

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 16.07.2020 № 55

О присуждении Ведерниковой Алене Ильиничне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Расчетно-экспериментальный метод применения теории критических дистанций для оценки динамической прочности металлов» по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 12.03.2020, протокол № 50, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Ведерникова Алена Ильинична 1990 г. рождения, в 2014 г. окончила ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет по направлению «Прикладная математика и информатика». В 2018 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории механики функциональных материалов ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории механики функциональных материалов ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор РАН, заместитель директора по научной работе ИМСС УрО РАН Плехов Олег Анатольевич.

Официальные оппоненты:

1. Матвиенко Юрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом прочности, живучести и безопасности машин ФГБУН Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук (г. Москва);
 2. Швейкин Алексей Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования систем и процессов ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет (г. Пермь);
- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН), г. Санкт Петербург, в своем положительном заключении, составленным д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, главным научным сотрудником ФГБУН ИПМаш РАН, и.о. заведующего лабораторией мехатроники Беляевым Александром Константиновичем и старшим научным сотрудником, к.т.н. Яковлевым Юрием Алексеевичем, и.о. заведующего

лабораторией прикладных исследований ФГБУН ИПМаш РАН, и утвержденном врио директора ФГБУН ИПМаш РАН, д.т.н. В.А. Полянским, указала, что диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, актуальной и практически значимой. Новые результаты имеют серьезное теоретическое и практическое значение. Полученные в работе результаты являются обоснованными и достоверными. Представленная диссертационная работа «Расчетно-экспериментальный метод применения теории критических дистанций для оценки динамической прочности металлов» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Ведерникова Алена Ильинична заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Соискателем опубликовано 11 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Yin T., Tyas A., Plekhov O., **Terekhina (Vedernikova) A.**, Susmel L. On the use of the Theory of Critical Distances to estimate the dynamic strength of notched 6063-T5 aluminium alloy // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2014. – V.30. – P.220-225.

С использованием методов теории критических дистанций, основанных на анализе особенности распределения напряжений вблизи вершины концентратора напряжений в линейно-упругом приближении, определены условия безопасной эксплуатации для образцов из алюминиевого сплава 6063-T5.

2. Yin T., Tyas A., Plekhov O., **Terekhina (Vedernikova) A.**, Susmel L. A novel reformulation of the Theory of Critical Distances to design notched metals against dynamic loading // *Materials & Design*. – 2015. – V.69. – P. 197-212.

Представлено обобщение теории критических дистанций для расчета критических усилий образцов с концентраторами напряжений при скоростях деформации 10^{-3} - 10^4 s^{-1} . Верификация проведена на 6 материалах (титановый сплав BT6, алюминиевые сплавы AMg6 и Al6063-T5, стали 301XH, VASCO Jet-1000, никелевый сплав RENE-41).

3. **Терехина (Ведерникова) А.И.**, Костина А.А., Плехов О.А. Оценка нормальных и касательных напряжений в деформируемых металлах по данным инфракрасной термографии // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2016. – № 3. – С. 241–251.

Разработан и реализован численно-экспериментальный метод оценки напряженно-деформированного состояния образцов с концентраторами напряжений.

4. **Terekhina (Vedernikova) A.**, Plekhov O. Evaluation of quasistatic and dynamic strength of components with stress concentrators based on the Theory of Critical Distances // *AIP conference Proceedings*. – 2016. – V.1785. – P.040087.

Показана эффективность обобщения теории критических дистанций при прогнозировании предельных параметров для материалов с прямой и обратной скоростной чувствительностью.

5. **Terekhina (Vedernikova) A.**, Kostina A., Plekhov O., Susmel L. Elasto-plastic TCD as a method of failure prediction // *Procedia Structural Integrity*. – 2017. – V.5. – P.569–576.

Предложено развитие обобщения теории критических дистанций с помощью учета процессов пластического деформирования и их зависимости от скорости деформации,

позволяющее повысить точность оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений в диапазоне скоростей деформации 10^{-3} - 10^4 с⁻¹.

6. Kostina A., **Terekhina (Vedernikova) A.**, Plekhov O. A non-local damage model for brittle fracture in metallic structures with stress concentrators // Procedia Structural Integrity. – 2017. – V.5. – P.302-309.

