

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМаш РАН)**



В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178  
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; [www.ipme.ru](http://www.ipme.ru)

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001

**УТВЕРЖДАЮ**

Врио директора  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт проблем  
машиноведения  
Российской академии наук  
(ИПМаш РАН)

доктор технических наук

В.А.Полянский

«27» апреля 2020



**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**на диссертационную работу Ведерниковой Алены Ильиничны  
«РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ  
КРИТИЧЕСКИХ ДИСТАНЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
МЕТАЛЛОВ»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

**Актуальность темы** исследования весьма высока, так как направлена на повышение точности оценок динамической прочности металлов. 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. В процессе разрушения материалов происходит превышение предела прочности на некотором характерном расстоянии в течение некоторого характерного времени. Развитие теоретических моделей, учитывающих нелокальный характер процесса разрушения для использования в стандартных конечно-элементных вычислительных пакетах (LS-DYNA, ANSYS, Comsol и других) 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.

Основной **целью диссертации** является развитие теории критических дистанций для описания процессов динамического разрушения и оценки предельного состояния конструкций с концентраторами напряжений.

Диссертация состоит из пяти глав, введения, заключения и приложения с рабочими таблицами. Общий объем составляет 150 с.

### **Краткое содержание**

**В главе 1** приведен научный литературный обзор. Дана информация о работах, посвященных критериям разрушения, основанным на введении характерного линейного масштаба различной физической природы. Также рассмотрены основные методы теории критических дистанций, проведен анализ области их применения, сделаны выводы о необходимости обобщения теории критических дистанций на случай динамического нагружения

**В главе 2** изложены способы экспериментального определения прочностных характеристик ряда металлических образцов с концентраторами напряжений при квазистатическом и динамическом растяжении. Приведено краткое описание методик и результатов экспериментальных исследований, представлены физико-механические свойства исследуемых материалов и геометрии образцов.

**В главе 3** предложено обобщение теории критических дистанций на случай динамического нагружения и проведена его верификация для металлических образцов, испытанных в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  1/с. Излагается обобщение соотношений теории критических дистанций на случай динамического нагружения. Предложено введение критической дистанции как степенной функции от скорости деформации и ее определение численно-экспериментальным методом на основании решения задачи о распределении напряжений в области концентратора напряжений в линейно-упругой постановке. Представлена методика оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений с использованием предложенного обобщения. Предложенный алгоритм реализован 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 с использованием метода конечных элементов. Описана экспериментальная программа проверки достоверности методики, включающая в себя независимые калибровочную и проверочную серии экспериментов. Оценена точность прогнозирования предельного состояния для металлических образцов с различными геометрическими особенностями при квазистатическом и динамическом нагружении на основе методов теории критических дистанций. Показано, что предложенное обобщение теории критических дистанций позволяет прогнозировать прочность образцов 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.

**В главе 4** проводится развитие предложенной методики с помощью учета упруго-пластического поведения материала. Установлено, что при корректном учете пластической деформации в области концентратора напряжений, функция, описывающая зависимость критической дистанции от скорости деформации, может быть заменена константой материала. Показано, что предложенная модификация позволяет повысить точность прогноза предельного состояния образцов с концентраторами напряжений до погрешности  $\pm 10\%$ . Верификация методики проведена с использованием экспериментальных результатов для образцов из титанового сплава ВТ1-0. Рассмотрена задача о растяжении цилиндрических образцов с кольцевым надрезом в упруго-пластической постановке, проведен анализ независимости решения от характерного размера элемента. С использованием экспериментальных результатов главы 2 идентифицированы параметры упруго-пластической модели Джонсона-Кука для титанового сплава ВТ1-0. Проведена верификация модели с помощью контрольной серии экспериментов для титанового сплава ВТ1-0. Проведена оценка

предельного состояния образцов с концентраторами напряжений из титанового сплава ВТ1-0 в диапазоне скоростей деформации  $10^{-3}$ - $10^4$  1/с. Показано, что при корректном учете пластической деформации погрешность при прогнозировании прочностных характеристик материала составляет  $\pm 10\%$ , а критическая дистанция является константой материала.

