

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СЕЛЮТИНА НИНА СЕРГЕЕВНА

**РАЗРУШЕНИЕ И ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ
НАГРУЗКАХ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук

член-корреспондент РАН

профессор Ю.В. Петров

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН
профессор **Петров Юрий Викторович**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Рутман Юрий Лазаревич

Профессор-консультант кафедры механики
Санкт-Петербургского государственного архитектурно-
строительного университета

Доктор физико-математических наук, доцент

Помыткин Сергей Павлович

Профессор кафедры высшей математики и механики
Санкт-Петербургского государственного университета
аэрокосмического приборостроения

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»

Защита состоится “___” _____ 2016 г. в __ часов на заседании
диссертационного совета Д212.232.30 на базе Санкт-Петербургского государственного
университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский
пр. 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького
Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-
Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте
<https://disser.spbu.ru/files/disser2/disser/mNrRLhjCcq.pdf>

Автореферат разослан “___” _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Кустова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В современном мире для уменьшения отказов конструкции необходимо иметь наиболее полное представление о возможных условиях эксплуатации. Особенно острым вопросом остается поведение конструкций при динамических нагрузках. На основе дорогостоящих натуральных испытаний или экспериментов в лабораторных условиях, устанавливаются критические напряжения (предел текучести, предел прочности), используемые для теоретических расчетов, с большим коэффициентом запаса по государственному стандарту. Полученные результаты не всегда удовлетворяют реальному поведению конструкции под действием ударной нагрузки.

Введение наиболее фундаментального подхода, описывающего поведение критических характеристик материала при динамических нагрузках, в инженерной практике до сих пор является незавершенной задачей. При этом новый фундаментальный подход для инженерной практики должен не только описывать наблюдаемые эффекты, но и иметь измеряемые физически обоснованные параметры.

В данной работе применяется критерий инкубационного времени (в виде критериев разрушения и текучести), описывающий динамические эффекты поведения прочности при хрупком разрушении и предела текучести при пластическом деформировании. Преимуществом подхода является единственный макроскопический временной параметр, не зависящий от геометрии, способа нагрузки и феноменологически связанный со структурными изменениями в материале на микроуровне. Предлагаемый подход не только объясняет, в рамках общего механизма концепции инкубационного времени, наблюдаемые в экспериментах динамические эффекты прочности и предела текучести, но и дает простые схемы измерения внедренной временной характеристики. В работе предлагается интерпретировать влияние наполнителя, металлических волокон на прочностные свойства материала в широком спектре внешних воздействий (при динамических нагрузках изменение наиболее ярко выражено) на основе концепции инкубационного времени.

Важная часть работы посвящена введению феноменологической модели деформационной кривой упругопластических материалов для различных скоростей деформации на основе концепции инкубационного времени. В данной работе предлагается применять используемую расчетную модель деформационной кривой к

мелкозернистым и крупнозернистым металлам и их сплавам. Исследование поведения предела текучести металлов при текущей пластической деформации на основе концепции инкубационного времени расширяет возможности расчетных схем в инженерной практике.

Актуальность темы заключается в необходимости развития методов расчета предельных нагрузок при квазихрупком разрушении и процессов текучести при пластическом деформировании под действием ударно-волновых нагрузок на базе физически обоснованных и измеримых параметров материала, учитывающих переход между статическими и динамическими воздействиями, а также в потребности исследований принципиальных динамических эффектов при разрушении и пластическом деформировании.

Предметом исследования является поведение предела прочности материала в зависимости от скорости деформации при влиянии наполнителя, армирующих структур, масштабного уровня разрушения, а также деформационной кривой упругопластических материалов под действием ударно-волновых нагрузок после наступления макроскопической текучести.

Целью работы является установка расчетных схем динамического предела прочности материала при хрупком разрушении и деформационной кривой упругопластических тел на основе общего механизма концепции инкубационного времени под действием широкого интервала скоростей деформации.

В работе решаются следующие задачи:

1. Дать развитие единого подхода, предназначенного для дальнейшего внедрения в инженерной практике, для расчетов критических напряжений (предел текучести, предел хрупкого разрушения) на одной кривой при медленных и быстрых воздействиях по данным эксперимента с помощью простых схем, основанных на введении физически обоснованных и измеримых параметров.
2. Обосновать эффекты неустойчивого поведения динамической прочности материала при введении заполнителя, металлических волокон и изучить поведение прочности бетона в рамках различных определений масштабного уровня разрушения.
3. Исследовать физический смысл параметров феноменологической модели пластического деформирования на примере динамического эффекта предела

текучести («зуб текучести») и проанализировать деформационную кривую в широком диапазоне скоростей деформации.

