

УДК 624.046.5

Ахметзянов Ф.Х. – кандидат технических наук, доцент**Радайкин О.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: olegxxii@mail.ru

Ибрагимов Р.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: rusmag007@yandex.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

К эффекту «деформационного упрочнения» бетона при растяжении механической нагрузкой

Аннотация

Постановка задачи. В работе поставлена задача объяснить механизм «деформационного упрочнения» бетона, наблюдаемый в экспериментах при его растяжении механической нагрузкой – от начала нагружения до момента, предшествующего появлению видимой макротрещины.

Результаты. Для этого выполнен анализ аналогий в металлах и сплавах, изучен теоретический и экспериментальный материал. В итоге на основе модели Конрада получено расчётное неравенство для оценки касательных напряжений, соответствующих концу «деформационного упрочнения» в цементном камне (бетоне).

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности применения дислокационной теории к объяснению рассматриваемого процесса «деформационного упрочнения».

Ключевые слова: деформационное упрочнение, бетон, цементный камень, микроструктура, нарушение сплошности, дислокации

В современных нормах по проектированию железобетонных конструкций используют осреднённые прочностные и деформационные характеристики бетона без учёта влияния его структуры. Тем не менее, из материаловедения известно, что сопротивляемость бетона различного рода воздействиям определяется физико-химическими и механическим процессами, протекающим в цементном камне – важной составляющей бетона, определяющей его свойства – на различных масштабных уровнях рассмотрения: микро- ($\sim 10^{-6}$ м), мезо- ($\sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$ м) и макроуровнях ($\sim 10^{-2}$ м). Учёт этих явлений, на наш взгляд, позволит более достоверно описывать поведение бетона под нагрузкой, прогнозировать его срок службы и решать другие актуальные практические задачи. В данной статье сделана попытка объяснить одно из таких явлений: «деформационное упрочнение» бетона, т.е. увеличение его модуля деформации при растяжении с ростом механической нагрузки. Сделать это предлагается с позиции процессов, протекающих в цементном камне.

Термин «деформационное упрочнение» принят нами по аналогии с металлами и сплавами, где при холодном деформировании возможен так называемый наклёп (нагартовка) – вид упрочнения вследствие изменения структуры металла и его фазового состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации (рис. 1).

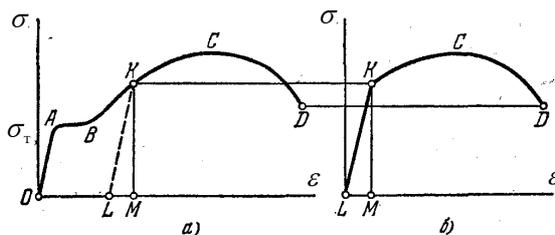


Рис. 1. Диаграмма деформирования металла к объяснению явления наклёпа:

а – первое растяжение образца до напряжений выше предела текучести σ_T с последующей разгрузкой (по линии OABKL); б – повторное нагружение образца

Наклёп сопровождается выходом на поверхность образца дефектов кристаллической решётки, увеличением прочности и твёрдости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера). Т.е. деформационное упрочнение в металлах и сплавах при наклёпе обусловлено торможением дислокаций (вследствие их размножения и увеличения плотности). – Чем труднее перемещаться дислокациям в материале, тем больше модуль деформации (производная напряжений по деформации).

Сам по себе термин «деформационное упрочнение» для бетона можно применить лишь условно, поскольку в результате действия механической нагрузки (деформаций) прочность материала не изменяется (увеличиваются только жёсткость, твёрдость и хрупкость), кроме того, механизм этого явления объясняется несколько иначе, чем в металлах и сплавах. Поэтому он взят нами в кавычки. Тем не менее, некая аналогия для бетона имеет место, о чём речь пойдёт ниже.

Ранее одним из авторов работы на основе анализа экспериментального графика зависимости « σ - ε », полученного для растянутой грани бетонного элемента в зоне чистого изгиба [1], было установлено, что модуль деформации бетона по мере нагружения от 0 до σ_{\max} ($\sigma_{\max}=R_{bm}$ – напряжения в вершине диаграммы деформирования « σ - ε », рис. 2) увеличивается вплоть до появления трещин с раскрытием до 0,002...0,005 мм [2], что соответствует напряжениям примерно $0,7\sigma_{\max}$. Т.е. происходит нечто наподобие упрочнения поликристаллического материала с ионными химическими связями. Выше этого уровня напряжений появляется макротрещина и начинается «разупрочнение» материала.

