

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-54-62>

УДК 539.4(075.8)

Ресурсное проектирование конструкционного бетона причальных сооружений на основе методов трибофатики

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Усиление того или иного повреждающего фактора ведет к снижению прочности, или износостойкости. Взаимодействие повреждающих явлений оказывается сложным. Если к циклической нагрузке (циклическое замораживание-оттаивание, механическая усталость) добавить контактную нагрузку (трение и износ), то надежность и долговечность воспринимающей их системы может либо снизиться, либо увеличиться, либо остаться на прежнем уровне. Результаты зависят от условий взаимодействия повреждающих явлений. На стыке трибологии и механики усталостного разрушения в середине 1980-х гг. благодаря исследованиям профессора Л. А. Сосновского возникла трибофатика – наука, которая изучает не взаимное влияние отдельных повреждающих факторов, а сложное сочетание различных повреждающих явлений. В результате этого взаимодействия обнаруживается особый тип деградации конструкционного бетона причальных сооружений – комплексное износоусталостное повреждение. Условия и закономерности такого повреждения причальных сооружений изучает трибофатика. Проектирование железобетонных конструкций по предельному состоянию – традиционный метод. Для ответственных конструкций причальных сооружений целесообразно ресурсное проектирование. Технический ресурс является показателем долговечности. Это наработка объекта, в данном случае железобетонных причальных сооружений, от начала эксплуатации до наступления предельного состояния. Исследованы морские портовые сооружения на побережье дальневосточных морей, отличительной особенностью эксплуатации которых являются климатические условия острова Сахалин. На конструкции портовых сооружений воздействуют волны. В зимний период при похолодании до отрицательных температур происходит обледенение конструкций в переменном уровне воды, на них оказывают воздействие плавающие льды.

Ключевые слова: трибофатика, конструкционный бетон, причальные сооружения, ледовая абразия, циклическое замораживание-оттаивание

Для цитирования: Леонович, С. Н. Ресурсное проектирование конструкционного бетона причальных сооружений на основе методов трибофатики / С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 54–62. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-54-62>

Resource Design of Structural Concrete Berthing Structures Based on Tribo-Fatigue Methods

Докт. техн. наук, проф. S. N. Leonovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An increase in one or another damaging factor leads to a decrease in strength or wear resistance. The interaction of damaging phenomena turns out to be complex. If contact load (friction and wear) is added to cyclic loading or cyclic

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
smits@bntu.by

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
smits@bntu.by

Abstract. An increase in one or another damaging factor leads to a decrease in strength or wear resistance. The interaction of damaging phenomena turns out to be complex. If contact load (friction and wear) is added to cyclic loading or cyclic freeze-thaw (mechanical fatigue), then the reliability and durability of the system receiving them can either decrease, increase, or remain at the same level. The results depend on the conditions of interaction of damaging phenomena. At the intersection of tribology and mechanics of fatigue fracture in the mid-1980s, thanks to the research of Professor Sosnovsky L.A., tribo-fatigue arose – a science that studies not the mutual influence of individual damaging factors, but a complex combination of various damaging phenomena. As a result of this interaction, a special type of degradation of structural concrete of berthing structures is revealed – complex wear-fatigue damage. The conditions and patterns of such damage to berthing structures are studied by tribo-fatigue. Design of reinforced concrete structures based on limit states is a traditional method. For critical structures of berth structures, resource-based design is advisable. Technical resource is an indicator of durability. This is the operating time of an object, in this case reinforced concrete berth structures, from the start of operation until the onset of the limit state. Sea port facilities on the coast of the Far Eastern seas, a distinctive feature of their operation being the climatic conditions of Sakhalin Island, have been studied. The structures of port facilities are affected by waves. In winter, when the temperature drops to below zero, structures become icy in variable water levels and are affected by floating ice.

