

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 212.092.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____ 1 _____

решение диссертационного совета от 12 мая 2017 года № _____

О **присуждении** Солоненко Элеоноре Павловне, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование напряженного состояния в стеклометаллокомпозитных материалах при температурной обработке» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, принята к защите 10 марта 2017 года, протокол № 1, диссертационным советом Д 212.092.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, приказ Минобрнауки России от 24 июня 2016 г. № 787/нк.

Соискатель Солоненко Элеонора Павловна 1989 года рождения, в 2011 году окончила магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» по направлению «Прикладная механика», с 30 августа 2013 года прикреплена соискателем ученой степени кандидата наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» в Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет», работает в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» ассистентом кафедры механики и математического моделирования.

Диссертация выполнена на кафедре механики и математического моделирования Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент, Любимова Ольга Николаевна, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», кафедра «Механики и математического моделирования», профессор.

Официальные оппоненты:

Кургузов Владимир Дмитриевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории механики разрушения материалов и конструкций Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск;

Севастьянов Георгий Мамиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатория проблем металлотехнологий Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ «ВолГТУ»), г. Волгоград, в своём положительном заключении, подписанном Багмутовым Вячеславом Петровичем, доктором технических наук, профессором, академиком Академии инженерных наук РФ, заслуженным работником высшей школы РФ, профессором кафедры сопротивления материалов и Захаровым Игорем Николаевичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой сопротивления материалов, и утверждённым ректором Волгоградского государственного технического университета Лысаком Владимиром Ильичем указала, что диссертация Солоненко Э.П. является завершённым научным исследованием, посвящённым решению проблемы, актуальной и важной в научном и практическом отношении, соответствует паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого

твердого тела и удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые результаты, исследованы модель Тула-Нарайанасвами и модель вязкоупругого тела с учетом реологического поведения стекла при высоких температурах и разработаны программы численного решения задачи стационарной теплопроводности и краевой задачи термомеханики о напряженно-деформированном состоянии, что определяет вклад в развитие физико-математической отрасли знания. Автор диссертации заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 2 статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 1 работа в зарубежном научном журнале, индексируемом в SCOPUS, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем работы составляет 152 страницы. Авторский вклад в подготовку работ, опубликованных в соавторстве, заключается в разработке и обосновании моделей и алгоритмов численного решения исследуемых задач, доказательстве основных результатов исследований, разработке программ численного решения на языках программирования высокого уровня. Наиболее значимые работы:

1. Любимова, О.Н. Термические напряжения в стеклометаллокомпозитном стержне с учетом свойств зоны соединения / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко, А.В. Морковин // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. -2015.- № 3 (25). -С. 131-137.
2. Любимова, О.Н. Моделирование поведения несогласованного спая стекла с металлом с учетом свойств зоны соединения / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Физ. мезомех. - 2016. -№ 2 (19). -С. 114-119.
3. Lyubimova, O.N. Thermo-mechanical relaxation of stresses in a glass-metal junction / O.N. Lyubimova, E.P. Solonenko // Journal of Physics: Conference Series 754 082002.

4. Солоненко, Э.П. Вычисление температурных напряжений в вязкоупругом цилиндрическом спае / Э.П. Солоненко // Свидетельство о государственной регистрации программы для № 2016661022. – дата регистрации 28.09.2016.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные, указывается основное отражение замечаний):

