

Р. А. Бурханова, Т. К. Акчурин, И. В. Стефаненко

**ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
ЖАРОСТОЙКИХ БЕТОНОВ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: burkhanov@inbox.ru

В статье рассмотрен анализ испытаний образцов жаростойких бетонов для определения их трещиностойкости и оценки характера разрушения в зависимости от температуры и нагрузки с использованием полных диаграмм деформирования бетона.

Ключевые слова: жаростойкий бетон, трещиностойкость, изгиб, удельная энергия разрушения, модуль упругости, диаграмма деформирования.

R. A. Burkhanova, T. K. Akchurin, I. V. Stefanenko

**INFLUENCE OF HEATING ON CHANGES IN CRACK TOUGHNESS
HEAT-RESISTANT CONCRETE**

Volgograd State Technical University

The article considers the analysis of testing samples of heat-resistant concrete to determine their crack resistance and assess the nature of destruction depending on temperature and load using complete concrete deformation diagrams.

Keywords: heat-resistant concrete, crack resistance, bending, specific fracture energy, modulus of elasticity, strain diagram.

Введение

Существенное влияние на трещиностойкость жаростойких бетонов оказывает их пористая структура, которая зависит от вида вяжущего и заполнителя, состава бетона, условий

твердения и других технологических факторов. Общим для всех бетонов является наличие большого количества дефектов-концентраторов

напряжений (микро- и макропоры, микротрещины, заполнители различной крупности и другие неоднородности), обусловленных, как природой материала, так и условиями его приготовления. Такая структура бетона способствует концентрации напряжений, что приводит к зарождению и развитию трещин при высокотемпературном нагреве и нагрузке. С другой стороны, в процессе разрушения бетона происходит ветвление и объединение микротрещин, они могут огибать заполнитель или проходить через него, а поры могут провоцировать или сдерживать их развитие за счет диссипации упругой энергии. При этом в процессе разрушения со стороны устья магистральной трещины образуется зона предразрушения [1–3]. Критическая длина равновесной трещины в обычном и жаростойких бетонах составляет 100–300 мм. Интегральной характеристикой сопротивления бетона разрушению является удельная энергия разрушения G_f , представляющая собой отношение работы, затраченной в процессе его разрушения к площади поверхности разрушения.

Другими показателями трещиностойкости бетона в условиях нормального отрыва являются критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} и критическая ширина раскрытия берегов трещин δ_c . Эти характеристики являются основными, но не единственными показателями трещиностойкости бетонов.

Материалы и методы исследования

Для определения трещиностойкости жаростойких бетонов и оценки характера их разрушения в зависимости от температуры и нагрузки, авторы использовали полные диаграммы деформирования бетона. Методика получения таких диаграмм была разработана кафедрой СМиСТ ИАиС ВолгГТУ. Она позволяет получать полные диаграммы бетона на обычном прессе. Для этого в систему «испытательная машина – образец» вводится дополнительное устройство, повышающее жесткость испытательной системы и воспринимающее избыток упругой энергии, высвобождающейся в процессе разрушения образца во время испытаний. В данном случае использовалось устройство в виде кольца (рис. 1). Испытания жаростойких бетонов проводили при трехточечном изгибе по схеме, представленной на рис. 1. Размеры испытываемых образцов-балок 50х50х320 мм и 100х100х400 мм. Надрез в образцах выполняли алмазным диском, ширина надреза 1–1,2 мм. Скорость нагружения 0,5 мм/мин. Запись полных с нисходящей ветвью диаграмм деформирования в координатах F – сила, f – прогиб проводилась автоматически на двухкоординатном самописце. Затем по площади диаграмм определяли работу, затраченную на разрушение образца и эффективную энергию разрушения бетона G_f (рис. 2).