4. Обосновать эмпирический закон Джонсона-Кука в рамках структурно-временного подхода, привести расчет предела текучести ряда материалов при высокоскоростных воздействиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Определение динамического предела прочности ряда материалов при хрупком разрушении в зависимости от скорости деформации;
2. Объяснение неустойчивого поведения динамической прочности бетона при введении заполнителя, металлических волокон при действии высокоскоростных нагрузок;
3. Результаты исследований размерного и масштабного эффектов прочности бетонов при ударно-волновых нагрузках;
4. Анализ деформационного поведения чистых металлов с динамическим эффектом предела текучести («зуб текучести») с точки зрения дислокационной модели пластичности;
5. Результаты исследований деформационной кривой в широком диапазоне скоростей деформации для крупнозернистых и мелкозернистых металлов;
6. Обоснование эмпирического закона Джонсона-Кука в рамках структурно-временного подхода.
7. Прогнозирование динамического предела текучести по критерию инкубационного времени для микро- и нанокристаллического никеля.

Методы исследования основываются на апробированных физических моделях. Вычисления критических напряжений (предел текучести при пластическом деформировании и предел прочности при хрупком разрушении) и феноменологической деформационной кривой осуществляются на основе концепции инкубационного времени.

Достоверность результатов обеспечивается хорошим соответствием теоретических кривых (скоростных зависимостей пределов прочности и текучести, феноменологических деформационных кривых), рассчитанных на основе концепции инкубационного времени, с экспериментальными данными, широко обсуждаемыми в литературе; а также согласованием с наблюдаемыми динамическими эффектами.

Предлагаемая концепция инкубационного времени для процессов квазихрупкого разрушения, устанавливающая связь между статическими и динамическими воздействиями, проверялась с помощью сравнения полученных оценок предельных характеристик разрушения конкретных материалов с данными, приведенными в литературе.

Результаты разработанной феноменологической модели и схемы расчета динамического предела текучести были сопоставлены с известными кинетическими моделями роста дислокаций, объясняющими неустойчивую природу пластической деформации.

Научная новизна

На основе концепции инкубационного времени предложен подход качественной оценки поведения прочности ряда конструкционных и природных материалов при ударно-волновых нагрузках. Предлагаемая интерпретация процесса разрушения в широком интервале внешних нагрузок, отличается от классических представлений, опирающихся на статическую прочность, тем, что реакция материала на внешнее воздействие описывается новым измеряемым свойством материала (инкубационное время), не зависящим от геометрии образца и истории воздействия. Структурная чувствительность нового параметра позволяет анализировать влияние структурных изменений на прочностные свойства материала и дает возможность выбора оптимальной модификации материала в зависимости от требуемых условий эксплуатации, как при статических, так и при динамических воздействиях.

Впервые получена расчетная схема деформационной кривой при пластическом деформировании материала на основе общего критерия инкубационного времени и дополнительного условия пластичности, включающего процесс релаксации упругих напряжений в отличие от классических критериев пластичности. Предлагаемая модель позволяет построить деформационную кривую в широком диапазоне внешних воздействий не только в случае проявления динамического эффекта предела прочности (явление «зуба текучести»), наблюдаемого в чистых металлах и наноматериалах, но и для классических зависимостей металлов и сплавов, где время процесса релаксации напряжений меньше, чем время нагрузки материала. Стоит отметить, что для расчетов деформационной кривой по интегральной модели пластичности необходимо знать только инкубационное время, оцениваемое по скоростным зависимостям предела

текучести. Обнаружена связь инкубационного времени и времени релаксации, рассчитанного по дислокационной модели.

Практическая ценность

Критерий инкубационного времени дает простую и удобную схему расчета динамической прочности материала в широком интервале нагрузок. Введение инкубационного времени разрушения как свойства материала способствует описанию динамических эффектов под влиянием гетерогенности структуры бетона (наличие наполнителя и армирующих структур) в зависимости от выбора условий эксплуатации. Это позволяет решить проблему колейности дорожного покрытия выбором для крупнозернистых асфальтовых покрытий, предназначенных для эксплуатации пассажирского транспорта, материалов с высокими прочностными показателями при динамических нагрузках и для мелкозернистых покрытий, рассчитанных на небольшие скорости грузового транспорта, материалов с высокой статической прочностью.

Построенная феноменологическая модель пластического деформирования позволяет прогнозировать деформационную кривую как функцию процесса для широкого спектра нагрузок (при квазистатических и динамических воздействиях). Использование интегральной модели пластичности для широкого интервала скоростей деформаций по сравнению с эмпирическими моделями (закон Джонсона-Кука), применяемыми при обработке металлов резанием, полезно как более точный и удобный метод оценки критического напряжения для высоких скоростей деформаций.

