



УДК624.012

Ахметзянов Ф.Х. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: ahunor@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

К вопросу о влиянии шероховатости поверхности бетона на повреждаемость строительных элементов

Аннотация

Задача включает две части. В первой – описан алгоритм определения вероятностных характеристик случайного поля шероховатости поверхности бетона: среднего значения и корреляционной функции. Во второй части по известным вероятностным характеристикам ординат шероховатости вычисляются вероятностные характеристики тензора напряжений для плоского напряженного состояния, а также дисперсия напряжений и коэффициент концентрации напряжений. Для второй части использовано решение Пальмова В.А. для машиностроительных элементов.

Ключевые слова: шероховатость, корреляционная функция, случайная функция, концентрация напряжений, трещина (повреждаемость).

Реальная поверхность строительных элементов никогда не бывает абсолютно гладкой, а всегда имеет неровности, образующие шероховатость.

Под шероховатостью поверхности понимается совокупность неровностей, располагаемых в пределах рассматриваемого участка. Шероховатость будем отличать от отклонения формы. Различие между ними видно на рис. 1. Первая – местное (локальное) отклонение в близких друг от друга поперечных сечениях элемента, а отклонение формы – различие в отметках осредненной поверхности на значительном, например, не менее характерного размера, расстоянии между поперечными сечениями.

Далее рассматриваем только шероховатость.

Шероховатость и ее влияние на физико-механические свойства поверхностного слоя материала достаточно детально исследованы в машиностроительных изделиях из металла и сплавов в противоположность строительным элементам из бетона и железобетона [2, 3, 4], для которых не встречены статьи в технической литературе.

Известно, что изменение размеров, геометрии поперечного сечения вызывает концентрацию напряжений. В экспериментальных испытаниях образцов из бетона и железобетона при кратковременных и продолжительных нагружениях трещины возникают в поверхностном слое при статическом, динамическом и знакопеременном нагружении [5, 9].

Наличие подъемов и впадин на поверхности материала не позволяет произвести передачу нагрузки равномерно и полностью на всей поверхности элемента. Поэтому, естественно, напряжения возрастают при передаче пропорционально коэффициенту K , равному отношению геометрической площади поверхности A , K площади за вычетом впадин A_B :

$$K = A / (A - A_B) = 1 / (1 - A_B / A) = 1 / (1 - K_B) \quad (1)$$

$$0 \leq K_B \leq 1 \quad (2)$$

Сопроматовские напряжения (в упругой области работы материала) σ^e будут равны:

$$\sigma^e = (q/A) \cdot K \quad (3)$$

где q – нагрузка; A – площадь нагружения поверхности бетона.

Кроме этого, при эксцентричном расположении центра тяжести всех впадин относительно геометрического центра тяжести поверхности с нагрузкой ℓ_{cl} возникает изгибающий момент:

$$M_q = N \cdot \ell_{cl} \quad (4)$$

Шероховатость влияет на следующие эксплуатационные свойства поверхностных слоев материала:

1. Концентрацию напряжений и прочность, трещиностойкость материала;
2. Обтекаемость жидкостями и газами;
3. Запыляемость поверхностей;
4. Прочность и качество покрытия;
5. Коррозионную стойкость;
6. Отражение электромагнитных волн от поверхности;
7. Износ, повреждаемость поверхностей материала.

Оценку шероховатости поверхности бетонных и железобетонных изделий рационально производить по стандартным числовым параметрам, аналогично изделиям в машиностроении для металлических изделий [7]:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии в пределах ℓ (рис. 2, 3);

R_2 – высота неровностей профиля (среднее расстояние между пятью высшими и пятью низшими точками профиля в пределах длины ℓ), определяемые по формулам:

$$R_a = 1/\ell \int_0^\ell |\gamma| dx \approx \Sigma^h |\gamma|/h \quad (5)$$

$$R_2 = [\Sigma_{r=1}^5 h_{\text{imax}} - \Sigma_{r=1}^5 h_{\text{imin}}]/5 \quad (6)$$

(Профиль – кривая, полученная в сечении шероховатой поверхности плоскостью, перпендикулярной к ней).

Совокупность впадин и выпуклостей поверхности элемента представляет статистическую случайную функцию с определенным законом распределения.

Впадины и выпуклости на поверхности представляют отклонения от среднего значения. В поперечном сечении со впадиной сопротивляемость нагружению на определенную величину, естественно, ниже сопротивляемости в сечении с выпуклостью. То есть отклонения будут зависеть от перепада локальных значений поверхности (шероховатости).