Keywords: tribo-fatigue, structural concrete, berthing facilities, ice abrasion, cyclic freeze-thaw

Keywords: трибофатика, конструкционный бетон, причальные сооружения, ледовая абразия, циклическое замораживание-оттаивание

For citation: Leonovich S. N. (2025) Resource Design of Structural Concrete Berthing Structures Based on Tribo-Fatigue Methods. *Science and Technique*. 24 (1), 54–62. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-54-62> (in Russian)

Деструкция железобетонных причальных сооружений при ледовой абразии и циклическом замораживании-оттаивании

Специфика климата создает характерные условия эксплуатации для бетона в сооружениях на морском побережье дальневосточных морей. На конструкции портовых сооружений воздействуют волны. В зимний период при похолодании до отрицательных температур происходит обледенение конструкций в переменном уровне воды, на них оказывают воздействие плавающие льды (ледовая абразия).

Рассмотрены два участка в переменном уровне с различными механизмами замораживания конструкционного бетона (рис. 1, 2). В процессе мониторинга температуры установ-

лены параметры морозной деструкции на бетон на этих участках (табл. 1, рис. 3).

Циклическое замораживание и оттаивание бетона в зоне действия прилива (рис. 4, участок А) происходит только в бетоне выше нулевой отметки в начале и в конце зимнего периода. В остальной зимний период в течение 60–80 сут. бетон покрыт слоем морского льда толщиной 50–100 см и защищен им от циклов замораживания-оттаивания. Температура бетона в период отлива не опускается ниже минус 8 °С при самой минимальной наблюдаемой температуре воздуха минус 20 °С. С повышением температуры воздуха повышается температура бетона [1–3].

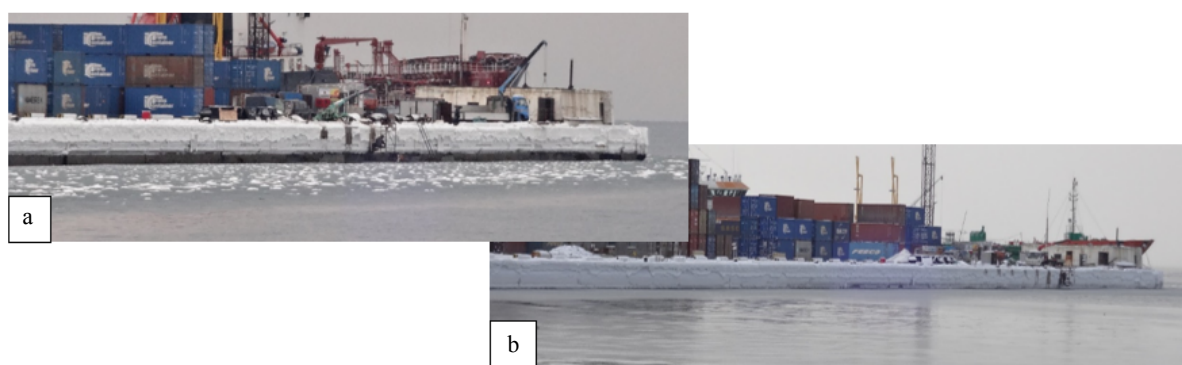


Рис. 1. Общий вид причального сооружения в зимний период (декабрь, ледовая абразия, механика усталостного разрушения – циклическое замораживание-оттаивание):
а – период отлива; б – период прилива

Fig. 1. General view of the berthing structure in winter (December, ice abrasion, fatigue mechanics– cyclic freeze-thaw):
a – low tide; b – high tide period

