

САДЫКОВА Елизавета Дмитриевна – бакалавр, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: 89607004395liza@gmail.com

About the authors:

DVUZHILOV Anton Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Material Strength, Theory of Elasticity and Plasticity, Tver State Technical University, Tver. E-mail: anton_in_tver@mail.ru

SADYKOVA Elizaveta Dmitrievna – Undergraduate Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: 89607004395liza@gmail.com

УДК 531

ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ: МЕХАНИЗМЫ И КРИТЕРИИ

А.Д. Макарова, А.С. Двужиллов

© Макарова А.Д., Двужиллов А.С., 2025

***Аннотация.** Статья предназначена для инженеров, исследователей и студентов, работающих в области механики разрушения, материаловедения и проектирования конструкций. Рассмотрено хрупкое разрушение материалов, которое характеризуется отсутствием пластической деформации или ее незначительностью до момента разрушения. Описаны различные механизмы хрупкого разрушения. Для каждого механизма представлены критерии, используемые для прогнозирования и предотвращения хрупкого разрушения. Обсуждены факторы, влияющие на хрупкое разрушение, такие как размер зерна, наличие дефектов, температура и скорость нагружения. Дана комплексная трактовка понятия хрупкого разрушения, его механизмов и критериев, представлены практические рекомендации по предотвращению такого типа отказов.*

***Ключевые слова:** хрупкое разрушение, механизмы разрушения, критерии разрушения, трещины, межзеренные границы, факторы.*

Хрупкое разрушение – это вид разрушения твердого тела (элемента или всей конструкции) при распространении трещины, в котором размер зоны пластической деформации незначительно мал по сравнению с размером трещины или поперечником твердого тела. Под действием

относительно невысоких напряжений хрупкое разрушение происходит внезапно и развивается катастрофически быстро [1].

Существует несколько основных механизмов хрупкого разрушения:

1) распространение трещины. Трещина возникает в дефекте или неоднородности и распространяется сквозь материал, вызывая разрушение;

2) скорость распространения трещины. Зависит от приложенного напряжения, размера и формы трещины, а также сопротивления материала разрушению;

3) хрупкое расщепление. Происходит в материалах с низкой пластичностью и высокой прочностью. Микротрещины образуются в плоскостях с наименьшим сопротивлением разрушению (например, в направлении зерен или вдоль межзеренных границ). Трещины растут и сливаются, образуя главную трещину, которая и приводит к разрушению;

4) отрыв границ зерен. Возникает в материалах с высокой прочностью зерен и низкой прочностью межзеренных границ. Под действием приложенного напряжения межзеренные границы разрушаются, что приводит к ослаблению материала;

5) микровязкий отрыв. Происходит в полимерных материалах и материалах с высокой вязкостью. Микроскопические пустоты или дефекты в материале являются точками зарождения трещин;

6) кливаж. Это расщепление материала вдоль определенных плоскостей слабости, известных как плоскости кливажа. Кливаж обычно происходит, когда материал испытывает растягивающее напряжение, перпендикулярное этим плоскостям;

7) трансграничное разрушение. Это разрушение через зерна материала, переходящее от одного зерна к другому. Трансграничное разрушение обычно случается, когда материал испытывает сдвиговое напряжение;

8) усталостное разрушение. Возникает в результате циклических нагрузок, приводит к постепенному образованию и распространению трещин, из-за которых в конечном счете происходит разрушение. Характеризуется сколами и следами усталости на поверхности излома;

9) замедленное разрушение. Это разрушение, которое происходит в течение длительного времени при напряжении ниже предела текучести. Характеризуется образованием микротрещин и их распространением. Приводит к затуплению кончиков трещин и появлению зон пластической деформации [1].

Есть два основных вида разрушения:

1) вязкое. Характеризуется значительной пластической деформацией перед разрушением. Трещина распространяется медленно и обычно сопровождается образованием зоны пластического течения вокруг кончика трещины;

2) хрупкое [3]. Характеризуется незначительной или отсутствующей пластической деформацией перед разрушением. Трещина распространяется быстро и с высокой скоростью высвобождения энергии.

На хрупкое разрушение материалов могут влиять различные факторы:

1. Скорость нагружения. Высокие скорости нагружения повышают вероятность хрупкого разрушения.

2. Размер зерна. Мелкие зерна обычно снижают склонность материала к хрупкому разрушению.

3. Наличие трещин или других дефектов. Из-за них может значительно снизиться прочность материала.

4. Легирующие элементы. Добавление легирующих элементов, таких как углерод или хром, повышает прочность материала.

5. Тип материала. Некоторые материалы более склонны к хрупкому разрушению, чем другие.

6. Структура материала. Дефекты в структуре материала, такие как поры и включения, могут служить точками возникновения трещин.

7. Условия окружающей среды. Температура, влажность и коррозионная среда могут повлиять на хрупкость материала.