Знания о критических напряжениях материала для процессов, время которых значительно меньше структурного времени материала при хрупком разрушении и пластичности (соответствующих динамическому деформированию), могут быть применены при эксплуатации железобетонных конструкций, при проектировании асфальтовых покрытий, а также при обработке металлов резанием.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования были даны для обсуждения на следующих международных, российских конференциях и научных семинарах: XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2013); Первом Международном научно-практическом семинаре «Системы комплексной безопасности и физической защиты» (Санкт-Петербург, 2013); Девятой научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывоопасности и противодействия

терроризму» (Санкт-Петербург, 2014); Пятой международной научно-технической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении» (Киев, 2014); VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Чебоксары, 2014); X Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывоопасности и противодействия терроризму» (Санкт-Петербург, 2015); XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике (Казань, 2015); 11th International DYMAT Conference (Lugano, 2015); XXVI Международной конференции «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» (Санкт-Петербург, 2015); XXII Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2016); LVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Севастополь, 2016); 21th European Conference on Fracture (Catania, 2016); научном совете РАН по горению и взрыву в Санкт-Петербургском Научном центре РАН (март 2016); семинарах кафедры теории упругости математико-механического факультета СПбГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 статей [1–13], в том числе 6 работ ([1–6]) в журналах рекомендованных ВАК РФ, 6 из них включены в систему цитирования Scopus ([1–6]).

В работах [1,2,4–6,11,13] использована общая концепция инкубационного времени для процессов разрушения и пластического деформирования, предложенная Петровым Ю.В.

В статье [1] Смирнов И. и Евстифеев А. получили результаты по динамическому эффекту инверсии прочности между армированным бетоном и габбро-диабазом и эффекту влагонасыщенности бетона при высоких скоростях деформации. В работах [1,2,13] Селютина Н.С. проводила расчеты прочности бетона с наполнителем в широком диапазоне скоростей деформации и объяснила наблюдаемый эффект инверсии прочности между бетоном с наполнителем и агрегатным бетоном. В работе [3] Петрову Ю.В. принадлежит концепция многомасштабности процесса разрушения. В статьях [3,10] Селютиной Н.С. принадлежит исследование предложенной концепции на высоких скоростях деформации для горных пород и бетона.

В работе [4] Кадони Е. принадлежат экспериментальные данные при статическом и динамическом деформировании стали. В статье [4] Петрову Ю.В. принадлежит модель расчета деформационной кривой стали при ударно-волновых нагрузках. В статье [4] Селютиной Н.С. выполнен расчет неустойчивого поведения

пластической деформации чистого железа. В работах [4,5,6,11,13] Бородину И.Н. и Майеру А.Е. принадлежит формулировка основных уравнений теории дислокаций.

В работах [5,6,11,13]. Селютина Н.С. предложила использовать модель расчета деформационной кривой не только для чистых металлов, но и для сплавов. В работах [2,3,5,6,7–10,12,13] Селютина Н.С. полностью выполнила численные расчеты и сравнивала их с экспериментальными данными. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, автор в равной степени участвовал в разработке основных подходов и в реализации численных расчетов.

Структура и объем работы. Диссертация, насчитывающая 101 страницу, состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 157 наименований. Работа включает в себя 21 рисунок и 9 таблиц.

Поддержка. Исследования автора на различных этапах работы поддерживались грантом Санкт-Петербургского государственного университета 6.38.243.2014; и грантами РФФИ (14-01-00814;16-51-53077; 16-31-00254), фондом Марии Кюри TAMER №610547 и программой №25 Президиума РАН.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе I обсуждаются ключевые нелокальные временные критерии хрупкого разрушения и пластического течения для расчета прочности и предела текучести, соответственно, при ударно-волновых нагрузках. Введение фундаментального “импульсного” критерия Петровым Ю.В., Морозовым Н.Ф. Уткиным А.А. (Ю.В. Петров и А.А. Уткин 1987, 1989; Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Уткин 1988,1989; Н.Ф. Морозов и Ю.В. Петров 1990) сделало возможным рассматривать процесс разрушения на пространственно-временном масштабе. Стоит отметить, что характерный структурный линейный размер среды не только описывал пространственную шкалу, но и определял один из параметров временной шкалы.

