

Научная статья

УДК 539.422.5

doi: 10.17223/19988621/97/7

Влияние скорости деформации квазихрупких композиционных огнеупорных материалов на характер их разрушения

Андрей Васильевич Заболотский¹, Андрей Иванович Дмитриев²

^{1, 2} *Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия*

¹ *ООО «Группа “Магнезит”», Сатка, Россия*

² *Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *zabolotsky@bk.ru*

² *dmitr@ispms.ru*

Аннотация. Предложена модель разрушения композиционного квазихрупкого материала, предполагающая вовлечение различных элементов структуры в процесс трещинообразования в зависимости от скорости упругой деформации. Введена зависимость критической скорости деформации материала от его упругих характеристик, измеренных квазистатическими методами. При скорости деформации ниже критической разрушению подвергается менее прочная составляющая композиционного материала. При увеличении ее сверх вычисленного критического значения разрушение приобретает объемный характер с вовлечением в трещинообразование всех элементов структуры материала.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, динамика разрушения, композиционный материал

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта № 22-19-00688, <https://rscf.ru/project/22-19-00688>).

Для цитирования: Заболотский А.В., Дмитриев А.И. Влияние скорости деформации квазихрупких композиционных огнеупорных материалов на характер их разрушения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 97. С. 100–115. doi: 10.17223/19988621/97/7

Original article

Effect of strain rate on the fracture behavior of quasi-brittle composite refractory materials

Andrey V. Zabolotskiy¹, Andrey I. Dmitriev²

^{1, 2} *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

¹ *Magnezit Group, Satka, Russian Federation*

² *Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *zabolotsky@bk.ru*

² *dmitr@ispms.ru*

Abstract. A fracture model for a composite quasi-brittle material is proposed, assuming that different structural elements are involved in crack formation depending on the strain rate. The deformation of the material may result from either external mechanical loading or self-expansion due to temperature changes. A dependence is introduced between the critical strain rate of the material and its elastic properties measured using the static methods. At strain rates below the critical threshold, fracture initiates in the weaker component of the composite, whereas at rates exceeding the critical value, failure becomes volumetric, involving all structural elements in crack formation. For such materials, the critical strain rate at which the fracture mechanism changes is calculated. The theoretical results are validated through laboratory static and dynamic strength tests of the industrial refractories. It is established that, in practice, the grain frame of the composite material is involved in crack formation when the strain rate exceeds the calculated critical value.

Keywords: brittle destruction, destruction dynamics, composite material

Acknowledgments: This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 22-19-00688).

For citation: Zabolotskiy, A.V., Dmitriev, A.I. (2025) Effect of strain rate on the fracture behavior of quasi-brittle composite refractory materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 97. pp. 100–115. doi: 10.17223/19988621/97/7

Введение

Огнеупорные материалы, или огнеупоры, применяются в качестве ограждения рабочей зоны высокотемпературных промышленных агрегатов. Такие материалы одновременно несут конструкционную функцию и играют роль тепловой изоляции. В большинстве случаев эти материалы представляют собой керамику на основе тугоплавких оксидов, карбидов или нитридов распространенных металлов. Структура такого композиционного материала представлена зерновым армирующим каркасом, равномерно распределенным в относительно однородной матрице. Матрица, в свою очередь, образуется в результате спекания мелких фракций сырьевого материала. Применение огнеупоров в качестве конструкционных материалов предъявляет к ним требования по прочностным характеристикам в соответствии с типичными нагрузками при эксплуатации высокотемпературного оборудования.

Определение прочностных характеристик промышленных огнеупоров регламентируется стандартными испытаниями на прочность при сжатии и изгибе при нормальных условиях, а также высокотемпературными исследованиями прочности при трехточечном изгибе и определении температуры начала деформации под нагрузкой. Последний вид испытаний проводится путем приложения к материалу постоянной сжимающей нагрузки при изменении температуры образца. В результате определяется максимальная допустимая температура эксплуатации материала, выше которой происходит деградация свойств, исключающая использование материала в качестве конструкционного. Все стандартные испытания прочности огнеупоров проводят в квазистатическом режиме, при котором нагрузка остается

постоянной или нарастает с малой скоростью – не более нескольких процентов ожидаемой прочности за секунду.

Вследствие особенностей микроструктуры, содержащей множественные дефекты в виде пор и микротрещин, огнеупоры демонстрируют так называемый квазихрупкий характер разрушения, характеризующийся нелинейными зависимостями напряжений от деформаций при нагружении композиционных материалов. Причиной такого поведения материалов является множественный локальный рост трещин на микроуровне, сопровождающийся разгрузкой напряженно-деформированного состояния (НДС) окружающей области материала, который приводит к формированию продолжительного участка диаграммы разрушения, на котором не наблюдается снижения эксплуатационных характеристик материала. При этом на макро- и мезоскопическом уровнях структуры поведение материала может характеризоваться как ограниченно пластичное, а на микроуровне – как хрупкое.

Описанный характер структуры и особенности разрушения огнеупорных материалов приводят к тому, что измеренные значения прочностных характеристик являются функцией условий, в которых проводятся испытания. При варьировании этих условий результаты испытаний могут кратно изменяться [1]. Например, при определении динамической прочности (которое не входит в перечень стандартных испытаний) ее значение оказывается значительно выше результата квазистатического измерения, применяемого в условиях заводской лаборатории [2].

