Численные методы реализованы с учетом требований к устойчивости и сходимости. Автор внимательно относится к проблеме сходимости используемой конечно-разностной схемы, что является необходимым условием получения надежных численных результатов.

Результаты различных разделов работы демонстрируют внутреннюю непротиворечивость. Полученные распределения температур и напряжений качественно согласуются с известными теоретическими представлениями о поведении оболочковых конструкций при термическом воздействии.

Практическое использование отдельных положений работы при подготовке патентных материалов и внедрении в учебный процесс служит дополнительным подтверждением достоверности научных результатов.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы проявляется в нескольких аспектах. Впервые предложена комплексная математическая модель, одновременно учитывающая межслойные взаимодействия в многослойных оболочках, воздействие опорного наполнителя и нестационарные температурные поля для различных геометрий отливок. Особенно значимым является рассмотрение трения и возможности скольжения между всеми слоями многослойной оболочки, которое в предыдущих работах (например, у Иванковой Е. П.) не получало должного внимания.

Впервые теоретически доказана ошибочность идеи о свободном скольжении слоев оболочковой формы. Расчеты показали, что это приводит к возникновению недопустимых растягивающих напряжений в приповерхностном слое и гарантированному разрушению. Это не предположение, а строгое численное доказательство, отсутствующее в предыдущих работах. На основе этого нового теоретического результата разработано и запатентовано новое техническое решение — создание не сплошного зазора, а микрозазора с «перемычками», который останавливает трещину, но сохраняет жесткость связи между слоями.

Автор впервые рассматривает трение на контакте ОФ–ОН как управляемый параметр, который можно использовать для повышения трещиностойкости. Установлена нелинейная зависимость НДС от параметра трения ψ^* . Показано, что: 1) отсутствие трения ($\psi^* = 0$) ведет к разрушению; 2) существует оптимальный диапазон трения ($\psi^* \approx 10$), при котором растягивающие напряжения минимизируются; 3) чрезмерное трение ($\psi^* > 40$) не дает дополнительного эффекта («насыщение»). Исходя из этих идей предложено технологическое решение по созданию демпфирующего барьерного слоя на внешней поверхности ОФ, который обеспечивает оптимальное силовое взаимодействие с ОН (получен патент).

Проведено первое системное сравнение НДС и механизмов разрушения для цилиндрических и сферических ОФ в единой методике и при сопоставимых условиях. Установлен принципиально разный характер разрушения: для цилиндрических ОФ наиболее опасны растягивающие напряжения σ_{22} ; для сферических ОФ наиболее опасны сжимающие напряжения σ_{33} . Для сферических ОФ впервые поставлена и решена задача оптимизации угла охвата φ опорным наполнителем, найдено оптимальное значение $\varphi = 90^\circ$. И эти результаты имели практический выход — разработаны и запатентованы различные технологические решения для сферических ОФ (температурные швы, уровень обсыпки), учитывающие их специфику.

Общая практическая значимость результатов диссертации подкреплена созданием и государственной регистрацией программного комплекса для моделирования напряженно-деформированного состояния оболочковых форм. Получено шесть патентов на новые технологические решения. Результаты внедрены в учебный процесс университета.

Разработанный инструмент моделирования имеет потенциал для использования при оптимизации конструкций форм и сокращении производственного брака. Предложенные технологические рекомендации направлены на повышение надежности форм и улучшение качества отливок. Практическая ориентированность работы проявляется в том, что

теоретические исследования завершаются конкретными технологическими рекомендациями, имеющими непосредственное прикладное значение.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на все достоинства, большая и интересная работа не может не вызывать вопросов и замечаний, например:

1. Одним из существенных упрощений, принятых в диссертации, является пренебрежение динамикой заполнения формы расплавом. Однако, допущение о мгновенном заполнении существенно снижает точность при моделировании начальных стадий процесса. Представляется, что самый опасный с точки зрения растрескивания момент — это первые секунды контакта горячего расплава со стенкой формы. При постепенном заполнении нижняя часть формы успевает резко нагреться и расшириться, в то время как верхняя часть остается более холодной. Возникает крайне неравномерное НДС, которое может привести к разрушению еще до полного заполнения формы. Модель, где форма заполняется мгновенно, «смазывает» этот пиковый эффект. Напряжения в нижней (первой заполняемой) части формы будут существенно выше, чем предсказывает модель с мгновенным заполнением. Неучет этого фактора может привести к завышенной оценке трещиностойкости конструкции.