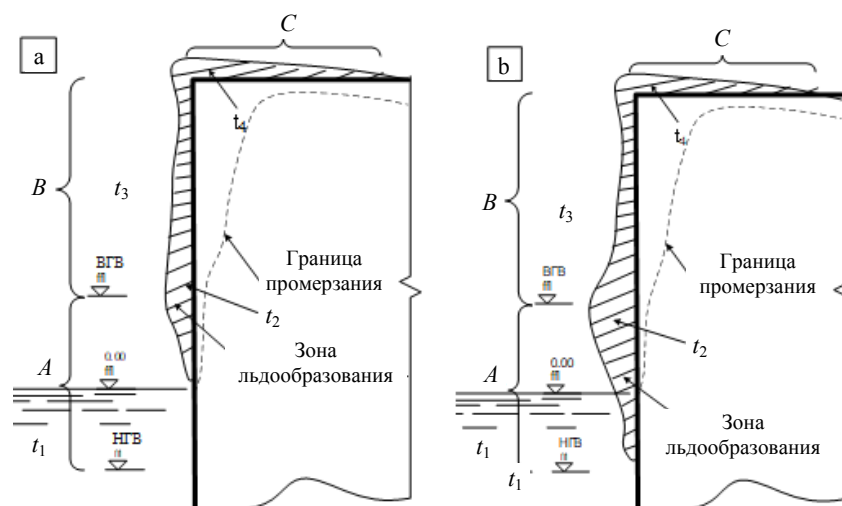


Рис. 2. Уровень воды с учетом водонасыщения и механизма замораживания бетона:
а – схема в начале и конце зимнего периода (бетон причального сооружения в контакте с морской водой);
б – схема в течение всего зимнего периода (бетон, насыщаемый всплеском волн)

Fig. 2. Water level taking into account water saturation and concrete freezing mechanism:
а – scheme at the beginning and end of the winter period (mooring concrete in contact with sea water);
б – scheme throughout the winter period (concrete saturated by the splash of waves)

Таблица 1

Механизм замораживания бетона и температурные параметры бетона и окружающей среды
Mechanism of concrete freezing and temperature parameters of concrete and the environment

Участок в зоне прилива	Зимний период	Значение температуры, °С			Механизм замораживания
		воздуха	воды	бетона	
ВГВ – 0.00	(15.11 ÷ 15.12) (20.02 ÷ 10.03)	(–5) ÷ (–10)	(+2.0) ÷ (0.0)	До (–5)	Циклы ЗО
	(15.12 ÷ 20.02)	Ниже (–10)	(–5) ÷ (–2.0)	(–5) ÷ (–10)	Длительное замораживание
0.00 – НГВ	(15.11 ÷ 15.12) (20.02 ÷ 10.03)	(–5) ÷ (–10)	(+ 2.0) ÷ (0.0)	(0,0)	Замораживание не происходит
	(15.12 ÷ 20.02)	Ниже (–10)	(– 0.5) ÷ (–2.0)	До (–9)	Циклы ЗО

Примечание. Температура бетона на глубине 50 мм от поверхности.

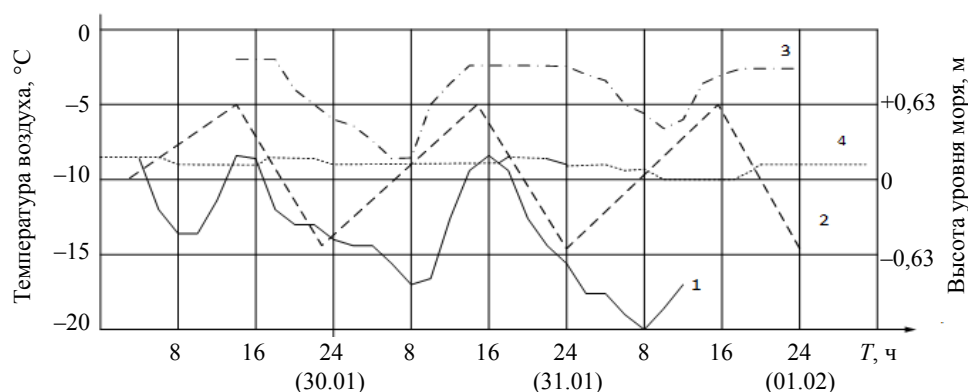


Рис. 3. Температура воздуха и бетона в зоне переменного уровня на отметках +0,400 и +2,500 в соответствии с Графиком прилива в акватории порта Корсаков (о. Сахалин): 1 – температура воздуха; 2 – ход прилива, м; 3 – температура бетона на отметке +0,40; 4 – то же на отметке +2,50

Fig. 3. Air and concrete temperatures in the variable level zone at +0.400 and +2.500 in accordance with the Tide Schedule in the waters of the port of Korsakov (Sakhalin Island): 1 – air temperature; 2 – tide progress, m; 3 – concrete temperature at +0.40; 4 – the same at +2.50