Для описания разрушения композиционных материалов широкое распространение получили континуальные методы учета накопления поврежденности, в основе которых лежат исследования Качанова, Работнова и др., подробно рассмотренные в обзоре [3]. Такой подход может быть применен при накопленных статистических данных для статических условий разрушения, а также для расчета динамической прочности материалов путем введения в уравнения соответствующих функций, учитывающих скорость нарастания деформаций:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = f(\vartheta, \sigma_1, \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \tau}, P_j), \quad (1)$$

где τ – время, $\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}$ – скорость накопления поврежденности в материале, σ_1 и ε_1 –

максимальные главные нормальные напряжения и деформации, $\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \tau}$ – скорость

деформирования композиционного материала, P_j – комплекс характеристик материала, определяющих его механические свойства. Для квазихрупких композиционных материалов наибольший риск трещинообразования связан с нормальными растягивающими напряжениями и деформациями, приводящими к появлению трещин нормального отрыва.

Известен способ использования степенных функций, аналогичных уравнению Аррениуса для описания деградации механических свойств конструкционных материалов при накоплении дефектов структуры [4], который также требует статистических исследований процесса разрушения для вычисления коэффициентов уравнения. В работе [5] показано, что использование континуальных характеристик композиционных материалов может приводить к значительным погрешностям в результатах расчетов, что требует применения более детального описания структуры материалов при динамическом нагружении.

При исследовании динамического разрушения композиционных материалов в настоящее время принято [2] пользоваться критерием инкубационного времени разрушения. В обобщенном виде этот критерий можно представить условием

$$\frac{1}{\tau_n} \int_{\tau_n}^{\tau} \left(\frac{F(\tau)}{F_c} \right)^{\alpha} d\tau \leq 1, \quad (2)$$

где $F(\tau)$ – характеристика локального силового поля (функция, описывающая НДС объекта, например главная компонента тензора напряжений, которая является предпочтительной характеристикой для квазихрупких композиционных материалов); F_c – критическое значение функции $F(\tau)$, в рассматриваемом случае квазистатический предел прочности материала при растяжении; τ_n — инкубационное время, связанное с динамикой релаксационных процессов, предшествующих разрушению (потеря несущей способности образца), и, следовательно, характеризующее время разрушения; α – чувствительность среды к уровню локального силового поля. Время и место разрушения определяются как момент и точка (в объеме материала) выполнения условия (2).

Сложность практического применения критерия (2) заключается в том, что входящие в него параметры могут быть определены только из серии испытаний материала на динамическую прочность, например по методу Кольского [6]. Оборудование для проведения подобного испытания на данный момент не является стандартным для лабораторий заводов-производителей композиционных материалов. Таким образом, актуальной является задача определения характера разрушения и оценки прочностных характеристик промышленных материалов при динамическом нагружении (которое часто возникает при эксплуатации материалов в результате механического или термомеханического внешнего воздействия) с использованием характеристик, определяемых в заводской лаборатории.

Цель работы – численно-экспериментальное выявление взаимосвязи между упругими свойствами компонентов композиционного материала, измеренными в квазистатическом режиме, и характером его разрушения при динамических нагрузках. Для нахождения границ применения результатов прочностных испытаний в квазистатическом режиме выполнена оценка скорости приложения механической нагрузки к материалу, при которой происходит изменение характера разрушения материала, приводящее к существенному изменению измеренных значений прочности.

Особенности разрушения огнеупорного композиционного материала

Разрушение конструкционных материалов по квазихрупкому сценарию под действием механической или термомеханической нагрузки состоит из трех последовательных стадий [7] (рис. 1):

– *стадии упругой деформации*, характеризующейся линейной зависимостью напряжений в материале от возникающих деформаций. На этой стадии выполняется закон Гука (см. рис. 1, 1). Для абсолютно хрупких материалов эта стадия завершается мгновенным катастрофическим разрушением всей конструкции: при достижении предела прочности материала происходит переход сразу к стадии образования катастрофической трещины (см. рис. 1, 4);

– *квазихрупкой стадии*, которая характеризуется нелинейными зависимостями напряжений от деформаций. На данной стадии происходят множественное образо-

вание и рост трещин на масштабе структуры материала с образованием сетки микротрещин, которая в пределе приводит к деградации механических свойств изучаемого объекта [8, 9] (см. рис. 1, 2, 3);

– *катастрофической стадии, или обострения* [10], характеризующейся резкой, чрезвычайно быстрой деградацией функциональных свойств объекта, сопровождающейся образованием одной или нескольких трещин макроскопического масштаба (см. рис. 1, 4).

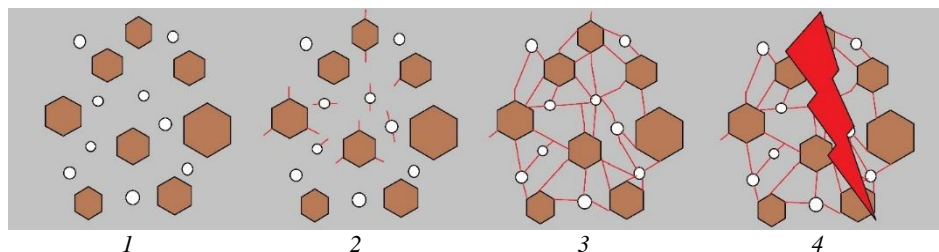


Рис. 1. Этапы развития трещины при квазихрупком разрушении композиционного керамического материала: 1 – трещины отсутствуют (исходное состояние), 2 – появление микротрещин на концентраторах напряжений, 3 – образование трещиноватой структуры на участке материала, 4 – рост катастрофической (разрушающей) трещины

Fig. 1. Stages of crack development during quasi-brittle fracture of a composite ceramic material: 1, no cracks (initial state); 2, appearance of microcracks on stress concentrators; 3, cracked structure formation in a section of the material; and 4, growth of a catastrophic destructive crack

Стадия квазихрупкого разрушения является определяющей для ресурса конструкции [11]: на протяжении этой стадии материал сохраняет свои конструкционные прочностные характеристики. В свою очередь, данная стадия складывается из стадии зарождения или инициации микротрещин, их роста или формирования микротрещиноватой структуры и начала роста магистральной трещины.