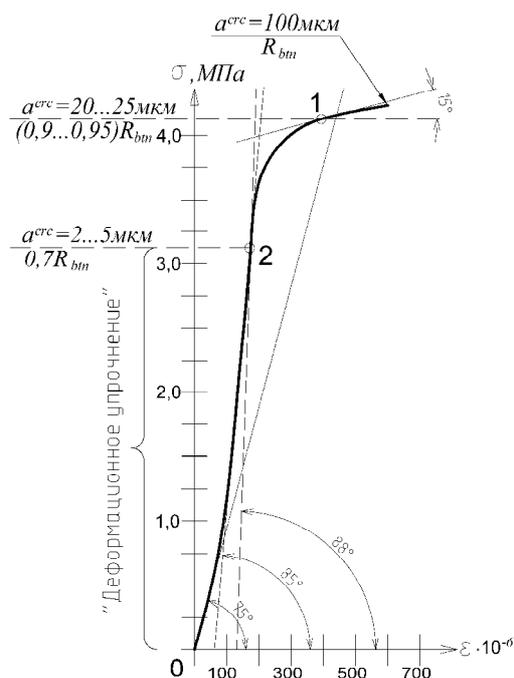


Рис. 2. Диаграмма деформирования растянутой грани изгибаемого бетонного образца (класс бетона В97, $R_{bm}=4,4$ МПа) [2]: уровни нагрузки, при которых выявлены первые трещины:
1 – методом электротензометрии; 2 – голографической интерферометрии

Далее макротрещина переходит в магистральную, развивающуюся с большой скоростью (сопоставимой со скоростью звука в данном материале), что приводит к резкому падению модуля деформаций и в итоге к разрушению образца (разделению балки на две части).

Для рассматриваемого примера на рис. 3 наглядно показано изменение модуля деформации с ростом нагрузки. Выделены три характерных участка: 1 – участок упругой работы материала с постоянным значением модуля деформации, равным начальному $E_{b,0}$ (до уровня напряжений $\approx 0,3\sigma_{\max}$); 2 – участок «деформационного упрочнения» с увеличением модуля деформации от $E_{b,0}$ до $E_{b,max}$ (до уровня напряжений $\approx 0,7\sigma_{\max}$); 3 – участок

«разупрочнения» – резкое падение модуля. При этом на рис. 3 помимо экспериментальной кривой «1» показана также некоторая аппроксимирующая кривая «2», не учитывающая «упрочнение» бетона. – Такая кривая принимается в качестве допущения при теоретических построениях в большинстве научных работ и в Нормах по проектированию.

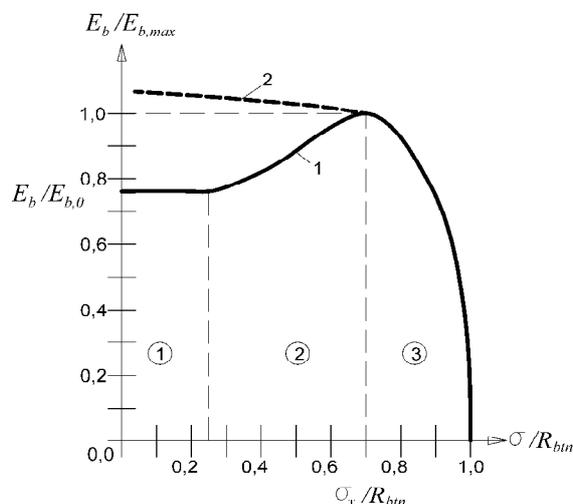


Рис. 3. Изменение модуля деформаций бетона с ростом нагрузки:

1 – кривая, полученная на основании результатов [2];

2 – аппроксимирующая кривая, не учитывающая эффект «деформационного упрочнения» бетона