Физическая интерпретация динамического процесса разрушения на основе квантовых аналогий Ю.В. Петров (1991) позволила ввести инкубационное время как независимый временной параметр, характеризующий динамические особенности хрупкого разрушения материала. Структурные параметры в рамках этого подхода (Ю.В. Петров (1991)) рассматривались без спецификации физического смысла как феноменологические характеристики пространственно-временной элементарной ячейки разрушения, связанной с протеканием подготовительных процессов разрыва на

фиксированном масштабном уровне. Определение пространственно-временной ячейки разрушения на основе двух независимых параметров позволило сформулировать: 1) структурно-временной подход для хрупкого разрушения, предложенного Ю.В. Петровым и Н.Ф. Морозовым (Ю.В. Петров и Н.Ф. Морозов (1994), Ю.В. Петров (1996)); 2) макроскопический критерий текучести металлов, введенный А.А. Груздковым и Ю.В. Петровым (А.А. Груздков и Ю.В. Петров (1999)); 3) кинетическую интерпретацию инкубационных процессов (А.В. Каштанов и Ю.В. Петров (2007)). Для бездефектных материалов в обобщенной форме применяется для описания динамических эффектов (Ю.В. Петров (1991), А.А. Груздков и Ю.В. Петров (1991), Ю.В. Петров и Н.Ф. Морозов (1994), Н.Ф. Морозов и Ю.В. Петров (2000); А.А. Груздков, Ю.В. Петров, В.И. Смирнов (2002); Ю.В. Петров (2004); Н.Ф. Морозов и Ю.В. Петров (2006), Ю.В. Петров (2014)) хрупкого разрушения, текучести:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\Sigma(s)}{\sigma_c} \right)^\alpha ds \leq 1, \text{ где } \tau - \text{инкубационное время, связанное с периодом подготовки}$$

материала к разрушению ($\tau = \tau_{fr}$) (моменту начала текучести ($\tau = \tau_y$)) и характеризующее скоростную чувствительность материала; $\Sigma(t)$ – некоторая временная зависимость роста среднего напряжения в образце; σ_c – статический предел локального силового поля (для текучести σ_y^0); α – характеризует чувствительность материала к уровню интенсивности (амплитуде) силового поля, приводящего к разрушению (или моменту начала текучести). Условие $\alpha \geq 1$ выполняется для твердых тел. Случай $\alpha = 1$ имеет физическое обоснование, как будет показано ниже. Следует отметить, что инкубационное время является свойством материала, не связанным с геометрией испытуемого образца, способа применяемой нагрузки и характеризует процесс разрушения на данном масштабном уровне.

В главе I объясняется основная идея концепции инкубационного времени. Показано, что релаксационная природа инкубационного времени, позволяет рассматривать чувствительность процессов разрушения и пластического деформирования при ударно-волновых нагрузках к параметрам внешнего воздействия. При этом в рамках единого механизма инкубационного времени, как независимый параметр внешнего воздействия и геометрии образца, учитывается различная физическая интерпретация каждого из процессов.

В главе I предлагается расчетная схема действующих напряжений в образце σ (5) при пластическом деформировании (феноменологическая деформационная кривая) на основе предположения о релаксации сдвиговых напряжений $\Sigma_G(t)$ на стадии пластического деформирования (после наступления момента текучести t_y), предложенного Петровым Ю.В.:

$$\frac{1}{\tau_y} \int_{t-\tau_y}^t \left(\frac{\Sigma_G(s)\gamma(t)}{\sigma_y^0} \right)^\alpha ds = 1, \quad (1)$$

где функция релаксации сдвиговых напряжений изменяется согласно условию:

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & \frac{1}{\tau_y} \int_{t-\tau_y}^t \left(\frac{\Sigma_G(s)}{\sigma_y^0} \right)^\alpha ds \leq 1, \\ \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_y} \int_{t-\tau_y}^t \left(\frac{\Sigma_G(s)}{\sigma_y^0} \right)^\alpha ds \right)^{\frac{1}{\alpha}}}, & \frac{1}{\tau_y} \int_{t-\tau_y}^t \left(\frac{\Sigma_G(s)}{\sigma_y^0} \right)^\alpha ds > 1. \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma(\varepsilon(t)) = \begin{cases} 2G\varepsilon(t), & t < t_y, \\ 2G \left[\gamma \left(\frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}} \right) \right]^{1-\beta} \varepsilon(t), & t \geq t_y, \end{cases} \quad (3)$$

где компонента $G \left[\gamma \left(\frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}} \right) \right]^{1-\beta}$ характеризует процесс релаксации напряжений после начала текучести t_y и β – скалярный параметр, описывающий степень упрочнения материала.

Предлагаемая модель была верифицирована для моделирования чувствительности деформационной диаграммы к проявлению эффекта «зуба текучести» в нитевидных металлических кристаллах при квазистатическом воздействии и для других металлов и Селютиной Н.С.¹ [4-7,11-13] для крупно- и мелкозернистых металлов (сталь, никель, медь, железо, золото).