В реальных материалах на этапе инициации трещин происходит конкуренция между различными концентраторами напряжений, одновременно возникающие трещины приводят к разгрузке НДС в некоторой окрестности формирующейся поверхности. Соответственно, имеет место множественный рост дефектов на концентраторах напряжений, локализация которых будет зависеть в том числе и от скорости приложения нагрузки [1]. Действительно, медленное нагружение приводит к преимущественному формированию повреждений в матрице и на интерфейсах – границах раздела фаз в материале, в то время как при высокой скорости нагружения возрастает степень поврежденности армирующих зерен огнеупора [1, 12].

Наблюдаемая картина локализации поврежденности при различных скоростях нагружения объясняется динамикой накопления напряжений в зернах и матрице огнеупора. Зерна, как правило, представляют собой плотные, упругие среды с относительно малой плотностью внутренних дефектов, при этом геометрическая форма зерен может обуславливать значительное количество поверхностных концентраторов напряжений. Матрица, напротив, обладает высокой объемной плотностью дефектов и относительно низким модулем упругости. Скорость распространения деформаций в матрице и зернах различна и соответствует скорости звука в упругой среде [13].

Скорость роста трещин в материалах и, соответственно, разгрузки НДС за счет локального разрушения может достигать половины от скорости звука в них [14, 15]. Таким образом, при малых скоростях деформации разрушение может быть локализовано в матрице материала, а при ее высокой скорости вследствие запаздывания разгрузки в процесс вовлекается и зерновая составляющая.

Описание математической модели

Наблюдаемые закономерности разрушения квазихрупких композиционных огнеупорных материалов описываются, исходя из законов сохранения. Закон сохранения масс (неразрывности) для сплошных сред имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (3)$$

где ρ – массовая характеристика (плотность), τ – время, \vec{v} – вектор скорости.

Под действием внешних сил, которые могут возникать в том числе и в результате теплового процесса, в материале возникают смещения, приводящие как к перемещению тела в пространстве как целого, так и деформациям, ответственным за формирование НДС. Эти процессы описываются законом сохранения импульса (уравнением движения) [14]

$$\rho \frac{d\vec{v}}{d\tau} = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{F}, \quad (4)$$

где $\vec{\sigma}$ – тензор напряжений, \vec{F} – вектор массовых сил. Тензор деформаций описывается соотношением Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

В выражении (5) ε_{ij} – компоненты тензора полных деформаций, u_i (u_j) – компоненты вектора перемещений, x_i (x_j) – координаты.

Механические напряжения связаны с упругими деформациями в рассматриваемых материалах законом Гука для изотропной среды, так как в пределах индивидуальных фаз, составляющих композиционный материал, рассматриваемое тело является изотропным:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{ij}^e + \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij}. \quad (6)$$

где ε_{ij}^e – компоненты упругой части тензора деформаций, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, δ_{ij} – символ Кронекера.

Фиксируемые значения прочности материалов при динамических испытаниях демонстрируют значительное превышение при высокой скорости деформации по сравнению с квазистатическими условиями нагружения. Кроме того, размеры образцов образцов различны для динамических и квазистатических режимов.

При наличии корреляции между скоростью деформации материала и характером трещинообразования последовательность разрушения выглядит следующим образом: на стадии упругой деформации квазихрупкого композиционного материала вся работа внешних сил расходуется на формирование НДС. Переход к следующей стадии разрушения определяется локальным достижением предела прочности,

например в окрестности концентраторов напряжений, который может быть определен как критическим механическим напряжением, так и критической упругой деформацией.

Для композиционного материала критический уровень параметров НДС в общем случае различен для разных составляющих фаз материала. В случае огнеупоров и керамики зерна армирующего каркаса обладают повышенными упругими и прочностными характеристиками по сравнению с матрицей материала и, соответственно, требуют дополнительных воздействий для их вовлечения в процесс трещинообразования.

Путем несложных преобразований зависимости (6) при допущении, что рассматриваемые материалы на масштабе структуры разрушаются, как хрупкие тела, получено уравнение для вычисления критической скорости деформации, требуемой для вовлечения зерен армирующего каркаса в процесс трещинообразования:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_1^e}{\partial \tau} \right)_{cr} = \frac{(\sigma_{cr}^t)_{gr} \omega_m}{E_{gr} x K}, \quad (7)$$

где $\left(\frac{\partial \varepsilon_1^e}{\partial \tau} \right)_{cr}$ – минимальная (критическая) скорость растягивающей деформации композиционного квазихрупкого материала, требуемая для трещинообразования в зернах каркаса, с^{-1} , $(\sigma_{cr}^t)_{gr}$ – предел прочности зерен на растяжение, Па, ω_m – скорость звука в матрице, м/с, E_{gr} – модуль упругости зерна, Па, в данном случае $\frac{(\sigma_{cr}^t)_{gr}}{E_{gr}}$ определяет критическую упругую деформацию фазы зерен, сверх которой

происходит их разрушение, x – расстояние от рассматриваемого зерна до ближайшего источника роста трещин, м (порядок величины для типичного огнеупора $10^{-5} \div 10^{-3}$ м), K – безразмерный коэффициент, связывающий скорость распространения трещин в матрице со скоростью звука в ней (может принимать значения от 2 до 10, согласно [16]).

