

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО 02068396, ОГРН 1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

02.09.2020 № 01.02.04/2480

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый проректор – проректор по научной
работе ФГБОУ ВО «Самарский
Государственный технический
университет»,
доктор технических наук, профессор

Ненашев М.В.

« 01 » 09 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Бойко Светланы Владимировны,

выполненную на тему: «Моделирование формообразования элементов конструкций
в условиях нестационарной ползучести»

и представленную к защите на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

1. Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, три главы, заключение и список литературы из 100 источников, изложена на 133 страницах (включая библиографический список), содержит 38 рисунков и 10 таблиц. Изложение материала подчинено раскрытию поставленных целей и задач исследования.

2. Актуальность исследования. Использование ресурсов механики деформируемого твердого тела (МДТТ) в технологической практике – один из трендов научных исследований в области обработки металлов давлением. Процессы формообразования различного назначения панелей занимают важное место в таких исследованиях. Основной задачей здесь является получение оптимальных параметров процессов формообразования элементов конструкций (заданная кривизна, время формообразования, силовые факторы и т.д.) при минимизации поврежденности в материале и величины остаточных технологических напряжений, с которыми связывается остаточный ресурс изделий. В этом направлении важное место занимают соответствующие процессы в режиме ползучести (сверхпластичности). Достаточно отметить, что в таких корпорациях как Boeing и Airbus до 70% корпусных деталей изготавливается в режиме сверхпластичности, что обусловлено тем, что режимы

«медленного» формообразования позволяют минимизировать и поврежденность в материале изделий, и величину технологических остаточных напряжений после силовой разгрузки по сравнению с «быстрыми» технологиями штамповки в режиме упругопластического деформирования. Ясно, что для решения такого рода проблем необходима разработка мощных вычислительных схем (или адаптация существующих программных комплексов) для решения задач формообразования с соответствующим развитием теорий ползучести, учитывающих все три стадии ползучести и накопление поврежденности в материале, а также эффекты разносопротивляемости материала при растяжении и сжатии, характерные для современных легких сплавов и композитных материалов, широко используемых в ответственных изделиях аэрокосмической промышленности. Именно в этом направлении выполнено рецензируемое научное исследование, что и определяет актуальность диссертационной работы как с точки зрения внутренних потребностей дальнейшего развития МДТТ, так и диктуется потребностями технологической практики в различных областях промышленности.

3. Научная новизна результатов и выводов. Основные научные достижения соискателя состоят в **разработке уточненного энергетического варианта теории ползучести, учитывающего кинетику накопления поврежденности и различные свойства материала на растяжение-сжатие и ее адаптацию к решению прямых и обратных задач формообразования балок и оробренных панелей в режиме ползучести на основе существующих программных комплексов и авторских расчетных схемах.**

Поскольку работа выполнялась в рамках научной школы Института гидродинамики СО РАН, то к элементам новизны следует отнести вариант модернизированной теории ползучести и длительной прочности, в определенной мере обобщающий исходный классический вариант О.В. Соснина, в частности, для материалов, разносопротивляющихся рстяжению-сжатию. Как следствие построения феноменологической теории следует отметить методику идентификации параметров этой модели и схему определяющего эксперимента для их определения.

К элементам новизны следует отнести разработанный соискателем алгоритм учета повреждённости материала в энергетическом варианте теории ползучести, который имплантирован в конечно-элементный вычислительный комплекс MSC, что существенно расширило возможности энергетического варианта теории ползучести для решения краевых задач.

Реализована методика моделирования знакопеременного чистого изгиба балки, при этом сделана попытка уточнить основную модель для описания эффектов типа деформационного старения и выполнена ее экспериментальная проверка (но о некоторых замечаниях по этому поводу пойдет речь ниже в отзыве).

Разработан оригинальный (упрощенный) вариант моделирования формообразования цилиндрической оребренной панели в виде составной конструкции из балок таврового сечения, который аналогичен известным подходам методов суперэлементов, подконструкций. Суть подхода в том, что предварительно разработаны методы решения краевых задач чистого изгиба балок таврового сечения, а затем эти методики последовательно реализуются при анализе оребренной панели – составной конструкции из тавровых балок. «Жизненность» данного подхода соискатель проиллюстрировал сравнением данных расчетов по этой модели с решением «полномасштабной» трехмерной краевой задачи в вычислительном комплексе MSC.Marc, Положительным моментом решения обратной задачи формообразования является учет «распружинивания» формуемой детали при полной ее разгрузке (но некоторые замечания по этому поводу ниже) и реализация простейшей задачи оптимизации силовых параметров деформирования оребренной панели.

Самостоятельную ценность имеют экспериментальные результаты по исследованию кратковременной ползучести в диапазоне температур, по всей видимости, близких к режимам сверхпластичности, с одной стороны, для исследователей, занимающихся прикладными вопросами формообразования элементов конструкций, а с другой стороны, для исследователей, занимающихся построением новых теорий для проверки их адекватности.

