

Д. г.-м. н. **В. А. Перепелицын**¹ (✉), д. т. н. **Ф. Л. Капустин**¹,
к. т. н. **К. Г. Земляной**¹, **Л. В. Остряков**², к. г.-м. н. **Л. П. Яковлева**²,
И. Г. Маряев³, **Л. М. Михайловская**³

¹ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

² ОАО «Первоуральский динасовый завод», г. Первоуральск, Россия

³ ОАО «Группа «Магnezит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

УДК 666.76.019

ГЕНЕЗИС ТРЕЩИН В ОГНЕУПОРАХ

Приведена генетическая классификация трещин по происхождению на всех стадиях производства и применения огнеупоров. Микротрещины в огнеупорах зарождаются как от внешних воздействий, так и от внутренних термических, механических, физических и химических напряжений первого и второго рода. Внешние и внутренние энергетические генераторы напряжений создают более 20 генетических типов микро- и макротрещин.

Ключевые слова: *генезис, огнеупоры, трещины «холодные», трещины «горячие», давление, напряжение.*

Поры и трещины являются практически постоянными элементами строения всех огнеупорных материалов, изделий и футеровок тепловых агрегатов. Они могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на различные свойства огнеупорной продукции. Однако в большинстве случаев чрезмерное развитие микро- и особенно макротрещиноватости крайне негативно влияет на износостойкость формованных огнеупоров, поэтому такие изделия являются браком.

Между содержанием терминов «пора» и «трещина» имеется много общего, но есть и существенные различия. С геометрической точки зрения пора — не заполненная твердым веществом часть внутреннего объема материала, имеющая три измерения: длину, ширину и высоту (поры произвольной формы) или один размер (поры кубовидной, сфероидальной, изометричной формы).

Поры и трещины возникают на многих стадиях эволюции минерального вещества как при геологических процессах в природе (метаморфизм, тектонические явления и др.), так и при изготовлении и службе огнеупоров, абразивов, керамики, стекла, петругических и других разновидностей технического камня. При этом для образования трещины обязательным условием обычно являются механические напряжения — энергетические воздействия высокой интенсивности различного происхождения. В отличие от трещин поры, как правило, получают в отсутствие внешних и внутренних механических напряжений.

В составе всех современных формованных огнеупоров (кроме эломок^{*1}), в том числе безобжиговых на органических связующих, явно преобладает минеральное вещество. Как известно, почти все природные минералы и аналогичные им по свойствам искусственные неорганические соединения имеют повышенную хрупкость — свойство, обратное ударной вязкости. Именно хрупкость и незначительная пластичность определяют интенсивность трещинообразования в минеральной продукции как при нормальной, так и при повышенной температуре.

Несмотря на резко различные условия образования пор и трещин между ними есть промежуточные морфологические образования, так называемые поры-трещины [1]. Поры-трещины — переходная геометрическая форма от трехмерной открытой поры к двумерной трещине. Следует отметить, что при определении открытой пористости стандартным методом в суммарное значение этого свойства входят как сами открытые поры, так и поры-трещины, а также открытые микротрещины. Фактически открытая пористость — это суммарный объем открытых пор и всех видов открытых трещин. Как показала многолетняя практика, в огнеупорах магнезиального состава на долю микротрещин в показателе открытой пористости приходится не менее 1/4 их суммарного объема. В изделиях другого вещественного состава относительное развитие трещиноватости колеблется в широких пределах в зависимости от различных технологических параметров производства и условий службы огнеупоров в тепловых агрегатах.

В настоящее время нет стандартизированного количественного метода определения пол-

^{*1} Эломы — эластичные композиционные огнеупорные материалы, изготавливаемые из пластичной органической массы с минеральным наполнителем.

✉
В. А. Перепелицын
E-mail: pva-vostio@bk.ru

ной трещиноватости природного и технического камня, кроме фиксации крупноразмерных трещин в ответственных изделиях, например в изделиях для МНЛЗ, рентгеновским методом. Качественное и полуколичественное определение трещин осуществляется микроскопией. Трещины и поры, являющиеся главными и постоянными элементами структуры традиционных огнеупоров, оказывают значительное влияние на большинство их структурно- и особочувствительных свойств [2], особенно на термомеханические свойства, расплавоустойчивость и др.

Несмотря на актуальность проблемы взаимосвязи трещин различного типа со свойствами огнеупоров, этому вопросу в отечественной и зарубежной литературе не уделено достаточного внимания [3–7]. Наибольшее число публикаций посвящено образованию трещин термического происхождения, возникающих при резких колебаниях температуры [1, 3, 5–7]. Системных исследований трещин в техническом камне, в том числе и в огнеупорах, не проводилось. Нами на основании многолетнего опыта с использованием литературных источников по смежным научным дисциплинам сделана первая попытка систематизации трещин в огнеупорах по происхождению (генезису).