Энергия, затраченная на трещинообразование на 2-й стадии разрушения квазихрупкого материала, оценивается в соответствии с уравнениями

$$U = \frac{EV}{2} (\varepsilon_1^{sp})^2, \quad (8)$$

$$\varepsilon_1^{sp} = \varepsilon_1^e - \varepsilon_{cr}^e, \quad (9)$$

где V – объем окрестности вершины трещины, энергия которого расходуется на образование ее новой поверхности, ε_1^{sp} – превышение главной компонентой деформации критического уровня ε_{cr}^e , при котором начинается трещинообразование на масштабе структуры. При выводе зависимости (8) также предполагалось, что основной вклад в разрушение вносят максимальные главные деформации, что в большинстве случаев выполняется для условий эксплуатации и испытаний огнеупорной керамики. В настоящее время отсутствует единое мнение о размере окрестности трещины, энергия которой может быть использована при образовании ее поверхности, однако большинство исследователей оценивает его как $2 \div 2,5$ характерных размеров растущей трещины. Скорость приращения длины трещины при этом

$$\frac{\partial l}{\partial \tau} = \frac{1}{\gamma h} \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (10)$$

Здесь γ – поверхностная энергия материала, l и h – геометрические параметры трещины. Соответственно, скорость роста трещины пропорциональна производной деформации материала, причем в случае квазихрупкого материала рассматривается именно сверхкритическая составляющая (в том числе ответственная за проявления квазихрупких или пластичных эффектов при разрушении композиционных материалов), энергия которой расходуется на трещинообразование при 2-й стадии квазихрупкого разрушения:

$$\frac{EV_{\varepsilon_1^{sp}}}{\gamma h} \frac{\partial \varepsilon_1^{sp}}{\partial \tau} = \frac{1}{K} \omega_m, K = 2 \div 10. \quad (11)$$

Таким образом, скорость распространения деформаций в теле, равная скорости звука в упругой среде, превышает скорость роста трещины в нем в K раз [15]. Соответственно, при различных упругих характеристиках зерен каркаса и матрицы существует критическая скорость нагружения, свыше которой внешние деформации будут создавать критическое НДС в каркасе ранее его разгрузки в окрестности зерен за счет трещинообразования в матрице, что приведет к вовлечению каркаса в процесс разрушения. Кроме того, из (11) следует, что при снятии внешней нагрузки ($\frac{\partial \varepsilon_1^e}{\partial \tau}$ обращается в 0) рост трещин в квазихрупком материале прекращается; таким образом, необходимым условием разрушения является наличие внешнего воздействия на тело (как и выше, имеются в виду деформации растяжения для этого класса материалов):

$$\frac{\partial \varepsilon_1^e}{\partial \tau} > 0. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

Выражение (7) связывает деформации растяжения в зерновом каркасе композиционного материала со скоростью роста трещин в матрице, определяющей разгрузку НДС в окрестности рассматриваемого зерна. Применение зависимости (7) к типичным огнеупорам для оценки порядка этой величины показало, что для начала трещинообразования в зернах каркаса необходима скорость нагружения порядка 10^2 с^{-1} или более. Действительно, прочность зерен армирующего каркаса может варьировать от десятков до сотен МПа, модуль их упругости имеет порядок сотен ГПа, скорость звука в матрице – 10^3 м/с , расстояния между армирующими зернами – порядка миллиметров (10^{-3} м), а коэффициент K – единицы. Это подтверждается также фиксируемыми значениями прочности материала при различных скоростях приложения нагрузки [1, 2, 17], что объясняется вовлечением более прочной зерновой фракции в процесс трещинообразования.

Увеличение измеренной прочности композиционных материалов при повышении скорости их деформации зафиксировано в многочисленных экспериментальных работах по определению динамической прочности [7] для широкого класса объектов. Также зафиксировано соответствие порядка величины критической скорости нагружения, рассчитанной по формуле (7) и определенной экспериментально, при

которой происходит изменение сценария разрушения композиционных материалов [2].

Стадия квазихрупкого поведения одного и того же композиционного материала в зависимости от скорости приложения нагрузки может реализоваться при различных уровнях деформации и напряжения. При скоростях деформации, значительно превышающих порог трещинообразования в зернах (критическую скорость деформации (9)), разгрузка НДС за счет их разрушения будет происходить медленнее роста деформаций, что приведет к разрушению композиционного материала одновременно в значительном объеме тела.

Трехточечный изгиб огнеупорного материала

Для типичной структуры огнеупора было выполнено численное моделирование стандартного испытания материала на прочность при трехточечном изгибе как пример медленного накопления деформаций в материале, не приводящего к разрушению зерен армирующего каркаса вплоть до образования магистральной трещины. Условия приложения нагрузки в этом случае были квазистационарными: согласно стандарту не допускался рост механических напряжений более чем 5% от ее ожидаемой прочности в секунду.

Определение НДС для такого испытания выполнено методом конечных элементов в трехмерной постановке. При этом размер образца и расчетной области составляет $150 \times 25 \times 25$ мм, к торцам прикладывали условие «жесткой заделки»: запрещено перемещение узлов на этих поверхностях, а к центральной части образца прикладывали силу, обеспечивающую его изгиб. Характерный размер элементов выбирали около 1 мм, соответственно, их общее количество составляло около 10^5 . В серии проведенных вычислений варьировали изгибающую силу до достижения напряжений в центральном сечении образца, обеспечивающих выполнение условия начала роста трещины на типичном концентраторе напряжения (микротрещине) для материала.

Оценка размерных параметров концентраторов напряжений матрицы, являющихся геометрическим местом возникновения трещин, выполнена путем компьютерного моделирования по оригинальной методике авторов, описанной в [18], и валидирована методом электронной микроскопии на примере серийных огнеупоров производства «Группы «Магнезит»» периклазографитового состава на органическом связующем. Средние расстояния между армирующими зёрнами разных фракций приведены в табл. 1. Предполагалось, что в исходном материале микротрещины обладают эллиптической формой, соотношение осей эллипсоида составляло 2:1.