Раскрыты физические механизмы, определяющие нелокальный характер разрушения, и предложено объяснение феноменологического алгоритма применения теории критических дистанций для металлических материалов.

7. **Terekhina (Vedernikova) A.**, Kostina A., Plekhov O. Application of the theory of critical distances for the estimation of fracture under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. – 2017. – V.1909. – P.020218.

Представлены результаты расчета предельного состояния образцов из стали 08X18H10T на основе обобщения теории критических дистанций на динамический случай.

8. **Terekhina (Vedernikova) A.**, Plekhov O., Kostina A., Susmel L. A comparison of the two approaches of the theory of critical distances based on linear-elastic and elasto-plastic analyses // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.208. – P.012042.

Представлено сравнение эффективности методов теории критических дистанций, основанных на решении в упругой и упругопластической постановках. Показано, что учет пластической деформации в области концентратора напряжений позволяет ввести критическую дистанцию как постоянную материала.

9. **Vedernikova A.**, Kostina A., Petrova A., Plekhov O. Physical explanation of the critical distance theory and a link with structure of material // Procedia Structural Integrity. – 2018. – V.13. – P.1165-1170.

Предложена модель, определяющая величину критической дистанции как фундаментальную длину диссипативной структуры в ансамбле дефектов. Структурный анализ поверхности разрушения образцов из ВТ1-0 показал существование двух областей с различным макрорельефом, размер переходной зоны коррелирует с величиной критической дистанции.

10. **Vedernikova A.**, Plekhov O., Bragov A. Calculation of limit loads for steel structures under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V.2051. – P.020316.

Показана эффективность применения алгоритмов обобщения теории критических дистанций для образцов из сталей 08X18H10T, Ст3 и 20X13.

11. **Vedernikova A.**, Kostina A., Plekhov O., Bragov A. On the use of the critical distance concept to estimate tensile strength of notched components under dynamic loading and physical explanation theory // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2019. – V.103. – P.102280.

На основе статистической модели поведения ансамбля мезодефектов в материале предложено физическое объяснение параметров теории критических дистанций. Представлены результаты верификации обобщения теории критических дистанций на случай динамического нагружения для ВТ1-0, 08X18H10T, Ст3 и 20X13.

Публикации содержат в сумме 86 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Матвиенко Ю.Г. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, научная и практическая значимость полученных результатов; обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос о влиянии масштабного фактора на предельное напряжение и критическое расстояние;
- вопрос о корректности использования скорости номинальной деформации образца, а не скорости локальной деформации у вершины концентратора напряжений;
- вопрос об использовании критериальной характеристики тела с трещиной, а не тела с вырезом;
- замечание об идентичности формул (5.12) и (5.14);
- замечание о введении гипотезы равенства предельного напряжения истинному пределу прочности образца и ее влиянии на постоянство критического расстояния.

2. Положительный отзыв официального оппонента Швейкина А.И. В отзыве отмечено, что в диссертации предложена модель, с помощью которой величина критической дистанции впервые трактуется как связанная с длиной диссипативной структуры в ансамбле дефектов. Оппонент отмечает следующие замечания:

- вопрос о трактовке критической дистанции как постоянной материала с позиций МДТТ;
- вопрос о возможности сопоставления длины диссипативной структуры и критической дистанции для различных видов концентраторов напряжений;
- замечания по представлению постановок задач и результатов (корректность употребления термина «относительная погрешность»; рекомендация уйти к безразмерному представлению зависимостей типа (3.38); не полностью описана постановка краевой задачи (стр. 93); не указано насколько значительно увеличение времени расчета при учете пластических деформаций; не говорится о исследовании чувствительности к параметрам в аппроксимациях);
- замечание по поводу опечаток и неточностей в оформлении (лишняя запятая после ФИО руководителя на титульном листе, на стр. 18 – «напряжено-деформированного», на стр. 33 «напряжений», в (1.24) вместо « σ » должно быть « σ_p », на стр. 68 «напряжений используя соотношение (3.21)» (пропущена запятая), не расшифрована легенда к рис. 3.7, при переходе от (3.3) к (3.4) используется (1.25), на что не указано).

