

УДК 691.21:53.096

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-118-132

*Т.Н. НЕМОВА, В.С. РЕКУНОВ, Н.А. ЦВЕТКОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **РАЗРУШЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (КИРПИЧ, БЕТОН, ГРАНИТ) ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУЙ**

В статье представлены результаты экспериментального исследования разрушения некоторых строительных материалов высокотемпературными гетерогенными струями продуктов сгорания твердых топлив. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности зданий и сооружений специального назначения при экстремальных тепловых воздействиях на элементы их конструкций. Целью работы являлось установление основных закономерностей разрушения неметаллических конструкционных материалов (кирпич, бетон, гранит) при воздействии на них высокотемпературных гетерогенных струй продуктов сгорания твердых топлив и разработка на их основе физической модели процесса. Для проведения экспериментов использовался газодинамический стенд, позволяющий варьировать давление торможения потока; в качестве характеристик выбраны величины массовой скорости разрушения материала и глубины образующихся кратеров. Получены зависимости массовых скоростей разрушения и глубин кратеров от давления торможения в сравнении с аналогичными данными для стали. Приведены данные по расчетам величин напряжений в приповерхностном слое материала. Предложена физическая модель процесса разрушения неметаллических конструкционных материалов, основанная на превышении возникающих в приповерхностном слое материала напряжений предела прочности материала.

**Ключевые слова:** строительные материалы; гетерогенная струя; газодинамический стенд; параметры струи; массовая скорость разрушения; предел прочности материала; напряжения на границе раздела.

**Для цитирования:** Немова Т.Н., Рекунов В.С., Цветков Н.А. Разрушение строительных материалов (кирпич, бетон, гранит) при высокотемпературном тепловом воздействии гетерогенных струй // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 118–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-118-132

*T.N. NEMOVA, V.S. REKUNOV, N.A. TSVETKOV,  
Tomsk State University of Architecture and Building*

## **DESTRUCTION OF BUILDING MATERIALS (BRICK, CONCRETE, GRANITE) UNDER HIGH-TEMPERATURE EVAPORATION OF HETEROGENEOUS COMBUSTION PRODUCTS**

The paper presents the research results of the building material destruction due to high-temperature evaporation of heterogeneous solid-fuel combustion products. The aim of this work is to determine basic laws of destruction of non-metallic constructional materials (brick, concrete, granite) under the influence of high-temperature evaporation of heterogeneous solid-fuel combustion products and develop a physical model of the process. A gas-dynamic setup is used to conduct the experiments, which allows to vary the stagnation pressure. The destruction rate of the material and the depth of resulting craters are chosen as characterization parameters.

The dependence of the destruction rate and the crater depth on the stagnation pressure is compared with the similar data for steel. The stress values are obtained for the surface layer of the material. The proposed physical model of the destruction process of non-metallic constructional materials is based on excess of stresses of the material strength limit arising in its subsurface layer. The obtained results can be used to ensure the safety of special-purpose buildings at extreme thermal effects on the structural elements.

**Keywords:** construction materials; heterogeneous flow; destruction rate; gas-dynamic setup; flow parameters; mass velocity; ultimate strength; interface stress.

**For citation:** Nemova T.N., Rekunov V.S., Tsvetkov N.A. Razrushenie stroitel'nykh materialov (kirpich, beton, granit) pri vysokotemperaturnom teplovom vozdествii geterogennykh strui [Destruction of building materials (brick, concrete, granite) under high-temperature evaporation of heterogeneous combustion products]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 118–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-118-132

При проектировании и строительстве зданий и сооружений специального назначения одним из основных критериев является обеспечение их прочности и устойчивости при экстремальных тепловых воздействиях. Пожарная безопасность при этом достигается выбором соответствующих материалов несущих элементов строительных конструкций с определенными пределами огнестойкости [1].

Степень разрушения строительных конструкций при воздействии открытого огня определяется свойствами материалов конструкций. Так, наибольшему разрушению, чаще всего носящему фатальный характер, подвергаются конструкции, изготовленные из дерева или составляющих.

Стальные конструкции более устойчивы к высокотемпературному воздействию, однако при определенных температурах (выше 600 °С) вследствие преимущественного использования малоуглеродистых сталей они значительно деформируются.

В железобетонных конструкциях происходящие необратимые изменения также связаны с температурными деформациями металла, что приводит к снижению прочности материала.

В бетонах в диапазоне температур 250–300 °С происходит изменение структуры и уменьшение прочностных характеристик цементного камня, в результате чего материал растрескивается, а при более высоких температурах полностью разрушается [2].

Однако наряду с воздействием открытого огня на конструкционные материалы, применяемые в строительстве, возможны ситуации, когда разрушение материалов вследствие техногенных катастроф обусловлено воздействием высокотемпературных тепловых струй различной природы, в том числе гетерогенных струй, генерированных сгоранием различных топлив, содержащих частицы металла (теплоэрозионное разрушение) [3, 4]. Вопросам механизма и физическим моделям процесса разрушения материалов в этих случаях до настоящего времени уделено мало внимания.

Так, в работах [3–8] приведены результаты исследования механизма разрушения стали высокотемпературными газовыми и гетерогенными струями с высоким содержанием частиц металла (железо, алюминий). Установлено

[8], что повышение концентрации частиц в струе приводит к увеличению массовой скорости разрушения стали. Механизм разрушения является неударным и не сопровождается плавлением материала, о чем свидетельствует низкая относительно температуры плавления величина температуры материала в момент разрушения, а также результаты качественного и количественного анализа структур стали в области разрушения. Сделан вывод о том, что разрушение сталей обусловлено структурными изменениями, происходящими в материале при тепловом воздействии, и переходе его в вязкотекучее состояние.