2. В работе отсутствует системный анализ влияния толщины стенки оболочковой формы на картину НДС, в частности, на возникновение опасных растягивающих напряжений на ее внешней поверхности. Автор исследует разные геометрии (цилиндр, сфера), но не проводит параметрического исследования ключевого размера — толщины стенки. Результаты, полученные для одного типоразмера ($T=5$ мм), механически переносятся на другой ($T=10$ мм) без должного анализа возникающих качественных изменений в НДС. При этом в толстой оболочке ярче проявляется эффект термического изгиба, который приводит к появлению растягивающих напряжений σ_{22} на внешней поверхности формы S_3 .

3. Все расчеты выполнены на моделях с относительно малыми характерными размерами ($R \approx 20$ мм, высота ≈ 50 мм). Автор не обсуждает, как результаты изменятся при увеличении масштабов форм. Отсутствие анализа масштабного фактора и пределов применимости модели является серьезным ограничением использования работы для проектирования реальных литейных процессов. Выводы о трещиностойкости, оптимальном трении и структуре ОФ могут считаться справедливыми только для исследованного в работе диапазона размеров (радиус ~ 20 мм, высота до 50

мм). Экстраполяция этих результатов на крупногабаритные отливки без проведения дополнительных расчетов остается под вопросом.

4. В формулировке граничных условий на поверхности S_3 (стр. 50, 62, 73, 79 и др.) одновременно задаются два физически несовместимых условия. С одной стороны, на участках локального отставания ОФ от ОН нормальное напряжение полагается равным нулю $\sigma_{11}|_{S_3} = 0$, что означает свободную поверхность. С другой стороны, на этой же поверхности сохраняется условие трения: $\sigma_{12}|_{S_3} = -\psi^* \cdot \tau_s \cdot \frac{U_{\text{ок}}}{U^*} \cdot \cos(n, x_1)$. Однако, если поверхность физически свободна в нормальном направлении, на ней не может быть касательных напряжений трения. Автор не поясняет эту коллизию. Необходимо четко определить, находится ли данный участок поверхности ОФ в контакте с наполнителем (и тогда задавать контактные условия), либо она свободна (и тогда трение не учитывается). Текущая формулировка является противоречивой.

5. В разделе 5.2 была поставлена задача оптимизации, но ее решение ограничилось лишь демонстрацией того, что один из предельных случаев ($\psi = 0$) является неприемлемым. Фактически автор проводит не столько поиск минимума $\min \sigma_{22}(x_1^*)$, сколько проверяет значения функции для одного характерного случая ($\psi = 0$). Было бы логично ожидать, что в задаче оптимизации внутренней структуры будет проведена серия расчетов для разных ψ (например, 0, 0.001, 0.01, 0.1 и т.д.), чтобы найти оптимальное сочетание положения поверхностей скольжения, количества таких поверхностей (слоев) в стенке ОФ и величины трения (или сдвиговой прочности) на ней.

6. В разделе 6.2 формально полученный оптимум для угла охвата сферической оболочки $\varphi = 10^\circ$ заменяется рекомендацией $\varphi = 90^\circ$. Указывается, что при $\varphi = 90^\circ$ напряжения «мало отличаются», но при этом данный угол охвата технологически удобнее (большая поверхность контакта обеспечивает лучшую стабильность формы). Однако это технологическое обоснование не подкреплено расчетами — не показано, как ведет себя форма при $\varphi = 90^\circ$ с точки зрения потери устойчивости, и не доказано, что уровень напряжений действительно остается допустимым. Вероятно, было бы правильно явно ввести технологическое ограничение в постановку задачи (например, $\varphi \geq 90^\circ$), показав при этом, чем решение $\varphi = 90^\circ$ хуже оптимального $\varphi = 10^\circ$, но все еще приемлемо.

Данные замечания в целом не снижают научного уровня диссертационной работы и значимости полученных результатов, а скорее подчеркивают сложность и многосторонность решаемых задач и перспективность избранного автором научного направления.

Заключение

Диссертация Чернышовой Д.В. «Моделирование деформирования цилиндрической и сферической керамических оболочковых форм при затвердевании в них стальной отливки» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой расчетными методами механики деформируемых сред дано решение актуальной задачи моделирования керамических оболочковых форм при температурно-силовых воздействиях в затвердевания и охлаждения стальных отливок, имеющей важное значение для современного литейного производства.

Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты, обладающие теоретической и практической ценностью и опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, а по объему и содержанию отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Ее автор, Чернышова Дарья Витальевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твердого тела (технические науки).

доктор технических наук (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела), доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов Волгоградского государственного технического университета

17.11.2025

Захаров Игорь Николаевич

Россия, 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»), www.vstu.ru, тел.(8442) 24-81-37, E-mail: sopromat@vstu.ru

Я, Захаров Игорь Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Чернышовой Дарьи Витальевны, и их дальнейшую обработку.

17.11.2025

Захаров Игорь Николаевич

Игорь Николаевич Захаров

Нач. общего отдела

(подпись)