¹ Selyutina N., Borodin E.N., Petrov Y., Mayer A.E. The definition of characteristic times of plastic relaxation by dislocation slip and grain boundary sliding in copper and nickel // International Journal of Plasticity. 2016. Vol. 82. P. 97–111. DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.02.004.

В главе II исследуется эффективность концепции инкубационного времени применительно к хрупкому разрушению горных пород и бетона при кратковременных нагрузках. В Разделе 2.1 дается метод определения предела прочности при ударно-волновых нагрузках как параметра процесса на основе оценки инкубационного времени. Показано, что введение инкубационного времени качественно (и количественно) интерпретирует поведение прочности, как при статической, так и при динамической кратковременной нагрузке.

В Разделе 2.2 показано поведение прочностных свойств бетона с наполнителем и нерегулярно армированного бетона в широком интервале скоростей деформации, усиливающихся с увеличением скорости внешнего воздействия. В работе рассмотрено влияние заполнителя на прочностные свойства бетона на основе экспериментальных данных D.L. Grote, S.W. Park, M. Zhou 2001 (Рисунок 1).

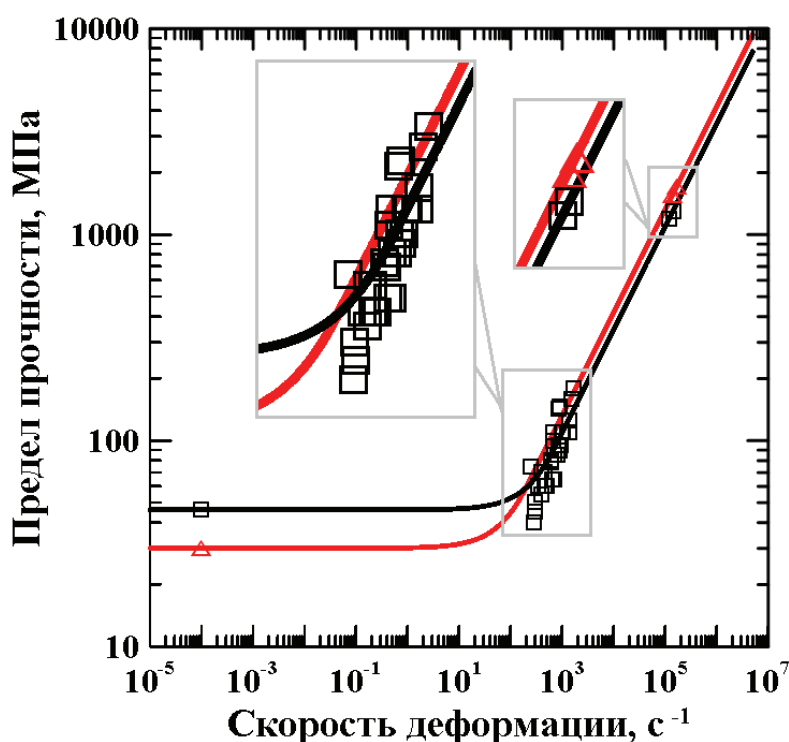


Рисунок 1. Поведение прочности агрегатного бетона (красная кривая) и бетона с заполнителем (черная кривая) по критерию инкубационного времени (2.4) в широком диапазоне скоростей деформации $10^{-5} - 10^7 \text{ с}^{-1}$ по экспериментальным данным D.L. Grote, S.W. Park, M. Zhou 2001 (агрегатный бетон – красные треугольники; бетон с заполнителем – черные квадраты).

Наблюдаемый эффект инверсии прочности агрегатного бетона и бетона с наполнителем на высоких скоростях деформации на Рисунке 1 объясняется за счет доминирующей роли влияния релаксационных процессов в материале, предшествующих развитию микроструктурных дефектов в материале. В работе исследуются прочностные свойства армированного бетона стальными волокнами в широком интервале скоростей деформации (Таблица 1) на основе экспериментальных данных Y. Nao, H. Nao (2013) и T.C. Yet, R. Hamid, M. Kasamuri (2012). Полученный эффект монотонного увеличения инкубационного времени с добавлением армирующих структур (Таблица 1) с точки зрения структурно-временного подхода показывает увеличение периода подготовки материала к разрушению, что приводит к ослаблению скорости процессов роста микродефектов в структуре материала. Обнаружено, что увеличение предела прочности при высокоскоростном воздействии будет наблюдаться для бетона с большим инкубационным временем.

Таблица 1. Свойства бетонов Y. Nao, H. Nao (2013) и T.C. Yet, R. Hamid, M. Kasamuri (2012).