Отзыв на диссертацию ведущей организации ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» имеет следующие замечания: 1. В диссертации отсутствует обоснование областей применимости используемых в работе моделей механического поведения материалов, составляющих стеклометаллокомпозит, при интенсивных термических воздействиях. В рассмотренных задачах использовался линейный упругий, либо вязкоупругий (для стекла) расчет в предположении малых деформаций. При этом за рамками исследования остались, например, эффекты пластичности и ползучести (в том числе, металлической части композиции), анализ их роли в формировании общей картины технологических и остаточных напряжений при длительных высокотемпературных воздействиях (характерных для исследуемых процессов отжига стеклометаллокомпозита), а также температурные интервалы проявления обсуждаемых механических эффектов в столь разнородных материалах, как сталь и стекло. Насколько оправданы такие допущения в плане достоверности качественной картины, количественной погрешности получаемых результатов и трудоемкости требуемых вычислительных операций? 2. Как нам показалось, в работе недостаточно полно использован потенциал численных методов как в плане учета особенностей решаемой задачи при построении собственных численных моделей рассматриваемых процессов, так и в плане верификации полученных результатов на основе их сопоставления с расчетными данными, полученными, например, при помощи современных конечно-элементных комплексов. Например, при построении автором конечно-разностной модели тепловых полей и дискретного метода расчета напряжений с учетом релаксационных процессов при отжиге СМК большая часть теплофизических и механических характеристик полагалась постоянными за исключением (по одной из компонент композита) удельной теплоемкости, коэффициента теплового расширения, вязкости. Обоснование таких допущений не приводится. С другой

стороны, отсутствует какой-либо сопоставительный верификационный анализ результатов полученных при помощи разработанных в диссертации методов с аналогичными расчетами на основе альтернативных подходов, экспериментальных исследований, литературных данных и т.д. Возможно ли оценить достоверность полученных в диссертации результатов о распределении температурных полей, полей остаточных напряжений, механическом поведении рассматриваемого стеклометаллокомпозита? 3. Важной особенностью разработанных в диссертации моделей является учет структуры, свойств и влияния на качество сцепления слоев переходной (диффузионной) зоны на границы раздела стеклянных и металлических слоев. Однако в работе не приводятся методик определения или обоснований параметров этой зоны (размеров, теплофизических или механических характеристик) и их эволюции на различных стадиях отжига. 4. Некоторая техническая неясность у нас возникла при попытке сопоставить выражения для осевых деформаций ε_{zz} (2.11), (2.17) с принятой чуть выше (на стр.63) гипотезой о плоском деформированном состоянии.

Отзыв на диссертацию официального оппонента Кургузова В.Д. имеет основные замечания: 1. Имеется небольшое количество опечаток, синтаксических и орфографических ошибок в тексте, в подрисуночных подписях, в формулах, не все используемые обозначения пояснены. Автору следовало бы более внимательно проверить диссертацию перед предоставлением в совет. 2. На рис. 1.13, стр. 29, по оси ординат отложен логарифм вязкости. Нельзя брать логарифм от размерной величины, поскольку получаемое значение не имеет физического смысла, необходимо брать логарифм отношения двух величин. 3. Не понятно использование автором терминов плоская деформация и обобщенное плоское деформированное состояние, в разных главах по-разному, где используется условие $\varepsilon_z=0$, а где то - $\varepsilon_z=C$. 4. Параметры сеток (число узлов), используемых в численных решениях, не указаны, не проведена оценка точности полученных в расчетах результатов. 5. Отсутствуют выводы по главам. Это затрудняет оценку результатов, полученных в конкретном разделе диссертации. 6. Выводы в диссертации и автореферате отличаются.