ГЕНЕЗИС ТРЕЩИН В ПРИРОДНОМ КАМНЕ

Прежде всего рассмотрим происхождение трещин в природном минеральном веществе — ближайшем аналоге искусственного (технического) камня. Макро- и микротрещины в минералах и горных породах уже более 200 лет являются объектом изучения минералогов, петрографов, кристаллографов и других специалистов. Геологами установлен полигенный генезис разномасштабных трещин в земной коре — от глобальных до микроскопических. В природе макро- и микротрещины образуются в широком интервале значений интенсивных термодинамических параметров: температуры, давления и концентрации активных компонентов (соответственно параметры T, P, C).

В природе трещины формируются почти во всех геологических и геохимических процессах при положительных и отрицательных температурах (пирогенез и криогенез) в условиях воздействия весьма высокого изостатического и одностороннего давления без участия химически активных реагентов и при их активном участии. В природном минеральном веществе различают три генетических типа трещин:

- механические (катаклиз, брекчирование, милонитизация, дезинтеграция и др.), формирующиеся преимущественно в результате внешних механических напряжений (динамический метаморфизм);

- термические — хрупкая деформация вследствие внешнего термического воздействия (контактный метаморфизм, растрескивание эффузивных пород, криогенез и др.);

- структурные, обусловленные в основном внутренними напряжениями вследствие многочисленных фазово-структурных превращений при метасоматозе, термическом метаморфизме и других процессах.

Как известно, более 95 % всех минералов относятся к числу весьма хрупких материалов, имеющих при нормальной температуре высокий предел упругости, практически полное отсутствие пластичности и разрушение без заметного изменения геометрической формы непосредственно за превышением предела упругости. Хрупкая деформация минералов сохраняется до повышенных температур (0,3–0,5 температуры плавления). При более высокой температуре возрастает роль пластической деформации, но хрупкость сохраняется.

Наиболее глубокий теоретический анализ генезиса трещин в горных породах и минералах обобщен в монографиях Н. П. Юшкина [8] и Д. П. Григорьева [9]. Н. П. Юшкин справедливо считает, что генезис трещин необходимо определять путем анализа генезиса напряжений, т. е. природы сил их вызывающих.

Анализируя напряженное состояние на уровне минерального индивида (кристалл, зерно), Н. П. Юшкин выявил три источника энергии, создающих поля напряжений в минералах (рис. 1):

- внешние силы, источник которых находится не только вне индивида, но обычно и вне агрегата; они передаются на минеральный индивид через окружающую среду, приводя его в напряженное состояние;

- силы, источником которых является сам минеральный индивид; эти силы вызывают напряжение в окружающей минерал среде;

- внутриминеральные силы, возникающие в каких-либо точках внутри индивида и создающие напряжение в отдельных его частях; под их действием напряженным может оказаться весь индивид и даже часть окружающей его среды [8].

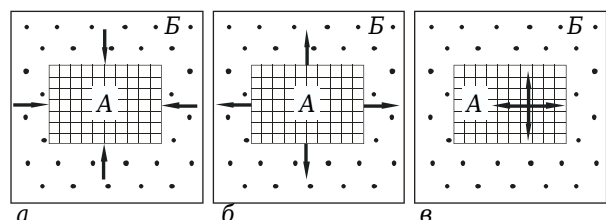


Рис. 1. Три типа сил, создающих поля механических напряжений в минеральных индивидах (по Н. П. Юшкину): а — внешние силы; б — силы минерального индивида; в — внутренние силы; А — минеральный индивид; Б — внешняя среда

Следовательно, трещины зарождаются и растут в минерале при воздействии как внешних силовых нагрузок, так и внутренних механических и других напряжений, превышающих предел прочности минерального вещества. Трещины являются конечной стадией деформаций минерала — хрупкого разрушения.

ГЕНЕЗИС ТРЕЩИН В ОГНЕУПОРАХ

Поры, трещины и переходные формы — поры-трещины самых разнообразных происхождения и геометрических форм — широко распространены во многих разновидностях природного и технического камня. Первые попытки классификации трещин были сделаны ранее [1, 3, 6, 10]. Однако в данных монографиях и статьях основное внимание уделено трещинам, возникающим в условиях резких изменений температуры вследствие термических напряжений («горячие» трещины), сведения о других «горячих» и «холодных» трещинах отсутствуют.

Классификацию дефектов строения огнеупоров можно разработать на основании различных базовых критериев: геометрических (форма и размер), функциональных (влияние на термомеханические и теплофизические свойства), генетических (происхождение, условия и механизм образования). При этом наибольший научный и практический интерес представляет генетическая классификация, т. е. систематизация дефектов по происхождению в различных условиях производства и применения огнеупоров.

