

На правах рукописи



Ведерникова Алена Ильинична

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД  
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ КРИТИЧЕСКИХ ДИСТАНЦИЙ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена в «Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»).

Научный руководитель: **Плехов Олег Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты: **Матвиенко Юрий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук, заведующий отделом прочности, живучести и безопасности машин (г. Москва);

**Кузькин Виталий Андреевич**, кандидат физико-математических наук, ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", доцент Высшей школы теоретической механики Института прикладной математики и механики (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН), г. Санкт Петербург.

Защита состоится **14 мая 2020 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ИМСС УрО РАН».

Автореферат разослан « \_\_\_ » апреля 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Необходимость разработки и внедрения простых и в тоже время эффективных критериев разрушения, позволяющих достоверно оценить условия безопасной эксплуатации металлических конструкций, в особенности конструкций с концентраторами напряжений, является очевидной в связи с созданием и увеличением числа инженерных сооружений сложной геометрии. Данная проблема актуальна для многих отраслей промышленности, включая машиностроительную, оборонную и космическую, где уже на стадии проектирования необходимо учитывать возможные аварийные ситуации, вызванные интенсивными динамическими воздействиями. Компоненты и конструкции должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать заданные нагрузки в широком диапазоне скоростей нагружения. Известно, что в процессе разрушения материалов происходит превышение предела прочности на некотором характерном расстоянии (Н. Neuber, В.В. Новожилов, D. Taylor) в течение некоторого характерного времени (Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров). Развитие теоретических моделей, учитывающих нелокальный характер процесса разрушения и алгоритмизированных для использования в стандартных вычислительных пакетах (ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, Comsol), позволяет повысить точность прогноза момента разрушения конструкции и сократить затраты на экспериментальное сопровождение практического внедрения разработки.

Одним из перспективных подходов для оценки предельного состояния образцов с учетом влияния концентраторов напряжений является теория критических дистанций, основанная на анализе особенности распределения напряжений вблизи вершины концентратора напряжений, полученного на основе решения линейно-упругой задачи. Диссертационная работа посвящена развитию теории критических дистанций на случай динамического нагружения и теоретическому анализу нелокального процесса разрушения (величины критической дистанции) на основе моделирования процессов эволюции дефектов в материале.

**Степень разработанности темы исследования.** Анализ процесса разрушения твердых тел показал необходимость введения структурного параметра, описывающего характерный линейный размер зоны процесса разрушения, в модели механики сплошных сред. Одними из первых такую попытку предприняли К. Wieghardt (1907), Н. Neuber (1937) и В.В. Новожилов (1969), предложившие критерий разрушения, согласно которому сравнивать с пределом прочности материала необходимо не максимальное, а осредненное на некотором масштабе нормальное напряжение. R.E. Peterson (1959), J.M. Whitney и R.J. Nuismer (1974) предложили критерии разрушения по напряжению в удаленной точке. В работах G. Pluvinage (2001) в качестве области осреднения использовался некоторый эффективный объем в окрестности вершины трещины. Значительный вклад в развитие методов и моделей прогнозирования разрушения, основанных на использовании

материального параметра длины, внесли такие ученые как И.И. Кокшаров, А. Северин, С.Е. Михайлов, В.М. Корнев, Л.П. Исупов, D. Taylor, L. Susmel, G.C. Sih, В.Н. Шлянников, L.F. Guillemot, M. Creager, O. Akourri, R.O. Ritchie, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, О.Б. Наймарк и др.

Среди зарубежных ученых общепринятым является подход, предложенный D. Taylor и L. Susmel, объединяющий интегральные критерии разрушения в так называемую теорию критических дистанций (ТКД). В основе ТКД лежат три метода прогнозирования прочности материалов, использующие численное решение задачи о распределении напряжений в области концентраторов напряжений в линейно-упругой постановке. Методы теории критических дистанций хорошо зарекомендовали себя в качестве инженерных методов прогнозирования разрушения конструкций с концентраторами напряжений при квазистатическом и циклическом нагружениях (D. Taylor, L. Susmel, S. Cicero, I. Pelekis, R. Louks, D.B. Lanning, R. Wang, F.T. Ibanez-Gutierrez, D. Bellett, P. Lazzarin и т.д.).

Согласно многочисленным экспериментальным данным, механический отклик материалов при высокоскоростном деформировании отличается от случая статического нагружения (U.S. Lindholm, L. Oosterkamp, O.S. Lee, X.M. Zhang, K. Sakino, C.S. Wiesner). В технической литературе можно найти критерии прочности, используемые для описания процессов динамического разрушения, например, критерий минимального времени Шоки-Кальтхоффа, импульсный критерий Никифоровского-Шемякина, критерий инкубационного времени Петрова-Морозова и др. Несмотря на это, проблема построения простых и в тоже время эффективных инженерных критериев разрушения, способных оценить предельное состояние материалов в широком диапазоне скоростей нагружения, до сих пор не является решенной в полном объеме.

**Целью** диссертационной работы является развитие теории критических дистанций для описания процессов динамического разрушения и оценки предельного состояния конструкций с концентраторами напряжений.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработка методики оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с<sup>-1</sup>.