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Полученные результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Данные о величине критической дистанции в широком диапазоне скоростей деформации могут использоваться в качестве табличных для оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание о более общем названии диссертации относительно решаемых задач;
- замечание о необходимости изложить описание выносимой на защиту методики в приложение;
- замечание о нарушении порядка ссылок (стр. 24-25 ссылки [52], [58]);
- замечание об отсутствии анализа экспериментальных данных из технической литературы в Главе 2;
- вопрос о возможности распространения полученных результатов на общий случай динамических нагрузок и образцов с концентраторами напряжений;
- вопрос о рассматриваемом в работе типе нагружения;
- вопрос об особенностях критической дистанции по сравнению с другими видами линейного размера, вводимыми в критериях разрушения;
- вопрос об определении параметров k и q в формуле (5.32) и их зависимости от скорости деформации.
- вопрос о зависимости фундаментальной длины диссипативной структуры от скорости деформации.

На автореферат поступило 8 отзывов:

1. Положительный отзыв от Панина С.В., д.т.н., профессора, заведующего лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», г. Томск (3 замечания);
2. Положительный отзыв от Богомолова Л.М., д.ф.-м.н., профессора, директора ФГБУН «Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН», г. Южно-Сахалинск (1 замечание);
3. Положительный отзыв от Кузькина В.А., к.ф.-м.н., доцента Высшей школы теоретической механики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург (6 замечаний);
4. Положительный отзыв от Иноземцева А.А., д.т.н., профессора, член-корреспондента РАН, управляющего директора, генерального конструктора АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь (2 замечания).
5. Положительный отзыв от Шанявского А.А., д.т.н., профессора, начальника отдела «Металлофизических исследований авиационных материалов» ФАУ «Авиационный регистр Российской Федерации», Московская область (5 замечаний);
6. Положительный отзыв от Балохонова Р.Р., д.ф.-м.н., заведующего лабораторией механики структурно-неоднородных сред, и Романовой В.А., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории механики структурно-неоднородных сред ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», г. Томск (1 замечание);
7. Положительный отзыв от Жеребцова С.В., д.т.н., доцента, профессора кафедры материаловедения и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород (1 замечание);
8. Положительный отзыв от Вайсберга Л.А., д.т.н., профессора, академика РАН, научного руководителя НПК «Механобр-техника» (АО), г. Санкт-Петербург (без замечаний).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- в цели работы указана «оценка предельного состояния конструкций», хотя решаемые

задачи посвящены исследованиям образцов;

- замечание о неудачной формулировке второго защищаемого положения;
- пожелание указать факт написания научных статей при описании личного вклада автора;
- опечатка в выражении (7);
- вопрос о рассматриваемом напряжении в критерии прочности в рамках ТКД в случае сложного напряженно-деформированного состояния;
- вопрос о преимуществах теории критических дистанций;
- не во всех задачах указано, какой тип конечного элемента использовался;
- вопрос о методе решения уравнения в частных производных (5.24) и проверке условия $dp_{yy} / dt \rightarrow \infty$.
- вопрос о влиянии на результат малого начального распределения дефектов;
- замечания по оформлению (определение Т-напряжений приведено после использования термина в тексте диссертации; лишние скобки в формуле (1.19);
- параметр σ_B используемый на стр. 36 диссертации, определяется значительно позже; на рис. 5.2, 5.3 не указаны размерности отложенных по осям величин; отсутствуют пояснения к обозначениям и графикам на рис.1 автореферата);
- не приведено сравнение погрешности прогноза предельного состояния образца по разработанной методике и по существующим методикам;
- не поясняется, чем может объясняться погрешность $\pm 20\%$;
- замечание о представлении погрешности в таблице 1 автореферата (не понятно для какого параметра, не ясно одинакова ли погрешность для разных скоростей деформации, не ясно есть ли отрицательная погрешность);
- вопрос об отличии терминов «деформация» и «номинальная деформация»;
- замечание о расстановке акцентов при формулировке выводов;
- вопрос о зависимости константы-дистанции от истории пластического течения;
- замечание о возможности использования обобщения теории критических дистанций при уровне погрешности $\pm 20\%$ в качестве эффективного инженерного метода.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики деформируемого твердого тела; имеют большое число публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях с результатами теоретических и экспериментальных исследований; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБУН Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт Петербург, является одним из ведущих научных центров в области механики, осуществляющих научно-исследовательские работы в области