Шероховатость имеют и поверхности трещин в бетонных и железобетонных элементах. Кроме этого, при измерениях раскрытия трещин на поверхности бетона элемента явно прослеживается случайная составляющая.

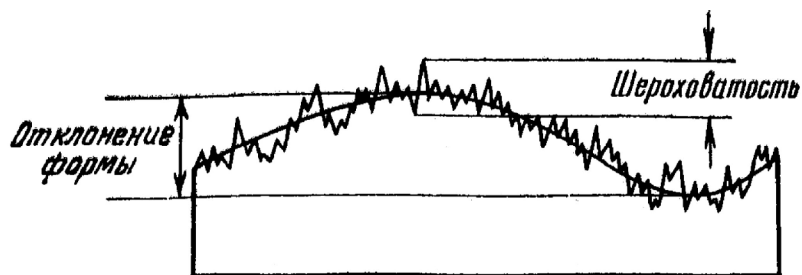


Рис. 1. Различие между отклонением формы и шероховатостью

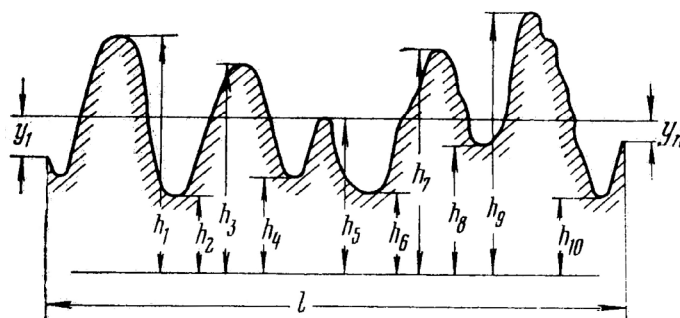
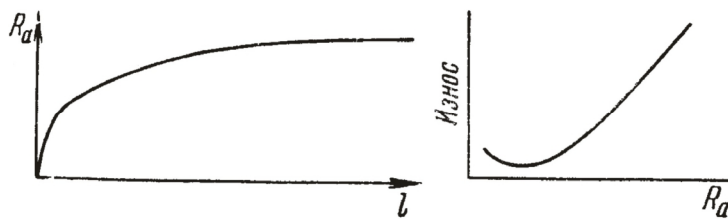
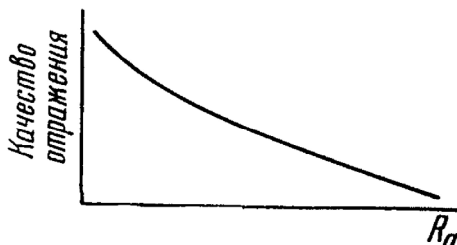


Рис. 2. Профиль поверхности

Рис. 3. Изменение параметра R_a с увеличением длины l Рис. 4. Влияние параметра R_a на эксплуатационные свойства поверхности

Композиционная модель шероховатости, исходящая из разделения причин неровностей на поверхности строительных элементов на детерминированную (определенную) периодическую основу и налагающуюся на нее случайную компоненту, позволяет принципиально использовать аппарат случайных функций для обработки и определения параметров компонент. Характер периодичности определяется технологическими факторами: составом; удобоукладываемостью; уплотнением бетонной смеси.

Понятие детерминированной составляющей можно свести к периодической составляющей со случайной фазой [6] (рис. 5).

В практическом приложении для описания случайного процесса шероховатости поверхности бетона строительных элементов нужно определять среднее значение случайной функции $X(\ell)$ и ее корреляционную функцию $K(\ell)$.

Для определения корреляционной функции исходим из предпосылки стационарности случайной функции (независимости среднего значения от ℓ), что практически выполняется (например, поверхности перекрытий, покрытий, наружных и внутренних стен стараются выполнять ровными). Стационарная корреляционная функция зависит лишь от разности аргументов, т.е.:

$$K(\ell_1 - \ell_2) = K(\ell_2 - \ell_1). \quad (7)$$

По исследованиям автора, случайные функции на поверхности железобетонных панелей жилых домов (например для раскрытия трещин) имеют стационарные участки с корреляционными функциями вида, показанного на рис. 6 [7]:

$$K(\ell) = \ell^{-\alpha} \cdot \cos \beta \ell, \quad (8)$$

где ℓ – длина интервала по рассматриваемому участку поверхности элемента.