Бетон	Y. Nao, H. Nao (2013)				T.C. Yet, R. Hamid, M. Kasamuri (2012)			
	0%	0.5%	1%	1.5%	0%	0.5 %	1%	1.5%
Статическая прочность, МПа	35.5	40.6	43.3	44.2	51	66	70	74.4
Инкубационное время, мкс	17.8	21.4	32	40	8.2	11.3	14.6	13.5

В Разделе 2.3. анализируется поведение прочности бетона при ударно-волновых нагрузках в рамках концепции многоуровневого разрушения. Проведено исследование эффекта роста прочности бетона с увеличением геометрических размеров. Обнаружено, что следует различать размерный эффект и масштабный эффект прочности.

В главе III рассматриваются процессы пластического деформирования металлов при ударно-волновых воздействиях в рамках концепции инкубационного времени. В Разделе 3.1. исследуется поведение инкубационного времени и динамического предела текучести для образцов с различной структурой, изготовленных из одного вида металла. Показано, что параметр инкубационного времени позволяет качественно наблюдать условный переход, до наступления которого материал имеет постоянный предел текучести, и, начиная с которого, предел текучести монотонно возрастает со скоростью деформации.

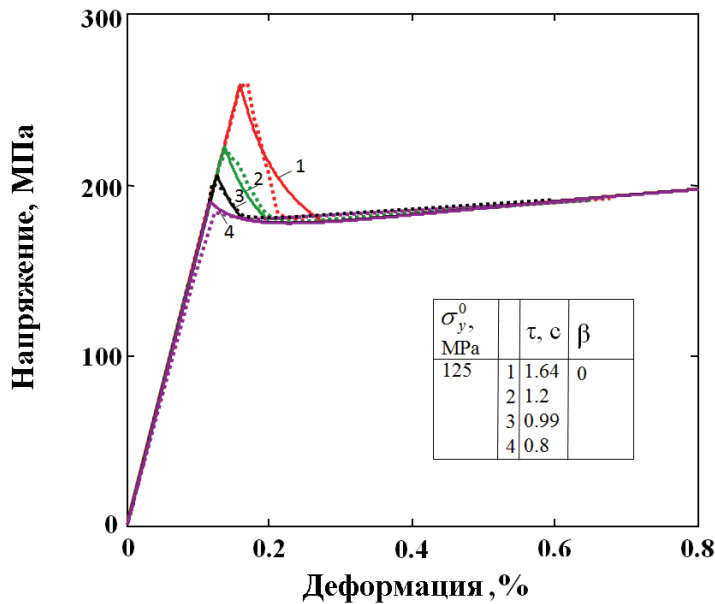


Рисунок 2. Зависимости напряжение-деформация по расчетной модели (1.16), (1.17), (1.19) для железа G.T. Nahn (1962) с одним параметром инкубационного времени. Начальная плотность дислокаций для кривых (1) 10^2 см^{-2} , (2) 10^3 см^{-2} , (3) 10^5 см^{-2} , (4) 10^7 см^{-2} .

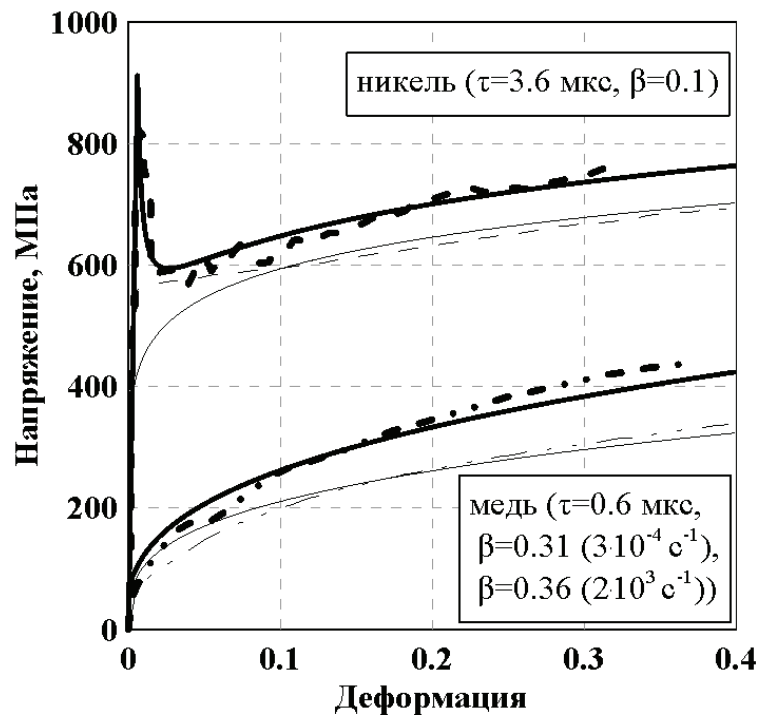


Рисунок.3. Зависимость напряжение-деформация для никеля и меди при скоростях деформации $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (тонкие линии) и $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (жирные линии) по экспериментальным данным N.P. Gurao, R. Karoor, S. Suwas (2010), показанных штриховой (никель) и штрихпунктирной (медь) линией на основе модели (1–3).