2. Проведение серии экспериментов на квазистатическое и динамическое растяжение гладких цилиндрических образцов и образцов с концентраторами напряжений для верификации предложенной методики на металлических материалах (титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6, алюминиевые сплавы АМг6 и А16063-Т5, стали 08Х18Н10Т, Ст3, 20Х13, 301ХН, VASCO Jet-1000, никелевый сплав RENE-41).

3. Анализ возможности повышения точности оценки динамической прочности образцов с концентраторами напряжений в случае учета процессов пластического деформирования и их зависимости от скорости деформации.

4. Моделирование механизма формирования критической дистанции на основе анализа эволюции ансамбля дефектов в процессе накопления и локализации деформации в области концентраторов напряжений.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложено обобщение теории критических дистанций на случай динамического нагружения, позволяющее оценить предельное состояние образцов с концентраторами напряжений при скоростях деформации в диапазоне  $10^{-3}$ - $10^4$  с<sup>-1</sup> на основе анализа особенности распределения напряжений вблизи вершины концентратора напряжений.

2. Предложена новая методика применения теории критических дистанций, основанная на учете процессов пластического деформирования и их зависимости от скорости деформации, позволяющая повысить точность оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с<sup>-1</sup>.

3. На основе моделирования локализации процессов накопления микроразрушений предложен механизм формирования критической дистанции в области концентраторов напряжений как результат развития диссипативной структуры в ансамбле дефектов.

**Теоретическая значимость работы** заключается в обобщении теории критических дистанций на случай динамического нагружения. Показано, что при учете процессов пластического течения величина критической дистанции является константой материала, в то время как при решении задачи в общепринятой (линейно-упругой) постановке – функцией от скорости деформации. Установлена взаимосвязь процессов эволюции ансамбля дефектов в материале и величины критической дистанции.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке и верификации методик расчета прочностных характеристик металлических образцов с концентраторами напряжений. Разработанные методики требуют для своей верификации сравнительно простую экспериментальную программу. Верификация предложенных методик проведена для десяти металлических материалов (ВТ1-0, ВТ6, АМг6, 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41). Полученные данные о величине критической дистанции в широком диапазоне скоростей деформации могут использоваться в качестве табличных для оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений.

Принятая в диссертационной работе методология исследования основана на комплексном применении средств компьютерного моделирования и натурных испытаний. Используются разработанные в «ИМСС УрО РАН» методики экспериментального исследования механических свойств материалов при квазистатическом и динамическом нагружениях. Для проведения динамических экспериментальных исследований применялся метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Для компьютерного моделирования применяются программные комплексы конечно-элементного анализа ABAQUS/ANSYS/COMSOL Multiphysics®<sup>1</sup>. При проведении

---

<sup>1</sup>ABAQUS: 002683342125\_ABQ12620\_0000\_1;  
ANSYS: No 1064623;  
COMSOL Multiphysics®: No 9600871.

идентификации параметров математических моделей использовался расчетно-экспериментальный подход, основанный на согласовании результатов натуральных испытаний и численных экспериментов на ЭВМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика применения теории критических дистанций, позволяющая оценить предельное состояние металлических образцов с концентраторами напряжений при динамическом нагружении с использованием решения задачи о распределении напряжений в области концентратора напряжений в линейно-упругой и упругопластической постановках.

2. Результаты экспериментального определения деформационных и прочностных характеристик конструкционных материалов (титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6, алюминиевый сплав АМг6, стали 08Х18Н10Т, Ст3, 20Х13) в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с<sup>-1</sup>, а также функции зависимости предельного напряжения от скорости деформации для исследуемых материалов.

3. Результаты численного моделирования деформирования образцов с концентраторами напряжений, значения величины критической дистанции для металлических материалов (ВТ1-0, ВТ6, АМг6, 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41) в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с<sup>-1</sup>.

4. Модель формирования критической дистанции как результат накопления и локализации деформации в области концентратора напряжений, определяющая величину критической дистанции как фундаментальную длину диссипативной структуры в ансамбле дефектов.

**Достоверность** экспериментальных исследований обеспечивается использованием поверенных средств измерения, соблюдением методологии проведения экспериментов и обработки результатов, устойчивой воспроизводимостью полученных результатов. Обоснованность положений, сформулированных в диссертации, подтверждена совпадением теоретических выводов с независимыми экспериментальными данными, полученными как в «ИМСС УрО РАН», так и другими авторами. Достоверность результатов численного моделирования подтверждается удовлетворительным соответствием экспериментальным данным, проведенным анализом сходимости, сопоставлением ряда частных результатов с опубликованными ранее частными результатами других авторов.

**Личный вклад автора** заключается в анализе текущего состояния исследований по теме работы, обобщении и верификации методов теории критических дистанций, формулировке основных результатов и выводов диссертации. Автор принимала непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований, представленных в работе, лично реализовывала методы и алгоритмы обработки экспериментальных данных, выполняла численное моделирование изучаемых процессов.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 14 международных и российских научных конференциях: International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (Bordeaux, 2014), Всероссийская школа-

конференция «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2014), «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, 2015, 2017), Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015), European Solid Mechanics Conference (Leganés-Madrid, 2015), Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2016), Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2016, 2018), Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Пермь, 2017), International Conference on Structural Integrity (Madeira, 2017), Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2017, 2018), European Conference on Fracture (Belgrade, 2018).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 24 научных публикациях, 11 из которых проиндексированы в международных системах цитирования и входят в список журналов, рекомендованных ВАК.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (174 наименования) и приложения. Работа содержит 63 рисунка и 29 таблиц. Общий объем диссертации составляет 150 страниц.