Для объяснения явления «деформационного упрочнения» в бетоне обратимся к аналогии в металлах более подробно. В литературе их деформационное упрочнение связывают с упрочняющей ролью границ зерен и сводят к «барьерному эффекту», а также усложнению деформации при пластическом течении и взаимодействии дислокаций. При этом напряжение начала текучести σ_T описывается зависимостью, приведённой в работе Мешкова Ю. Я., Сердитовой Т. Н. Разрушение деформированной стали (Киев: Наукова Думка, 1989. 160 с.):

$$\sigma_T = \sigma_{0T} + k_T d^{1/2}, \quad (1)$$

где σ_{0T} – температурно-зависимая часть предела текучести; k_T – опытная постоянная, зависящая от вида материала; d – размер зерна поликристаллического материала. Величина σ_{0T} состоит из нескольких компонентов:

$$\sigma_{0T} = \sigma_{n-n} + \sigma_n + \sigma_{np} + \dots, \quad (2)$$

где σ_{n-n} – напряжения Пайерлса-Набарро. Остальные составляющие правой части этой формулы связаны с особенностью структуры материала (металла). Известно, что наиболее сильной температурной зависимостью и наибольшей величиной в выражении (2) обладает именно эта составляющая – σ_{n-n} , которая отвечает за движение дислокаций по естественному рельефу решетки поликристалла.

В работе [3], уравнение (1) адаптировано для хромированной стали с различным содержанием добавки Хрома, что обеспечено введением дополнительных эмперических коэффициентов.

В работе [3] предпринята попытка объяснить конкретные физические механизмы, приводящие к зависимости (1) в металлах. Для этого используется закон упрочнения, явным образом учитывающий физические особенности взаимодействия решеточных дислокаций с границами зёрен, а также кинетику накопления в них дислокаций ориентационного несоответствия.

Вопросы упрочнения интересуют и исследователей плёночно-тканевых композитов [5]. Моделирование структуры таких материалов предлагается выполнять методом конечных элементов, а полученные результаты затем описывать законом изотропного упрочнения вида $\sigma_T = \sigma_{0T}(1 + C\varepsilon_i)$, где ε_i – интенсивность деформации, C – параметр упрочнения.

По аналогии с металлами на рис. 3 для бетона показаны напряжения σ , соответствующие окончанию «деформационного упрочнения», которые составляют примерно 0,7 от предельных R_{bt} .

Поскольку пластическая деформация в металлах осуществляется скольжением за счёт движения дислокаций в определённых плоскостях под действием касательных напряжений, логичнее рассматривать кривые деформирования не « σ - ϵ », а « τ - γ ». Приведённое напряжение сдвига в таком случае равно:

$$\tau = \sigma \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha, \quad (3)$$

где θ – угол между нормалью к плоскости скольжения и осью растяжения; α – угол между направлением скольжения и осью растяжения (когда ось растяжения перпендикулярна плоскости скольжения ($\alpha=90^\circ$) или параллельна ей ($\theta=90^\circ$), то $\tau=0$; $\tau=\tau_{\max}$ получается, если $\theta=\alpha=45^\circ$).

В связи с этим уравнение аналогичное (2) было предложено Петчем и Холлом:

$$\tau = \tau_0 + kd^{1/2}, \quad (4)$$

где τ_0 – напряжения трения решетки или напряжения начала движения дислокации, когда d (диаметр зерна) $\rightarrow \infty$, что эквивалентно переходу в монокристалл; k – константа, учитывающая влияние структуры границ зерен, степени закрепления дислокаций и легирования.

В зарубежных работах [6, 7] благодаря мощному внедрению микроскопии и компьютерного анализа поверхности шлифов детально рассматривается вопрос о влиянии распределения зёрен по размеру на напряжения Петча-Холла в различных металлах.

В бетоне уравнение (4) подтверждено для гидросиликатов геля цементного камня в эксперименте Ю.М. Баженова с сотрудниками (Баженов Ю. М. Технология бетона. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 455 с.) – для частиц с размерами 0,16-2,89 мкм. Из эксперимента установлено, что процесс микро- и макроразрушения бетона и цементного камня начинается с зарождения и развития микротрещин скола в кристаллитах гидросиликатов, расположенных около концентраторов напряжений – пор и других технологических дефектов (рис. 4).



Рис. 4. Микроструктура цементного камня, на поверхности которого видны типичные ступеньки скола ($\times 2200$) [4]

При этом выделяются два механизма возникновения ступеней скола: либо по плоскостям спайности при переходе трещин в кристаллит с другой ориентацией, либо в результате пластических сдвигов по плоскостям лёгкого скольжения, которые содержат молекулы подвижной воды. Было также отмечено, что в цементном камне возникшие трещины скола останавливаются границами кристаллитов, особенно в тех местах, где ориентация плоскостей спайности при переходе в соседний кристаллит скачкообразно изменяется. Обращает на себя внимание тот факт, что относительно низкая прочность цементного камня (например, по сравнению с металлами и сплавами) обусловлена неравномерным распределением в нём продуктов гидратации. Также в эксперименте установлено влияние на структуру цементного камня и бетона комплексных добавок,

способствующих улучшению микропластических свойств кристаллитной структуры, уменьшению размеров зерен и пор цементного геля и более равномерному их распределению в микрообъемах.