Основой предлагаемого варианта генезиса трещин в огнеупорных и керамических материалах являются механические, термические и химические внешние и внутренние напряжения, а также различные массообъемные превращения в широком интервале значений интенсивных термодинамических параметров (P , T , C), создающие макро- и микротрещиноватость. В связи с резко различным поведением минерального вещества в широком температурном интервале [11] авторы сочли целесообразным разделить типы трещинообразования на низкотемпературные («холодные») и высокотемпературные («горячие»), традиционно последовательно реализующиеся на различных стадиях подготовки минерального сырья и технологии производства безобжиговой и обжигаемой огнеупорной продукции. Генетические типы «холодных» ($T \leq 100^\circ\text{C}$) и «горячих» ($T > 100^\circ\text{C}$) трещин, как и ранее пор [1], формирующихся в процессе изготовления огнеупоров, названы первичными, или технологическими (рис. 2–4).

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ

Низкотемпературные первичные (технологические) трещины относятся к четырем генетическим группам: механические, химические, кристаллизационные и биогенные (см. рис. 2). Механические трещины, в свою очередь, по характеру внешнего энергетического воздей-

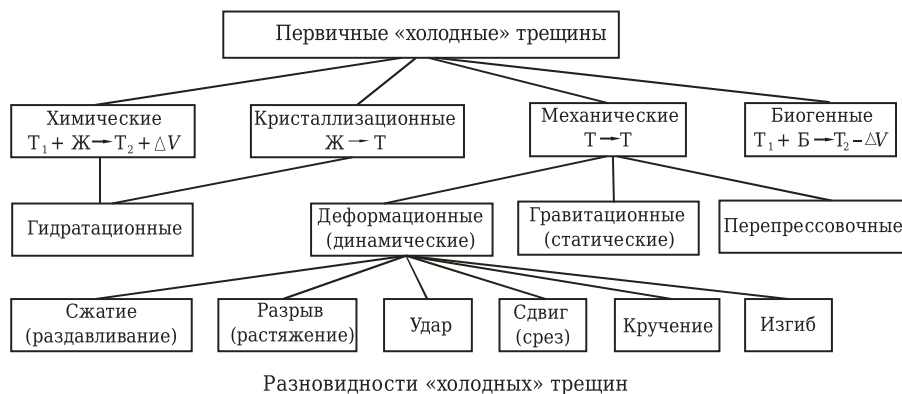


Рис. 2. Генетическая классификация технологических (первичных) «холодных» трещин: Т — твердое; Ж — жидкость; Б — бактерии; ΔV — изменение объема

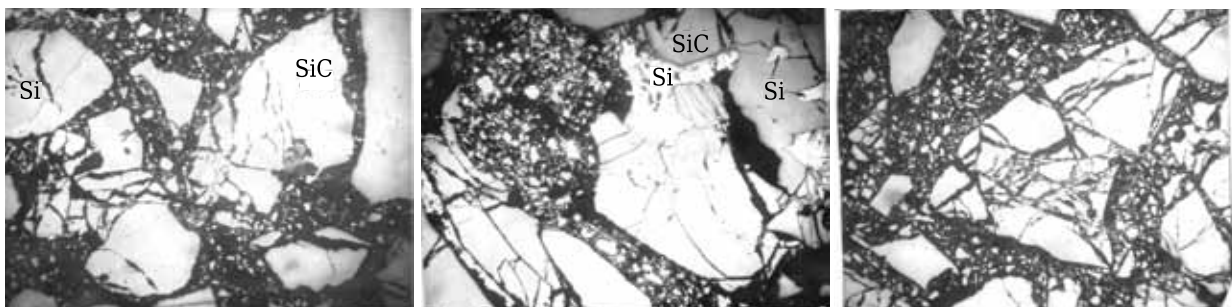


Рис. 3. Механические трещины хрупкого разрушения в карбиде кремния после прессования

ствия подразделяются на двумерные дефекты структуры от динамических нагрузок — сжатия, растяжения, удара, сдвига, кручения (см. рис. 2–4), статического давления (например, масса вышележащих рядов садки) и перепрессовочные. Последние возникают при формовании сырца изделий путем одностороннего прессования вследствие запрессовки воздуха и упругого расширения после снятия давления. Ориентированы перепрессовочные трещины в виде параллельных плоскостей, расположенных перпендикулярно направлению давления прессования.

При нормальной температуре в огнеупорах происходят различные химические реакции, сопровождающиеся положительным изменением объема новообразований. Например, гидратация периклаза MgO при 20 °С с образованием брусита $Mg(OH)_2$ протекает с увеличением объема на 13,3 см³/моль. При этом возникает давление примерно до 2000 МПа (20 кбар). Аналогичная реакция гидратации извести CaO с образованием портландита $Ca(OH)_2$ в нормальных условиях идет с увеличением объема $\Delta V = 16,3$ см³/моль и развивает давление примерно до 3300 МПа (33 кбар) [12]. Сведения о давлении продуктов кристаллизации при некоторых химических реакциях в огнеупорах в замкнутом пространстве приведены в таблице. Видно, что оно почти на 2–3 порядка превышает предел прочности при сжатии соответствующих видов огнеупорных изделий. При этом неизбежно формирование трещин.

При кристаллизации в свободном пространстве из растворов при нормальной температуре растущий кристалл развивает кристаллизационное давление. Величина кристаллизационных сил F вычисляется по формуле Хаимова – Малькова:

$$F = k \frac{T \ln C/C_0}{V},$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура; V — удельный объем; C/C_0 — пересыщение [8].