В современной научной литературе практически отсутствуют данные по физическим моделям процессов разрушения таких конструкционных строительных материалов, как бетон, гранит, мрамор, кирпич, при воздействии на них высокотемпературных гетерогенных струй. Однако предполагать идентичность механизмов разрушения сталей и бетона (гранита, мрамора, кирпича) [9] без проведения специальных исследований было бы в корне неверно.

В технологиях резки и сварки конструкционных материалов широко используется сфокусированное лазерное излучение, позволяющее исключить применение трудоемких операций и увеличить скорость резки [10]. Основными определяющими процесс резки параметрами приняты глубина и ширина реза. Однако следует отметить некоторую формализацию результатов, обусловленную отсутствием сравнительного анализа данных, полученных для материалов разной природы.

Сложность в интерпретации экспериментальных результатов во всех способах воздействия на конструкционные материалы заключается в том, что кирпич, бетон, гранит, мрамор не являются «чистыми» по составу и структуре материалами, а представляют собой сложные природные или искусственно созданные образования, включающие в себя разнородные по составу и свойствам компоненты (гранит, мрамор) [1]. Тем не менее широкое применение таких материалов в строительстве приводит к необходимости исследования параметров конкретных процессов теплового и эрозионного воздействия как для выбора оптимальной технологии обработки (резки и перфорации) материалов, так и для создания новых перспективных материалов [11, 12].

В связи с этим целью настоящей работы является установление основных закономерностей разрушения неметаллических конструкционных материалов высокотемпературными гетерогенными струями.

### **Методы исследования**

Экспериментальные исследования были проведены с помощью газодинамического стенда по методике [5, 6]. Основным элементом стенда являлся газогенератор, включающий в себя камеру сгорания, в которую помещалось твердое топливо, содержащее частицы металла (алюминий, железо) массовой концентрацией до 0,3, сопловой блок, системы зажигания и регистрации давления в камере. Температура продуктов сгорания топлива составляла 3000 К.

Использование твердотопливного варианта стенда обеспечивало устойчивое горение топлива при давлении до 5 МПа, а также позволило варьировать состав и концентрацию частиц в струе продуктов сгорания без применения сложных систем подачи частиц в струю.

Для оценки параметров воздействия струи на материалы были проведены расчеты одиночной сверхзвуковой струи в области непрерывного течения вблизи среза сопла и в области разрежения. Максимально возможные размеры струи (максимальный радиус  $y_m$ , образующий границы струи, и его осевая координата  $x_m$ ) для степени нерасчетности  $n \leq 20$  определены из следующих зависимостей [13]:

$$y_m = \frac{2}{k \cos^2 \alpha} n^{0,43}, \quad x_m = 2,6 \frac{M_a^2}{M_a^2 + 1} n^{0,39},$$

где  $\alpha$  – угол полураствора сопла в выходном сечении;  $M_a$  – значение числа Маха на срезе сопла. Для используемых в экспериментах осесимметричных сопел с углом раствора  $\alpha = 3'$  значения  $y_m$  и  $x_m$  в единицах, равных отношению максимального радиуса и осевой координаты к радиусу выходного сечения сопла, составляют 2,64 и 5,07 соответственно.

Оценки параметров сверхзвуковой струи (давление, скорость, число Маха и плотность) в критическом сечении сопла, на срезе сопла и в сечении струи, соответствующем максимальным значениям  $y_m$  и  $x_m$  торможения, были проведены по полученным экспериментально значениям давления в камере газогенератора при горении топлива и температуре продуктов сгорания [6, 8]. Погрешность измерения давления в камере сгорания тензометрическими датчиками типа ЛХ-412 составляла 6 %.

В результате проведения серии экспериментов определено расстояние от среза сопла до поверхности образца конструкционного материала, равное  $x = 4-4,8$  ( $x = L / r_a$ , где  $L$  – расстояние от среза сопла до образца;  $r_a$  – радиус выходного сечения сопла) и соответствующее оптимальному режущему воздействию струи на материал. Уменьшение этого расстояния приводит к разрушению сопла продуктами сгорания топлива, а увеличение – к снижению массовой скорости разрушения материала, а следовательно, и к снижению эффективности резки и перфорации.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальные параметры высокотемпературной струи (скорость 2836 м/с, число Маха 3,42, плотность 0,116 кг/м<sup>3</sup>) соответствуют области максимального радиуса воздействующей на материал струи.

Для экспериментальных исследований были изготовлены опытные образцы гранита и бетона. Образцы гранита представляли собой 2–3 пластины, собранные в пакет. Образцы бетона состояли из агломерата отвердевшего цементного камня (как результата гидратации смеси, включающей порошки алюмосиликатов), мелкого и крупного минерального камня и воды. В качестве керамических материалов были использованы стандартные красные кирпичи марок 75–100.

В качестве параметров, характеризующих процесс разрушения конструкционных материалов, были приняты величины массовой скорости разрушения и глубин кратеров, образующихся в результате воздействия высокотемпературной гетерогенной струи на материал. Массовая скорость разрушения рассчитывалась согласно [6, 8] по экспериментально определенным с помощью термопар величинам линейной скорости разрушения материала и его плотности. Для это-

го на задние стенки пластин гранита по оси струи устанавливались хромель-алюмелевые термопары. В образцах бетона термопары располагались по толщине образцов в процессе их изготовления соосно со струей.