По теореме Биркгофа-Хинчина корреляционная функция непрерывного случайного процесса может быть представлена в виде интеграла:

$$K(\ell) = \int \ell^{i\lambda \ell} \cdot dF(\lambda), \quad (9)$$

где $F(\lambda)$ – вещественная, неубывающая ограниченная функция, называемая спектральной функцией процесса $x(\ell)$.

Если известна корреляционная функция $K(\ell)$, то производная от спектральной функции $S(\lambda)$ находится по формуле обращения интегралов Фурье:

$$S(\lambda) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \ell^{i\lambda \ell} \cdot K(\ell) d\ell \quad (10)$$

Спектральные представления случайных функций дают возможность аппроксимировать случайные процессы линейными комбинациями гармоник вида

$$\sum X_k e^{i\lambda_k x}, \quad (11)$$

где X_k – попарно некоррелированные случайные величины, а λ_k – вещественные числа. Точность аппроксимации зависит от числа h слагаемых в сумме [6].

Коэффициент концентрации напряжений на шероховатой поверхности упругого тела

Выше были изложены соображения, что шероховатость поверхности бетона можно рассматривать как реализацию случайной функции профиля поверхности строительного элемента. Экстремальные значения шероховатости можно рассматривать как выбросы случайной функции, теория которых разработана и использовалась в практических приложениях [8]. В случаях гауссовского процесса решение задачи упрощается. При этом в технической литературе приводятся примеры близости к нормальному закону распределения как деформативных, так и прочностных характеристик бетона (рис. 7).

Напряжения от нагрузки с учетом шероховатости можно рассматривать как отклонения от напряжений σ на поверхности с осредненной отметкой (с положительным или отрицательным приращением напряжения $\sigma \pm \Delta\sigma$).

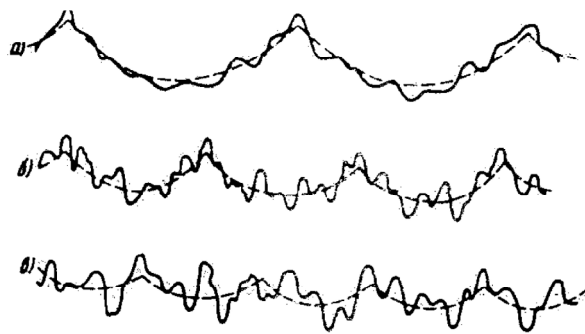


Рис. 5. Влияние технологических факторов на соотношение детерминированной и случайной составляющей профиля