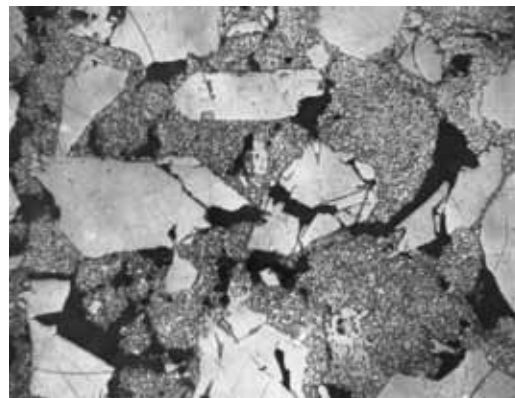


Рис. 4. Образование трещин и трещин-пор в периклазовом изделии (97,1 % MgO) после формования на гидравлическом прессе (давление прессования 160 МПа): белое — периклаз; темное — трещины и поры. Свет отраженный. $\times 16$

При наличии поверхностно-активных веществ (ПАВ) в растворе установлено явление понижения механической прочности твердых тел под влиянием абсорбции ПАВ из окружающей среды (эффект Ребиндера).

В последние годы выявлено образование в строительных материалах биокоррозионных трещин [13]. Биокоррозия обусловлена активным химическим воздействием некоторых бактерий, интенсивно размножающихся в сульфатных, фосфатных, карбонатных и других растворах. Подобные растворы применяют при производстве безобжиговых огнеупоров, что не исключает возможность протекания в них биохимических процессов и образования специфических биокоррозионных трещин.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ

Эти трещины можно разделить на две подгруппы по условиям формирования: 1) с участием воды, гидратов, карбонатов, кислот, солей и ор-

Давление кристаллизации при образовании новых минералов (по данным Jürgen Pötschke [12])

Минерал	Реакция	Увеличение объема*, см ³ /моль	Температура, °С	Давление кристаллизации, 10 ³ ат
Графит	$2CO = CO_2 + C$	5	500	62
Брусит	$MgO + H_2O = Mg(OH)_2$	13,3	RT (20)	20
Портландит	$CaO + H_2O = Ca(OH)_2$	16,3	RT (20)	33
Шпинель	$MgO + Al_2O_3 = MgAl_2O_4$	6,8	1400	51
Муллит	$2SiO_2 + 3Al_2O_3 = Si_2Al_6O_{13}$	11,7	1400	113
Нефелин	$2SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O = Na_2Al_2Si_2O_8$	9,2	1400	485
Калиофилит	$2SiO_2 + Al_2O_3 + K_2O = K_2Al_2Si_2O_8$	64,1	1400	61
β-глинозем	$Na_2O + 9Al_2O_3 = Na_2Al_{18}O_{28}$	38,4	1400	47
Бадделеит	$ZrO_2(куб) = ZrO_2(мон)$	1,9	1100	29
Кристаллит	$SiC + 3H_2O = SiO_2 + 3H_2 + CO$	13,2	1100	170
Двухкальциевый силикат	$\beta-2CaO \cdot SiO_2 = \gamma-Ca_2SiO_4$	6,25	620	51

* Молярный объем (молярная масса/плотность), см³/моль: C = 5, MgO = 11,2, $Mg(OH)_2$ = 24,5, CaO = 16,7, $Ca(OH)_2$ = 33,0, Na_2O = 27,3, Al_2O_3 = 25,7, SiO_2 (кварц) = 23,1, SiO_2 (кристаллит) = 25,7, K_2O = 40,5, $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ = 108,4, $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ = 176,5, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ = 135, $MgO \cdot Al_2O_3$ = 43,7, $Na_2O \cdot 9Al_2O_3$ = 297, ZrO_2 (мон) = 21,7, ZrO_2 (куб) = 19,8, SiC = 12,5, $2CaO \cdot SiO_2$ = 52.

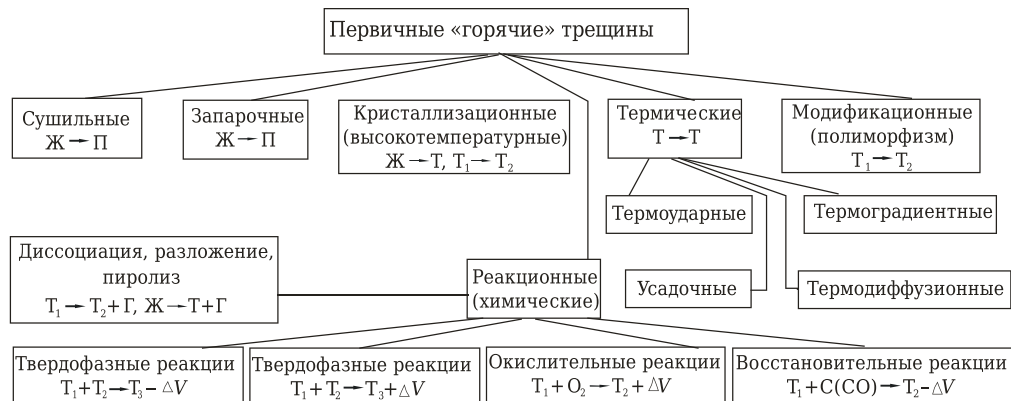
ганических веществ в жидком и парообразном состоянии (температура ниже 1000 °С) и 2) бесфлюидные (в «сухой» среде). К первой группе относятся трещины, образующиеся при сушке вследствие испарения физической влаги и частично пиролиза органики (рис. 5). Иногда появляются запарочные трещины, обусловленные конденсацией влаги внутри сырца огнеупора. При быстром нагреве происходит интенсивное испарение воды. Получающийся пар создает высокое давление, которое иногда разрывает изделие.