Плотность гранита, бетона и кирпича для расчета скорости массового разрушения материалов определялась экспериментально, т. к. для гранитов разного состава величина плотности несколько различается, а для бетона и кирпича она существенно зависит от соотношения составляющих их компонентов.

Образцы с установленными в них термопарами с помощью специального держателя закреплялись перпендикулярно оси гетерогенной струи на расстоянии  $(10-15)10^{-3}$  м от выходного сечения сопла. Время эксперимента определялось по осциллограмме давления и не превышало 1 с. После эксперимента проводился визуальный анализ внешнего вида образцов.

Так как высокотемпературная гетерогенная струя представляет собой смесь газообразных продуктов сгорания и частиц полидисперсного состава [5], а присутствие частиц в струе приводит к повышению эффективной плотности струи, то были проведены исследования по оценке напряжений на границе материал – капля расплава металла (окисла металла), возникающих при ударе капли по поверхности твердого тела. Согласно [14], принимается ряд допущений, снижающих уровень давления на площадке соприкосновения капли с конструкционным материалом, вследствие чего получены нижние оценки нагрузок на поверхность твердого тела при ударе капли, однако в целом метод адекватно описывает физико-механические процессы в малой по размерам зоне взаимодействия.

Считаем, что в момент удара капли расплава о поверхность конструкционного материала на участке соприкосновения возникает сила, направленная по нормали к поверхности взаимодействия. Удар в реальных условиях происходит под определенным углом атаки, много меньшим  $90^\circ$ . Эта сила вызывает появление волн напряжений, распространяющихся как вдоль поверхности, так и вглубь материала. Изменение напряжений поперек фронта волн и соответствующие сдвиговые и нормальные напряжения в тонком прилегающем к поверхности слое материала и приводят к его разрушению. Величины всех напряжений, действующих в этом слое, в основном определяются величиной напряжений, действующих на границе, и свойствами материала.

В соответствии с [14] величина напряжений на поверхности контакта конструкционного материала с каплей расплава может быть определена следующей зависимостью:

$$\sigma_{\Gamma} = \frac{\rho_1 C_1 V_1 \cos \varphi}{1 + C_1 \rho_1 / C_2 \rho_2},$$

где  $C$  – скорость звука;  $\rho$  – плотность;  $V$  – скорость капли;  $\varphi$  – угол между нормалью к поверхности взаимодействия и вектором скорости капли (угол атаки); индексы 1 и 2 соответствуют капле расплава и конструкционному материалу.

### Результаты экспериментов

На рис. 1, а – в приведены фотографии внешнего вида типичных кратеров, образовавшихся соответственно в образцах гранита, бетона и кирпича

в результате воздействия высокотемпературной гетерогенной струи. На поверхности всех образцов вокруг кратера отмечено осаждение темного слоя конденсированных продуктов разрушения материала и сгорания топлива. Под ним – разрушенный на глубину  $(1-2)10^{-3}$  м поверхностный слой конструкционного материала.

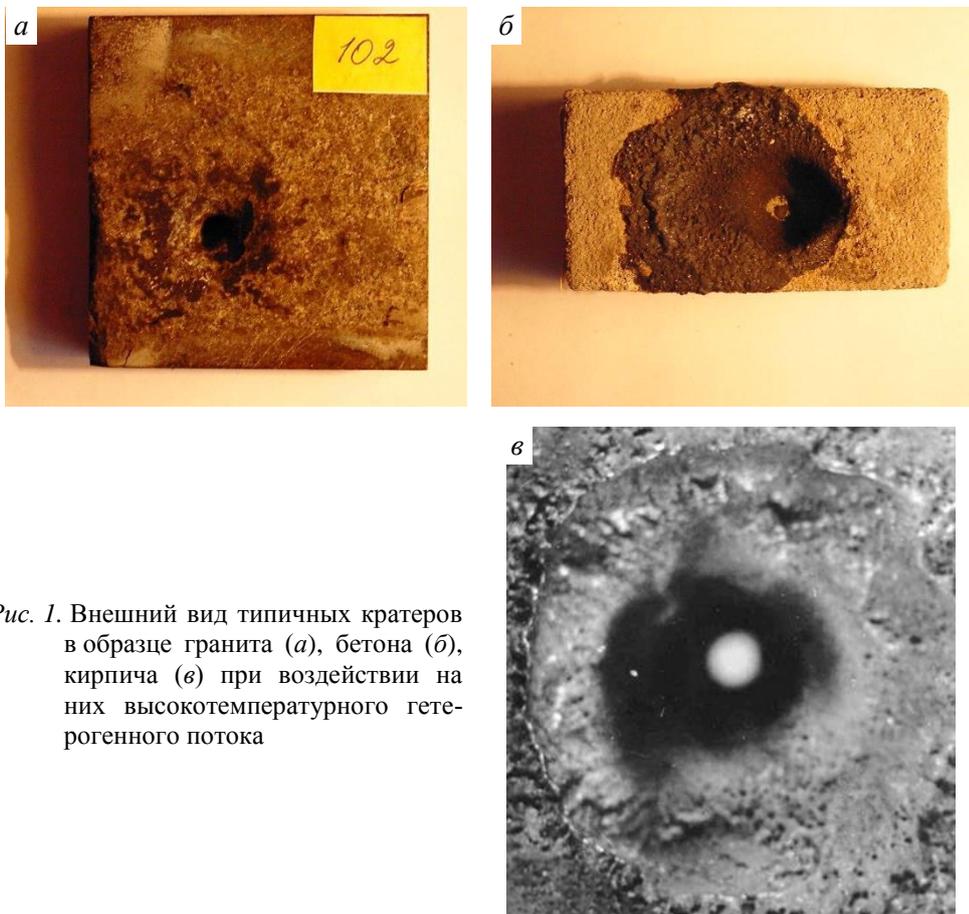


Рис. 1. Внешний вид типичных кратеров в образце гранита (а), бетона (б), кирпича (в) при воздействии на них высокотемпературного гетерогенного потока