Таблица 1

Средние расчетные расстояния между частицами периклаза разных фракций для фактического гранулометрического состава огнеупорного изделия производства ООО «Группа «Магнезит»»

№	Фракция, мкм	Среднее расстояние, мкм
1	4 000–6 000	18 800
2	1 000–4 000	7 800
3	500–1 000	2 700
4	175–500	1 800

Критерием начала роста трещины считалось достижение растягивающим напряжением в ее вершине предела прочности на разрыв для материала матрицы либо соответствующей упругой деформации в вершине дефекта (7). Напряжения в вершине микротрещины определяли в соответствии с зависимостью [19]

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + 2 \frac{l}{b}\right), \quad (13)$$

где σ – максимальное эффективное напряжение в окрестности вершины микротрещины, σ_0 – напряжение в отдаленной окрестности микротрещины, определяемое в соответствии с (6); l и b – длины большой и малой осей микротрещины соответственно. Экспериментально определенные свойства материала, использованные для расчета, приведены в табл. 2 (погрешность лабораторного измерения этих величин для хрупких композиционных материалов в типичных случаях достигает 15–20%), кроме того, упругие характеристики рассматриваемых материалов могут определяться и расчетным путем [20].

Таблица 2

Свойства материала, используемые для моделирования

Показатель	Значение	Источник
Прочность матрицы при растяжении, МПа	20	[21]
Модуль упругости матрицы, ГПа	10	[21]
Вязкость разрушения матрицы, МПа·√м	2	[21]
Прочность армирующих зерен при растяжении, МПа	150	[22]
Модуль упругости зерен, ГПа	250	[22]
Прочность композита при изгибе, МПа	8	Эксперимент

Возникшая микротрещина в композиционном материале при рассматриваемом типе нагружения распространяется со скоростью не более 0,5 скорости звука в данном материале [14] до выхода на границу раздела фаз: либо на поверхность армирующего зерна, либо на границу испытываемого образца.

Очевидно, что по мере роста микротрещины требуемое для его продолжения напряжение в окрестности ее вершины снижается (рис. 2, красная линия).

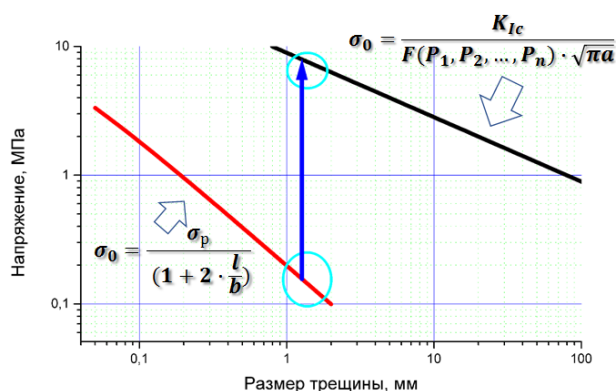


Рис. 2. Корреляция между максимальным размером трещиноподобного дефекта и фактическим значением прочности для одного из периклазоуглеродистых огнеупоров
Fig. 2. Correlation between the maximum size of a crack-like defect and the actual strength value for one of the periclase-carbon refractories

Согласно данным табл. 1, при достижении трещиной размера порядка 10^{-3} м ее вершины придут в соприкосновение с зернами каркаса, обладающими значительно большей прочностью, чем матрица. Далее возможно изменение направления роста трещины, либо начало роста соседних микротрещин, либо разрушение одного из зерен каркаса. Как правило, в огнеупорах на этой стадии формируется трещиноватая структура. Разрушение такой структуры требует большего уровня механических напряжений по сравнению с увеличением длины одиночной докритической трещины и носит катастрофический характер, причем напряжения, при которых образуется магистральная трещина, зависят как от формы и размера сформировавшейся микротрещины, так и от геометрических характеристик самого разрушаемого объекта. Соответствующая линия на рис. 2 была получена путем расчета по методике, описанной в [11] для эллиптической трещины в теле конечного размера:

$$K_{Ic} = f_I(P_1, \dots, P_n) \sigma_0 \sqrt{\pi l}, \quad (14)$$

где f_I – эмпирически определенная функция, зависящая от размеров дефекта и конструкции, способа приложения нагрузки и т.д., обозначенных как перечень параметров P_1, \dots, P_n , σ_0 – напряжения в отдаленной окрестности вершины трещины, l – характерный размер трещины. Величина K_{Ic} , называемая также вязкостью разрушения или критическим коэффициентом интенсивности напряжений является значением, сверх которого происходит катастрофический рост трещины. Функция f_I в уравнении (14) изучена численными методами для большинства распространенных случаев проектирования [11], а само значение вязкости разрушения определяется в лабораторном эксперименте в соответствии с ГОСТ 25.506–85 и ГОСТ 29167–2021.

Переход между линиями на рис. 2 находится в области ожидаемого размера микротрещины в случае ее контакта с ближайшими зернами каркаса (ее длина в этот момент времени равна среднему расстоянию между армирующими зернами), а экспериментально измеренная прочность композиционного материала (см. табл. 2) также соответствует расчетному значению.

Динамическое нагружение огнеупора по методу Кольского

Прямой эксперимент по валидации зависимости характера разрушения огнеупора от скорости деформации был проведен по методу Кольского в ННГУ им. Лобачевского. Целью эксперимента было установление различного характера разрушения образцов квазихрупкого композиционного материала, деформируемого с различной скоростью. Предполагалось, что при деформации с докритической скоростью область разрушения будет находиться преимущественно в матрице материала, а при более высоких скоростях деформации будет наблюдаться разрушение и его зернового каркаса. В качестве объекта исследования выступали серийные огнеупорные материалы производства «Группы “Магнезит”» периклазо-шпинельного состава. Образцы диаметром и высотой 50 мм нагружали ударным способом с различной скоростью движения ударника и, соответственно, упругой деформации, как превышающей вычисленный критический уровень 10^2 с^{-1} , так и ниже его. В процессе эксперимента считывали импульсы, возникающие в ударнике и мерном стержне, по которым восстанавливали значения упругой деформации материала и ее производную по времени (скорость нагружения). Кроме того, процесс разрушения записывали на видео.