экспериментальных и теоретических исследований процессов динамического нагружения, деформирования и разрушения материалов. Научно-исследовательские работы в области механики разрушения проводятся сотрудниками лаборатории мехатроники и лаборатории прикладных исследований на мировом уровне с применением современных экспериментальных установок, вычислительных средств и программного обеспечения. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании семинара по прикладным проблемам механики (совместный семинар лаборатории мехатроники и лаборатории прикладных исследований ИПМаш РАН) в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны два алгоритма применения теории критических дистанций, основанные на использовании решений линейно-упругой и упругопластической задач о распределении напряжений в области концентратора напряжений, позволяющие оценить предельное состояние металлических образцов с концентраторами напряжений в диапазоне скоростей деформации 10^{-3} - 10^4 с⁻¹;

предложена модель, описывающая процесс формирования критической дистанции в металлических материалах как результат накопления дефектов в области концентратора напряжений и определяющая её величину как фундаментальную длину диссипативной структуры в ансамбле дефектов;

доказана эффективность применения разработанных алгоритмов для расчета прочности образцов с концентраторами напряжений в диапазоне скоростей деформации 10^{-3} - 10^4 с⁻¹;

введена функциональная зависимость критической дистанции от скорости деформации, позволяющая расширить область применения теории критических дистанций на случай динамического нагружения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

на примере материалов ВТ1-0, ВТ6, АМг6, 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41 **доказаны** положения, вносящие вклад в расширение области применения теории критических дистанций для описания процессов разрушения металлических образцов в диапазоне скоростей деформации 10^{-3} - 10^4 с⁻¹;

доказана возможность применения предложенной модели и оценки величины критической дистанции на основе анализа процессов накопления дефектов в материале.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы экспериментальные и численные методы исследования процессов деформирования и разрушения металлических образцов с концентраторами напряжений при квазистатическом и динамическом нагружении. В частности, для проведения динамических экспериментальных исследований применялся метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Для компьютерного моделирования использовался метод конечных элементов и метод конечных разностей, реализованные в рамках стандартных и оригинальных алгоритмов в программных комплексах

ABAQUS/ANSYS/COMSOL Multiphysics;

изложены алгоритмы применения теории критических дистанций для различных скоростей деформации и приведены экспериментальные данные для оценки предельных усилий для образцов из ВТ1-0, ВТ6, АМг6, 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41;

раскрыты физические механизмы, определяющие нелокальный характер разрушения, и предложено объяснение широкоиспользуемого феноменологического алгоритма применения теории критических дистанций для металлических материалов;

изучены и описаны процессы локализации разрушения в области концентраторов напряжений, реализован алгоритм применения нелокального критерия разрушения в программном комплексе COMSOL Multiphysics;

проведена модернизация общепринятой теории критических дистанций, предложен практический алгоритм её применения, разработаны и реализованы для ВТ1-0, ВТ6, АМг6, 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41 процедуры идентификации материальных констант и функций.

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

разработаны расчётно-экспериментальные методики оценки предельных напряжений для металлических образцов с концентраторами напряжений при динамическом нагружении, проведена оценка точности и достоверности прогноза на примере металлов и сплавов, широко используемых в отечественной промышленности. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для повышения точности оценки критического состояния деталей авиационных двигателей, выполненной с использованием локальных критериев разрушения, разрабатываемых в АО «ОДК-Авиадвигатель».

определены расширенные границы применения теории критических дистанций для оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений;

создана база данных зависимостей критической дистанции от скорости деформации для ВТ1-0, ВТ6, АМг6, 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41;

представлены предложения и практические рекомендации по применению разработанных методик, варианты дальнейшего повышения их точности и расширения области применения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ использованы аттестованное испытательное оборудование и поверенные средства измерений, обеспечена устойчивая воспроизводимость результатов, учтены рекомендации действующих стандартов.

теория является развитием нелокальных критериев прочности, предложенные гипотезы проверены с использованием оригинальных и независимых экспериментальных данных;

идея расширения области применения теории критических дистанций **базируется** на анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения материалов в области концентрации напряжений;

для реализации и проверки идеи **использованы** современные численные методы и математические алгоритмы обработки данных;