В Разделе 3.2. на основе расчетной схемы деформационной кривой (1–3) анализируется эффект «зуба текучести», проявляющийся на диаграммах нитевидных кристаллов меди, железа и фторида лития на скоростях деформации порядка $10^{-5} \text{ с}^{-1} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Проводится сравнение инкубационного времени, полученного по интегральному критерию текучести, с результатами оценки времени релаксации на основе известных кинетическими моделями роста дислокаций, объясняющими неустойчивую природу пластической деформации. Представленная на Рисунке 2 зависимость напряжение-деформация железа (G.T. Nahn (1962)), построенная на скоростях деформации порядка 10^{-3} с^{-1} на основе модели (1–3), показывает уменьшение инкубационного времени с увеличением плотности дислокаций: 1 кривая – 10 см^{-2} (2.15 с), 2 кривая – 10^3 см^{-2} (1.55 с), 3 кривая – 10^5 см^{-2} (1.26 с), 4 кривая – 10^7 см^{-2} (1.06 с) и рост зуба текучести. С точки зрения теории дислокаций, увеличение эффекта «дислокационного голодания» также наблюдалось уменьшение времени релаксации напряжений. Показано преимущество оценки динамического предела текучести на основе концепции инкубационного времени относительно дислокационной теории, состоящее в использовании простой расчетной схемы, содержащей один дополнительный параметр материала (инкубационное время).

В Разделе 3.3. Прогнозируется устойчивое и неустойчивое поведение пластической деформации, проявляющееся на диаграммах мелкозернистых металлов в широком интервале скоростей деформации. На Рисунке 3 рассмотрены теоретические кривые, построенные по расчетной схеме (1–3) для никеля $\sigma_y^0 = 380 \text{ МПа}$, $G = 76 \text{ ГПа}$, $\tau_y = 3.6 \text{ мкс}$ и меди $\sigma_y^0 = 40 \text{ МПа}$, $G = 42 \text{ ГПа}$, $\tau_y = 0.6 \text{ мкс}$. Хорошее соответствие теоретических кривых с экспериментальными данными дает описание явления «зуба текучести» для никеля при высокой скорости деформации $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и процесс механического упрочнения меди (монотонное увеличение «зуба текучести» совместно с увеличением скорости деформации). С другой стороны, схема (1–3) позволила описать при динамических воздействиях «зуб текучести» при деформировании никеля и его отсутствие при деформировании меди. Наблюдается, что расчетную схему (1–3) феноменологической кривой также можно использовать для материалов без проявления зуба текучести (диаграмма для меди на Рисунке 3) в широком диапазоне скоростей деформаций. Показано, что деформационная диаграмма материала является кривой процесса в отличие от классических представлений о поведении упругопластических тел.

В Разделе 3.4. проводится сравнение модели инкубационного времени с эмпирической моделью Джонсона-Кука, широко используемой при обработке металлов резанием (Рисунок 4). Показано, что динамический предел текучести в рамках концепции инкубационного времени лучше оценивается относительно классической (G.R. Johnson, W.H. Cook (1983), (1985)) и модифицированной (H.Couque, R.Boulanger, F. Bornet (2006)) моделей Джонсона-Кука.