На рис. 3 приведено по три последовательных кадра разрушения материала при скорости деформирования менее (80 с^{-1} (a)) и более критической (350 с^{-1} (b)). Были зафиксированы значения прочности материала 60 и 110 МПа соответственно. В квазистатических условиях прочность такого материала при сжатии составляет 50–60 МПа.

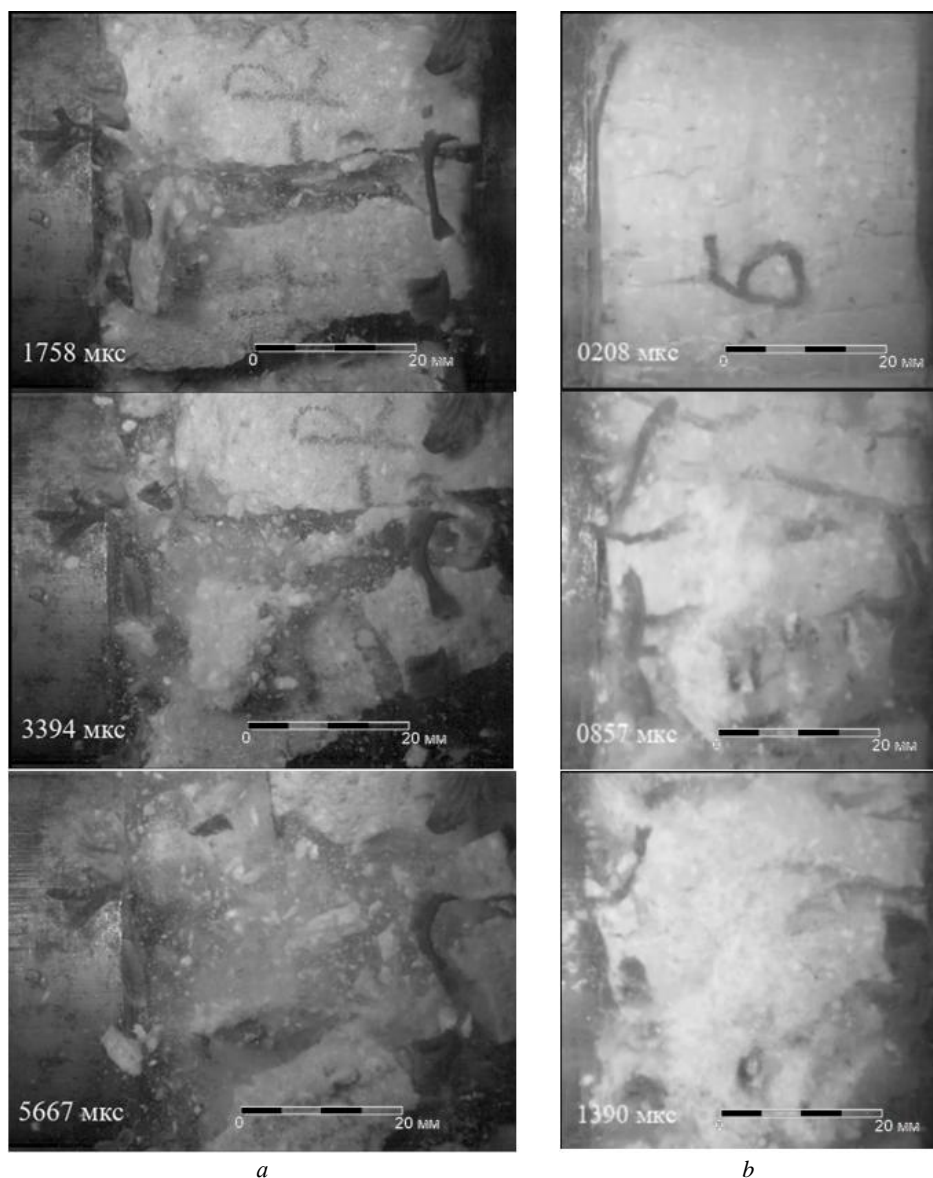


Рис. 3. Характер разрушения огнеупорного материала при малой (a) и высокой (b) скорости деформации

Fig. 3. Fracture behavior of the refractory material at (a) low and (b) high strain rates

При малой скорости деформирования (см. рис. 3, а) происходит разрушение материала на крупные блоки. Трещины проходят преимущественно по матрице или границам раздела между матрицей и зернами каркаса. На рисунке видно, что фрагменты представляют собой либо отдельные зерна каркаса размером около 2 мм, либо блоки, включающие зерна каркаса и прилегающие фрагменты матрицы, – в этом случае размер обломков составляет 5 мм и более. При быстром нагружении, напротив, виден множественный рост трещин на начальной стадии (см. рис. 3, б), сменяющийся интенсивным объемным разрушением на некотором удалении от поверхности приложенной нагрузки. Разрушение в этом случае фиксируется как в матрице материала, так и в зернах каркаса. Фрагменты на фото представляют собой пылевидные частицы, размер которых можно оценить как существенно меньший 1 мм (на 1–2 порядка величины), т.е. менее чем типичный размер компонентов зерновой фракции, что подтверждает трещинообразование внутри зерен армирующего каркаса материала.

Таким образом, экспериментально показано изменение характера разрушения квазихрупкого материала при увеличении скорости деформирования сверх расчетного критического значения. Разрушение в докритической области представлено образованием крупных блоков материала с прохождением трещин по границам раздела зерен каркаса и матрицы, зерна при этом в основном не подвергаются разрушению. В закритической области происходит объемное разрушение материала на мелкие пылевидные фрагменты, причем разрушению подвергаются и зерна каркаса.