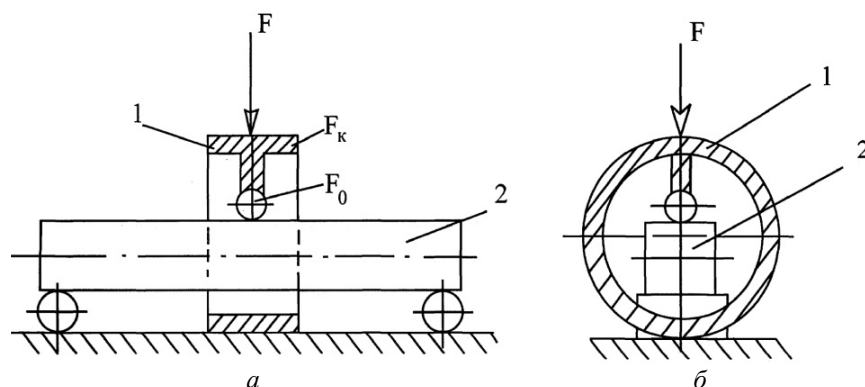


Рис. 1. Схема испытаний образцов-балочек при изгибе:

a – совместная работа с кольца и образца; *б* – расчетная схема:

F – усилие, создаваемое машиной, F_k и F_0 – соответственно сила, действующая на кольцо (1) и образец (2)

Количество потенциальной упругой энергии, накапливаемой в образцах при испытаниях на изгиб, зависит от размеров образцов и его также можно менять за счет изменения глубины надреза в образцах.

Критерий характера разрушения имеет вид:

$$\Delta U = U_c - U_o, \quad (1)$$

где U_c – упругая энергия, накапливаемая в системе «образец – машина»; U_o – энергия разрушения образца.

В данном случае прорастание трещины можно контролировать, что позволяет получить стабильный характер разрушения и записать нисходящую ветвь диаграммы разрушения.

$$G_f = \frac{A_o + F_o f_o}{b(h-a)}, \quad (2)$$

где A_o – работа разрушения; масса образца $F_o = \gamma b h L$ (γ – объемная масса бетона; b, h, L – соответственно ширина, высота, расстояние между опорами) и $b(h-a)$ – площадь попереч-

ного сечения образца (нетто) с учетом глубины надреза a (рис. 2).

Как известно, энергетический G_f и силовой K_{1c} критерии связаны между собой соотношением

$$K_{1c} = \sqrt{EG_f} \quad (3)$$

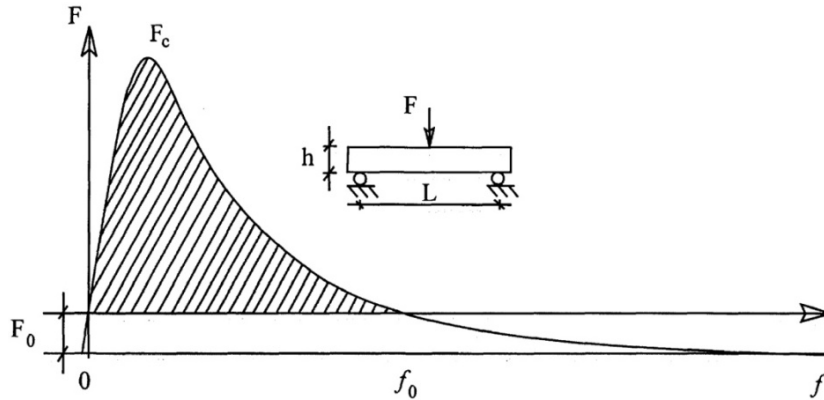


Рис. 2. Определение удельной энергии разрушения бетона (G_f) по полной диаграмме деформирования бетона в соответствии с уравнением (2)

Значения динамического модуля упругости E определяли резонансным методом на тех же образцах, что и для определения полных диаграмм деформирования. Испытуемые образцы устанавливают на опоры, расстояние между которыми составляет 0.55 от длины образца и соответствует нулевой амплитуде. Изменяя частоту колебаний возбуждения, получали явление резонанса. Значение резонансной частоты Z определяли после каждого цикла «нагрев-охлаждение» на одних и тех же образцах [1]. Динамический модуль упругости определяется по формуле

$$E = \frac{Z^2 M l_o^2 T}{C^2 J^2}, \quad (4)$$

где Z – резонансная частота; M – масса бетона; l_o – длина образца; T – поправочный коэффициент в зависимости от размеров образца и коэффициента Пуассона; C – коэффициент, зависящий от порядка гармоник колебаний; J – момент инерции в зависимости от геометрической формы сечения образца.

Значения пределов прочности бетонов при изгибе (R_{bf}) определяли из полных диаграмм изгиба и из данных испытаний при одноосном растяжении (R_{bt}). За счет переменной жесткости резиновых прокладок, наибольшее обжатие образца происходит на его концах, а в срединной части, где происходит разрушение, концентрация напряжений практически отсутствует. Ме-

тодика предусматривала из испытаний на одном и том же образце определение динамического модуля упругости, предела прочности при изгибе, одноосном растяжении, сжатии, пористости, работы на разрушение образца, G_f и K_{1c} , что способствовало повышению точности получаемых результатов, принимая во внимание неоднородную структуру жаростойких бетонов.