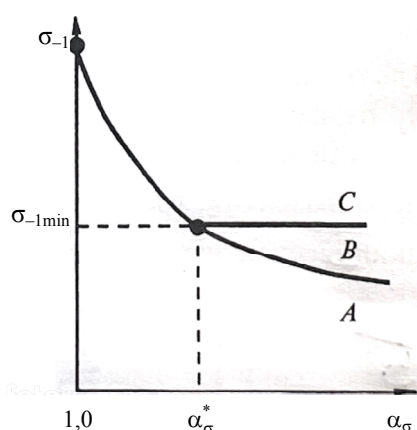


Рис. 4. Усталостное повреждение и разрушение локализации действующих напряжений [6]

Fig. 4. Fatigue damage and failure localization of acting stresses [6]

На участках зоны всплеска волн (участки В и С) бетон подвергается длительному замораживанию при обледенении в течение 80–90 сут. (рис. 1, 2), которое происходит при отрицательных температурах, на 2–3 °С ниже, чем в зоне действия прилива.

Обоснованы с точки зрения анализа долговечности причальных железобетонных сооружений следующие периоды их воздействия: 1-й период (1925–1945 гг.); 2-й период (1970–1990 гг.); 3-й период (2000 г. по настоящее время), которые отличаются технологиями производства бетонных работ.

Анализ повреждений конструкций свидетельствует о целесообразности их дифференцирования по следующим признакам для объяснения причин разрушения бетона [1–3]:

- глубине поврежденного слоя (поверхностное и объемное);
- масштабу повреждения конструкции (локальное и глобальное);
- кинетике процесса разрушения (внезапное и деградационное).

В табл. 2 приведены результаты обследований конструкций по внешним признакам с учетом принятой дифференциации по видам разрушений бетона и возможные причины разрушений.

Трибофатика бетонных причальных сооружений

Трение и износ, усталостное разрушение не влияют друг на друга, сложным образом взаимодействуют друг с другом.

Усиление того или иного повреждающего фактора ведет к снижению прочности, или износостойкости. Взаимодействие повреждающих явлений оказывается сложным. Если к циклической нагрузке или циклическому замораживанию-оттаиванию (механическая усталость) добавить нагрузку контактную (трение и износ), то надежность и долговечность воспринимающей их системы может либо снизиться, либо увеличиться, либо остаться на прежнем уровне. Результаты зависят от условий взаимодействия повреждающих явлений. На стыке трибологии и механики усталостного разрушения в середине 80-х гг. прошлого века благодаря исследованиям профессора Л. А. Сосновского возникла трибофатика [4–7]. Трибофатика изучает не взаимное влияние отдельных повреждающих факторов, а сложное сочетание различных повреждающих явлений. В результате этого взаимодействия обнаруживается особый тип деградации конструкционного бетона причальных сооружений – комплексное износоусталостное повреждение. Условия и закономерности такого повреждения причальных сооружений можно изучить с помощью трибофатики [1–3].

Ресурсное проектирование

Проектирование железобетонных конструкций по предельному состоянию является традиционным методом. Для ответственных конструкций причальных сооружений целесообразно ресурсное проектирование.

Технический ресурс является показателем долговечности. Это наработка объекта, в данном случае железобетонных причальных сооружений от начала эксплуатации до наступления предельного состояния

$$N \geq N_R, \quad (1)$$

т. е. расчетная долговечность N не должна быть меньше установленного нормативного ресурса N_R .

Для проектирования используется параметр ресурса

$$K_R = \left(\frac{N_R}{N_{G\sigma}} \right)^{\frac{1}{m_{\sigma\tau}}}, \quad (2)$$

где N_R и $m_{\sigma\tau}$ – определяемые экспериментально или расчетным методом параметры кривой усталости.