Бесфлюидные («сухие») трещины формируются в основном в более высокотемпературных условиях (1000 °С – точка плавления). В эту подгруппу вошли четыре источника внутренних напряжений, генерирующих трещины: 1) высокотемпературные кристаллизационные (например, при затвердевании плавнелитых корундовых изделий [14, 15]; 2) термические первого рода [3] (в условиях стационарного и перемен-

ного температурных режимов); 3) реакционные, обусловленные химическими превращениями с положительным и отрицательным изменением объема ($\pm\Delta V$); 4) модификационные (вследствие внутренних напряжений, развиваемых при полиморфных превращениях минералов в твердом состоянии). Все высокотемпературные первичные трещины второй генетической подгруппы, обусловленные напряжениями второго рода [3], являются наиболее частой причиной технологического брака обжигаемых огнеупорных изделий [16, 17].

ВТОРИЧНЫЕ (ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ) ТРЕЩИНЫ

Вариант генетической классификации вторичных трещин показан на рис. 6. Как известно, служба огнеупоров и керамики в современных высокотемпературных тепловых агрегатах осуществляется в широком диапазоне интенсивных



Генерирующие источники напряжений, формирующих микро- и макротрещины

Рис. 5. Генетическая классификация технологических (первичных) «горячих» трещин

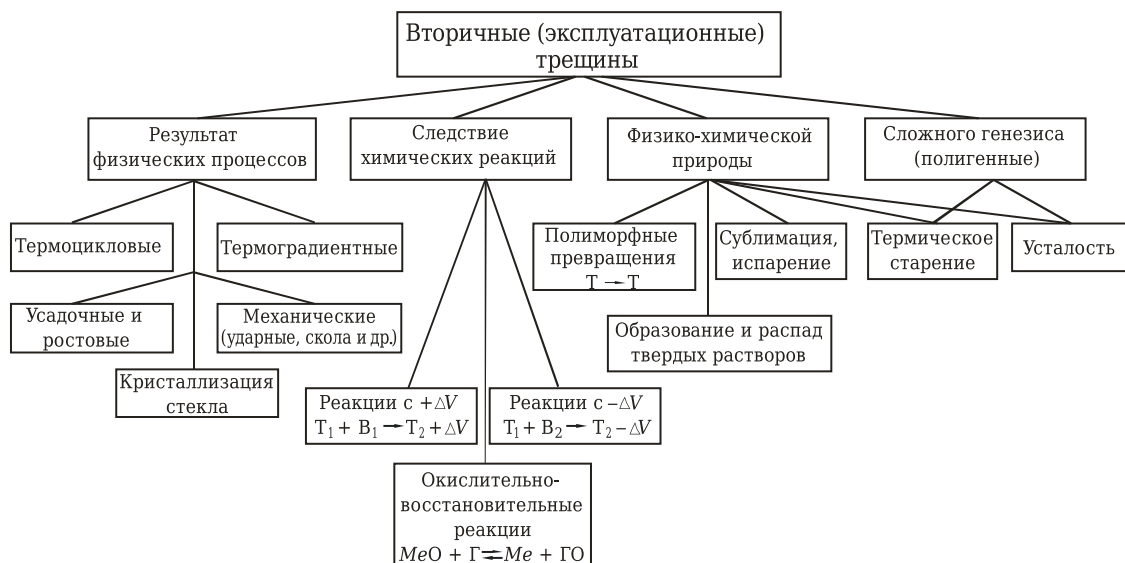


Рис. 6. Генетические типы вторичных (эксплуатационных) трещин: В — вещество; Г — газ

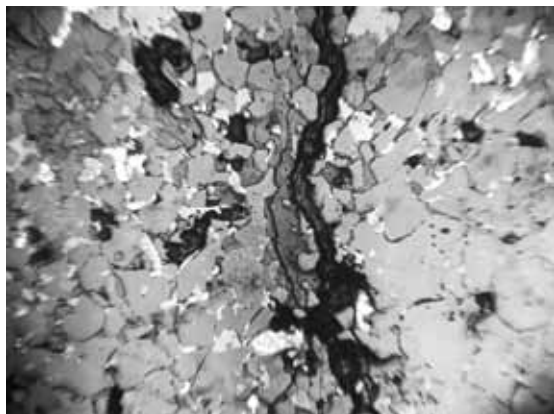


Рис. 7. Термическая микротрещина в периклазохроми-
те после службы. Свет отраженный. $\times 180$