Относительную деформацию на восходящей ветви полных диаграмм деформирования (рис. 2) определяли по данным R_{bt} и E , а локальную деформацию Δl_p в зоне разрушения (нисходящая ветвь) – по формуле

$$\Delta l_p = \frac{2G_f}{R_{bt}} \quad (5)$$

Для определения критической длины трещины использовали принятый в механике разрушения бетона комплексный энергетический критерий:

$$l_c = \frac{EG_f}{R b^2 t} = \left(\frac{K_{1c}}{R_{bt}} \right)^2. \quad (6)$$

Этот критерий показывает реальную прочность материалов с энергией их разрушения, модулем упругости и критической длиной трещины. Значение l_c также может служить мерой хрупкости материала. С уменьшением l_c хрупкость возрастает.

Планирование эксперимента осуществлялось при постоянном $B/C = 0,63$ для жаростой-

кого бетона на портландцементе (ЖБП) и В/Ц = 0,65 для жаростойкого бетона на глиноземистом цементе (ЖБГ). При этом использовались следующих уровни варьирования факторов:

1. Количество цемента (Ц), кг/м³
365 ≤ Ц ≤ 435 (X1)
2. Количество заполнителя (З), кг/м³
1233 ≤ З ≤ 1378 (X2)

Результаты исследований

Составы исследованных жаростойких бетонов широко применяются при строительстве

теплотехнических сооружений и соответствуют требованиям СП 130.13330.2018 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий», ГОСТ 20910 – 2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия». Авторы исследовали также жаростойкий портландцементный камень с тонкомолотой шамотной добавкой.

Возраст образцов составлял 28 суток. Полные диаграммы деформирования жаростойких цементного камня и бетона на портландцементе приведены на рис. 3.

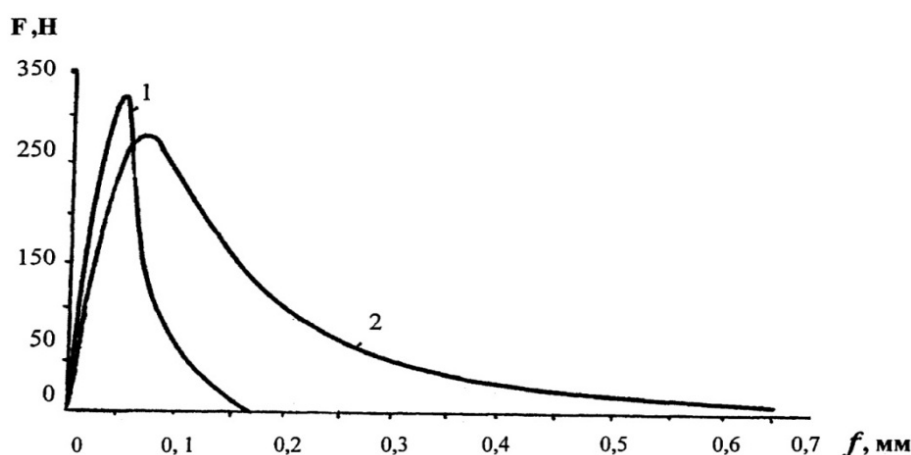


Рис. 3. Полная диаграмма изгиба жаростойких цементного камня и (1) и бетона (2) на портландцементе не подвергшихся нагреванию. F – сила; f – прогиб

Из полученных данных следует, что длительность процесса разрушения за пределами временного сопротивления при введении песка и щебня (бетона) возрастает, о чем свидетельствует более плавный характер нисходящей ветви для бетона по сравнению с цементным камнем. Качественный анализ диаграмм также показывает, что более неоднородный по сравнению с цементным камнем бетон является менее хрупким материалом и в большей степени должен быть способен к перераспределению напряжений. При переходе от жаростойкого цементного камня к бетону удельная энергия разрушения возрастает в 3 раза, а критическая

длина равновесной трещины l_c в 4 раза. Согласно [4] увеличение количества и крупности заполнителя также повышает критическую длину равновесной трещины l_c и локальную деформацию Δl_p . Все эти показатели свидетельствуют о том, что трещиностойкость жаростойкого бетона существенно выше, чем жаростойкого цементного камня с тонкомолотым шамотом.