Зона воздействия струи на гранит, в границах которой наблюдалось разрушение поверхностного слоя, имела диаметр, равный диаметру входной части кратера, что соответствует аналогичным параметрам, полученным для стали [7]. Поверхность материала при этом, даже вне зоны разрушающего воздействия струи продуктов сгорания, имела рыхловатую чешуйчатую структуру. Визуально весь образец материала в результате термического воздействия претерпел существенные изменения. Это выразалось в том, что все образцы гранита изменяют свою окраску, становясь серовато-мутными. При этом очертания кристаллов, составляющих гранит, на срезе несколько размываются.

Следует отметить, что ни на поверхности образца гранита, ни на стенках и в полости образующегося кратера не отмечено следов расплава компонентов, составляющих гранит, и прежде всего кварца.

На образцах бетона темный слой на поверхности материала вокруг образующегося кратера визуально представлял собой пористую пенистую массу с ярко выраженными следами расплава двуокиси кремния. При попытке отделить этот слой от поверхности бетона он отслаивался вместе со слоем исходного материала. При этом область разрушения поверхностного слоя значительно больше соответствующих областей для стали и гранита (диаметр области разрушения в два раза превышает диаметр входной части кратера). Это может быть обусловлено более низкой температурой плавления компонентов бетона по сравнению с соответствующей величиной для гранита.

Разрушение красного кирпича также сопровождалось образованием кратера, при этом размеры зоны воздействия высокотемпературной струи соответствуют аналогичной величине для бетона. Кроме того, как и для бетона, на поверхности материала в границах зоны воздействия струи наблюдались следы расплава в виде пористой блестящей массы, характерной для двуокиси кремния.

На рис. 2 и 3 приведены основные экспериментальные закономерности: изменение массовой скорости разрушения гранита и стали (рис. 2) и глубины образующихся в этих материалах кратеров (рис. 3) в зависимости от давления торможения.

Влияние давления торможения на массовую скорость разрушения хорошо согласуется для гранита и стали и носит линейный характер (рис. 2).

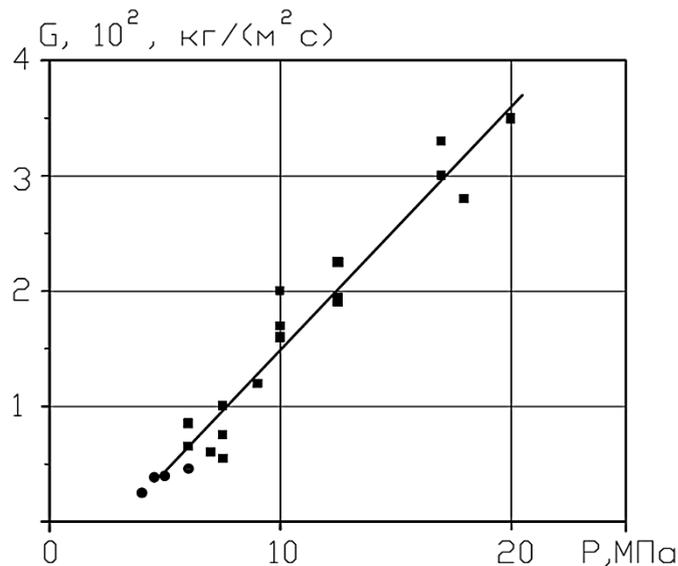


Рис. 2. Зависимость массовой скорости разрушения гранита от давления торможения в сравнении с аналогичными данными для стали:

● – гранит; ■ – сталь

Зависимость глубин образующихся кратеров от давления торможения также хорошо согласуется для гранита и стали. Для бетона глубина кратеров при тех же условиях эксперимента почти в два раза больше соответствующей величины для гранита и стали.

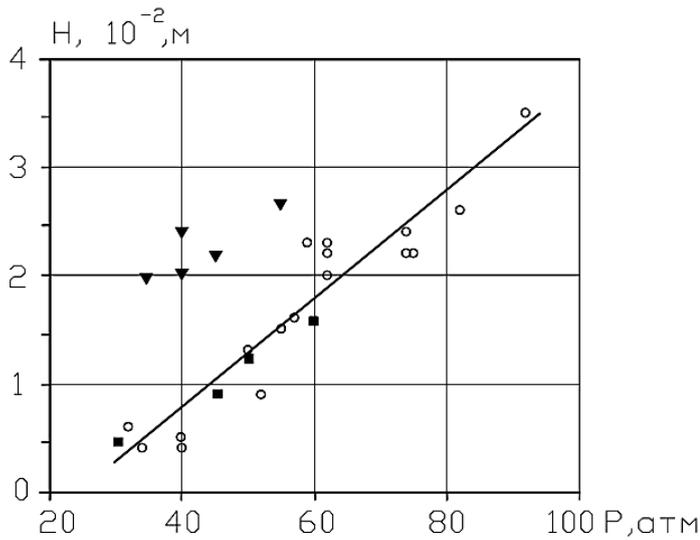


Рис. 3. Зависимость глубины разрушения конструктивных материалов от давления торможения:  
 ■ – гранит; ▼ – бетон; ○ – сталь

Расчет возникающих величин напряжений в поверхностном слое проведен для таких конструктивных материалов, как сталь, гранит, бетон, и топлив, содержащих частицы алюминия, железа, а также смеси частиц алюминия и железа в стехиометрическом соотношении 13:10 соответственно.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости величин напряжений в стали при воздействии частиц алюминия, железа и их смеси от угла атаки.