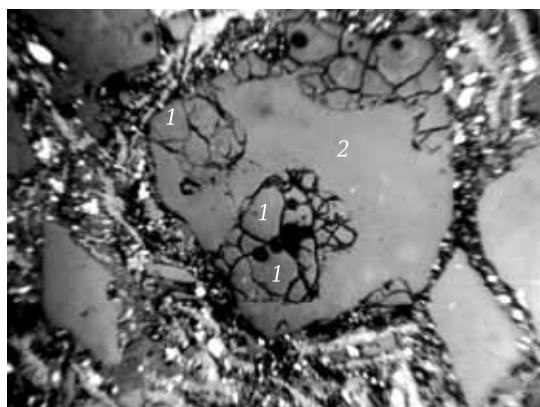


Рис. 8. Микроструктура частичной раскристаллизации
кремнеземистого стекла с образованием характерных
оконтуривающих микротрещин вокруг индивидов кри-
стобалита в оксидоуглеродистом изделии после службы:
1 — кристобалит; 2 — кремнеземистое стекло. Свет от-
раженный. $\times 54$

термодинамических параметров (P , T , C). В свя-
зи с условиями эксплуатации генезис трещин в
тугоплавких неметаллических материалах име-
ет более широкий спектр в сравнении с техноло-
гическими трещинами и порами. Вместе с тем
вследствие экстенсивного (временного) фактора
дальнейшее развитие имеют аналогичные тех-
нологические дефекты структуры высокотемпе-
ратурного происхождения.

В результате анализа и систематизации обшир-
ного объема информации о фазово-структурных
превращениях, происходящих при службе огнеу-
поров и керамики в различных эксплуатационных
средах, нами установлены 4 главные группы про-
цессов трещинообразования. В зависимости от
физико-химической природы выделены трещины:
1) образующиеся в результате физических про-
цессов; 2) вследствие химических превращений
[3, 10]; 3) трещины физико-химической природы,
4) сложного генезиса (полигенные).

Первая группа включает, в свою очередь,
пять характерных генетических типов: термо-

циклические — результат многократного нагре-
ва и охлаждения (рис. 7), термоградиентные
(вследствие напряжений между рабочей зоной
и менее нагретыми слоями огнеупора, часто с
различными ТКЛР), усадочные (различная до-
полнительная усадка или дополнительный рост
заполнителя и матрицы), механические (разру-
шение воздействием ударных, сжимающих, ска-
лывающих и других нагрузок) и кристаллиза-
ционные (типичный пример — диверсификация
кварцевого стекла при температуре выше 1100°C)
[18]) (рис. 8).

Вторичные высокотемпературные хими-
ческие реакции, протекающие в огнеупорах
при службе, носят в основном массообменный
характер с внешней средой в отличие от вну-
тренних превращений при технологической
термообработке изделий. Массообменные хи-
мические реакции относятся преимущественно
к трем главным типам: с положительным ($+\Delta V$)
и отрицательным ($-\Delta V$) изменениями объема,
окислительно-восстановительные ($\pm\Delta V$).

Все химические реакции, сопровождающие-
ся положительным изменением объема, вызы-
вают в огнеупорах термические напряжения
второго рода [3, 10]. В качестве примера таких
массообменных реакций можно привести обра-
зование нефелина и калиофилита KAlSiO_4 при
службе шамота в футеровке доменной печи.
Синтез этих щелочных алюмосиликатов проис-
ходит с увеличением объема на 20 и 9,2 % соот-
ветственно [19], что создает давление кристал-
лизации 48500 и 6100 МПа соответственно [12].
Реакции с отрицательным изменением объема
приводят к образованию усадочных трещин.
Такие реакции особенно характерны для со-
временных оксидоуглеродистых огнеупоров при
службе в сталеплавильном производстве.

К трещинам физико-химической природы
отнесены двумерные дефекты структуры, воз-
никающие вследствие внутренних напряжений
при полиморфных превращениях минералов
(как с положительным, так и с отрицательным
изменением объема), при образовании и рас-
паде твердых растворов, а также протекания
процессов сублимации и испарения вещества
огнеупора, особенно в восстановительной сре-
де. Наиболее высокие внутренние напряжения
возникают при полиморфных превращениях
фаз. Например, при переходе ларнита $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$
в шеннонит $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ при охлаждении до 620°C
развивается давление до 5100 МПа [12], что,
безусловно, приводит к образованию трещин
или полному разрушению изделий. В результа-
те массообмена с внешней средой в огнеупорах
кроме химических реакций часто происходит
образование твердых растворов, особенно высо-
кой концентрации в поверхностных частях кри-
сталлов. В минералах в связи с неравномерным
вхождением в них изоморфных примесей соз-