Нагрев оказывает значительное влияние на изменение полных диаграмм изгиба, а также прочности, предельных локальных деформаций и пористости жаростойкого бетона на портландцементе (табл. 1).

Таблица 1

Параметры полных диаграмм деформирования, R_b , E и пористость Π жаростойких цементного камня и бетона на портландцементе с шамотными заполнителями

Материал	R_b , МН/м ²	$E \cdot 10^3$, МН/м ²	G_f Н/м	K_{Ic} , МН/м ^{2/3}	l_c , м	$\Delta l_p \cdot 10^{-6}$, м	Π , %
Жаростойкий цементный камень	2,4	29,75	$\frac{15.5}{1}$	0,68	0,08	13,00	33,15
Жаростойкий бетон	1,96	26,88	$\frac{47.1}{8}$	1,12	0,33	48,14	28,88

Видимые изменения в жаростойком бетоне фиксируются после его нагрева при температуре 105 °С. Значения K_{lc} и G_f бетона возрастают, а затем с повышением температуры нагрева снижаются. В тоже время энергия разрушения бетона после нагрева при 800 °С незначительно отличается от энергии разрушения до нагревания, несмотря на то, что нагрев привел к существенному снижению его прочности и модуля упругости. После нагрева до температуры 105 °С пористость бетона уменьшается за счет усадки при удалении сорбционной воды. Далее с увеличением температуры нагрева возрастает вследствие удаления химически связанной влаги материала.

Полные диаграммы деформирования жаростойкого бетона на глиноземистом цементе и на портландцементе в результате воздействия высоких температур имеют аналогичный вид. Различия состоят в том, что с повышением температуры нагрева, диаграммы деформирования бетона на портландцементе изменяются плавно, для жаростойкого бетона на глиноземистом цементе выявляется резкое изменение диаграмм после нагрева бетона при 105 °С, далее с повышением температуры существенных изменений не происходит. Это находит подтверждение в результатах сорбционных измерений в диапазоне относительной влажности от 0 до 98 % : происходит постепенное снижение сорбционного влагосодержания бетонов на портландцементе с повышением температуры нагрева бетона, в то время как для жаростойкого бетона на глиноземистом цементе характерно ее резкое снижение после нагрева при 300 и 800°С. Аналогичный характер имеет изменение удельной поверхности рассматриваемых бетонов при нагреве.

Удельная энергия разрушения G_f после нагрева бетона в интервале температур 20–800

°С изменяется незначительно. Силовой критерий K_{lc} с повышением температуры постепенно снижается и после нагрева при 800 °С составляет 45,5 % от начальной величины.

Установлено наличие корреляции между пределом прочности на растяжение при изгибе и изменением модуля упругости жаростойкого бетона на глиноземистом цементе, которая описывается уравнением:

$$R_{btf} = 1.12 + 0.15 E \cdot 10^3 \quad \Delta = \pm 0.15 \text{ МПа.} \quad (7)$$

Для жаростойкого бетона на жидком стекле (рис. 4) характерны пологие нисходящие ветви диаграмм, что свидетельствует о постепенном процессе развития трещин. В отличие от других видов бетонов жаростойкий бетон на жидком стекле отличается невысокими значениями модуля упругости (рис. 5, а) и, следовательно, малыми значениями возникающих температурных напряжений при его нагреве и охлаждении. Кроме того, этот вид бетона обладает наиболее высокими остаточными значениями параметров трещиностойкости G_f и K_{lc} после нагрева при температуре 800 °С, а работа, затрачиваемая на разрушение образцов после нагрева бетона при температуре 105–800 °С, составляет 0,09–0,11 Нм. Заметное влияние на изменение деформативных свойств жаростойкого бетона на жидком стекле оказывает его нагрев при температуре 800 °С. По сравнению с другими видами бетонов жаростойкий бетон на жидком стекле обладает небольшим сопротивлением зарождению в нем трещин при нагреве. Критическое значение температурного градиента

$\Delta t_{cz} = \frac{R_{btf}}{dE}$, вызывающего зарождения трещин жаростойком бетоне на жидком стекле примерно в 2 раза выше, чем в жаростойком бетоне на портландцементе (табл. 2).