Процесс механической усталости в общем случае имеет две стадии: стадию I до зарождения магистральной трещины, оцениваемую долговечностью N_T , и стадию II ее развития, или стадию живучести элемента конструкции с трещиной, оцениваемую долговечностью $N_{ж}$. Принимая во внимание концепцию об опасном объеме деформируемого твердого тела, на стадии I обнаруживается рассеянное повреждение, на стадии II – локализованное разрушение [4–7].

Усталостное разрушение магистральной трещиной реализуется лишь в области C , определяемой критической точкой с координатами $(\alpha_{\sigma}^*, \sigma_{-1min})$ (рис. 4).

Повреждение малыми усталостными трещинами обычно предшествует разрушению магистральной трещиной. Трещина является длинной, если ее характерный линейный размер на порядок больше размера типичного структурного элемента в материале. К коротким относят трещины, длина которых соизмерима с размерами микроструктурных составляющих материала.

Четкой границы между I и II стадиями механической усталости не существует, поскольку нет однозначного деления трещин на короткие и длинные. Однако начало II стадии связывается применимостью линейной механики разрушения. Здесь анализируется напряженное состояние в вершине трещины и коэффициент интенсивности напряжений K , как мера скорости развития магистральной трещины и вязкости разрушения конструкционного бетона [8–10].

Коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве используются автором для оценки поведения конструкционного бетона при коррозионных и температурных воздействиях [8–10]. Например, оценка хрупкого разрушения бетона железобетонных конструкций при воздействии высоких температур производится с использованием критерия хрупкого разрушения [11]

$$B = \frac{\alpha_b \alpha_{bt} \beta E_c \rho_0 W}{K_{IC} \lambda_K \pi_p}, \quad (3)$$

где α_b – коэффициент пропорциональности; $\alpha_b = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{5/2} \cdot \text{кг}^{-1}$; α_{bt} – то же температурной деформации расширения бетона, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

E_c – модуль упругости бетона при нормальных условиях, МПа; β – коэффициент изменения модуля упругости при пожаре; ρ_0 – плотность бетона в сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ_K – коэффициент теплопроводности бетона, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; π_p – общая пористость бетона, %; K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений, $\text{МН} \cdot \text{м}^{3/2}$; W – объемная эксплуатационная влажность бетона, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Автором предложена зависимость, полученная на основании обработки собственных экспериментальных данных, для прогнозируемой морозостойкости бетона эксплуатируемых конструкций F в зависимости от значений коэффициентов интенсивности напряжений K_{IC} [12]

$$F(N) = 303,85 K_{IC} - 153,49 K_{IC} + 136,31, \quad (4)$$

где $F(N)$ – морозостойкость бетона, циклы замораживания и оттаивания; K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений, $\text{МН} \cdot \text{м}^{3/2}$.

С точки зрения статической механики усталостного разрушения [4], при механической усталости возникает область пластических деформаций (опасный объем Ω_K). Поперечный размер этого объема оценивается по формуле

$$d_* = \frac{1}{\alpha \pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{\text{пл}}^{\text{II}}} \right)^2, \quad (5)$$

где α – параметр вида напряженного состояния; K_{IC} – коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве; $\sigma_{\text{пл}}^{\text{II}}$ – предел пропорциональности при циклическом нагружении.

Применительно к стадии II усталостного разрушения относительный опасный объем при детерминированном подходе

$$\omega_K = \frac{\Omega_K}{\Omega_0}, \quad (6)$$

где Ω_0 – рабочий объем с площадью A_0 опасного сечения с магистральной трещиной.

Если площадь A_0 имеет единичную толщину, то $\Omega_0 = 1 \cdot A_0$. Очевидно, что (6) есть мера поврежденности тела магистральной трещиной. Если последняя является плоской, то вместо (6) используют соотношение между площадью A_I

с трещиной и рабочей площадью A_0 поперечного сечения.

Состояние поврежденности при механической усталости обусловлено: на стадии I – циклическими напряжениями и опасным объемом $V_{P\gamma}$, на стадии II – коэффициентом интенсивности напряжений (K_I , K_{II} , K_{III}) и опасным объемом Ω_K .