Во **введении** обоснованы актуальность и научная новизна, определены цели и задачи исследования, проанализирована теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложено краткое содержание глав работы.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер и состоит из двух разделов. Раздел **1.1** содержит информацию о работах, посвященных критериям разрушения, основанным на введении характерного линейного масштаба различной физической природы. В разделе **1.2** рассмотрены основные методы теории критических дистанций (ТКД), согласно которым наступлению предельного состояния (разрушению) соответствует ситуация, когда эффективное напряжение  $\sigma_{eff}$  на некотором расстоянии от вершины концентратора напряжений (по методу точки), осредненное на некотором расстоянии (по методу линии) или на некоторой площади (по методу площади), равно предельному напряжению  $\sigma_0$ .

В разделе отмечено, что основными параметрами ТКД являются критическая дистанция  $L$  и предельное напряжение  $\sigma_0$ . При оценке прочности конструкций для части материалов  $\sigma_0$  принимается равным временному сопротивлению разрушению  $\sigma_B$ . В то время как для других материалов в теории критических дистанций предложена методика, позволяющая оценить  $\sigma_0$  на основе сопоставления результатов тестирования двух серий образцов с различными концентраторами напряжений. Величина предельного напряжения  $\sigma_0$  опреде-

ляется одновременно с величиной критической дистанции  $L$  как общая точка в распределениях  $\sigma_1^{(\rho_1)}(r)$ ,  $\sigma_1^{(\rho_2)}(r)$ , полученных в результате численного решения задачи о распределении напряжений в области концентраторов напряжений в линейно-упругой постановке с граничными условиями, соответствующими экспериментально определенным усилиям разрушения. В наиболее часто рассматриваемом двумерном случае  $r$  – координата, отсчитываемая от вершины концентратора напряжений,  $\sigma_1$  – компонента тензора напряжений, соответствующая анализируемой моде разрушения,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – острый и тупой радиусы концентраторов напряжений.

По результатам первой главы сделан вывод, что традиционной областью применения теории критических дистанций являются квазистатическое и циклическое нагружения. Обобщение ТКД на случай динамического нагружения является актуальным и требует дополнительных гипотез.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному определению прочностных характеристик металлических образцов с концентраторами напряжений (ВТ1-0, ВТ6, АМГ6, 08Х18Н10Т, Ст3, 20Х13, А16063-Т5, 301ХН, VASCO Jet-1000, RENE-41) при квазистатическом и динамическом растяжении. Приведено краткое описание методик и результатов экспериментальных исследований, представлены физико-механические свойства исследуемых материалов и геометрии образцов. Механические испытания были проведены в «ИМСС УрО РАН» (Пермь) и испытательной лаборатории Университета Шеффилда (Бакстон). Для верификации предлагаемых в работе методик также использованы экспериментальные данные, предоставленные Научно-исследовательским институтом механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород) и данные из работы А. Brisbane (DTIC AD0404731, WPAFB, USA, 1963).

Экспериментальная программа для каждого материала включала независимые калибровочную и проверочную серии экспериментов, заключающиеся в тестировании гладких цилиндрических образцов и цилиндрических образцов с U-образными и V-образными кольцевыми надрезами (радиус надрезов  $\rho$  изменялся в пределах от 0.1 до 4.00 мм). Образцы тестировались в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с $^{-1}$ .

В основе калибровочной серии экспериментов лежат испытания гладких образцов во всем диапазоне скоростей деформации, дополненные испытаниями образцов с двумя существенно разными значениями радиусов концентраторов напряжений при крайних скоростях деформации. Данные калибровочной серии экспериментов использованы в последующих главах для определения функции или величины критической дистанции для исследуемых материалов.

Полученные значения критической дистанции использовались для прогноза предельного состояния образцов с произвольными значениями коэффициента концентрации напряжений, испытанных при произвольной скорости деформации. Точность прогноза проверялась с использованием данных из проверочной серии экспериментов.

В третьей главе диссертации предложено обобщение теории критических дистанций на случай динамического нагружения и проведена его верификация для металлических образцов, испытанных в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с<sup>-1</sup>.