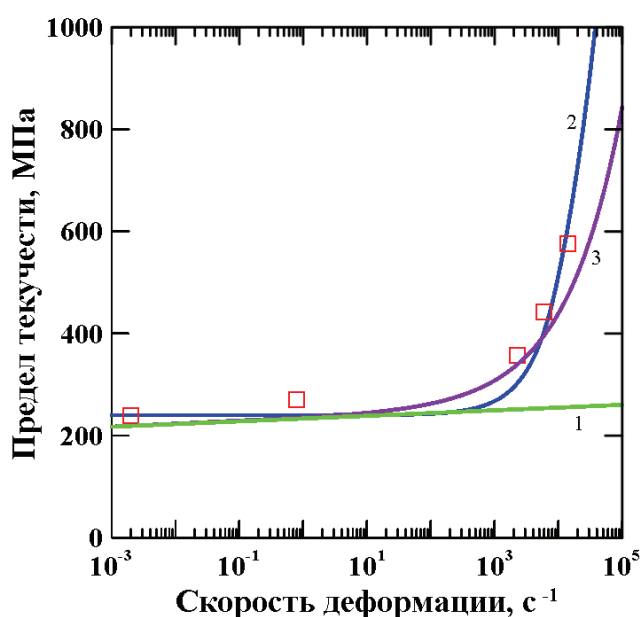


Рисунок 4. Поведение предела текучести в широком диапазоне скоростей деформаций для никеля по критерию инкубационного времени (синяя кривая 2), моделей Джонсона-Кука классической (фиолетовая кривая 3) и модифицированной (зеленая кривая 1) на основе экспериментальных данных Н. Couque (2014).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Исследовано поведение прочности материала при квазихрупком разрушении и пластическом деформировании при ударно-волновых нагрузках на основе единой концепции инкубационного времени. Установлен алгоритм расчета предела прочности и предела текучести при динамических воздействиях.
2. Представлены результаты расчета предела прочности бетона на основе концепции инкубационного времени разрушения при введении заполнителя, металлических волокон. Объясняется эффект инверсии прочности на высоких скоростях деформации за счет доминирующей роли релаксационных процессов в материале, предшествующих развитию микроструктурных дефектов.

3. Предложена феноменологическая модель пластического деформирования для чистых металлов. Показано, что полученную методику можно также применять для крупнозернистых и мелкозернистых металлов для широкого спектра внешних воздействий. Используемая модель учитывает явление «зуба текучести» и его отсутствие (классическая деформационная кривая), что позволяет ее использовать для различных материалов.
4. Проведено сравнение моделей Джонсона-Кука и интегрального критерия текучести (1) в определении предела текучести материала при высокоскоростном воздействии. Получены характеристики классической модели Джонсона-Кука через параметры интегрального критерия текучести. Выявлено, что при высокоскоростном воздействии лучше работает интегральный критерий текучести.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Petrov Y., Smirnov I., Evstifeev A., Selyutina N. Temporal peculiarities of brittle fracture of rocks and concrete // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2013. Vol. 24. P. 112–118. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.12.
2. Petrov Y., Selyutina N. Dynamic behaviour of concrete and mortar at high strain rates // *Materials Physics and Mechanics*. 2013. Vol. 18. P. 101–107.
3. Petrov Y., Selyutina N.. Scale and Size Effects in Dynamic Fracture of Concretes and Rocks // *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 94. 04005. DOI: 10.1051/epjconf/20159404005.
4. Borodin E., Petrov Y., Cadoni E., Selyutina N. Relaxation Model for Dynamic Plastic Deformation of Materials // *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 94. 04039. DOI: 10.1051/epjconf/20159404039.
5. Borodin E.N., Selyutina N.S., Petrov Yu.V. Determining characteristic plastic-relaxation times using micro- and nanocrystalline nickel as an example // *Doklady Physics*. 2016. Vol. 61. № 3. P.143–146. DOI: 10.1134/S1028335816030095.
6. Borodin E.N., Selyutina N.S., Petrov Yu.V., Mayer A.E. Dependence of relaxation times on the material microstructure for different mechanisms of plasticity // *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 26. P.42–44.

Публикации в других изданиях:

7. Селютина Н.С. Построение зуба текучести при растяжении нитевидного кристалла меди, используя критерий инкубационного времени и релаксационной функции напряжений // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2013. С. 424–425.
8. Селютина Н.С. Влияние насыщения водой бетона на его прочность при динамическом нагружении // Труды девятой научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывоопасности и противодействия терроризму», Санкт-Петербург, 2014. – С. 146–154.
9. Селютина Н.С. Обсуждение явлений прочности бетона при динамическом нагружении // Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела, часть 2, под редакцией Н.Ф.Морозова, Б.Г.Миронова, А.В. Манжирова, Чебоксары 2014. – С. 185–187.
10. Селютина Н.С. Влияние масштабного уровня разрушения на прочность бетона при динамическом нагружении // Сборник докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике. 2015. С. 3395–3398.
11. Селютина Н.С., Бородин И.Н., Петров Ю.В. Релаксационная модель пластического деформирования металлов // Сборник докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике. 2015. С. 3399–3401.
12. Селютина Н.С. Поведение предела текучести металлов при динамическом нагружении на основе релаксационной модели пластичности // Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций XXVI Международная конференция. 2015. С. 306–307.
13. Бородин И.Н., Селютина Н.С., Петров Ю.В., Майер А.Е. Зависимость характерных времен релаксации от структуры материала для различных механизмов пластичности // Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций XXVI Международная конференция. 2015. С.70–72.

Подписано в печать 01.07.2016 Формат 60x84^{1/16} Цифровая Печ.л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ № 27/06 печать

Типография «Фалкон Принт»
(197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д. 41, литер Б,
сайт: falconprint.ru)