Таблица 2

Критические значения температурного градиента, вызывающего зарождение трещин в жаростойких бетонах

Вид жаростойкого бетона	R_{bt} , МН/м ²	$E \cdot 10^3$, МН/м ²	$d \cdot 10^{-6}$, I/°C	Δt_{cz} , °C
На портландцементе	3,92	26,88	7,5	19,6
На глиноземистом цементе	5,31	27,56	7,5	26,55
На жидком стекле	3,55	16,3	5,5	39,88

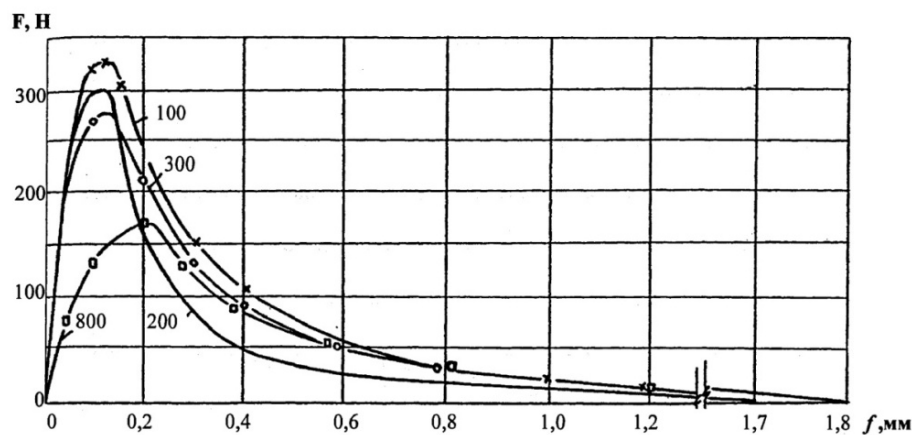


Рис. 4. Изменение полных диаграмм деформирования жаростойкого бетона на жидком стекле с шамотными заполнителями в зависимости от температуры нагрева бетона. Цифры на кривых – температура нагрева в $^{\circ}\text{C}$. F – сила; f – прогиб

Установлена корреляция между пределом прочности на растяжение и модулем упругости, изменяющимися в результате нагрева бетона (рис. 5, б):

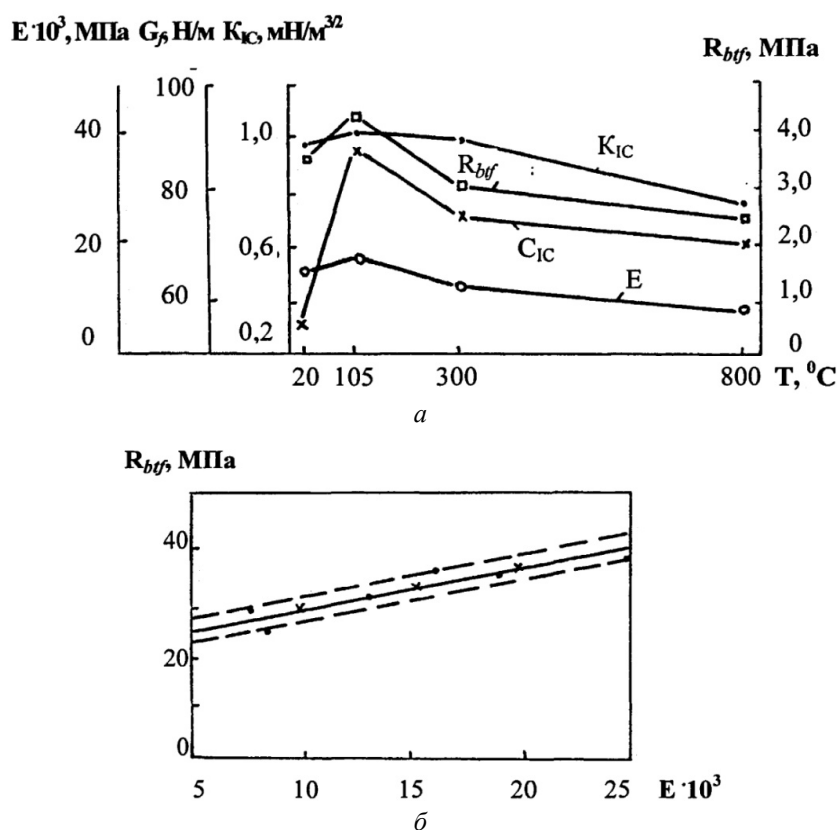


Рис. 5:

а – изменение параметров трещиностойкости G_f , K_{IC} , предела прочности при растяжении R_{btf} и модуля упругости E в зависимости от температуры нагрева жаростойкого бетона на жидком стекле; б – взаимосвязь модуля упругости E и предела прочности при растяжении R_{btf} жаростойкого бетона на жидком стекле при нагреве

$$R_{btf} = 2.14 + 0.08 E \cdot 10^3 \quad \Delta = \pm 0.2 \text{ МПа.} \quad (8)$$

Выявленная для исследованных видов жаростойких бетонов при нагреве взаимосвязь

между пределом прочности бетона при растяжении и модулем упругости имеет большое практическое значение, т. к. дает возможность прогнозировать их прочность и долговечность.

Выводы

1. Полные с нисходящей ветвью диаграммы деформирования бетона позволяют качественно и количественно оценить трещиностойкость и характер разрушения жаростойких бетонов с учетом влияния высокотемпературного нагрева и нагрузки.

2. С увеличением количества тонкомолотой добавки в жаростойком цементном камне, введением песка и щебня, длительность процесса разрушения материалов возрастает, о чем свидетельствует более плавный характер нисходящей ветви диаграмм. Энергия разрушения жаростойкого бетона на портландцементе в 2.5–3 раза выше, чем жаростойкого портландцементного камня.

3. Нагрев жаростойкого бетона на портландцементе приводит к изменению параметров его трещиностойкости и долговечности. В целом хрупкость бетона при нагреве уменьшается. Наиболее значительные изменения трещиностойкости происходят после нагрева бетона при температуре 105 °С за счет удаления влаги из его порового пространства и 800 °С – за счет дегидратации кристаллогидратов цементного камня и деструкции материала.

4. Для всех видов бетонов с повышением температуры нагрева восходящая и нисходящая ветви полных диаграмм деформирования становятся более пологими. Однако, существенное различие заключается в том, что для бетона на портландцементе с повышением температуры до 800 °С изменения диаграмм происходят плавно, в то время как для жаростойкого бетона на глиноземистом цементе нагрев при температуре 105 °С приводит к резкому изменению диаграмм, а затем с повышением температуры существенных изменений не происходит. Это свидетельствует о стабилизации структуры жаростойкого бетона на глиноземистом цементе после нагрева при 105 °С. Снижение K_{Ic} после нагрева бетона при 800 °С препятствует воз-

никновению значительных температурных напряжений в этом виде бетона и способствует его высокой долговечности.

5. Для жаростойкого бетона на жидком стекле характерно постепенное, медленное развитие трещин в процессе его разрушения и высокая долговечность. Заметное изменение деформативных свойств жаростойкого бетона на жидком стекле происходит только после его нагрева при температуре 800 °С. По сравнению с другими видами бетонов, жаростойкий бетон на жидком стекле обладает наибольшим сопротивлением зарождению трещин при нагреве, превышая этот показатель у жаростойкого бетона на портландцементе в два раза.

6. Установлена взаимосвязь между модулем упругости и пределом прочности при растяжении в зависимости от температуры нагрева жаростойких бетонов. Применение резонансного метода позволило разработать простой неразрушающий метод, позволяющий при минимальном количестве образцов определять термостойкость бетонов, прогнозировать их прочность и долговечность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джонс, Р. Неразрушающие методы испытаний бетонов / Р. Джонс, И. Фэкоару. – М. : Стройиздат, 1974. – 296 с.
2. Бурханова, Р. А. Наполнение эпоксидных полимеров как фактор получения многокомпонентной композиции с улучшенными прочностными свойствами / Р. А. Бурханова, Н. Ю. Евстафьева, Т. К. Акчуринов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – Вып. 4 (81). – С. 151–161.
3. Шевченко, В. И. Разработка теории и методов определения характеристик трещиностойкости и долговечности бетонов: ВолгИСИ, отчет о НИР № 2.1 - 91 / В. И. Шевченко, Т. Ф. Чердниченко, В. В. Григорьевский. – Волгоград, 1991. – 72 с.
4. Шевченко, В. И. Применение методов механики разрушения для оценки трещиностойкости бетона / В. И. Шевченко. – Волгоград : Изд-во ВПИ, 1988. – 104 с.