В параграфе 3.1 излагается обобщение соотношений теории критических дистанций на случай динамического нагружения. В основу анализа заложена следующая гипотеза: *поскольку временное сопротивление разрушению  $\sigma_B$  и вязкость разрушения  $K_{Id}$  являются функциями скорости деформации, предположим, что аналогичным образом от скорости деформации зависит величина предельного напряжения  $\sigma_0$ , а значит и величина критической дистанции  $L$ .*

Математически данная гипотеза сформулирована следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_B = f_{\sigma_B}(\dot{Z}) = a_f \dot{Z}^{b_f} \\ K_{Id} = f_{K_{Id}}(\dot{Z}) = \alpha \dot{Z}^\beta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_0 = f_{\sigma_0}(\dot{Z}) = a_0 \dot{Z}^{b_0} \\ L = f_L(\dot{Z}) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{Id}}{\sigma_0} \right] = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\alpha \dot{Z}^\beta}{a_0 \dot{Z}^{b_0}} \right] = M \dot{Z}^N, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{Z} = \{\dot{F}, \dot{\varepsilon}, \dot{\Delta}, \dot{K}_I\}$ ,  $\dot{F}$  – скорость нагружения (Н/с),  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации (1/с),  $\dot{\Delta}$  – скорость движения захватов (м/с),  $\dot{K}_I$  – скорость изменения коэффициента интенсивности напряжений (Па·м<sup>0.5</sup>/с),  $a_f$ ,  $b_f$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $M$  и  $N$  – материальные константы.

Согласно методам теории критических дистанций, соотношения для  $\sigma_{eff}$  могут быть записаны в виде:

$$\text{для метода точки:} \quad \sigma_{eff} = \sigma_y \left( \theta = 0, r = \frac{L}{2} \right), \quad (2)$$

$$\text{для метода линии:} \quad \sigma_{eff} = \frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma_y(\theta = 0, r) dr, \quad (3)$$

$$\text{для метода площади:} \quad \sigma_{eff} = \frac{2}{\pi L^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^L \sigma_1(\theta, r) r dr d\theta, \quad (4)$$

где  $\sigma_y$  – нормальное напряжение,  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение,  $(\theta, r)$  – полярные координаты.

Условие безопасной эксплуатации принимает вид:

$$\sigma_{eff} < \sigma_0. \quad (5)$$

Анализ данных о зависимости  $\sigma_B$  и  $K_{Id}$  от скорости воздействия  $\dot{Z}$  показал, что независимо от способа определения  $\dot{Z}$ , использованные степенные законы являются справедливыми для всех исследованных материалов.

Методика оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений представлена в виде алгоритма на рисунке 1.

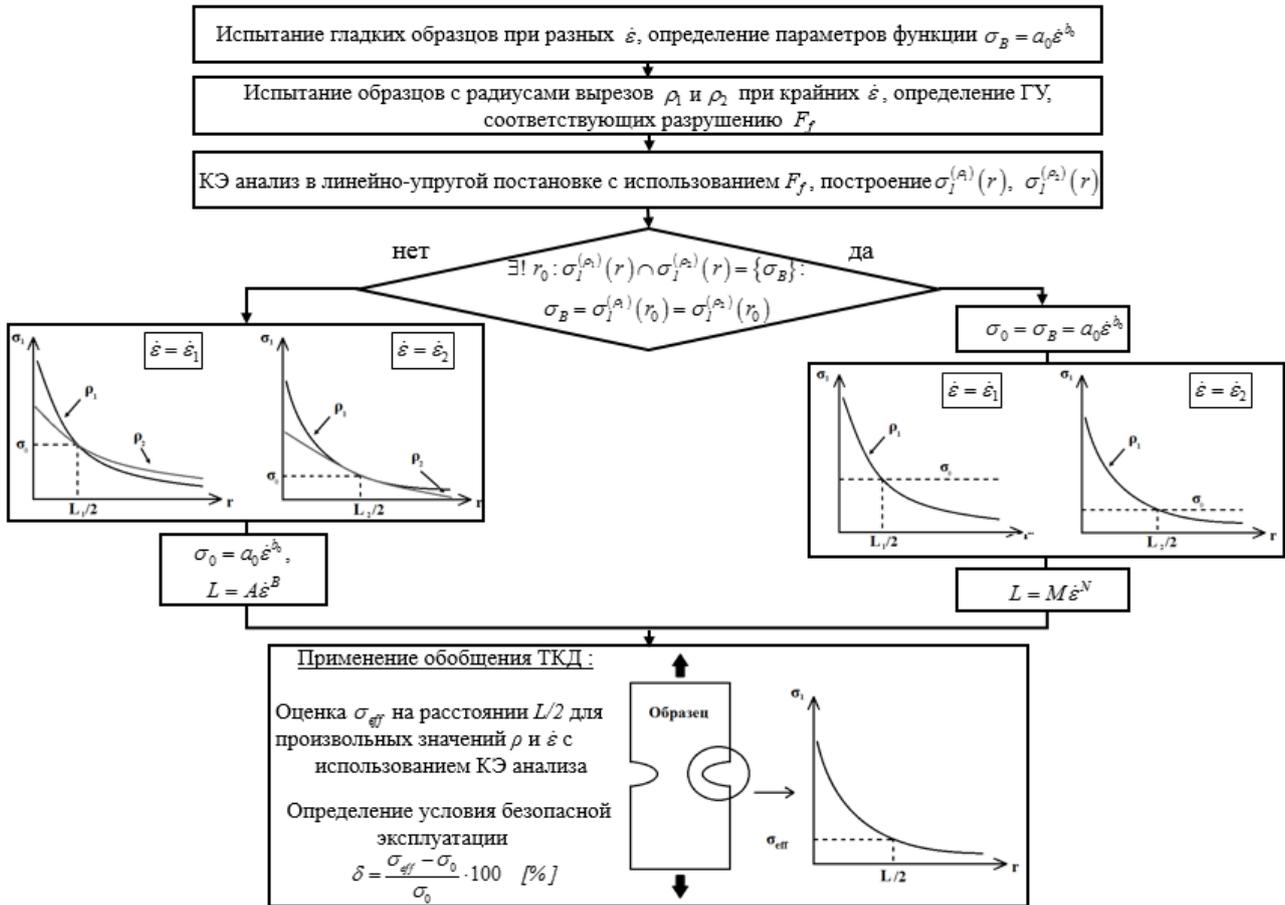


Рисунок 1 – Алгоритм оценки предельного состояния с использованием обобщения теории критических дистанций (на примере метода точки)