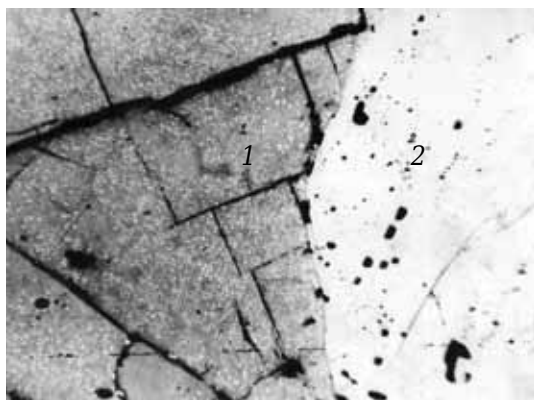


Рис. 9. Микротрещины, параллельные плоскостям спайности периклаза в периклазохромитовом изделии с прямой связью периклаз – хромит после службы в футеровке вакууматора: 1 — периклаз с выделениями вторичного шпинелида в результате распада твердого раствора при охлаждении; 2 — хромит; темные линии — микротрещины. Свет отраженный. $\times 125$

даются структурные несоответствия в разных частях кристаллов с неодинаковыми параметрами элементарной ячейки кристаллической решетки. Это явление получило название гетерометрия [8]. Несоответствие кристаллической решетки на границе участков кристалла с изоморфной примесью различной концентрации приводит к возникновению внутренних напряжений и образованию микротрещин (рис. 9).

В условиях службы в высокотемпературных восстановительных средах в наиболее нагретых участках рабочих зон изделий происходит избирательное испарение и сублимация компонентов с высокой упругостью паров, например Cr_2O_3 из хромшпинелида, R_2O , P_2O_5 , B_2O_3 и др. В результате длительного и интенсивного протекания этих процессов в кладке высокотемпературной (до 1910 °C) туннельной печи комбината «Магнезит» сформировались открытые сублимационные поры-трещины, ориентированные параллельно изотермам в периклазохромитовых изделиях [20].

Наиболее сложный и менее изученный генезис имеют полигенные трещины, формирование которых обусловлено сочетанием нескольких источников напряжений: механических, химических, термических и структурных (т. е. первого и второго рода). К числу полигенных трещин относятся, в частности, трещины, возникающие вследствие термического старения и усталости огнеупоров, особенно при службе в бесшлаковых средах [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В фундаментальной монографии «Введение в керамику» У. Д. Кингери констатировал «...нужно знать, каким образом в материале могут зародиться микротрещины. Это, к сожалению,

трудный вопрос, поскольку таких причин может быть очень много» [4]. Однако ответ на данный вопрос автор не дает.

По нашему мнению, как и в природном минеральном веществе (горные породы и минералы), микротрещины в огнеупорах зарождаются от внешних воздействий, а также от внутренних термических, механических, физических и химических напряжений (первого и второго рода [3]). Перечисленные внешние и внутренние энергетические генераторы напряжений при производстве и применении огнеупоров создают более 20 генетических типов микро- и макротрещин.

Условно все двумерные дефекты строения огнеупоров разделены на первичные (технологические) и вторичные (эксплуатационные), формирующиеся соответственно при изготовлении и службе футеровок. В зависимости от температурных условий технологические трещины разделены на «холодные» ($T \leq 100$ °C) и «горячие» ($T > 100$ °C).

В связи с резко различными комплексами физико-химических свойств огнеупоров в большинстве из них химические низкотемпературные напряжения (например, вследствие гидратации в магнезиальных составах) и создаваемые ими трещины отсутствуют.

Наиболее опасны при производстве и службе огнеупоров термические напряжения первого и второго рода, создающие внутренние напряжения, на 2–3 порядка превышающие реальную прочность изделий.

Информация о генезисе трещин необходима при разработке профилактических мероприятий для предотвращения технологического брака и повышения износоустойчивости огнеупоров в службе.

Библиографический список

1. **Марясев, И. Г.** Поры: их классификация и роль в реальных структурах огнеупорных материалов / И. Г. Марясев, Л. М. Михайловская, Л. Д. Бочаров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2011. — № 6. — С. 99–109.
2. **Марясев, И. Г.** Pores: their classification and role in actual refractory material structures / I. G. Maryasev, L. M. Mikhailovskaya, L. D. Bocharov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 52, № 3. — P. 202–211.
3. **Перепелицын, В. А.** Классификация свойств огнеупоров / В. А. Перепелицын, Е. Е. Гришенков // Новые огнеупоры. — 2004. — № 6. — С. 25–27.
4. **Перепелицын, В. А.** A classification of refractories: Properties / V. A. Perepelitsyn, E. E. Grishenkov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2004. — Vol. 45, № 5. — P. 324–326.
5. **Стрелов, К. К.** Структура и свойства огнеупоров / К. К. Стрелов. — М.: Металлургия, 1982. — 208 с.
6. **Кингери, У. Д.** Введение в керамику / У. Д. Кингери; под ред. П. П. Будникова и Д. Н. Полубояринова; пер. с англ. — М.: Стройздат, 1964. — 456 с.