Выводы

Предложен способ определения критической скорости упругой деформации композиционного огнеупорного материала. При превышении критической скорости деформирования изменяется характер трещинообразования: происходит переход от разрушения менее прочной матрицы огнеупора к появлению трещин и в зерновой (более прочной) компоненте материала. При расчете критической скорости деформации использовались упругие характеристики компонентов материала, определяемые при лабораторных испытаниях в квазистатическом режиме. Таким образом, предложенный способ позволяет предсказывать характер разрушения композиционного материала при различной динамической нагрузке по результатам стандартных статических прочностных испытаний его компонентов.

На примере измерения предела прочности при трехточечном изгибе в квазистатическом режиме образца серийного огнеупора, производимого «Группой “Магнезит”», показана стадийность разрушения таких композиционных материалов. Применение предложенной модели разрушения к анализу значений прочности, измеренных при трехточечном изгибе огнеупорного материала, показывает совпадение расчетных и экспериментальных значений этой величины.

Для динамического нагружения огнеупора по методу Кольского показано, что при превышении критической скорости деформации характер разрушения материала изменяется предсказанным образом: в процесс массово вовлекаются зерна армирующего каркаса материала. В отличие от медленного нагружения, при высоких скоростях деформации разрушение носит объемный характер: не происходит разделения материала по ограниченному числу новых поверхностей, а имеет место образование многочисленных трещин в значительном объеме материала.

Список источников

1. Grigoriev A.S., Zabolotskiy A.V., Shilko E.V., Dmitriev A.I., Andreev K. Analysis of the Quasi-Static and Dynamic Fracture of the Silica Refractory Using the Mesoscale Discrete Element Modelling // *Materials*. 2021. V. 14. Art. 7376. doi: 10.3390/ma14237376
2. Смирнов И.В., Петров Ю.В. Анализ динамической прочности битумных вяжущих для асфальтобетона в терминах критерия инкубационного времени разрушения // *Физическая мезомеханика*. 2020. Т. 23, № 2. С. 24–34. doi: 10.24411/1683-805X-2020-12003
3. Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: классические континуальные теории // *Физическая мезомеханика*. 2015. Т. 18, № 4. С. 68–87. doi: 10.24411/1683-805X-2015-00035
4. Баев В.С., Пичугин А.П. Теория динамической прочности композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 84–86.
5. Кривошеина М.Н. Моделирование напряженного состояния в преградах из анизотропных материалов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 79. С. 89–99. doi: 10.17223/19988621/79/8
6. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. V. 62 (11). P. 676–700.
7. Курдюмов С.П. Режимы с обострением. Эволюция идеи. М. : Физматлит, 2006. 312 с.
8. Shilko E.V., Grigoriev A.S., Lapshina A.A., Buyakov A.S., Shmakov V.V., Dmitriev A.I., Zabolotskiy A.V., Andreev K. Development of a mesoscale mechanical model of ceramic materials with multiscale porosity. Silica refractory case study // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Art. 2899. doi: 10.1063/5.0162808
9. Grigoriev A.S., Shilko E.V., Skripnyak V.A., Psakhie S.G. Kinetic approach to the development of computational dynamic models for brittle solids // *International Journal of Impact Engineering*. 2019. V. 123. P. 14–25. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.018
10. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // *Физическая мезомеханика*. 2013. Т. 16, № 1. С. 5–26. doi: 10.24411/1683-805X-2013-00032
11. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т. М.: Мир, 1990. Т. 1. 448 с.; Т. 2. 568 с.
12. Andreev K., Yin Y., Luchini B., Sabirov I. Failure of refractory masonry material under monotonic and cyclic loading – Crack propagation analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 299. Art. 124203. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124203
13. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3 т. М.: Лань, 2020. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. 436 с.
14. Морозов В.А., Савенков Г.Г. Предельная скорость распространения трещин в динамически разрушаемых материалах. // *Прикладная механика и техническая физика*. 2013. Т. 54, № 1. С. 163–169. doi: 10.1134/S0021894413010173
15. Чекунаев Н.И., Каплан А.М. Предельная скорость распространения трещин в упругих материалах // *Прикладная механика и техническая физика*. 2009. Т. 50, № 4 (296). С. 158–166. doi: 10.1007/s10808-009-0091-1
16. Победря Б.Е. Модели механики сплошной среды // *Фундаментальная и прикладная математика*. 1997. Т. 3, № 1. С. 93–127.
17. Брагов А.М., Карихалу Б.Л., Петров Ю.В., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К., Смирнов И.В. Высокоскоростное деформирование и разрушение фибробетона // *Прикладная механика и техническая физика*. 2012. Т. 53, № 6. С. 144–152.
18. Заболотский А.В. Построение и исследование модели поровой структуры керамического материала // *Инновационная наука*. 2017. № 03-1. С. 27–34.
19. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 593 с.