Отметим, в физике твердого тела было установлено, что при растяжении, ионные и ковалентные кристаллы металлов с объемно-центрированной гексагональной плотно упакованной структурой разрушаются хрупко – сколом, особенно при низких температурах и при обычных температурах для таких хрупких металлов, как молибден (Орлов А. Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 144 с.). Кроме того, известно, что кристаллы цементного камня (бетона) так же в основном объемно-центрированные с гексагональной плотно упакованной структурой (Кузнецова Г. В., Кудряшов И. В., Тимашев В. В. Физическая химия вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1989. 384 с., Справочник по химии цемента под ред. Волконского В. В., 1980. 224 с.). Такие кристаллы разрушаются хрупко и именно благодаря этому, а также капиллярно-пористой структуре цементный камень и бетон в целом являются квазихрупкими. Таким образом, аналогия хрупких металлов и бетона (цементного камня) – очевидная.

В общем виде механизм хрупкого разрушения бетона можно исследовать на основе компьютерного моделирования его атомной структуры, как это сделано в работе [8] для калициевого гидросиликата – основной составляющей цементного камня.

Альтернативную для выражений (1) и (4) модель, описывающую упрочнение металлов, предложил Конрад (Конрад Х. Модель деформационного упрочнения для объяснения величины зерна на напряжения течения металлов // Сверхмелкое зерно в металлах. М.: Металлургия, 1973. С. 206–219), согласно которой рост напряжений течения при уменьшении d связывается с резким увеличением плотности дислокаций ρ (линейных дефектов или нарушений кристаллической решетки твердого тела, существенно влияющих на механические и другие физические свойства). В этой модели для гомогенного распределения дислокаций напряжения сдвига по Тейлору равно:

$$t = t^* + aGb\sqrt{r}, \quad (5)$$

где t^* – вклад различных структурных факторов, не включённых во второе слагаемое правой части формулы; a – коэффициент, величина которого различна на разных стадиях; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргера (количественная характеристика, описывающая искажения кристаллической решетки вокруг дислокации); ρ – плотность дислокаций.

К высокопрочным сплавам алюминия эта модель развита в работе [9].

Соотношение Петча-Холла вытекает из уравнения (5), если при данной степени деформации плотность дислокаций в материале пропорциональна обратному диаметру зерна. Такая зависимость может быть получена, если считать, что размер зерна влияет главным образом на длину свободного пробега (среднее расстояние λ , которое частица пролетает за время свободного пробега от одного столкновения до следующего). Выражая деформацию сдвига в виде $\gamma = \rho bs$, где среднее расстояние перемещения дислокаций $s = Cd$, C – постоянная, то:

$$r = r_0 + \frac{g}{bCd}, \quad (6)$$

где ρ_0 – начальная плотность дислокаций. Подставляя значение ρ в уравнение (5), получим:

$$t = t^* + aGb\sqrt{r_0 + \frac{g}{bCd}}.$$

Выделяя в этом выражении параметр τ_μ (вклад в напряжение текучести начальных дислокаций), имеем:

$$t = t^* + t_m + aG\sqrt{\frac{gb}{C}}d^{-1/2}. \quad (7)$$

С учётом $\tau_0 = t^* + \tau_\mu$ приходим к уравнению, эквивалентному соотношению Петча-Холла, причём параметр k зависит от степени деформации:

$$k = aG\sqrt{\frac{gb}{C}}.$$

Для оценки возможности применения модели Конрада к цементному камню (бетону), отметим, что в нём, как в типичном кристаллическом материале, ещё до появления псевдопластичности (до начала накопления микроповреждений), т.е. на условно упругом участке кривой «напряжение-деформация», возможны некоторые неупругие микроявления, вызванные движением дислокаций (Макридин Н.И., Максимова И.Н., Прошин А.П., Соломатов В.Н., Соколова Ю.А. Структура, деформативность, прочность и критерии разрушения цементных бетонов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. 275 с.), точечных дефектов, перемещением атомов на границах зёрен и т.д. Эти микроявления сопровождаются местной концентрацией напряжений и деформаций и служат причиной неоднородного внутреннего трения в кристаллитах и зёрнах цементного камня. Причём ещё в период формирования последних, т.е. при твердении бетонной смеси, под влиянием различных факторов (в том числе от усадки и начальных локальных микронапряжений) возникают многочисленные нарушения сплошности структуры: субмикротрещины, сравнимые с элементарной ячейкой кристалла, микротрещины – размерами до нескольких зёрен цементного камня, поры, полосы скольжения величиной $0,0001 \dots 0,01$ мкм ($10^{-7} \dots 10^{-5}$ см) и т.д. На наш взгляд все перечисленное может быть объяснено накоплением и движением дислокаций в цементном камне. По-видимому, впервые оценка концентрации дислокаций в этом материале была дана в работе [10]: до $10^{11} \dots 10^{12}$ см $^{-2}$, т.е. почти как в металлах ($10^{12} \dots 10^{13}$ см $^{-2}$).

Отметим, что дислокации, зарождаясь в период формирования структуры цементного камня и бетона, затем в затвердевшем бетоне превращаются в основном в «сидячие», играют роль определённого тормоза для сдвиговых деформаций микроструктуры, но в дальнейшем при определённой концентрации могут способствовать появлению микроскола.

Косвенно всё перечисленное подтверждает возможность применения дислокационного механизма (7) для объяснения «деформационного упрочнения» цементного камня (бетона).

Для оценки эффекта упрочнения, из формулы (7) выразим модуль сдвига:

$$G = \frac{t - (t^* + t_m)}{a \sqrt{\frac{gb}{Cd}}}$$

Воспользуемся известной зависимостью теории упругости $E_b = 2G(1 + \nu)$, где ν – коэффициент поперечных деформаций. Получим:

$$E_b = \frac{2(1 + \nu) [t - (t^* + t_m)]}{a \sqrt{\frac{gb}{Cd}}} \quad (8)$$

Если предположить, что на начальном этапе нагружения (до «упрочнения») связь между напряжениями и деформациями подчиняется закону Гука:

$$\tau = G\gamma \text{ или } E_{b0} = 2(1 + \nu_0) \frac{t}{g},$$

где ν_0 – коэффициент Пуассона (для бетона $\nu_0 \approx 0,2$), тогда, чтобы происходило «упрочнение» за пределами упругой стадии работы материала, необходимо выполнение следующего неравенства: $E_b > E_{b0}$, т.е.:

$$\frac{2(1 + \nu) [t - (t^* + t_m)]}{a \sqrt{\frac{gb}{Cd}}} > 2(1 + \nu_0) \frac{t}{g}$$

или

$$t > \frac{t^* + t_m}{1 - a \frac{1 + \nu_0}{1 + \nu} \sqrt{\frac{b}{Cdg}}} \quad (9)$$

Величины τ^* , τ_u , a , b , C , d , входящие в неравенство (9) подлежат экспериментальному уточнению для цементного камня и бетона.

Общие выводы

1. Сделана попытка объяснить механизм «деформационного упрочнения» бетона (цементного камня), наблюдаемый в экспериментах при его растяжении механической нагрузкой – от начала нагружения до момента, предшествующего появлению видимой макротрещины.

2. Для этого выполнен анализ аналогий в металлах и сплавах. В итоге на основе модели Конрада получено расчётное неравенство для оценки касательных напряжений, соответствующих концу «деформационного упрочнения» в цементном камне (бетоне).

3. Сделан вывод о возможности применения дислокационной теории к объяснению рассматриваемого процесса.