**В главе 5** приведено описание процессов накопления и локализации дефектов в области концентраторов напряжений. В основу описания эволюции ансамбля дефектов в области концентратора напряжений положена статистическая модель деформационного поведения ансамбля мезодефектов, ранее разработанная в «ИМСС УрО РАН». Изложено построение эволюционного уравнения для структурной деформации – деформации, вызванной появлением дефектов. Для модельного материала представлены результаты моделирования поведения дефектов в одномерном случае при одноосном растяжении бесконечной пластины с полукруглым вырезом. Численные расчеты проведены в пакете Wolfram Mathematica. 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 предельного напряжения на критическом расстоянии, соответствующем половине фундаментальной длины диссипативной структуры, совпадающей с половиной критической дистанции. Предложено обобщение определяющих соотношений на трехмерный случай. Численные расчеты проведены в конечно-элементном пакете Comsol Multiphysics. Решена задача о квазистатическом растяжении цилиндрического образца с кольцевым надрезом из титанового сплава ВТ1-0. Показано соответствие момента разрушения образца моменту инициирования локализованной структуры в ансамбле дефектов, на половине длины которой напряжение превышает временное сопротивление разрушению для данного материала.

#### **Теоретическая и практическая ценность полученных результатов**

Теоретическая ценность 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 ценность 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.

**Степень обоснованности и достоверность результатов** диссертационной работы обеспечивается, в экспериментальной части, использованием поверенных средств измерения, соблюдением методологии проведения экспериментов и обработки результатов, устойчивой повторяемостью и 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.

#### **Степень новизны полученных результатов**

Впервые предложено обобщение теории критических дистанций на случай динамического нагружения, позволяющее оценить предельное состояние образцов с концентраторами напряжений при скоростях деформации в диапазоне  $10^{-3}$ - $10^4$  1/с на основе анализа особенности распределения напряжений вблизи вершины концентратора напряжений. Предложен новый способ применения теории критических дистанций, основанный на учете процессов пластического деформирования и их зависимости от скорости деформации, позволяющий повысить точность оценки предельного состояния образцов с концентраторами напряжений в вышеуказанном диапазоне скоростей деформации. На основе моделирования локализации процессов накопления микроповреждений предложен механизм формирования критической дистанции в области концентраторов напряжений как результат развития диссипативной структуры в ансамбле дефектов.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК и проиндексированных в основных международных системах цитирования. Общее число публикаций составляет 24.

## Замечания по диссертации и автореферату

### Замечания по оформлению:

1. Согласно названию диссертации работа посвящена исследованию метода для оценки динамической прочности металлов. Однако согласно представленным задачам и результатам в работе рассматривается отдельный случай оценки предельного состояния металлических образцов с концентраторами напряжений при динамическом нагружении. Это более узкий набор задач.

2. Несмотря на то, что обоснование методики, выносимой на защиту, подробно рассмотрено в тексте диссертации, не хватает краткого описания самой методики. Было бы правильно изложить методику, например, в приложении.

3. Нарушен порядок ссылок (стр. 24-25 ссылки [52], [58]).

4. В выводах к Главе 2 указано, что «...Получены статические и динамические диаграммы деформирования образцов из исследуемых материалов при растяжении в диапазоне скоростей деформации до  $10^4 \text{ с}^{-1}$ , на основании которых были определены прочностные и деформационные характеристики материалов. Отмечено влияние скорости деформации на свойства материала. Дополнительно проанализированы экспериментальные данные из технической литературы...». Однако в действительности в Главе 2 анализа не проводится.