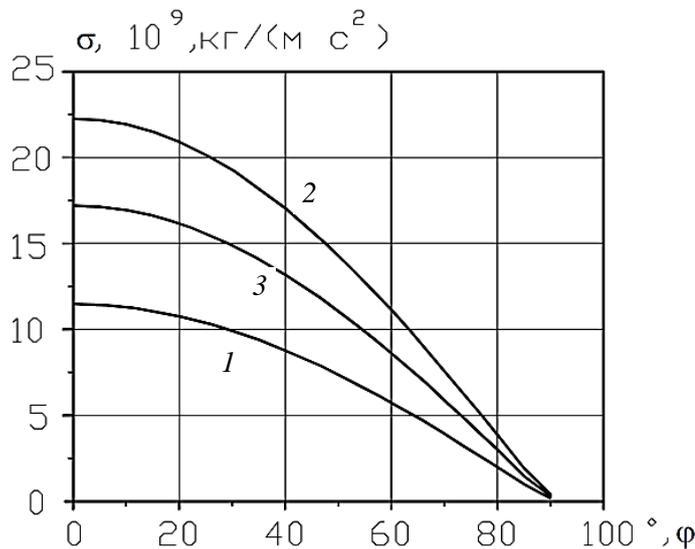


Рис. 4. Зависимости изменения величин напряжений в стали при воздействии частиц алюминия (кривая 1), железа (кривая 2) и их смеси (кривая 3) от угла атаки

Для всех кривых с увеличением угла атаки величины напряжений в материале уменьшаются. Максимальные значения напряжений достигаются при угле атаки, равном 0. Для частиц с большей плотностью величины напряжений существенно выше. Так при воздействии частиц железа величина напряжений в стали увеличивается почти вдвое по сравнению с воздействием частиц алюминия (рис. 4). Кривая величин напряжений для смеси частиц лежит между соответствующими кривыми для компонентов смеси. Аналогичные зависимости получены для бетона и гранита.

На рис. 5 приведены в сравнении зависимости величин напряжений, возникающих в стали, граните и бетоне при воздействии частиц алюминия и железа. Для всех материалов верхние кривые соответствуют частицам железа, нижние – частицам алюминия, при этом области, ограниченные этими кривыми, для разных материалов не пересекаются. Аналогичные зависимости для этих же конструкционных материалов при воздействии на них смеси частиц алюминия и железа в соотношении 13:10 приведены на рис. 6.

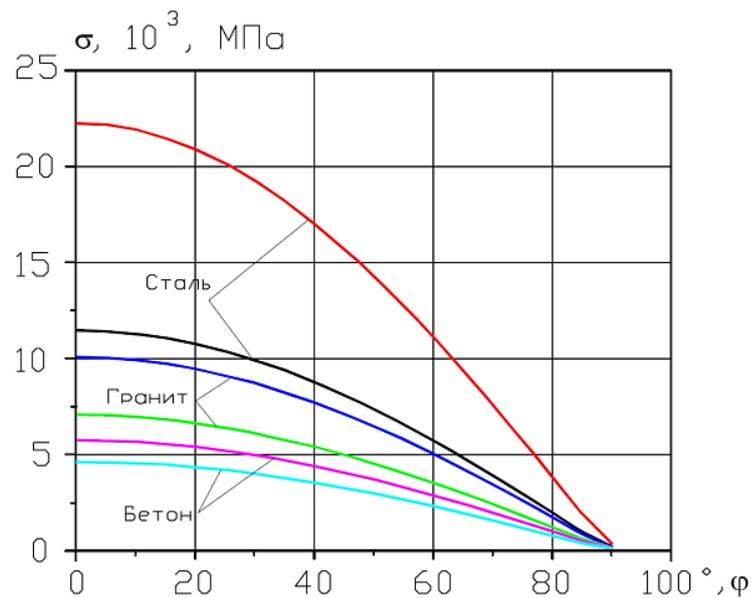


Рис. 5. Зависимости изменения величин напряжений в стали, граните и бетоне при воздействии частиц алюминия и железа. Верхние кривые соответствуют частицам железа, нижние – частицам алюминия

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что величины напряжений в исследованных конструкционных материалах повышаются с увеличением эффективной плотности струи вследствие увеличения плотности материала частиц (величина напряжений для частиц железа выше по сравнению с частицами алюминия). Для одинаковых частиц величина напряжений в материале повышается по шкале бетон – гранит – сталь.

При нагреве неметаллических конструкционных материалов свыше 100 °С вследствие происходящих в материалах физико-химических процессов

их прочность (особенно динамическая) снижается<sup>1</sup>. Поэтому при исследовании процесса их разрушения в данных условиях необходимо оценить степень влияния температуры.