Список библиографических ссылок

1. Цилосани З. Н., Нижарадзе М. Д., Далакишвили Г. Л. Исследование трещинообразования в бетоне и железобетоне методом голографической интерферометрии // Бетон и железобетон. 1990. № 8. С. 8–10.
2. Ахметзянов Ф. Х. К особенностям деформирования, повреждаемости, изменения физико-механических характеристик бетона в конструкциях // Известия вузов. Строительство. 1993. № 9. С. 150–155.
3. Popov A. Non-parametric model of Holl-Petch relationship for chromium steel // Machines, Technologies, Materials. 2013. № 10. P. 13–15.
4. Селуков Д. Г., Волегов П. С. Исследование влияния размера зерна на предел текучести в двухуровневой модели на базе физической теории пластичности // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21, вып. 3. С. 1305–1307.
5. Каюмов Р. А., Мангушева А. Р. Предельный анализ для пленочно-тканевого композиционного материала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 6. С. 95–98.
6. Lehto, Pauli & Remes, Heikki & Saukkonen, Tapio & Hänninen, Hannu & Romanoff, Jani. Influence of grain size distribution on the Hall.Petch relationship of welded structural steel // Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 592. P. 28–39.
7. Hanamura T., Qiu. H. Analysis of Fracture Toughness Mechanism in Ultra-Fine Grained Steel: Relationship Between Grain Size and Tensile Properties. Springer, 2014. P. 9–25.
8. Bauchy M., Laubie H., Abdolhosseini Qomi M. J., Hoover C. G., Ulm F.-J., Pellenq R.J.-M. Fracture toughness of calcium-silicate-hydrate from molecular dynamics simulations // Journal of Non-Crystalline Solids. 2015. № 419. P. 58–64.
9. Александров И. В., Чембарисова Р. Г., Латыпов М. И. Аналитическое моделирование напряжения течения сплава Al 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Вестник УГАТУ. 2012. № 3 (48). С. 115–125.
10. Ахметзянов Ф. Х. К эффекту торможения силовой трещины в цементном камне (бетоне) усадочным трещинообразованием // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 14–18.

Ahmetzjanov F.Kh. – candidate of technical sciences, associate professor

Radaikin O.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: olegxxii@mail.ru

Ibragimov R.A. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: rusmag007@yandex.com

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

To the effect of «strain hardening» concrete under tensile mechanical load

Abstract

Problem statement. In this work tasked to explain the mechanism of the concrete «strain hardening» which observed in experiments under tensile mechanical stress – from start of loading to the moment preceding appearance of the visible macrocrack.

Results. To do this, the analysis of the analogies in metals and alloys studied by theoretical and experimental material. In the end, based on the model of Conrad the obtained inequality to estimate the tangential stresses corresponding to the end of «strain hardening» in cement stone (concrete).

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is the application of dislocation theory to the explanation of the process of «strain hardening».

Keywords: work hardening, concrete, cement stone microstructure, discontinuity, dislocation.

References

1. Tsilosani Z. N., Nizharadze M. D., Dalakishvili G. L. A study of cracking in concrete and reinforced concrete method of holographic interferometry // *Beton i zhelezobeton*. 1990. № 8. P. 8–10.
2. Ahmetzjanov F. Kh. To the characteristics of the deformation, damage, change of physico-mechanical characteristics of concrete structures // *Izvestiya vuzov. Construction*. 1993. № 9. P. 150–155.
3. Popov A. Non-parametric model of Holl-Petch relationship for chromium steel // *Machines, Technologies, Materials*. 2013. № 10. P. 13–15.
4. Selukov D. H., Volegov P. S. investigation of the effect of grain size on yield strength in the two-level model on the basis of the physical theory of plasticity // *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2016. Vol. 21. Issue. 3. P. 1305–1307.
5. Kayumov R. A., Marusheva A. R. Limit analysis for film-fabric composite material // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. № 6. P. 95–98.
6. Lehto, Pauli & Remes, Heikki & Saukkonen, Tapio & Hänninen, Hannu & Romanoff, Jani. Influence of grain size distribution on the Hall-Petch relationship of welded structural steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 592. P. 28–39.
7. Hanamura T., Qiu. H. Analysis of Fracture Toughness Mechanism in Ultra-Fine Grained Steel: Relationship Between Grain Size and Tensile Properties. Springer, 2014. P. 9–25.
8. Bauchy M., Laubie H., Abdolhosseini Qomi M. J., Hoover C. G., Ulm F.-J., Pellenq R.J.-M. Fracture toughness of calcium-silicate-hydrate from molecular dynamics simulations // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2015. № 419. P. 58–64.
9. Alexandrov I. V., Chembarisov R. G., Latypov I. M. Analytical modeling of flow stress of Al alloy 1570 subjected to severe plastic deformation // *Vestnik USATU*. 2012. № 3 (48). P. 115–125.
10. Ahmetzjanov F. Kh. The effect of braking force cracks in the cement stone (concrete) shrinkage crack formation // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 3 (29). P. 14–18.