Параграфы 3.2-3.5 посвящены реализации предложенного алгоритма для оценки предельного состояния металлических образцов с концентраторами напряжений при динамическом нагружении на основе моделирования напряженно-деформированного состояния металлов и сплавов в линейно-упругой постановке.

Определенные зависимости  $\sigma_0(\dot{\varepsilon}_{nom})$  и  $L(\dot{\varepsilon}_{nom})$ , значения эффективного напряжения  $\sigma_{eff}$  и их сравнение с предельным напряжением  $\sigma_0$  для соответствующей скорости деформации, представлены в таблице 1. Погрешность оценки предельного напряжения оценивалась по формуле:

$$\delta = \frac{\sigma_{eff} - \sigma_0}{\sigma_0} \cdot 100 [\%]. \tag{6}$$

По результатам третьей главы сделан вывод, что предложенное обобщение теории критических дистанций позволяет прогнозировать прочность образ-

цов с концентраторами напряжений из металлических материалов в исследованном диапазоне скоростей нагружения с погрешностью  $\pm 20\%$  и может рассматриваться как эффективный инженерный метод оценки предельного состояния, не требующий значительных экспериментальных усилий и затрат машинного времени.

Таблица 1 – Результаты оценки предельного состояния образцов согласно обобщению ТКД

Материал	$\sigma_0, [МПа],$ $L, [мм]$	Погрешность, [%]		
		метод точки	метод линии	метод площади
<b>BT1-0</b>	$\sigma_0 = 538.968 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.0214}$ $L = 2.592 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.08692}$	17.18	13.95	31.09
<b>BT6</b>	$\sigma_0 = 1027.69 \dot{F}_{nom}^{0.0127}$ $L = 3.761 \dot{F}_{nom}^{-0.02555}$	19.98	14.72	13.26
<b>AMг6</b>	$\sigma_0 = 585.948 \dot{F}_{nom}^{-0.00848}$ $L = 0.671 \dot{F}_{nom}^{0.01813}$	1.8	11.71	5.6
<b>08X18H10T</b>	$\sigma_0 = 932.65 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.01965}$ $L = 0.541 \dot{\epsilon}_{nom}^{-0.005984}$	7.46	19.28	12.72
<b>20X13</b>	$\sigma_0 = 1367.524 \dot{\epsilon}_{nom}^{-0.006381}$ $L = 0.768 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.06276}$	5.18	12.89	15.21
<b>Ст3</b>	$\sigma_0 = 1240.62 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.02501}$ $L = 0.3727 \dot{\epsilon}_{nom}^{-0.01822}$	11.8	20.35	20.41
<b>Al6063-T5</b>	$\sigma_0 = 218.1 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.0118}$ $L = 2.592 \dot{\epsilon}_{nom}^{0.08692}$	17.73	20.33	16.23
<b>301XH</b>	$\sigma_0 = 1889.8 \dot{\Delta}^{-0.027}$ $L = 1.449 \dot{\Delta}^{0.0051}$	27.26	18.91	28.84
<b>RENE-41</b>	$\sigma_0 = 2477.9 \dot{\Delta}^{0.012}$ $L = 0.529 \dot{\Delta}^{-0.084}$	34.74	18.55	38.14
<b>VASCO JET-1000</b>	$\sigma_0 = 2503.3 \dot{\Delta}^{-0.005}$ $L = 1.468 \dot{\Delta}^{-0.005}$	12.94	11.69	14.7

В четвертой главе предложено развитие методики с помощью учета упругопластического поведения материала. Верификация методики проведена с использованием экспериментальных результатов для образцов из титанового сплава BT1-0.

В параграфе 4.1 рассматривается задача о растяжении цилиндрических образцов с кольцевым надрезом в упругопластической постановке, проведен

анализ независимости решения от характерного размера элемента. Для учета упругопластических свойств материала и их зависимости от скорости деформации используется модель Джонсона-Кука:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^p)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*), \quad (7)$$

где  $\sigma$  – интенсивность напряжений на поверхности текучести,  $\varepsilon^p$  – интенсивность пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$  – интенсивность безразмерной скорости деформации,  $\dot{\varepsilon}_0$  – интенсивность начальной скорости пластической деформации,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  и  $m$  – константы материала.

В параграфе 4.2 с использованием экспериментальных результатов главы 2 идентифицированы параметры упругопластической модели Джонсона-Кука, учитывающей величину пластической деформации и ее чувствительность к скорости нагружения, для титанового сплава BT1-0. Проведена верификация модели с помощью контрольной серии экспериментов для титанового сплава BT1-0.