Процесс повреждения и разрушения при трении не имеет стадии II развития магистральной трещины. Множественные развивающиеся трещины в пределах опасного объема при трении из-за его изнашивания рассматривают как приведенные единичные наклонные и подповерхностные трещины. Для них применимы подходы линейной механики разрушения. Поврежденность материала в паре трения обусловлена либо контактными напряжениями, либо коэффициентом интенсивности напряжений, а также величиной опасного объема.

Применительно к фрикционно-механической усталости:

– при прямом эффекте

$$\frac{W_{P\gamma}}{V_0} = \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \cup \frac{S_{P\gamma}}{V_0} = \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \left[1 + \frac{S_{P\gamma}}{V_{P\gamma}} \left(1 - \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \right) \right] \Lambda_{\sigma/\tau} \quad (7)$$

– при обратном эффекте

$$\frac{W_{P\gamma}}{V_k} = \frac{S_{P\gamma}}{S_k} \cup \frac{V_{P\gamma}}{S_k} = \frac{S_{P\gamma}}{S_k} \left[1 + \frac{V_{P\gamma}}{S_{P\gamma}} \left(1 - \frac{S_{P\gamma}}{S_k} \right) \right] \Lambda_{\tau/\sigma}, \quad (8)$$

где $\Lambda_{\sigma/\tau}$, $\Lambda_{\tau/\sigma}$ – соответствующие параметры от контактной и внеконтактной нагрузок.

Долговечность на стадии I

Контактирующая со льдом поверхность конструкционного бетона подвергается ледовой абразии (истиранию). Результатом ледовой абразии является обнажение арматуры, уменьшение сечения, а в комплексе – потеря несущей способности причального сооружения в целом.

В соответствии с подходами трибофатики на поверхности элемента в окрестности площадки контакта в первом цикле нагружения формируются как опасные объемы $V_{P\gamma}$, $S_{P\gamma}$, так и комплексный опасный объем $W_{P\gamma} = \varphi(V_{P\gamma}, S_{P\gamma})$ [5, 6].

При мере накапливаемого износоусталостного повреждения за n циклов нагружения

$$\omega_{nT} = \frac{W_{nT}}{W_{P\gamma}}, \quad (9)$$

где

$$W_{nT} = \sum_1^q V_q; \quad (10)$$

V_q – элементарные объемы рассеянного повреждения в пределах комплексного опасного объема $W_{P\gamma}$; W_{nT} – нагружения n при неизменном уровне циклических и фрикционных напряжений; ω_{nT} – мера структурной поврежденности при температурно-временном и нагруженном состоянии элемента силовой системы.

Когда значение W_{nT} достигнет величины $W_{P\gamma}$, в опасном объеме наступает предельное состояние, весь он пронизан множественными трещинами критической концентрации. Поэтому при $\omega_{nT} = 1$ элемент силовой системы в пределах опасного объема сопротивляться действующим нагрузкам уже не может. Опасный объем поврежден начальной магистральной трещиной (рис. 4). Магистральная трещина появляется при условии

$$W_{nT} = W_{P\gamma}, \quad (11)$$

или

$$\omega_{nT} = \omega_N = 1. \quad (12)$$

С точки зрения Л. А. Сосновского [6, 7], накопление локальных повреждений описывается кривой типа 2 или 3 (рис. 5). Если условия для кинетического развития повреждений отсутствуют, первичные трещины оказываются неразвивающимися (пунктир 1 на рис. 5).

Скорость v_1 накопления структурных повреждений ω_{nT} , рассеянных в пределах комплексного опасного объема на стадии I, определяется экспоненциальной функцией циклических σ и фрикционных τ_w напряжений, а также температурой T . Из кинетической теории прочности твердых тел следует

$$v_1 = \frac{d\omega_{nT}}{dn} = C_U \exp\left(-\frac{U_0 - f(Q)}{kT}\right), \quad (13)$$

где функция контактных и внеконтактных нагрузок

$$f(Q) = [\gamma_\sigma(\sigma / \sigma_{-1\min}) + \gamma_\tau(\tau_W / \tau_{f\min})] + \lambda(\sigma \leftrightarrow \tau_W); \quad (14)$$

γ_σ и γ_τ – структурно-чувствительные коэффициенты.