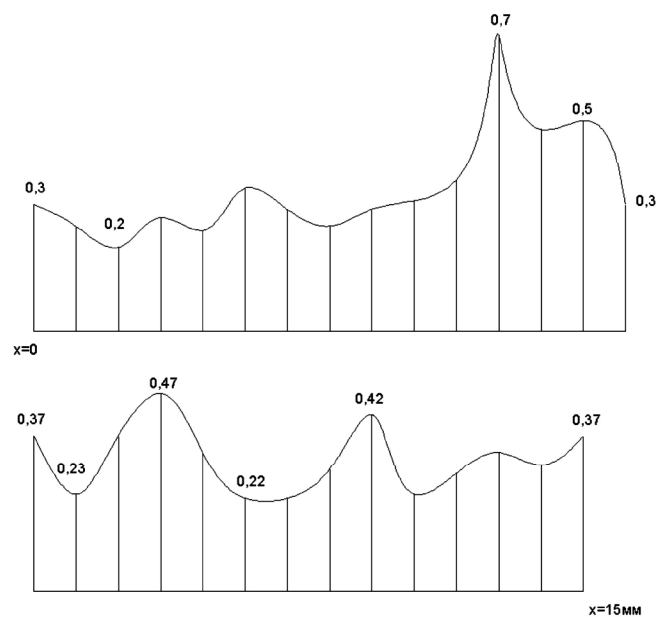


Рис. 6. Случайная функция раскрытия трещины

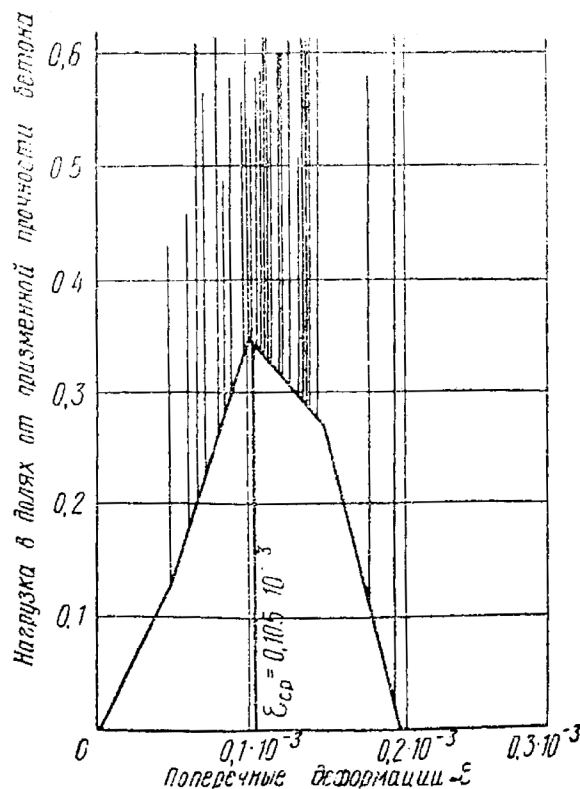


Рис. 7. Кривая распределения величин предельных поперечных деформаций бетона

Коэффициент концентрации напряжений определяется отклонением:

$$K = (\sigma + \Delta\sigma) / \sigma = 1 + \Delta\sigma/\sigma. \quad (12)$$

Заметим, что в сопряжении коэффициент концентрации напряжений есть отношение напряжения на участке с дефектом (например с отверстием) к напряжению при отсутствии дефекта (отверстия).

Принимая профиль границы поверхности $H(y)$ – стационарную случайную функцию от переменной y с нулевым математическим ожиданием, задают ее спектральное представление [6], по которому можно определить корреляционную функцию по выражению (9):

$$H(y) = \int \ell^{i\lambda L} \cdot dF(\lambda). \quad (13)$$

Таким образом, определяются вероятностные характеристики ординат H шероховатой поверхности. По известным характеристикам H вычисляются вероятностные характеристики тензора напряжений для плоского напряженного состояния элемента, определяемого напряжениями σ_x , σ_y , τ_{xy} . Эта задача для машиностроительных элементов была решена Пальмовым В.А. [10]. Им было предложено спектральное представление напряжения от шероховатости границы полуплоскости, с помощью которого находилось математическое ожидание и корреляционная функция случайного напряжения σ_s , действующего в сечении, перпендикулярном границе.

Полученная прямая связь вероятностных характеристик напряжения на границе с вероятностными характеристиками шероховатости поверхности позволяет вычислять среднее на единицу длины границы число выбросов $N(u)$ напряжения σ_s за некоторый уровень u :

$$N(u) = 1/2\pi \sqrt{\frac{\hat{e}s(0)}{\hat{e}s(i)}} \ell \frac{(u-s)}{2\hat{e}s(0)}. \quad (14)$$

Предполагалось, что закон распределения H и σ_s является нормальным. Математические ожидания среднего числа пересечений контуром шероховатости нулевого уровня и среднего числа максимумов соответственно равны:

$$h = \frac{1}{p} \sqrt{-\frac{\hat{e}''(0)}{\hat{e}(0)}} \quad (15)$$

$$m = \frac{1}{2p} \sqrt{-\frac{\hat{e}''(0)}{\hat{e}''(0)}} \quad (16)$$

Здесь $K(0)$ – дисперсия напряжения на границе полуплоскости:

$$(L'(0) = D = -4\sigma^2 K''[H(y) = 0]).$$

$K''(0)$; $K^{(4)}(0)$ – вторая и четвертая производные корреляционной функции $H(y)$ при $y = 0$;

выражения (15) и (16) после преобразований позволяют получить среднее квадратическое отклонение напряжения σ_s :

$$B = 2\pi n R_q \sigma, \quad (17)$$

а дисперсия $D = \beta^2$

R_q – среднее квадратическое отклонение высоты шероховатости

$$N(u) = m \cdot \ell \frac{(u - s)'}{2b'}. \quad (18)$$

Дисперсия напряжений имеет максимальное значение на поверхности и быстро убывает по мере удаления от нее. Концентрация напряжений на шероховатой поверхности есть случайная величина со средним значением σ_s . Это среднее значение попадает в интервал значений (например, с вероятностью 0,95):

$$\sigma - 2\beta < \sigma_s < \sigma + 2\beta. \quad (19)$$

Если отнести оценку напряжения к номинальному напряжению σ (без учета шероховатости), то коэффициент концентрации α (условный) равен: (с учетом выражения (19)):

$$\alpha = 1 + 2\beta/\sigma. \quad (20)$$

Подставив по выражению (17) β , имеем:

$$\alpha = 1 + 4\pi n R_q. \quad (21)$$

Рассматривая профиль H как реализацию случайного процесса, находим вероятностные характеристики n и R_q удержанием по одной реализации. В работе [6] оценка α для металлических машиностроительных деталей при разных шероховатостях поверхностей (проката, обработанных шлифовкой поверхностей и др.) и разных видах напряженного состояния составляли 1,09...1,56, а по графикам с более значительными отклонениями шероховатости увеличивались до 4...5.