В параграфе 4.3 проведена оценка предельного состояния образцов с концентраторами напряжений в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  с $^{-1}$ . Принимается гипотеза равенства предельного напряжения  $\sigma_0$  истинному пределу прочности образца без концентратора напряжений  $S_B$ .

Аппроксимирующая функция для предельного напряжения имеет вид:

$$\sigma_0 = S_B = 569.773 \dot{\varepsilon}_{nom}^{0.0211} \text{ [МПа]}. \quad (8)$$

Распределение напряжений по Мизесу вдоль оси абсцисс, проходящей через центр образца, для радиусов концентраторов напряжений  $\rho = 2$  мм и  $\rho = 0.1$  мм при квазистатическом нагружении позволили определить величину критической дистанции  $L = 0.24$  мм. Аналогичная стратегия использована для оценки значения  $L$  во всем диапазоне скоростей деформации. Показано, что при корректном учете пластической деформации функция, описывающая зависимость критической дистанции от скорости деформации, может быть заменена константой материала (рис. 2).

Проведенная согласно двум методам ТКД оценка эффективного напряжения для образцов с различными радиусами концентратора напряжений в исследованном диапазоне скоростей деформации показала, что учет пластической деформации позволяет повысить точ-

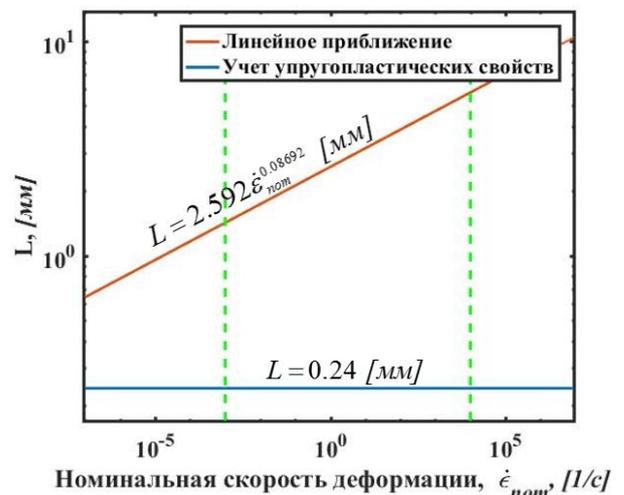


Рисунок 2 – Зависимость величины критической дистанции от скорости деформации

ность оценки прочности образцов с концентраторами напряжений из титанового сплава ВТ1-0. Результаты сравнения  $\sigma_{eff}$  с  $\sigma_0$  представлены на рисунке 3.

С практической точки зрения, важным моментом, касающимся учета пластической деформации при использовании ТКД, являются существенные вычислительные затраты, в связи с чем данная методика перестает быть простым инженерным инструментом, поскольку значительно увеличит время и стоимость моделирования реальных конструкций.

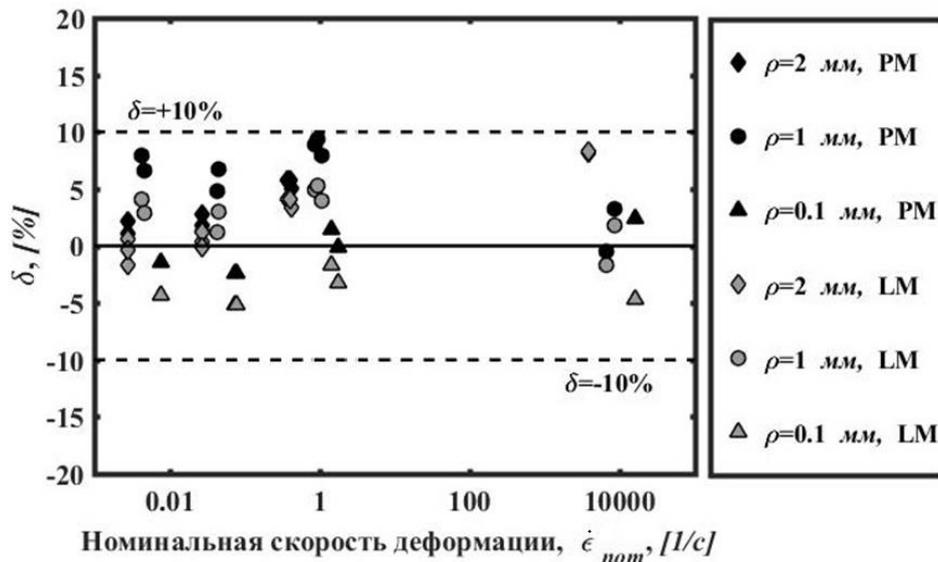


Рисунок 3 –Точность методов ТКД при оценке прочности образцов с концентраторами напряжений с учетом упругопластических свойств материала

**Глава пять** посвящена описанию процессов накопления и локализации дефектов в области концентраторов напряжений. Учет пластической деформации, позволяющий перейти от функциональной зависимости критической дистанции от скорости деформации к константе материала, дает возможность ввести гипотезу о критической дистанции как фундаментальной длине диссипативной структуры в ансамбле дефектов, развивающейся в режиме с обострением. В основу описания эволюции ансамбля дефектов в области концентратора напряжений положена статистическая модель деформационного поведения ансамбля мезодефектов, ранее разработанная в «ИМСС УрО РАН».