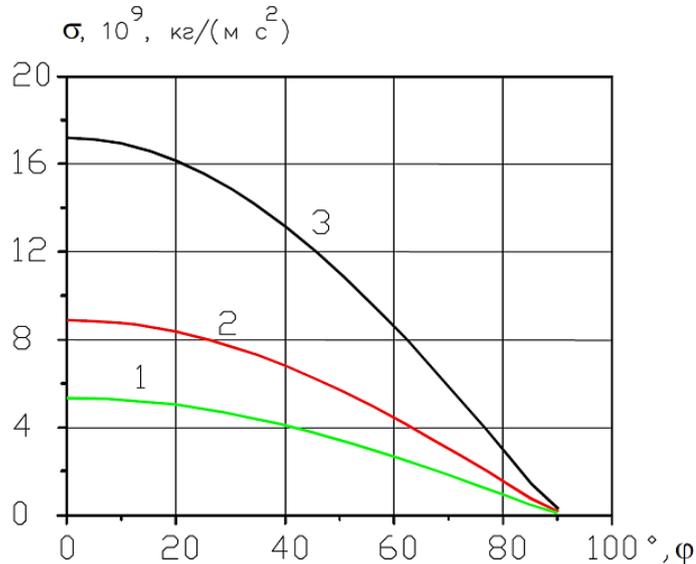


Рис. 6. Зависимости изменения величин напряжений в бетоне (кривая 1), граните (кривая 2) и стали (кривая 3) при воздействии гетерогенной высокотемпературной струи смеси частиц алюминия и железа

В таблице приведены известные значения пределов прочности бетона, гранита и стали при температуре 18 и 500 °С, а также рассчитанные по приведенной выше методике величины напряжений в приповерхностном слое материалов при температуре 18 °С.

| Параметры                         | Бетон                               | Гранит                             | Сталь             |
|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| $\sigma_B$ , МПа (18 °С)          | $0,4 \cdot 10^2$                    | $10^2 - 1,6 \cdot 10^2$            | $0,43 \cdot 10^3$ |
| $\sigma_B$ , МПа (500 °С)         | $0,24 \cdot 10^2 - 0,08 \cdot 10^2$ | $0,6 \cdot 10^2 - 0,96 \cdot 10^2$ | $0,23 \cdot 10^3$ |
| $\sigma_T$ , МПа                  | $5,5 \cdot 10^3$                    | $9 \cdot 10^3$                     | $17,2 \cdot 10^3$ |
| Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ | 2200                                | 2620                               | 7800              |
| Твердость                         |                                     | 6–7                                | 6–8               |

Анализ данных таблицы показал, что рассчитанные величины напряжений в подповерхностном слое стали, бетона и гранита даже при нормальной

<sup>1</sup> СП 52-110-2009. Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим повышенным и высоким температурам. Москва: ФГУП НИЦ Строительство, 2009; ГОСТ 379-2015. Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.

температуре выше предела прочности для этих материалов. При повышении температуры до 500 °С разница соответственно увеличивается. Величина предела прочности конструкционных материалов при температурах 18 и 500 °С увеличивается по шкале бетон – гранит – сталь, что хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными (см. рис. 2 и 3). Величины плотности материалов увеличиваются по шкале бетон – гранит – сталь, а диапазоны твердости гранита и стали пересекаются.

Таким образом, скорость массового разрушения (и глубина перфорации) конструкционных материалов определяется физическими свойствами материалов.

### **Физическая модель разрушения конструкционных материалов**

Анализ представленных выше экспериментальных и расчетных результатов позволяет утверждать, что механизм разрушения конструкционных материалов, как и для сталей, обусловлен его уносом при превышении напряжений, возникающих в приповерхностном слое, предела прочности материала. С изменением угла атаки, когда воздействующие частицы движутся вдоль поверхности, разрушение материалов происходит при превышении напряжений предела прочности материала при срезе. Для расчетов в технике предел прочности при срезе принимается обычно равным аналогичным величинам, в частности, при динамическом воздействии.

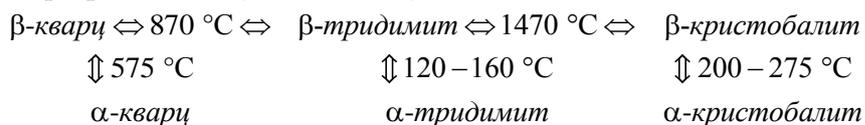
В начальный момент воздействия на поверхности материала образуется веерная полуограниченная струя, границы которой определены настоящей работой. В сверхзвуковой части струи процессы переноса наиболее интенсивны. Диаметр входной части формирующегося кратера не меняется со временем, соответствуя тому, какой образуется в начальный момент. Растекание струи и унос материала происходят вдоль поверхности материала при выполнении условия равенства касательных напряжений и предела прочности вследствие абразивного действия частиц металла, содержащегося в топливе, и движущихся вдоль поверхности в режиме «трение – скольжение».

Увеличение эффективной плотности струи приводит к увеличению величин касательных напряжений трения струи и, соответственно, к интенсификации разрушения (уноса) материала.

Гранит и бетон, в состав которых входят одинаковые компоненты, в частности алюмосиликаты, значительно различаются по структурному строению. Гранит представляет собой сложную полнокристаллическую породу магматического происхождения, содержащую до 70 % кварца [15], и, по сравнению с бетоном, имеет упорядоченную решетчатую тетраэдрическую кристаллическую структуру. В силу этого твердость гранита будет выше, чем для материалов с аналогичным составом, но неупорядоченной структурой, каковым и является бетон [16]. В бетоне эти составляющие не образуют общей системы, имеющей кристаллическую структуру и отличающейся повышенной твердостью и механической прочностью. Поэтому в результате динамического или режущего воздействия на бетон даже при нормальных условиях происходит ослабление в первую очередь связи цементный камень – наполнитель, что приводит к значительным деформациям, обуславливающим резкое снижение прочности материала.