Анализ диссертационного исследования позволяет сделать вывод, что все заявленные соискателем элементы новизны и положения, выносимые на защиту, имеют место быть.

Все сформулированные элементы новизны соответствуют как минимум следующим областям исследования паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела:

1. Теория упругости, пластичности и ползучести.
2. Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники.
3. Математические методы и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования.
4. Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

Отрасль «Физико-математические науки» также не вызывает сомнений, поскольку работа направлена на построение, модернизацию и экспериментальную проверку теории ползучести энергетического типа с дальнейшим ее использованием для решения связанных прямых и обратных задач ползучести и поврежденности для моделирования процессов формообразования элементов конструкций.

4. Теоретическая и практическая ценность результатов. С точки зрения внутренней логической завершенности работы соискателем сделан существенный вклад в построение теории ползучести энергетического типа, описывающей несвязные задачи ползучести и поврежденности с учетом различных свойств на растяжение-сжатие, и решение ряда прямых и обратных задач формообразования элементов конструкций (балок и подребранных панелей) в режиме ползучести (сверхпластичности) на ее основе.

С прикладной точки зрения здесь все очевидно, поскольку процессы формообразования являются уже штатными технологиями в авиационной и космической промышленности, поэтому методики, численные методы и разработанные программные модели будут востребованы в расчетной практике. Определенную ценность имеют результаты экспериментальных исследований для ряда современных материалов, поскольку в области ползучести экспериментальные исследования в отечественной науке резко сократились в последнее время.

Очевидно, что все теоретические и экспериментальные результаты будут полезны в научных исследованиях академических институтов, организациях Высшей Школы, отраслевых научно-исследовательских институтах, занимающихся подобными проблемами, и в технологической практике промышленных предприятий.

5. Апробация работы и полнота опубликованных результатов. Основные положения рецензируемой работы в достаточной мере опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях, включая публикации в журналах из перечня ВАК Минобрнауки и в изданиях из библиометрических баз данных Web of Science и Scopus, материалах ряда Международных и Всероссийских научных конференций. Поэтому считаем, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

6. Диссертация и автореферат в целом написаны понятным научным языком, но с точки зрения орфографии, пунктуации и стилистики оформление работы оставляет желать лучшего. Содержание диссертации достаточно полно, подробно и ясно раскрывает постановку, методы и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат в целом отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям. Судя по автореферату и диссертации основные результаты, сформулированные в пункте «Заключение», принадлежат автору.

7. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций. Приведенные в диссертации теоретические (и экспериментальные) результаты получены на основе корректного применения математического аппарата с использованием уточненных методов численного решения краевых задач ползучести и пластичности на основе обобщения уже известных теоретических и экспериментальных подходов. Для экспериментальных исследований использованы

апробированные методики. Достоверность результатов подтверждается хорошей согласованностью решений по разным методам, сравнением данных расчета автора работы с известными собственными экспериментальными данными в частных случаях. Полученные результаты не противоречат известным результатам в частных случаях и в определенной мере обобщают теоретические (и частично экспериментальные) результаты, полученные ранее другими авторами.

8. Рекомендации по использованию результатов работы. Результаты диссертационной работы Бойко С.В. могут быть использованы как в учебном процессе, так и в научных исследованиях Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (г. Москва), Пермском национальном исследовательском политехническом университете (г. Пермь), Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете (г. Комсомольск-на-Амуре), Самарском государственном техническом университете (г. Самара), Самарском национальном исследовательском университете имени С.П. Королева (г. Самара), Новосибирском государственном университете (г. Новосибирск) и во многих других высших учебных заведениях, а также в учреждениях РАН: Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва), Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского (г. Москва), ИМАШ Уро РАН (г. Екатеринбург), Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Институте проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа) и многих других научных и научно-исследовательских организациях, занимающихся родственными проблемами.

9. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее, замечания по диссертационной работе С.В. Бойко можно классифицировать как по оформлению, так и по существу работы.

1. Несмотря на большой объем приведенных экспериментальных исследований, описаны они неинформативно. Соискатель не приводит, какое количество образцов испытано при каждом фиксированном уровне напряжения и температуры, имеется ли разброс данных и если «да», то необходимо было указать доверительные интервалы для деформации ползучести образцов и кривизны для балок. При наличии статистической информации многие уточнения расчетов (как, например, на рис. 2.25) были бы статистически незначимыми, т.е. попадали бы в один доверительный интервал.