В параграфе 5.1 описано построение эволюционного уравнения для структурной деформации (деформации, вызванной появлением дефектов). Уравнение имеет вид:

$$\dot{\tilde{p}} = \Gamma_p \left( \tilde{\sigma} - \rho \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}} \right) + \Gamma_{pg} \tilde{\sigma}, \quad (9)$$

где  $\Gamma_{ps}$ ,  $\Gamma_p$  – кинетические коэффициенты,  $F$  – свободная энергия системы «твердое тело с дефектами»,  $\tilde{p}$  – тензор плотности дефектов,  $\tilde{\sigma}$  – тензор напряжений,  $\rho$  – плотность.

Аппроксимация функции  $\tilde{\sigma} - \rho \frac{\partial F}{\partial \tilde{p}}$ , определяющей равновесную концентрацию дефектов, в безразмерном виде для одномерного случая записана в виде:

$$Z - \frac{\partial \Psi}{\partial p} = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} - ap + qp^\beta + \bar{\nabla} \cdot (kp^s (\bar{\nabla} p)), \quad (10)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное значение компоненты тензора напряжений в области концентратора напряжений,  $\beta$ ,  $s$  – степени полиномов, определяющие характер генерации и скорость диффузии дефектов  $q$ ,  $k$ ,  $a$  – материальные константы,  $Z$ ,  $\Psi$  – безразмерные величины напряжений и свободной энергии.

Уравнение (9) в одномерном случае с аппроксимацией (10) в приближении постоянного напряжения и соотношением показателей  $\beta = s + 1$ , имеет автомодельное решение, описывающее появление одной диссипативной структуры<sup>2</sup>:

$$p(x, t) = (q(t - t_c))^{-\frac{1}{s}} \left( \frac{2(s+1)}{s(s+2)} \sin^2 \left[ \frac{\pi x}{L_c} \right] \right)^{\frac{1}{s}}, \quad (11)$$

зависящее от двух параметров самоподобия – времени обострения:

$$t_c = \frac{2(s+1)}{s(s+2)} \frac{1}{p^s q}, \quad (12)$$

фундаментальной длины:

$$L_c = 2 \frac{\pi}{s} \sqrt{s+1} \sqrt{\frac{k}{q}}. \quad (13)$$

В параграфе 5.2 для модельного материала представлены результаты моделирования поведения дефектов в одномерном случае при одноосном растяжении бесконечной пластины с полукруглым вырезом радиусом  $\rho$ . Зависимость нормального напряжения диаметральной линии, перпендикулярной направлению приложения нагрузки, описана в аналитическом виде соотношением:

<sup>2</sup> Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. – М.: Наука, 1987. – 480 с.

$$\sigma_{yy}(x,0) = \frac{K_t \sigma_\infty}{3} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x}{\rho} + 1 \right)^{-2} + \frac{3}{2} \left( \frac{x}{\rho} + 1 \right)^{-4} \right), \quad (14)$$

где  $K_t$  – коэффициент концентрации напряжений,  $\sigma_\infty$  – напряжение, приложенное к пластине.

Граничные и начальные условия для плотности дефектов имеют вид:

$$p_{yy}(x,t)|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial p_{yy}(x,t)}{\partial x} \right|_{x \rightarrow +\infty} = 0, \quad p_{yy}(x,t)|_{t=0} = 0.$$

В результате численного эксперимента показано, что процесс инициирования диссипативной структуры (перехода к макроскопическому разрушению) требует одновременного выполнения двух условий: напряжение  $\sigma_{yy}$  должно превышать временное сопротивление разрушению  $\sigma_B$  в некоторой окрестности концентратора напряжений, и длина этой окрестности должна быть больше или равна масштабу  $l_{c\sigma}$  ( $(\exists l \geq l_{c\sigma}) : (\forall x \in [0, l]), \sigma_{yy}(x) > \sigma_B$ ).

На рисунке 4 представлены результаты анализа условий возникновения диссипативной структуры в области концентратора напряжений. По оси абсцисс отложены численно определенные значения фундаментальной длины диссипативной структуры  $L_{TN}$  и их оценка  $L_c$  по формуле (13) для различных значений параметров  $s, k, q$ . По оси ординат – значения  $l_{c\sigma}$ , соответствующие условию развития диссипативной структуры в режиме с обострением.