20. Бельхеева П.К. Малопараметрическое уравнение состояния графита для описания поведения сплошных и пористых образцов в ударных волнах и волнах разгрузки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 90. С. 50–63. doi: 10.17223/19988621/90/5
21. Стенашкин А.А., Ожерелков Д.Ю., Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А. Критерии оценки вязкости разрушения углерод-углеродных композиционных материалов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 4. С. 64–70.
22. Wang X., Chen Y., Ding J., Yu C., Deng C., Zhu H. Influence of ceramic phase content and its morphology on mechanical properties of MgO–C refractories under high temperature nitriding // Ceramics International. 2021. V. 47 (8). P. 10603–10610. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.12.172

References

1. Grigoriev A.S., Zabolotskiy A.V., Shilko E.V., Dmitriev A.I., Andreev K. (2021) Analysis of the quasi-static and dynamic fracture of the silica refractory using the mesoscale discrete element modelling. *Materials*. 14(23). Article 7376. doi: 10.3390/ma14237376
2. Smirnov I.V., Petrov Yu.V. (2020) Dynamic strength analysis of bitumen binders for asphalt concrete mixtures in terms of the fracture incubation time criterion. *Physical Mesomechanics*. 23. pp. 538–546. doi: 10.1134/S1029959920060090
3. Volegov P.S., Gribov D.S., Trusov P.V. (2017) Damage and fracture: Classical continuum theories. *Physical Mesomechanics*. 20. pp. 157–173. doi: 10.1134/S1029959917020060
4. Baev V.S., Pichugin A.P. (2010) Teoriya dinamicheskoy prochnosti kompozitsionnykh materialov [Theory of dynamic strength of composite materials]. *Stroitel'nye materialy – Construction Materials*. 7. pp. 84–86.
5. Krivosheina, M.N. (2022) Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya v pregradakh iz anizotropnykh materialov [Simulation of the stress state in barriers made of anisotropic materials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 89–99. doi: 10.17223/19988621/79/8
6. Kolsky H. (1949) An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 62(11). pp. 676–700.
7. Kurdumov S.P. (2006) *Rezhimy s obostreniem. Evolyutsiya idei* [Modes with peaking. Evolution of an idea]. Moscow: FISMATLIT.
8. Shilko E.V., Grigoriev A.S., Lapshina A.A., Buyakov A.S., Shmakov V.V., Dmitriev A.I., Zabolotskiy A.V., Andreev K. (2023) Development of a mesoscale mechanical model of ceramic materials with multiscale porosity. Silica refractory case study. *AIP Conference Proceedings*. Article 2899. doi: 10.1063/5.0162808
9. Grigoriev A.S., Shilko E.V., Skripnyak V.A., Psakhie S.G. (2019) Kinetic approach to the development of computational dynamic models for brittle solids. *International Journal of Impact Engineering*. 123. pp. 14–25. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.018
10. Makarov P.V., Eremin M.O. (2013) Fracture model of brittle and quasibrittle material and geomechanics. *Physical Mesomechanics*. 16. pp. 207–226. doi: 10.1134/S1029959913030041
11. Murakami Y. (1987) *Stress Intensity Factors Handbook*. Oxford: Pergamon Press.
12. Andreev K., Yin Y., Luchini B., Sabirov I. (2021) Failure of refractory masonry material under monotonic and cyclic loading – Crack propagation analysis. *Construction and Building Materials*. 299. Article 124203. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124203
13. Savel'ev I.V. (2020) *Kurs obshchey fiziki. Mekhanika. Molekulyarnaya fizika. Tom 1* [General physics course. Mechanics. Molecular physics. Volume 1]. Moscow: LAN'.
14. Morozov V.A., Savenkov G.G. (2013) Limiting velocity of crack propagation in dynamically fractured materials. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 54. pp. 142–147. doi: 10.1134/S0021894413010173

15. Chekunaev N.I., Kaplan A.M. (2009) Limiting velocity of crack propagation in elastic materials. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 50. pp. 677–683. doi: 10.1007/s10808-009-0091-1
16. Pobedrya B.E. (1997) Modeli mekhaniki sploshnoy sredy [Models of continuum mechanics]. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika – Fundamental and Applied Mathematics*. 3(1). pp. 93–127.
17. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Smirnov I.V. (2012) High-rate deformation and fracture of fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 53(6). pp. 926–933. doi: 10.1134/S0021894412060168
18. Zabolotskiy A.V. (2017) Postroenie i issledovanie modeli porovoy struktury keramicheskogo materiala [Construction and study of a model of the pore structure of a ceramic material]. *Innovatsionnaya nauka – Innovative Science*. 03(1). pp. 27–34.
19. Feodos'ev V.I. (2016) *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: MGТУ im. Baumana.
20. Bel'kheeva R.K. (2024) Maloparametricheskoe uravnenie sostoyaniya grafita dlya opisaniya povedeniya sploshnykh i poristykh obraztsov v udarnykh volnakh i volnakh razgruzki [Low-parametric equation of state for graphite describing solid and porous samples under shock and unloading waves]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 90. pp. 50–63. doi: 10.17223/19988621/90/5
21. Stepashkin A.A., Ozherelkov D.Yu., Sazonov Yu.B., Komissarov A.A. (2018) Kriterii otsenki vyazkosti razrusheniya uglerod - uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Criteria for assessing the fracture toughness of carbon-carbon composite materials]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*. 4. pp. 64–70.
22. Wang X., Chen Y., Ding J., Yu C., Deng C., Zhu H. (2021) Influence of ceramic phase content and its morphology on mechanical properties of MgO–C refractories under high temperature nitriding. *Ceramics International*. 47(8). pp. 10603–10610. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.12.172

Сведения об авторах:

Заболотский Андрей Васильевич – кандидат технических наук, инженер-технолог отдела инжиниринга Управления инжиниринга, проектов и производства работ ООО «Группа “Магнезит”» (Сатка, Россия); научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: zabolotsky@bk.ru

Дмитриев Андрей Иванович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия); Томский государственный университет (Томск, Россия). E-mail: dmitr@ispms.ru

Information about the authors:

Zabolotskiy Andrey V. (Candidate of Technical Sciences, Process Engineer, Magnezit Group, Satka, Russian Federation; Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: zabolotsky@bk.ru

Dmitriev Andrey I. (Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation; Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: dmitr@ispms.ru

Статья поступила в редакцию 22.10.2024; принята к публикации 06.09.2025

The article was submitted 22.10.2024; accepted for publication 06.09.2025