8. Напряженное состояние. Концентрация напряжений в материале является основным фактором, влияющим на возникновение хрупкого разрушения [1].

Критериями хрупкого разрушения, позволяющими инженерам оценить вероятность его наступления, являются:

1. Предел прочности на растяжение. Представляет собой максимальное напряжение, которое материал может выдержать перед разрушением.

2. Модуль Юнга. Является мерой жесткости материала.

3. Предельная энергия разрушения. Это энергия, необходимая для распространения единицы площади трещины.

4. Критерий Гриффитса. Данный критерий основан на энергии, необходимой для создания трещины. Хрупкое разрушение происходит тогда, когда энергия, высвобождаемая при росте трещины, превышает энергию, необходимую для создания новой поверхности трещины [2].

5. Силовой критерий Ирвина. Для каждого типа трещин существует критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, по достижении которого начинается рост трещины.

6. Критерий Мак-Клинтока. Данный критерий гласит, что хрупкое разрушение происходит тогда, когда пластическая деформация в вершине трещины достигает критического значения.

Инженеры используют данные критерии в целях установления пределов допустимых напряжений для конкретного материала и конструкции, чтобы предотвратить хрупкое разрушение. Хрупкое

разрушение важно и при работе строителей, потому что это один из наиболее опасных видов разрушения. Оно часто наступает без предварительных признаков, при низких уровнях средних напряжений от действующих нагрузок. Причинами таких разрушений являются хрупкие трещины, которые распространяются с большой скоростью, что приводит, как правило, к полному разрушению конструкции. Строителям необходимо принимать во внимание хрупкое разрушение при расчете элементов на выносливость. Они должны представлять, каких габаритов должно быть сечение, чтобы выдержать нагрузку при любом стечении неблагоприятных обстоятельств.

Специальные испытания также помогают заранее определить условия развития хрупкого разрушения и избежать его при работе. Например, испытания при низких температурах дают возможность идентифицировать температуру хладноломкости, а испытания на ударный изгиб – определить ударную вязкость материала.

Выбор соответствующего критерия зависит от конкретного материала и условий нагружения.

Таким образом, в настоящей статье были рассмотрены механизмы хрупкого разрушения материалов, представлены критерии хрупкого разрушения, такие как предел упругости и предел прочности на разрыв, исследованы различные факторы, влияющие на хрупкое разрушение (скорость нагружения, температура и размер зерна).

Понимание механизмов и критериев хрупкого разрушения имеет решающее значение для проектирования надежных и безопасных конструкций. Разработчики могут использовать эту информацию для выбора материалов, оптимизации конструкций и предотвращения их хрупкого разрушения.

Библиографический список

1. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с. URL: <https://djvu.online/file/Mt3mcIiFYIzgP?ysclid=m46mqgqm80784847126> (дата обращения: 02.12.2024).
2. Маркочев В.М., Алымов М.И. О теории хрупкого разрушения Я. Френкеля и А. Гриффитса // Чебышевский сборник. Т. 18. № 3. 2017. С. 377–389. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-teorii-hrupkogo-razrushe-niya-ya-frenkelya-i-a-griffitsa/viewer> (дата обращения: 02.12.2024).
3. Френкель Я.И. Теория обратимых и необратимых трещин в твердых телах // Журнал технической физики. Т. 22. № 11. 1952. С. 1857–1866. URL: <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/library:0114267> (дата обращения: 02.12.2024).

BRITTLE FRACTURE: MECHANISMS AND CRITERIA

A.D. Makarova, A.S. Dvuzhilov

Abstract. *The article is intended for engineers, researchers and students working in the field of fracture mechanics, materials science and structural design. Brittle fracture of materials, which is characterized by the absence of plastic deformation or its insignificance up to the moment of fracture, is considered. Various brittle fracture mechanisms are described. For each mechanism, the criteria used to predict and prevent brittle fracture are presented. Factors affecting brittle fracture such as grain size, presence of defects, temperature and loading rate are discussed. A comprehensive interpretation of the concept of brittle fracture, its mechanisms and criteria is given, and practical recommendations for preventing this type of failure are presented.*

Keywords: *brittle fracture, fracture mechanisms, fracture criteria, cracks, grain boundaries, factors.*

Об авторах:

МАКАРОВА Алена Денисовна – бакалавр, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: aliona_makarova22@mail.ru

ДВУЖИЛОВ Антон Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры сопротивления материалов теории упругости и пластичности, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: anton_in_tver@mail.ru

About the authors:

MAKAROVA Alena Denisovna – Bachelor's Degree, Tver State Technical University, Tver. E-mail: aliona_makarova22@mail.ru

DVUZHILOV Anton Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Material Strength, Theory of Elasticity and Plasticity, Tver State Technical University, Tver. E-mail: anton_in_tver@mail.ru