Оценка фундаментальной длины диссипативной структуры по результатам численного моделирования дает точное соотношение, соответствующее постулату теории критических дистанций в формулировке Тейлора-Сусмеля для метода точки: переход от дисперсного к макроскопическому разрушению возникает при превышении временного сопротивления разрушению  $\sigma_B$  (или напряжения  $\sigma_0$ , определяемого аппроксимацией (10)) на критическом расстоянии, соответствующем половине фундаментальной длины диссипативной структуры

$$l_{c\sigma} = \frac{1}{2} L_{TN}.$$

В параграфе 5.3 предложено обобщение определяющих соотношений на трехмерный случай. Решена задача о растяжении цилиндрического образца с кольцевым надрезом из титанового сплава ВТ1-0. Показано соответствие момента разрушения образца моменту инициирования локализованной структуры

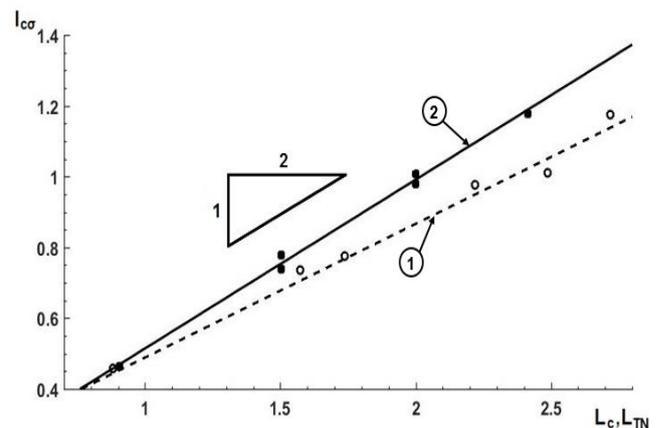


Рисунок 4 – Зависимость между  $L_c$  и  $l_{c\sigma}$  (линия 1),  $L_{TN}$  и  $l_{c\sigma}$  (линия 2)

в ансамбле дефектов, на половине длины которой напряжение превышает временное сопротивление разрушению для данного материала (рис. 5).

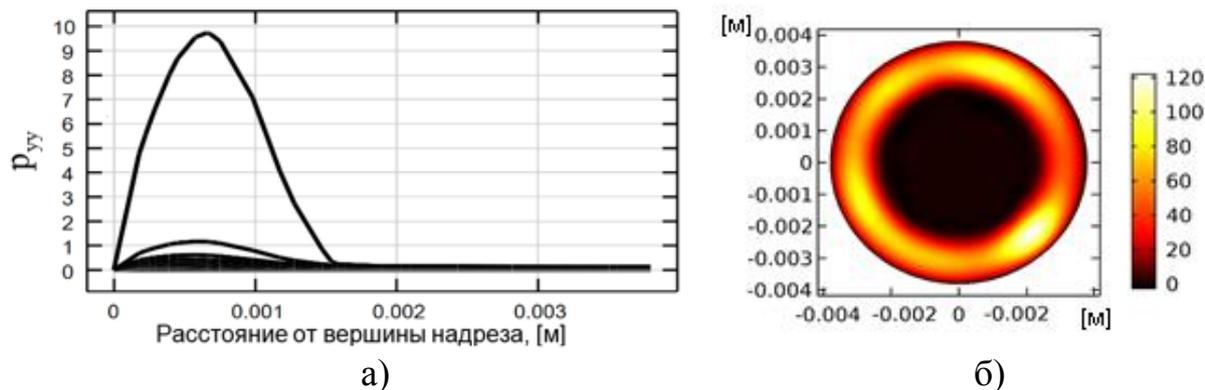


Рисунок 5 – (а) Распределение плотности дефектов  $p_{yy}$  вдоль радиального направления, (б) пространственное распределение  $p_{yy}$  в конечный момент времени в поперечном сечении, проходящем через центр образца, для случая

$$\sigma_{yy} > \sigma_B, l_{c\sigma} = L_{TN} / 2$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментального исследования процессов деформирования и разрушения образцов с концентраторами напряжений предложено обобщение теории критических дистанций, позволяющее оценить момент разрушения в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}-10^4 \text{ с}^{-1}$ . Для определения критических усилий в работе предложены и экспериментально верифицированы две методики применения теории критических дистанций: на основе упругого и упругопластического анализа распределения напряжений в области концентратора напряжений.

На основе статистической модели ансамбля мезодефектов описана кинетика дефектов в области концентратора напряжений. Предложено объяснение феноменологического правила, введенного в теории критических дистанций, и его двойственности при определении величины предельного напряжения и величины критической дистанции для пластичных материалов.

К основным результатам работы можно отнести следующее:

1. Предложено два обобщения теории критических дистанций, позволяющих оценить предельное состояние металлических образцов с концентраторами напряжений при динамическом нагружении с использованием решения задачи о распределении напряжений в области концентратора напряжений в линейно-упругой и упругопластической постановках.

2. Установлено, что учет упругопластического поведения материалов позволяет повысить точность прогноза предельного состояния (для титанового сплава ВТ1-0 показано повышение точности прогноза предельного усилия на 10%).

3. Показано, что корректный учет пластической деформации в области концентратора напряжений позволяет заменить функцию, описывающую зависимость критической дистанции от скорости деформации, на константу материала.

4. На основе модели эволюции ансамбля дефектов предложено объяснение феноменологических правил, используемых в теории критических дистанций, раскрыт физический механизм формирования критической дистанции в области концентраторов напряжений.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. 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. (WoS)

2. **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. (WOS).

3. 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. (WoS)

4. **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. (БАК, Scopus)

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

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. (WoS)

7. **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. (WoS)

8. **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. (WoS)

9. **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. (WoS)

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. (Scopus)

11. **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. (WoS)