

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Волкова Александра Евгеньевича на диссертацию Селютиной Нины Сергеевны на тему «Динамическая деформация и разрушение материалов на основе релаксационных моделей необратимого деформирования», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация посвящена **актуальной** теме создания теоретических моделей, способных в рамках единой модели описывать пластическую деформацию и разрушение материалов самой разной природы (стекло, керамика, металлы, композиты) в условиях действия как статических так и быстро меняющихся динамических нагрузок. Очевидно, что такая модель имеет большое **фундаментально-научное значение**, поскольку развивает представления механики материалов и учитывает общие закономерности процессов деформации и разрушения. Вместе с тем модель обладает предсказательной силой, так как позволяет рассчитывать поведение материалов для различных скоростей деформирования. **Практическое значение** диссертационной работы обусловлено все более широким использованием материалов в условиях высокоскоростного воздействия, которое реализуется в различных приложениях, а также применяется в современных технологических процессах. К тому же включенные в модель новые материальные параметры создают основу для классификации материалов по их свойствам сопротивляться динамическим нагрузкам. Такая классификация может также использоваться при установлении технологических параметров термической, механической, термомеханической обработки, а также оптимизирования строения композитов или химического состава сплавов.

**Достоверность** результатов обусловлена использованием теоретических и экспериментальных подходов, апробированных в механике деформируемого твердого тела, соответствием результатов с данными экспериментов и с результатами расчетов, полученных в рамках альтернативных моделей.

**Апробация.** Результаты, представленные в диссертации, доложены на ряде российских и международных конференций, на семинарах кафедры Теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета. Они опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах

Главное достижение диссертации – решение задачи создания модели, описывающих реакции материала (деформацию и разрушение) на статические и динамические нагрузки в рамках единого подхода. Для этой цели используется апробированный ранее структурно-временной подход, в рамках которого введено независимое от процесса деформации и размеров образца характерное время релаксации напряжений. Исследованы скоростные зависимости прочности, вязкости разрушения, энергии разрушения. Разработана релаксационная модель пластичности как обобщение структурно-временного критерия текучести. Показано, что структурно-временной подход позволяет рассчитывать различные параметры, описывающие динамическую прочность самых разных материалов, в частности, динамический предел прочности, динамическую трещиностойкость,

динамическую работу разрушения. Автор убедительно показал, что «параметр временной чувствительности материала, вводимый в релаксационной модели пластичности, может служить хорошей мерой, отражающей произведенные над материалом технологические действия и соответствующей мерой структурных изменений.»

Наиболее важными конкретными результатами являются следующие.

Дано объяснение сравнительным зависимостям динамической прочности от скорости деформирования для ряда структурно различных материалов, например, бетонов, гранита, известняков и песчаников, содержащим различное количество воды или композитов, отличающихся типом армирования. Дано объяснение тем фактам, что материал, имеющий более низкую статическую прочность может иметь более высокую динамическую прочность. Установлено влияние ряда факторов на инкубационное время разрушения, характеризующего скоростную чувствительность материала и через него на динамическую прочность, таких как водонасыщенность структурно различных бетонов и горных пород; массовая доля льда мерзлого грунта; материал и форма армирующего волокна композитов фибробетонов. Теоретически объяснено, почему большую прочность имеет бетон с наиболее насыщенной водой структурой. Сформулированы рекомендации по способу армирования фибробетона для достижения высокой динамической прочности.

Обнаружено отсутствие влияния длины разреза образца горной породы на ее инкубационное время разрушения в испытаниях на трехточечный изгиб. Выявлены различия в определении инкубационного времени по силовому и энергетическому критериям инкубационного времени на основе испытаний на трехточечный изгиб.