5. **Коломейцев, В. В.** Термостойкость высокотемпературных материалов / В. В. Коломейцев, С. А. Суворов, Е. Ф. Коломейцева // Новые огнеупоры. — 2004. — № 6. — С. 28–34.

Kolomeitsev, V. V. Thermal stability of high-temperature materials. Part 1 / V. V. Kolomeitsev, S. A. Suvorov, E. F. Kolomeitseva // Refractories and Industrial Ceramics. — 2004. — Vol. 45, № 5. — P. 327–332.

6. **Наценко, А. И.** Термостойкость хрупких материалов / А. И. Наценко // Теоретические и технологические исследования в области огнеупоров. — М. : Металлургия, 1971. — С. 189–208.

7. **Даукнис, В.** Исследование термической стойкости огнеупорной керамики / В. Даукнис, К. Казакевичус, Г. Пранкявичус [и др.]. — Вильнюс : Минтис, 1971. — 151 с.

8. **Юшкин, Н. П.** Механические свойства минералов / Н. П. Юшкин. — Л. : Наука, 1971. — 284 с.

9. **Григорьев, Д. П.** Онтогенез минералов / Д. П. Григорьев. — Львов : Изд-во Львовского гос. ун-та, 1961. — 284 с.

10. **Перепелицын, В. А.** Основы технической минералогии и петрографии / В. А. Перепелицын. — М. : Недра, 1987. — 255 с.

11. **Перепелицын, В. А.** Общие закономерности высокотемпературных превращений минерального вещества / В. А. Перепелицын // Новые огнеупоры. — 2012. — № 3. — С. 149–152.

Perepelitsyn, V. A. General features of mineral substance high-temperature conversion / V. A. Perepelitsyn // Refractories and Industrial Ceramics. — 2012. — Vol. 53, № 2. — P. 104–107.

12. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания : справочник / ред. Г. Роучка, Х. Витнау ; пер. с нем. — М. : Интернет Инжиниринг, 2010. — 392 с.

13. **Свергузова, С. В.** Исследование процесса биокоррозии строительных материалов методом математического планирования эксперимента / С. В. Свергузова, Е. Н. Гончарова, Ю. В. Буракова // Строительные материалы. — 2001. — № 1. — С. 34, 35.

14. **Попов, О. Н.** Производство и применение плавнелитых огнеупоров / О. Н. Попов, П. Т. Рыбалкин, В. А. Соколов, С. Д. Иванов. — М. : Металлургия, 1985. — 256 с.

15. **Рахманов, В. А.** Причины растрескивания плавнелитых корундовых изделий / В. А. Рахманов, А. Г. Маранц, Д. Н. Полубояринов, И. Г. Дудеров // Огнеупоры. — 1974. — № 7. — С. 40–45.

16. **Бочаров, Л. Д.** Генетическая классификация брака магнезиальных изделий / Л. Д. Бочаров, В. М. Бибаев, В. А. Перепелицын // Огнеупоры. — 1992. — № 4. — С. 20–23.

17. **Бочаров, Л. Д.** Классификация несоответствий продукции ОАО «Комбинат «Магнезит» / Л. Д. Бочаров, И. Г. Марясев, А. Г. Лузин, В. Г. Алфеева. — Челябинск : Изд-во ОАО «Комбинат «Магнезит», 2003. — 320 с.

18. **Пивинский, Ю. Е.** Кварцевая керамика / Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин. — М. : Металлургия, 1974. — 264 с.

19. **Бережной, А. С.** Многокомпонентные щелочные оксидные системы / А. С. Бережной. — Киев : Наукова думка, 1988. — 200 с.

20. **Перепелицын, В. А.** Износоустойчивость футеровки высокотемпературных туннельных печей / В. А. Перепелицын, Л. Д. Бочаров, И. Г. Марясев // Новые огнеупоры. — 2009. — № 2. — С. 23–36.

Perepelitsyn, V. A. Lining wear resistance in high-temperature tunnel furnaces / V. A. Perepelitsyn, L. D. Bocharov, I. G. Maryasev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2009. — Vol. 50, № 1. — P. 31–42.

21. **Перепелицын, В. А.** Высокотемпературное старение основных огнеупоров в бесшлаковых средах / В. А. Перепелицын, К. В. Симонов, Л. Д. Бочаров // Конф. «Реальная структура неорганических жаростойких и жаропрочных материалов» : тез. докл. — Первоуральск, 1979. — С. 167. ■

Получено 22.01.16

© В. А. Перепелицын, Ф. Л. Капустин,
К. Г. Земляной, Л. В. Остряков, Л. П. Яковлева,
И. Г. Марясев, Л. М. Михайловская, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

TECNARGILLA 2016
25° Salone internazionale delle tecnologie e delle forniture per l'industria ceramica e del laterizio
Il futuro della ceramica
26-30 сентября 2016 г.
г. Римини, Италия
tecnargilla.it