Повышение температуры (даже кратковременное) приводит к значительному снижению прочности бетона вследствие протекания процесса дегидратации. Наличие паров воды, которые присутствуют в газообразных продуктах сгорания топлива, и химическое взаимодействие их с окислами кальция приводит к локальному увеличению объема, что снижает прочность бетона и интенсифицирует процесс его разрушения.

В основном наполнителем бетона является песок, состоящий из 60–95 % двуокиси кремния, которая существует в трех кристаллических модификациях: кварц, тридимит и кристобалит. При нагревании происходят модификационные превращения, идущие по следующей схеме:



При температуре 1710 °C образуется расплав. Эти процессы в совокупности с дегидратацией приводят уже при относительно невысоких температурах к повышению напряжений в конструкционном материале и нарушению механических связей кварца с цементным камнем. Механическая прочность цементного камня при 500 °C уменьшается в 5 раз [17]. При этом наличие частиц в высокотемпературной гетерогенной струе способствует интенсификации разрушения бетона.

Физико-химические превращения в бетоне при нагреве его высокотемпературной гетерогенной струей и визуальный анализ образцов после экспериментов позволили сделать вывод о том, что глубина модификационных превращений в бетоне значительна и достигает стадии появления вязкого расплава. Удаление его из зоны разрушения по сравнению с мелкодисперсными продуктами разрушения, например сталей, возможно при повышенных скоростях возвратной струи. Вследствие этого на поверхности материала фиксируются следы расплава.

Разрушение керамических материалов, в частности красного кирпича, характеризуется тем, что вследствие его состава (в основном обычная глина  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , содержащая большое количество железа и песка) нагрев его до 800–1000 °C не приводит к плавлению. При повышении температуры происходит плавление, сопровождаемое вспучиванием расплава вследствие выделения газов.

Процесс разрушения керамических материалов (красного кирпича) может быть представлен следующим образом. При воздействии высокотемпературной гетерогенной струи происходит прогрев поверхностного слоя материала и последующий унос его с поверхности. При движении частиц материала в возвратной струе происходит их прогрев, сопровождающийся плавлением и образованием вязкого расплава. Так как скорость возвратной струи недостаточна для удаления вязкого расплава с поверхности конструкционного материала у входной части кратера, расплав растекается по поверхности и застывает в виде пористой стекловидной массы, как отмечено при визуальном анализе внешнего вида образцов (см. рис. 1, в).

Таким образом, процессы разрушения материалов с кристаллической структурой и близкими значениями величин твердости (как гранит и сталь) при воздействии на них высокотемпературных гетерогенных струй с большой концентрацией частиц характеризуются близкими параметрами разрушения (глубина и массовая скорость). В отличие от них разрушение конструкционных материалов с неупорядоченной структурой (и более низкими величинами твердости) происходит по тому же механизму, но характеризуется большими значениями глубин перфорации и величин массовой скорости разрушения. С учетом физических свойств конструкционных материалов экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными данными.

### Выводы

Механизм разрушения конструкционных материалов высокотемпературной гетерогенной струей обусловлен уносом материала при превышении напряжений, возникающих в приповерхностном слое, предела прочности материала.

Напряжения, возникающие в исследованных конструкционных материалах, повышаются с увеличением эффективной плотности струи. При прочих равных условиях величина напряжений зависит от предела прочности материала и повышается по шкале бетон – гранит – сталь.

Процесс разрушения бетона и кирпича сопровождается плавлением основного компонента материалов – кварца.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Киреева Ю.И.* Современные строительные материалы и изделия. Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. 245 с.
2. *Пушенко А.С.* Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2008. 217 с.
3. *Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л.* Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. Москва : Янус-К, 2007. 392 с.
4. *Михатулин Д.С., Немова Т.Н., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л.* Гетерогенные режущие устройства: оптимизация газодинамического тракта разгона частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8. № 2. С. 301–310.
5. *Кузнецов Г.В., Немова Т.Н., Савельева Л.А.* Влияние состава и процесса горения металлизированных твердых топлив на интенсивность разрушения конструкционных материалов струей продуктов сгорания // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 6. С. 89–95.
6. *Абалтусов В.Е., Кузнецов Г.В., Немова Т.Н.* Механизм высокотемпературного разрушения металлов под действием гетерогенной струи с высокой концентрацией частиц // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 3. С. 438–444.
7. *Немова Т.Н., Колесникова Е.А.* Определение температурного поля подложки под каплей расплава методом выравнивания температур соседних слоев // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 12-2. С. 195–199.
8. *Kuznetsov G.V., Alekseenko N.N., Nemova T.N.* Steel destruction under the action of high-temperature heterogeneous streams with a significant concentration of the particles // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 5. С. 79–86.
9. *Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А.* Термомеханическое разрушение бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 61–68.
10. *Букатый В.И., Перфильев В.О., Шараухов Н.Н.* Исследование цветовым пирометром динамики температуры мрамора и гранита при воздействии мощным лазерным излучением // Известия Алтайского государственного университета. 2005. № 1 (35). С. 93–96.

11. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г. Разработка плазменных технологий для стройиндустрии // Актуальные проблемы современности. 2017. № 1 (15). С. 150–154.
12. Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Процессы плавления силикатов в плазмохимическом реакторе // Бюллетень науки и практики : электронный журнал. 2017. № 2 (15). С. 59–62.
13. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. Москва : Машиностроение, 1991. 560 с.
14. Позняк И.М., Климов Н.С., Подковыров В.Л., Сафронов В.М., Житлухин А.М., Коваленко Д.В. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2012. Вып. 4. С. 23–33.
15. Петрографический кодекс России. Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2008. С. 144. 200 с.
16. Туманов А. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва : Palmarium Academic Publishing, 2015. 104 с.
17. Семериков И.С., Герасимова Е.С. Физическая химия строительных материалов. 2-е изд., стер. Москва : Флинта, 2017. 204 с.