В опытах автора на цементных образцах с размерами 4x4x16 см, испытанных при четырехточечном изгибе, разница в средней разрушающей нагрузке составляла 12%. Образцы (3 шт. контрольные с обычной, в лабораторных условиях, технологией изготовления сравнивались по разрушающей нагрузке с образцами, отличавшимися (3 шт.) тем, что были обернуты при изготовлении одним слоем полиэтиленовой пленки, что обуславливало менее шероховатую поверхность. Последняя была причиной образования трещин при более высоком уровне нагружения и в итоге более высокой несущей способности. Изготовлены образцы больших размеров поперечного сечения с целью проверки влияния шероховатости на область

таких размеров образцов. Отметим, что когда шероховатая граница полуплоскости образована системой периодичности повторяющихся выступов и впадин:

$$H = A \cos (2\pi/\tau) \cdot y, \quad (22)$$

где: A – высота выступов, τ – шаг; y – координата по длине элемента.
Значение коэффициента концентрации напряжений имеет вид [11]:

$$\alpha_n = 1 + 2 \sqrt{g \frac{2A}{r}}, \quad (23)$$

где: r – радиус кривизны границ во впадине;
 g – функция отношения $\tau/2A$.

У Тимошенко С.П. исследования концентрации напряжений в металлических изгибаемых профилях интересны и графическими зависимостями, приведенными в [12], по которым (опытные данные) коэффициент концентрации напряжений возрастает с уменьшением отношения радиуса впадины r к высоте поперечного сечения элемента d . Это позволяет предположить, что концентрация напряжений над вершиной трещины в бетоне при $r/d < 0,1$ более трех раз превышает напряжение, которое возникает от нагрузки при отсутствии трещин.

В бетоне строительных элементов в сечении с концентрацией напряжений σ_k , которые относительно напряжений без концентрации σ будут:

$$\sigma_k = \alpha_n \cdot \sigma, \quad (24)$$

при условии:

$$\sigma \geq R_{tbn}, \quad (25)$$

будут образовываться трещины (повреждения).

Глубина влияния образованной от шероховатости поверхности бетона трещины будет зависеть от раскрытия образующейся трещины (имеющей также случайную составляющую) [13].

Выводы:

1. Шероховатость поверхности бетона – одна из причин, наряду с неоднородностью структуры, вызывающая концентрацию напряжений в поверхностном слое строительных элементов.

2. В опытах автора при испытании образцов на изгиб, изготовленных в лабораторных условиях, с обычной поверхностью и с более гладкой поверхностью превышение разрушающей нагрузки в последних составляло до 12 % из-за повышенной трещиностойкости при гладкой поверхности.

3. Предложено экспериментально установленное для бетона выражение для корреляционной функции и квазиэргодичность на поверхности бетона случайной функции шероховатости.

Список литературы

1. Витенберг Ю.Р. Оценка волнистости поверхности с помощью корреляционных функций. // Вестник машиностроения, 1971.
2. Голубев Ю.М., Небольских В.Я. Функциональная связь критериев и параметров шероховатости с некоторыми эксплуатационными показателями деталей машин. // Сборник «Наука и производство». – Новосибирск, 1968.