Накопление повреждений ω_{nT} в связи с ростом числа циклов нагружения n имеет место лишь тогда, когда $\sigma > \sigma_{-1\min}$ и $\tau_W > \tau_{f\min}$; если $\sigma < \sigma_{-1\min}$ и $\tau_W < \tau_{f\min}$, то считают, что $v_I = 0$.

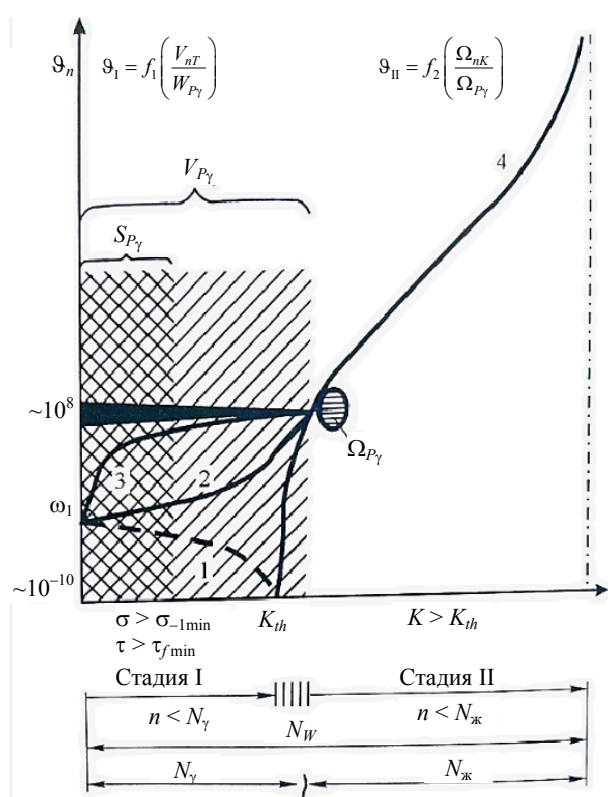


Рис. 5. Кинетика разрушения элемента [6]

Fig. 5. Element destruction kinetics [6]

Сформулированы функция повреждаемости

$$\phi_1(\omega_1) = 1 - \omega_1 \exp \left[\frac{f(Q)}{kT} \left(1 - \frac{1}{\omega_1} \right) \right], \quad (15)$$

а также мера поврежденности в 1-м цикле нагружения

$$\omega_1 = \frac{W_{P\gamma}}{V}. \quad (16)$$

Мера (16) определяется по формулам (7), (8) при фрикционно-механической усталости.

Получено уравнение кривой предельных состояний элементов силовой системы по трещинообразованию. Согласно этому уравнению, долговечность N_T снижается, если растут нагрузки (σ , τ_W , T) и, следовательно, увеличиваются опасные объемы в первом цикле нагружения.

Нагрузочная функция (14) определяет механическую энергию $U_M(\sigma, \tau_W)$ циклических и контактных напряжений, величина которых больше соответствующих пределов выносливости. Следовательно, $U_M(\sigma, \tau)$ в данном случае – повреждающая механическая энергия.

Долговечность на стадии II

Согласно рис. 5, если повреждаемость на стадии I описывается кривыми типа 2 или 3, то далее реализуется стадия II живучести элемента силовой системы с магистральной трещиной, в вершине которой формируется опасный объем Ω_{Py} . Кинетика роста трещины описывается кривой 4.

На стадии II развитие разрушения контролируется коэффициентом интенсивности напряжений K , величина которого определяется соответствующими нагрузками. Если принять степенную зависимость скорости повреждений v_{II} на этой стадии от коэффициента интенсивности напряжений, можно получить уравнение

$$N_{\mathcal{K}} = \frac{1 - \omega_K}{C_K \Delta K_{\omega}^{n_K} (n_K + 1)}, \quad (17)$$

где

$$\Delta K_{\omega} = \frac{K_{\max} - K_{th}}{1 - \omega_K}, \quad (18)$$

а ω_K определяется по (6).