## REFERENCES

1. Kireeva Yu.I. Sovremennye stroitel'nye materialy i izdeliya [Modern building materials and products]. Rostov-on-Don: Feniks, 2010. 245 p. (rus)
2. Pushenko A.S. Vysokoprochnyi beton v usloviyakh vozdeystviya vysokikh temperatur : dis. ... kand. tekhn. nauk [High strength concrete under high-temperature conditions. PhD Thesis]. Rostov-on-Don, 2008. 217 p. (rus)
3. Mikhatulin D.S., Polezhaev Yu.V., Reviznikov D.L. Teploobmen i razrushenie tel v sverkhzvukovom geterogennom potoke [Thermal exchange and destruction of bodies in a supersonic heterogeneous flow]. Moscow: Yanus-K, 2007. 392 p. (rus)
4. Mikhatulin D.S., Nemova T.N., Polezhaev Yu.V., Reviznikov D.L. Geterogennye rezhushchie ustroystva: optimizatsiya gazodinamicheskogo trakta razgona chastits [Heterogeneous cutting devices: optimization of gas-dynamic particle acceleration path]. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2001. V. 8. No. 2. Pp. 301–310. (rus)
5. Kuznetsov G.V., Nemova T.N., Savel'eva L.A. Vliyanie sostava i protsessa goreniya metalizirovannykh tverdykh topliv na intensivnost' razrusheniya konstruktsionnykh materialov struei produktov sgoraniya [Influence of composition and combustion process of metallized solid fuels destructed by high-temperature evaporation of heterogeneous combustion products]. *Fizika goreniya i vzryva*. 2002. V. 38. No. 6. Pp. 89–95. (rus)
6. Abaltusov V.E., Kuznetsov G.V., Nemova T.N. Mekhanizm vysokotemperaturnogo razrusheniya metallov pod deistviem geterogennoi strui s vysokoi kontsentratsiei chastits [Mechanism of destruction of metals under high-temperature evaporation with high particle concentration]. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1999. V. 37. No. 3. Pp. 438–444. (rus)
7. Nemova T.N., Kolesnikova E.A. Opredelenie temperaturnogo polya podlozhki pod kaplei rasplava metodom vyravnivaniya temperatur sosednikh sloev [Temperature field of substrate under molten droplet detected by temperature equalization of adjacent layers]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010. V. 53. No. 12-2. Pp. 195–199. (rus)
8. Kuznetsov G.V., Alekseenko N.N., Nemova T.N. Steel destruction under the action of high-temperature heterogeneous streams with a significant concentration of the particles. *Inorganic Materials: Applied Research Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2000. No. 5. Pp. 79–86.
9. Zharova I.K., Kuznetsov G.V., Maslov E.A. Termomekhanicheskoe razrushenie betonnoi plastyiny pod deistviem vysokotemperaturnoi geterogennoi strui [Thermomechanical destruction of concrete plate under high-temperature heterogeneous flow]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2006. No. 6. Pp. 61–68. (rus)
10. Bukatyi V.I., Perfil'ev V.O., Sharaukhov N.N. Issledovanie tsvetovym pirometrom dinamiki temperatury mramora i granita pri vozdeystvii moshchnym lazernym izlucheniem [Color pyrometer measurements of temperature dynamics of marble and granite exposed to powerful laser radiation]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2005. No. 1 (35). Pp. 93–96. (rus)

11. *Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G.* Razrabotka plazmennyykh tekhnologii dlya stroiindustrii [Development of plasma technologies for construction industry]. Aktual'nye problemy sovremennosti. 2017. No. 1 (15). Pp. 150–154. (rus)
12. *Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V.* Protsessy plavleniya silikatov v plazmokhimicheskom reaktore [Silicate melting processes in plasma chemical reactor]. *Byulleten' nauki i praktiki: elektronnyi zhurnal*. 2017. No. 2 (15). Pp. 59–62. (rus)
13. *Erokhin B.T.* Teoriya vnutrikamernyykh protsessov i proektirovanie RDTT [Intra-compartment process theory and design of RDTT]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 560 p. (rus)
14. *Poznyak I.M., Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Safronov V.M., Zhitlukhin A.M., Kovalenko D.V.* Eroziya metallov pri vozdeistvii intensivnykh potokov plazmy [Erosion of metals under intensive plasma flows]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Termoyadernyi sintez*. 2012. No. 4. Pp. 23–33. (rus)
15. Petrograficheskii kodeks Rossii [Petrographic Code of Russia]. St.-Peterburg: VSEGEI, 2008. P. 144. (rus)
16. *Tumanov A.* Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii [Concrete and reinforced concrete structures]. Moscow: Palmarium Academic Publishing, 2015. 104 p. (rus)
17. *Semerikov I.S., Gerasimova E.S.* Fizicheskaya khimiya stroitel'nykh materialov [Physical chemistry of building materials]. 2nd ed., Moscow: Flinta, 2017. 204 p. (rus)

#### Сведения об авторах

*Немова Татьяна Николаевна*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf\_tgs@tsuab.ru

*Рекунов Виталий Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf\_tgs@tsuab.ru

*Цветков Николай Александрович*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

#### Authors Details

*Tat'yana N. Nemova*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia kaf\_tgs@tsuab.ru

*Vitalii S. Rekunov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia kaf\_tgs@tsuab.ru

*Nikolai A. Tsvetkov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia nac.tsuab@yandex.ru