3. Пальмов В.А. Напряженное состояние вблизи шероховатостей поверхности упругих тел. // ПММ, 1963, № 5.
4. Кошек Л.Н. Статические параметры шероховатости поверхности и их измерение. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 1970.
5. Ахметзянов Ф.Х. Влияние поверхности бетонных и железобетонных элементов на повреждаемость. // Известия КГАСУ, 2010, № 1 (13).
6. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход. – М., Наука, 1975.
7. Ахметзянов Ф.Х. Надежности по трещиностойкости железобетонных наружных стеновых панелей жилых зданий и исследованию раскрытия трещин в них как случайных функций. // Межвузовский сборник научных трудов «Надежность строительных конструкций». – Куйбышев: Архитектурно-строительный институт, 1991.
8. Ахметзянов Ф.Х. К оценке расстояния между трещинами в бетонных и слабоармированных железобетонных изгибаемых и сжатых элементах с использованием теории выбросов случайных функций. // Материалы 3-й Всероссийской конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции». – Чебоксары, 2001.
9. Берг О.Я. Исследование прочности железобетонных конструкций при воздействии на них многократно повторных нагрузок. // Труды института транспортного строительства «Исследования железобетонных конструкций», вып. 19. – М.: Трансжелдориздат, 1956.
10. Пальмов В.А. Концентрация напряжений около шероховатостей границы упругого тела. // Известия АН СССР, ОТН, «Механика и машиностроение», 1963, № 3, 5.
11. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – Гостехиздат, 1947.
12. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов, т. 2. – М.: Наука, 1965.
13. Ахметзянов Ф.Х., Арсентьев Е.З. О соотношении заглубления трещин в бетоне к ширине их раскрытия на поверхности бетонных и железобетонных конструкций. // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции. Тезисы доклада II Всероссийской конференции. – Чебоксары, 1999.

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

E-mail: ahunor@mail.ru

Kazan state University of Architecture and Engineering

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

Influence of roughness the surface concretes building elements on the damage

Rezume

The author's experiments established a decrease in bearing capacity in the area of pure bending of naturally-rough cement samples as compared to smooth-surfaced twin samples. Dependence of tensions on the curve of the bent element, as is known from the Theory of Strength of Materials cannot, provide a way to evaluate the influence of surface roughness on the amount of stress from outer load without a further extension to this approach.

Roughness on the surface of the element is a random coordinate function. To describe these functions in concrete, the specific work-tested correlation function [7] was used, while for defining intervals between rugosities, the range between overshoots of a random function was employed.

The stress value, adjusted for concrete's surface roughness, were recommended for estimation on the basis of Palnov's solution as applied to engineering materials [10].

The presented formulae of relationship between the behavior of roughness in concrete and the mean expectation value, as well as the correlation function of random stress δ operating in the section perpendicular to the surface boundary, allows you to define plane stress condition on a rough element surface.

Keywords: roughness, probability function, correlation function, concentration of tensions, crack, damage.

References

1. Witenberg Ju.P. Estimation wavy surface with using of correlations functions. // Herald mechanical engineering, 1971, № 8.
2. Golubev Ju.M., Nebolskih V.Ja. Criteria and parameters of roughness together binding with some indexes machinery components on exploitation stage. Collected articles. Science and production. – Novosibirsk, 1968.
3. Palmov V.A. Tension condition nearby roughness surfaces on elastic bodies. Applied mathematics and mechanic, 1963, № 5.
4. Coshek L.N. Statistical parameters of roughness surfaces and their measurement. Dissertation candidates degree for technical. – Novosibirsk, electro institute, 1970.
5. Akhmetzyanov F.Kh. Influence of surface the concretes and reinforced concretes elements on the damage.
6. Khusu A.P., Witenberg Ju.P., Palmov V.A. Roughness of surfaces, theoretical-probable of approach. – Moscow, science, 1975.
7. Akhmetzyanov F.Kh. Reliability crack fastness of reinforced outwardly walls elements on building and research cracks with use the correlation functions. Collected articles «Reliability of building constructions». Architectural-building institute. – Kuibyshev, 1991.
8. Akhmetzyanov F.Kh. Estimation of distance the cracks on concrete and reinforced elements in compress and bending with use the theory of throws fortuitously function. In materials of Russians conference «New in the architecture, planning and reconstruction building constructions». – Cheboksary, 2001.
9. Berg O.Ja. Research of durability reinforced concrete constructions with influence repeatedly many times loasts. Works of Transports building institute «Research of reinforced concrete constructions on bridges». – Moscow, transgeldorisdat, 1956.
10. Palmov V.A. Tension concentration by the roughness's boundary elastic bodies. Herald of Science Academy Soviet Unions, mechanic and mechanical engineering, 1963, № 3, № 5.
11. Newber G. Tensions concentration. State publishing, 1947.
12. Timoshenko S.P. Resistance of materials. – Moscow, Science, Bandwidth, 1965.
13. Akhmetzyanov F.Kh., Arsentjev E.S. Correlation depth of cracks to width on surface of concrete and reinforced concrete on constructions. In materials of Russian conference «New in the architecture, planning and reconstruction building constructions». – Cheboksary, 1999.