Впервые предложена релаксационная модель пластичности для прогнозирования монотонных и немонотонных зависимостей деформации материала при различных скоростях деформации. Для данной модели установлены схемы определения ее по диаграммам деформирования материала. Найдены типы деформационных реакций материала на нагрузку, обусловленные различными скоростями деформирования, температурами, размерами зерен, которые может моделировать релаксационная модель пластичности. Показано, что предлагаемая релаксационная модель пластичности для гомогенных материалов в широком диапазоне скоростей деформации основана на использовании инвариантных параметров модели к истории нагружения материала. Показано и обосновано отсутствие полной инвариантности параметров других динамических моделей пластичности, таких как модели Джонсона-Кука, Зерилли-Армстронга, Русинька-Клепачко и их модификаций, по отношению к истории нагружения материала.

В рамках развиваемого подхода предложена модель циклического деформирования металлов. Выполнено прогнозирование стабилизации деформационной петли графика пластической деформации. Установлены характерные времена релаксации для процесса циклического деформирования стали 50, подвергнутой термической обработке и комбинированной деформационно-термической обработке. Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование эффекта стабилизации петли деформационно-силового гистерезиса для стали 45. Впервые показано, что предлагаемая модель циклического деформирования в режиме малоциклового усталости для марки стали

45 успешно прогнозирует процесс деформирования и эффект стабилизации петли пластической деформации. Теоретически исследовано поведение предела текучести стали и ряда алюминиевых сплавов в широком диапазоне скоростей деформации

Разработана релаксационная модель необратимого деформирования и разрушения для металлических композитов-ламинатов. Модель описывает многостадийность необратимой деформации и немонотонность процесса деформирования, как при статических, так и при динамических нагрузках.

#### **Замечания.**

1. Не исследована связь инкубационного времени разрушения со структурой материала, а определение его значения производится только из опытов по динамическому нагружению. Таким образом, рекомендация, как увеличить инкубационное время, может быть дана только после проведения этих опытов.
2. В работе выполнено моделирование диаграмм деформации с зубом текучести для металлов и скоростей деформации порядка 1000 с<sup>-1</sup>. Никак не комментируется тот факт, что зуб текучести может наблюдаться и при низких скоростях деформирования.
3. В таблицах 27, 28 параметр  $\beta$  зависит от скорости деформирования. Это противоречит принципу построения модели, параметры которой – зависят только от материала.
4. Во всех модельных экспериментах по циклическому деформированию параметр  $\beta = 0$ . Почему?
5. Структурно-временной критерий разрушения есть необходимое и достаточное условие разрушения. Поэтому в условии (1) должно быть равенство, а не неравенство, поскольку пока равенство не достигнуто, разрушения не будет. Это же замечание относится к другим рассматриваемым в работе критериям, например, (19).
6. С.74. На многих рисунках (в частности на рис. 14, 16, 18, 25) большинство точек сливается. Следовало бы отдельно показать графики для скоростей от  $10^1$  до  $10^4$  с<sup>-1</sup>.
7. С.91. Не обсуждается плохое соответствие (рис.25) расчетных и экспериментальных данных зависимостей предела прочности от скорости деформации мерзлого песчаного грунта.
8. В тексте диссертации имеется очень много грамматических и синтаксических ошибок, несогласованных предложений. Наиболее заметны следующие.
  - а. С.17. В отличие от структурно-временного подхода, являющегося основой для формулировки релаксационной модели пластичности, в которой явно вводится функция релаксации, и моделирующей скоростную зависимость предельных прочностных характеристик материала, предлагаемая модель прогнозирует процесс необратимого деформирования и восстанавливает деформационную зависимость при различных условиях нагрузки. - Написано сумбурно, так что в итоге неясно, в какой из двух моделей явно вводится функция релаксации.
  - б. С.47. «согласно (1) материал остается неповрежденным в момент достижения предела статической прочности  $t_c = \sigma_c / \dot{\sigma}$ ». Неповрежденным или неразрушенным?
  - в. С.48. В формуле (2) использовано неразъясненное обозначение  $\Sigma$ . Не сказано, зачем для обозначения напряжения используется то строчная, то заглавная буква?
  - г. С.49. «Решение (3) зависит от отношения инкубационного времени и времени процесса разрушения». Это не решение каких-либо уравнений, поскольку раньше уже

было сказано, что рассматривается линейная зависимость напряжений от времени. Далее на этой же странице формула (3) названа критерием, каким она не является.