Отзыв на диссертацию официального оппонента Севастьянова Г.М. имеет основные замечания: 1. Значение температуры окружающей среды в граничных условиях Ньютона-Рихмана не приведено в тексте работы, без этого оценить решение тепловой задачи затруднительно. Коэффициент теплоотдачи в указанном соотношении выбран произвольно. Переход от уравнения (2.1) к системе (2.7) безоснователен. Вывод о низкой неоднородности температуры можно было сделать на основании анализа тепловых потоков при заданной геометрии и теплофизических параметрах системы, для этого не обязательно было строить достаточно сложную модель теплопереноса с учетом фазовых переходов, результаты расчетов по которой никак не используются в дальнейшей оценке напряженного состояния. 2. Использование параметра «степень сцепления» (формула 1.27 и далее по тексту) крайне неудачно. Контактные взаимодействия принято задавать на основе тех или иных законов трения (трение Кулона-Амонтона, трение Прандтля или более комплексные соотношения). Во всех них присутствуют параметры материалов и/или пар материалов (предельное сопротивление сдвигу, коэффициент сухого трения и т.д.). Здесь же параметр явно подчиняется напряженному состоянию и не может в принципе быть некой материальной константой. 3. В работе отсутствуют какие либо данные по химическому составу переходной зоны «стекло-металл», позволяющие хоть как-то оценить его физические свойства. Зависимости, используемые в диссертации для задания механических характеристик этого слоя, не основаны ни на экспериментальных данных, ни на известных теориях осреднения. Поэтому говорить о том, что при определении напряженно-деформированного состояния композита в работе учитывается влияние структуры зоны соединения между слоями, не совсем верно. Кроме того, из текста диссертации неясно, как автор собирается влиять на размеры этой зоны (с целью повышения эксплуатационных характеристик конечного изделия), так как связь её характерных размеров с технологическими параметрами рассматриваемого процесса в работе не устанавливается. Наиболее существенно наличие этой зоны, судя по результатам расчетов автора, складывается на напряжениях в этом переходном слое. Возможно, что именно в нем начнется разрушение композита. Однако проблема в том, что прочностные характеристики этого тонкого слоя, по всей видимости, ещё

никому не известны. 4. Прочность материалов, в том числе и стекла, определяется не только остаточными напряжениями, но и микродефектами сплошности. Для их оценки существуют специальные модели пластических течений (в частности, достаточно широко используемая модель Гурсона-Твергарда-Нидлемана и проч.). Представляется, что для оценки конечных характеристик стеклянных слоев большое значение имел бы учет поврежденности, нежели релаксации напряжений. Тем более что числовые значения, полученные по релаксационной модели автором, зачастую не слишком отличаются от значений, прогнозируемых линейной теорией упругости. Кроме того, для ряда расчетных вариантов интенсивности напряжений в металлических слоях превышают предел текучести (как по окончанию процесса охлаждения, так и, возможно, в ходе его из-за повышенных температур). В этом случае итоговое распределение напряжений, естественно, может координально отличаться от прогнозных значений работы.

Отзыв на автореферат Антоненко С.В., доктора технических наук, профессора кафедры кораблестроения и океанотехники ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток) имеет основные замечания: 1. К сожалению, в автореферате не раскрыты все обозначения, неясны термины «фиктивная температура», «структурная температура» (с. 9). Из описания неясно, каким образом (к каким поверхностям) подводится или отводится тепло. Указано, что используется линейная теория вязкоупругости, хотя понятно, что будут возникать и пластические деформации (упруго-вязко-пластический материал). 2. Режим термообработки (начальная температура, скорость охлаждения), как известно, оказывает влияние на свойства стали, её кристаллическую структуру. Вероятно, это относится и к стеклу. Из автореферата неясно, учитывалось ли это обстоятельство в работе. Определение остаточных напряжений не комментируется соискателем. Остаточные сжимающие напряжения в стекле могут быть полезны с точки зрения прочности композита (аналог – предварительно напряженный железобетон). С позиции представителя технических наук хотелось бы видеть рекомендации по конструкции (выбор соотношения толщин, материалов) и технологии (режимы обработки), хотя в работе по «механике деформируемого твердого тела» это, в принципе, не требуется. 3. Вызывает некоторое удивление вывод на с. 14 автореферата:

«Выявлено, что выдержка в интервале $540^{\circ}\text{C} - 567^{\circ}\text{C}$ позволяет снизить напряжения в компонентах сая в значительной мере. Например, для $\delta=100$ мкм напряжения ... составляют примерно $-103,61$ МПа, а ... при охлаждении с промежуточной выдержкой ... около $-100,59$ МПа». Во-первых, вряд ли оправданы 5 значащих цифр в результате; скорее всего, погрешность модели более высока. Во-вторых, в большинстве технических приложений изменение в 3% считается несущественным (кстати, скорость охлаждения указана с одной значащей цифрой, хотя её влияние, надо полагать, значительно, а выдержать постоянную скорость охлаждения во всём исследуемом интервале температур затруднительно). С другой стороны, представляется, что в рамках численного исследования учет переменной скорости охлаждения не составит труда. 4. Вызывает недоумение тот факт, что в автореферате ни разу не упоминается В.В. Пикуль, работы которого фактически заложили основы диссертации Э.П. Солоненко.