### Замечания по содержанию:

1. Согласно задачам, положениям, выносимым на защиту, и итогам диссертационного исследования, результаты получены для случая динамического нагружения. Однако динамическое нагружение может быть разнообразным, например, могут быть случаи постоянно растущей нагрузки или импульсной нагрузки, которые могут приводить к существенно разным результатам. Кроме того, не конкретизирована схема нагружения (например, растяжение, изгиб, кручение). При этом на стр. 56-57 приняты гипотезы обобщения применяемой в исследовании теории критических дистанций, которые позволяют оценить момент разрушения материалов. Рассматривается конкретный случай одноосного растяжения, указывается ограничение диапазона скорости деформации и ограничение диапазона длительностей импульса нагружения, а также указывается, что не рассматриваются концентраторы напряжений типа трещин. Как результаты, полученные с данными ограничениями, могут быть распространены на общий случай динамических нагрузок и образцов с концентраторами напряжений?

2. На стр. 56-57 в постановке задачи указано, что «...под динамическим нагружением в работе понимаются скорости деформации до  $10^4 \text{ с}^{-1}$ . Длина образца мала по сравнению с

длиной нагружающего импульса. В образце в течение испытания реализуется одноосное напряженно-деформированное состояние с равномерным распределением напряжений и деформаций по его длине. Несмотря на высокие скорости деформации образца, испытание может рассматриваться как квазистатическое». Непонятно, какое в итоге нагружение рассматривается в исследовании: динамическое или квазистатическое.

3. В диссертации указано как минимум пять типов характерного линейного размера в критериях разрушения, которые известны из литературы. Какие особенности имеет величина критической дистанции, полученная по результатам исследований в диссертации, по сравнению с уже известными характерными линейными размерами?

4. Результаты Главы 5 зависят от введения дополнительных параметров, например,  $k$  и  $q$  в формуле (5.32). Как эти параметры зависят от скорости деформации и можно ли их определить, не зная заранее фундаментальной длины  $l$ ?

5. В Главе 5 полученное в примере значение фундаментальной длины для ВТ1-0 соответствует значению критической дистанции для ВТ1-0 при квазистатической деформации, полученной в Главе 3 в рамках линейно-упругой задачи. При этом в Главе 3 четко показана зависимость критической дистанции от скорости деформации. Критическая дистанция, полученная в Главе 4 в рамках упругопластической задачи и предлагаемая в качестве константы материала, имеет другое значение. Значит ли это, что фундаментальная длина диссипативной структуры, как и критической дистанции, определяемая в рамках линейно-упругой модели, зависит от скорости деформации?

Указанные замечания не снижают ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

### Заключение

Диссертационная работа **Ведерниковой Алены Ильиничны** является завершенной научно-квалификационной работой, весьма актуальной и практически значимой. Новые результаты имеют серьезное теоретическое и практическое значение. Полученные в работе результаты являются обоснованными и достоверными. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация **Ведерниковой Алены Ильиничны** удовлетворяет п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор **Ведерникова Алена Ильинична** заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Отзыв подготовлен главным научным сотрудником, и.о. заведующего лабораторией мехатроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем машиноведения Российской академии наук, доктором физико-математических наук (01.02.04), членом-корреспондентом РАН Беляевым Александром Константиновичем.

Диссертационная работа **Ведерниковой Алены Ильиничны** и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании семинара по прикладным проблемам механики (совместный семинар лаборатории мехатроники и лаборатории прикладных исследований ИПМаш РАН). Присутствовало на заседании 15 человек, протокол № 5 от 26 марта 2020 года. Результаты голосования: «за» – 15 человек, «против» – 0, «воздержалось» – 0.

И.о. заведующего лабораторией мехатроники, главный научный сотрудник  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Беляев Александр Константинович

И.о. заведующего лабораторией прикладных исследований, старший научный сотрудник  
кандидат технических наук

Яковлев Юрий Алексеевич

Подписи А.К. Беляева и Ю.А. Яковлева заверяю:

Зав. сектором кадров ИПМаш РАН

В.В. Сталь

27.04.2020



**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН)

Адрес: 199178, Санкт Петербург, Васильевский остров, Большой проспект, д. 61

Телефон : +7 (812) 321-4778

e-mail: ipmash.ran@gmail.com