- д. С.52. «амплитуда импульса фиксируется не в конечном импульсе, а в точке достижения максимума напряжения в момент времени.» Расшифровать очень трудно.
- е. С.53. «Напряжения разрушения насыщенного бетона выше скорости деформации выше, чем у сухого бетона при более высоких скоростях деформации в отличие от наибольшей статической прочности сухого бетона.». Комментарии излишни.
- ж. С.55. «Разница между двумя формами импульсов (симметричной и правой) уменьшается независимо от временной формы импульса, если длительность импульса уменьшается.». Трудно понять.
- з. С.58. «Большее инкубационное время объясняется большим доминирующим влиянием инкубационного процесса на материал, подвергнутого динамической нагрузке.» Над чем доминирующим? Какого процесса?
- и. С.58. Известен поточно агрегатный способ производства бетона. Общепринятого понятия агрегатный бетон и «агрегатный размер бетона» нет. Неясно, что имеет в виду автор. Какой наполнитель, не описано.
- к. С.63. Автор не разъясняет, почему для двух бетонов, исследованных в работах [94] и [95] так сильно отличается показатель  $\alpha$ , хотя соотношение воды и цемента ( $w/c$ ) на стадии формирования образцов равно различалось мало: 0.46 [94] и 0.5 [95].
- л. С.73: «При статических и динамических испытаниях больший предел прочности наблюдался у сухого известняка. В работе [99] показано, что несмотря на этот факт, что инкубационное время для водонасыщенного известняка  $t\sigma=74.5$  мкс было больше, чем у сухого известняка  $t\sigma=47.3$  мкс (Табл. 7).» Чем объяснить такое несоответствие?
- м. С.111. В подписи к рис. 34 говорится о зависимости предела текучести от длительности импульса. Однако, ранее величина  $t\gamma$  обозначала не длительность импульса, а время начала течения.
- н. С.173. В параграфе 4.1 рассматривается «случай циклического деформирования при произвольной истории нагружения на отдельном цикле». Непонятно, что рассматривает автор: цикл нагружения при заданном законе изменения напряжения или цикл деформирования при заданном законе изменения деформации.
- о. С.173. Схема деформирования на  $j$ -м цикле и его параметры описаны недостаточно ясно, а график не приведен. Отсчитывается ли цикл от деформации равной нулю? Что такое время разгрузки: это время начала разгрузки и, следовательно, убывания деформации? Если так, то при  $t > t^{unl}$  будет  $H(\epsilon_j(t) - \epsilon_j^{unl}) = 0$  и вторая строчка в формуле (53) обратится в ноль.
- п. С.173. Формулы (54) и (55) совпадают. Явно, это опечатка.
- р. С.174. «Нормализованное напряжение – это отношение напряжения к статической деформации на первом цикле.» Без комментариев.
- с. С.177. Как рис.69 согласуется с тем, что амплитуда напряжений была постоянной и равной 400 МПа?
- т. С.184. Рис.75а не соответствует подписи и совпадает с рис.74а.
- у. С.192. « $E_1, E_2, \dots, E_{n-1}$  – модуль Юнга металловолокон при разрушении хрупких 1...  $n-1$  волокнистых слоев». Описание композита недостаточно ясно.

Схемы или рисунка нет. Он появляется только в следующем параграфе на с.197 (рис.80). Откуда взялись металловолокна, если в дальнейшем речь идет об эпоксидных, углеродных кевларовых или стеклянных волокнах? У этих металловолокон в каждом слое модули разные? Модуль Юнга металловолокон зависит от того, сколько слоев разрушилось?

Сделанные замечания относятся, в основном, к стилю изложения и оформлению, либо носят характер пожеланий. Они не изменяют общего положительного заключения по диссертации.

Диссертация Селютиной Нины Сергеевны на тему: «Динамическая деформация и разрушение материалов на основе релаксационных моделей необратимого деформирования» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Селютина Нина Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, без ученого звания,  
профессор кафедры Теории упругости СПбГУ

Волков А.Е.

09.11.2023