Отзыв на автореферат Мурашкина Е.В., кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН» (г.Москва) имеет замечание методологического характера. При исследовании напряженно-деформированного состояния следовало бы учесть возможность пластического течения в материале при высоких температурах.

Отзыв на автореферат Князевой А.Г., доктора физико-математических наук, заведующего лабораторией моделирования физико-химических процессов в современных технологиях института физики высоких технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» имеет основные замечания: 1. Каким методом решалась задача оптимизации? 2. От каких технологических параметров зависит размер переходной зоны и почему он не изменяется в процессе отжига? 3. Насколько надежными являются данные по структурным параметрам модели (стр.9) и параметры материала в условиях равновесной и замороженной структуры? 4. Обе квазистатические задачи в упругой постановке имеют точные аналитические решения. Насколько отличаются величины напряжений, полученных автором от упругого решения?

5. Модель, представленная в работе, не учитывает процесс разрушения, поэтому некорректно для описания полученных результатов использовать то, что в модели не заложено (стр. 14). 6. Как связаны результирующие и остаточные напряжения? Как определяли средние напряжения? 7. С какой целью проводился эксперимент? Что для него дала теория или, наоборот, как данные этого эксперимента использованы для идентификации параметров?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются компетентными специалистами в исследуемой области, а ведущая организация широко известна достижениями работающих в ней специалистов в области науки, соответствующей тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны и программно реализованы численные методы расчета вязкоупругих напряжений в цилиндрических спаях стекла с металлом, при температурной обработке с учетом переходного слоя в стекла, который может быть моделирован как слой со специфическими свойствами либо степенью сцепления стекла и металла;

предложен метод определения термических напряжений в спаях стекла с металлом с учетом реологических особенностей стекла на всем температурно-временном интервале отжига, с учетом диффузионной зоны (её толщины и температурного коэффициента линейного расширения) и /или качества сцепления в слоях (через наличие осевой деформации);

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

получены новые сведения об эволюции напряжений в стеклометаллокомпозите на всем температурно-временном интервале отжига с учетом влияния структуры зоны соединения (состава и геометрии) между слоями стекла и металла и качества их сцепления;

разработан метод расчета напряжений при технологическом отжиге для нового конструкционного материала – стеклометаллокомпозита; **установлен** интервал отжига (стеклования) для стекла С52-1;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы теории температурных напряжений, методы численного анализа, линейная теория вязкоупругости;

изложены методы численного решения температурной задачи с учетом фазовых переходов в стекле и расчета вязкоупругих напряжений в цилиндрическом СМК спае с учетом реологических особенностей стекла и наличия переходного слоя;

показано влияние режима отжига и механических характеристик переходного слоя на эволюцию термических напряжений в спае.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана модель расчета параметров режима отжига нового конструкционного материала - стеклометаллокомпозита, которая может быть использована при определении физико-механических характеристик сварных соединений из разнородных материалов (металл-пластик, металл-стекло, стекло-пластик и т.п.).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

предложенная модель построена в рамках классических моделей определения реологических свойств стекла, где **используются** методы и подходы линейной теории вязкоупругости, законы сохранения и принципы равновесной термомеханики, выверенные вычислительные программы, сравнение с результатами экспериментальных данных;

идея базируется на использовании стандартных конечно-разностных схем при решении задачи о моделировании температурного поля в композите, применении модели Тула-Нарайанасвами-Мойнихана-Мазурина при определении эволюции термических напряжений на каждом временном шаге и напряжений, деформаций и перемещений в каждом узле по времени как функции от координаты r ;

использованы результаты экспериментальных данных - параметров жидкой и твердой фазы стекла при моделировании реологии стекла, использован принцип Больцмана при решении уравнения Вольтерра 2 рода;

