


УТВЕРЖДАЮ
Исполнительный директор
доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН
С.Л.Чернышев

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации БОРМОТИНА Константина Сергеевича
«ИТЕРАЦИОННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМОВКИ И КЛЕПКИ
ТОНКОСТЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ»,

представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 05.13.18 - Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

Из данного автореферата следует, что диссертационная работа соискателя К.С.Бормотина посвящена *актуальной* проблеме разработки математических и программно-вычислительных основ цифрового производства обшивок крыла современных самолетов типа SSJ-100. Крыло этих самолетов имеет сверхкритический профиль третьего поколения, крутку и излом, которые в комплексе с другими факторами обуславливают изделию эффективность и высокую конкурентоспособность на современном рынке ближне-среднемагистральных самолетов. В свою очередь, обеспечение прочности и ресурса такого крыла уже на этапе производства потребовали разработки новых режимов и способов формовки и клепки. С точки зрения ресурсных характеристик панелей крыла оказался эффективным упруго-ползуче-релаксационный режим гибки с использованием эффектов старения. А для обеспечения качества аэродинамической поверхности обшивки крыла – специальная кривизна стрингеров, которая компенсировала выход обшивки

из допуска после приклепывания, как это имело место при кривизнах стрингера соответствующих теории обшивки.

При постановке на серийное производство в современных жестко конкурентных условиях отладку этих технологий следует производить на цифровой базе. Математическое и компьютерное моделирование может обеспечить: (1) достаточно глубокую проработку технологии изготовления элементов конструкции и их заготовок, определение их технологичности; (2) переход к цифровой отработке технологических процессов, значительное сокращение объема экспериментов и опытно-промышленных испытаний по оснастке, заготовке и параметров обработки.

Судя по автореферату, К.С.Бормотин разработал теоретические и методологические основы численного анализа обратных задач формообразования и клепки панелей для интегрированной технологии цифрового проектирования, отработки и оптимизации технологических процессов изготовления обшивок крыла. В теоретическом плане рассматриваемые модели и задачи интересны тем, что исследуются современные нелинейные модели для описания ползучести с фазовыми превращениями и вариационные постановки новых обратных задач. Главными проблемами рассмотренной термо-механообработки являются анизотропия, разнсопротивляемость сплава и связь с распадом раствора, а также решение обратных задач, связанных с определением параметров заготовки и внешних воздействий, необходимых для формовки детали за заданное время. Математические определяющие соотношения анизотропной ползучести, постановка и анализ обратных задач ползучести восходят к работам российской школы Ю.Н.Работнова, О.В.Соснина и И.Ю. Цвелодуба. Развитые ими модели и формулировки включают в себя уравнения трансверсально-изотропной ползучести и соотношения разномодульной изотропной ползучести, а также использование постулата устойчивости. Эти подходы в настоящее время широко используются в механике ползучести металлов. Как известно, ползучесть современных

плитовых и листовых сплавов характеризуется одновременным проявлением существенных анизотропии и разносопротивляемости. Один из подходов к описанию такого поведения был предложен А.И.Олейниковым, который используется в работе. Предложен также подход к учету влияния деформационного старения сплава при формовке. При этом предполагается совмещение режимов формовки и термообработки, линейная зависимость характеристик материала от времени, механические свойства сформованной детали соответствуют заданным эксплуатационным. Тестирование моделей проводили на простейших задачах о ползучести сплава АК4-1Т в экспериментах, выполненных под руководством О.В.Соснина.

Предложены алгоритмы решения обратных задач формовки, развёртки и клепки, которые, как показано в работе, могут быть сформулированы с использованием вариационных принципов. Обратная задача формовки представляет собой задачу определения остаточного напряженно-деформированного состояния, которое реализуется в теле после определенного неупругого деформирования в течение заданного времени под действием заданных внешних воздействий. Обратная задача развертки состояла в вычислении геометрической модели заготовки исходя из геометрической модели детали и технологии её формовки. В обратных задачах формовки и развертки поведение материала описывается данной моделью разносопротивляющейся трансверсально-изотропной ползучести; классическая модель, в отличие от разработанной модели, приводит к многократной погрешности в прогибе.

Решение обратной задачи клепки дает такие технологические параметры как последовательность приклепывания ребер жесткости, маршруты клепки, а также упреждающие кривизны ребер, обеспечивающие заданные геометрические параметры клепаной панели.

Реализована конечно-элементная дискретизация разработанных итерационных методов и алгоритмов и их программная реализация в виде разработанного автором комплекса программ. При решении обратных задач

формовки показано, что расчеты оснастки формблока по балочной теории и расчеты клепки с обычными кривизнами стрингеров, в отличие от полученных автором, приводят к существенным количественным и качественным погрешностям.

Основные положения диссертации обосновываются с помощью проведенных доказательств ряда теорем. Для подтверждения теоретических положений и эффективности разработанных алгоритмов автором решен ряд модельных и тестовых задач, проведено сравнение расчетных, экспериментальных результатов и известных решений, полученных ранее другими авторами. Предложены и обоснованы новые функционалы обобщенных вариационных принципов прямых и обратных экстремальных квазистатических задач формообразования деталей в режиме ползучести и пластичности, представлен вариационный способ построения итерационного метода, доказана единственность, устойчивость и сходимость решения обратных задач неупругого деформирования. Определение рационального формообразования в обратных задачах ползучести позволяет построить новые технологические процессы, обеспечивающие минимальную поврежденность деталей.

Представлен новый эффективный способ моделирования заклепочного соединения панели и ребра жесткости, позволяющий учитывать и анализировать влияние маршрута клепки швов на остаточную конфигурацию панели. Это дает возможность улучшить качество деталей на этапе проектирования.

Предложены и протестированы новые вычислительные алгоритмы и программы, реализующие итерационные схемы решения рассмотренных обратных задач в программном комплексе конечно-элементного анализа, решения которого согласуются с промышленными испытаниями.

Замечания.

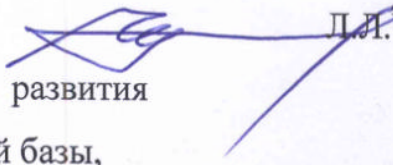
1. Учитывая наблюдаемые в последние годы тенденции развития цифрового производства, было бы интересно получить от автора

оценку возможностей приложения или развития предложенных в диссертации методов для обоснования технологической реализуемости новых концепций летательных аппаратов и крыльев.

2. Современное авиастроение все больше использует эффективные свойства композитов. Однако, в работе, судя по автореферату, совсем не затрагивается вопрос об использовании разработанных методов для композитных элементов конструкций.

Данные замечания, учитывая специальность искомой ученой степени, относятся, прежде всего, к перспективам темы и никак не снижают общий научный уровень работы.

Таким образом, полученные научные результаты представленной работы, нашедшие практическое применение в Комсомольском-на-Амуре авиационном заводе Объединенной авиационной корпорации России, имеют существенное значение для современного цифрового производства, полностью отвечают требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а их автор Константин Сергеевич Бормотин заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заместитель Генерального директора  Д.И. Чернышев
ФГУП «ЦАГИ» - начальник комплекса развития
производственной и экспериментальной базы,
кандидат технических наук

Леонид Леонидович Чернышев
140180 Россия, г. Жуковский, Московская область
ул. Жуковского, 1
8 (495) 556-42-05, info@tsagi.ru