2. Непонятно, что имеется в виду, когда утверждается о влиянии выдержки при температуре на кривые ползучести и приводится аппроксимация от времени для параметра B_A (стр. 82). В этом случае модель переходит в теорию течения со старением (стр. 39) со всеми ее недостатками, основной из которых – неинвариантность относительно времени приложения нагрузки. Другими словами, если взять два идентичных образца и испытывать их при одинаковых напряжениях и

температуре, приложив к первому образцу нагрузку в момент времени $t=0$, а ко второму в момент времени $t=t_1$ ($t_1 > 0$), выдержав его без нагрузки в течении $t=t_1$, то кривые ползучести для первого образца при $t > 0$ и второго – при $t > t_1$ не будут конгруэнтными.

3. Много вопросов по главе 3, ясность изложения материала в которой желает быть много лучше. В частности, в пункте 3.2.3 ставится задача формообразования панелей в режиме ползучести. В дальнейшем для решения упругопластической задачи сначала используется степенная аппроксимация диаграммы упругопластического деформирования, затем двузвенная ее аппроксимация, а в дальнейшем – идеальная пластичность, и это для одного и того же материала. Аналогично с характеристиками ползучести: для балки они приняты при $T=195^{\circ}C$, а для панели – при $200^{\circ}C$, но это единая составная конструкция из одного и того же материала АК4-1. Рецензент понимает, что результаты расчетов носят больше качественный характер, поскольку отработывалась методика решения обратной краевой задачи, но такие несуразности все же нужно исключать.

4. Соискатель не учитывает обратную ползучесть (о чем в диссертации прямо сказано), но ряд сталей (в частности, сталь 45) после разгрузки имеет обратную ползучесть, соизмеримую с упругой деформацией при заданном напряжении. Вообще говоря, этот факт нужно исследовать в процессах формообразования после снятия нагрузки. Диссертант ограничился расчетами лишь до мгновенного снятия нагрузки и последующей упругой разгрузки. Кроме этого, в конструкции возникает поле остаточных самоуравновешенных напряжений после полной силовой разгрузки деформируемой заготовки, и под действием этих напряжений также возникают процессы «распружинивания» элемента конструкции во времени. Величина этого «распружинивания» также подлежит исследованию.

5. Вследствие неясности изложения сути материала, трудно понять, что реально получено в пункте 2.6 при исследовании знакопеременного изгиба балки (а это выносятся в положения научной новизны, выносимые на защиту). Во-первых, почему соискатель не описал расчетным путем весь блок циклической нагрузки на рис. 2.24 (слева), а уделил внимание лишь зависимости кривизны в фазе приложения момента, проигнорировав обратную ползучесть после разгрузки балки (рис. 2.24, справа), тем более, что экспериментальные данные для материала имелись (рис. 2.22)? Во-вторых, почему во второй серии испытаний на стр. 83 указано 5 ступеней нагрузки, а на графике на рис. 2.26 приведено 6 графиков (без расшифровки принадлежности графиков той или иной ступени маркерами) и были ли здесь разгрузки балки после каждой ступени? В-третьих, оценить содержание пункта 2.6.3 крайне сложно в силу плохого его изложения. Если речь идет о балке, то при каком первоначальном значении момента получены кривые релаксации, о каком напряжении идет речь на рис.

2.27 (по высоте балки имеем распределение напряжений) и как в балке можно экспериментально (?) измерить напряжение в процессе релаксации?

6. В силу ненадлежащего отношения к стилю изложения материала в диссертации относительно много опечаток, неточностей, неясного по смыслу текста (на часть из них указано в вышеизложенных замечаниях). Приведем некоторые из них. На стр. 30 в формуле для величины ω в числителе и знаменателе пропущен дифференциал dt . Зачем соискателю понадобилась гипотеза б (стр. 31), если она в диссертации ни разу не использовалась? Экспоненциальная аппроксимация для скорости деформации ползучести (стр. 31) противоречива, поскольку при $\sigma = 0$ имеем ненулевую скорость, лучше использовать гиперболический синус. Как понимать текст на стр. 110 «Разница между численным расчетом и по ХТ составили 3» (чего?) или в подрисуночной подписи к рис. 3.4: «График процессов моментов...». На стр. 107 не приведено численное значение параметра m_2 . Неточности имеются и в автореферате, например, на рис. 4 маркерами не отмечены значения моментов, при которых получены графики. Не указаны величины моментов для графиков на рис. 2. На стр. 9 автореферата абзац начинается так: «Достаточно точно описывает процесс изгиба балки..., что является подтверждением достоверности...». Что описывает? И т.д.

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку работы Бойко Светланы Владимировны.

10. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаем, что диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней и является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Совокупность научных исследований можно классифицировать как модификацию известных теорий ползучести энергетического типа и разработку новых и адаптивное известными численных методов и алгоритмов для решения важных как в теоретическом, так и прикладном плане прямых и обратных краевых задач формообразования элементов конструкций в режиме ползучести.

Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных экспериментальных и теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа Бойко С.В. «Моделирование формообразования элементов конструкций в условиях нестационарной ползучести» соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 01.10.2018 года), а ее автор – Бойко Светлана