Предложена авторская методика для оценки трещиностойкости бетона, базирующаяся на совокупности его традиционных физикомеханических свойств (параметров $f_c, f_{ax}, f_{fl}, f_{sp}$), в сочетании с многопараметрической оценкой вязкости разрушения бетона на всех этапах деформирования и трещинообразования, осуществляемой на одном и том же образце с определением параметров $K_{IC}, K_{IIC}, J, W, E, \phi$ (рис. 6), из серии не менее трех образцов.

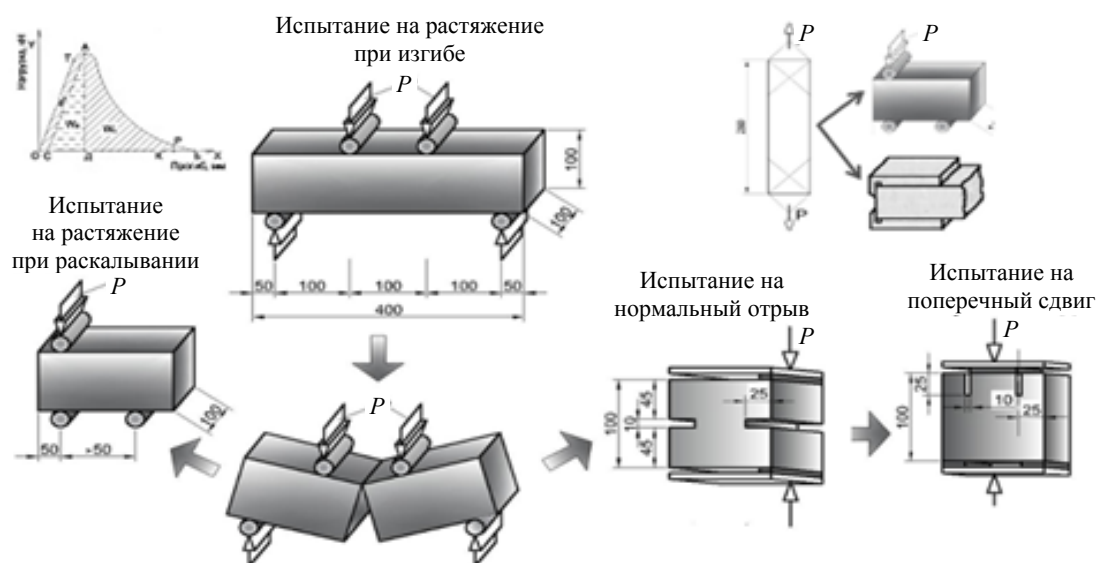


Рис. 6. Многопараметрическая оценка параметров по образцам (призмам) 100×100×400 мм

Fig. 6. Multiparameter estimation of parameters from samples (prisms) 100×100×400 mm

Таким образом, согласно (17), долговечность на стадии II, как и на стадии I, во многом обусловлена величиной относительного опасного объема в 1-м цикле нагружения.

ВЫВОДЫ

1. Предложено ресурсное проектирование конструкционного бетона причальных сооружений на основе методов трибофатики.

2. Рассмотрен опасный участок в переменном уровне, где конструкционный бетон причальных сооружений подвергается циклическому замораживанию-оттаиванию и ледовой абразии.

3. Состояние поврежденности при механической усталости обусловлено на стадии I циклическими напряжениями, на стадии II – коэффициентами интенсивности напряжений.

4. Сформированы функция повреждаемости и мера поврежденности на 1-м цикле нагружения.

5. На стадии II развитие разрушения контролируется коэффициентами интенсивности напряжений. Методология экспериментального определения и анализа разработана автором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малюк, В. В. Методика обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин) /

В. В. Малюк, В. Д. Малюк, С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. 2021. № 5–6 (607–608). С. 67–74.

2. Малюк, В. В. Анализ результатов обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин, 1927-2018) / В. В. Малюк, В. Д. Малюк, С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. 2022. № 1 (609). С. 3–9. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-3-9>.

3. Малюк, В. В. Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин) / В. В. Малюк, В. Д. Малюк, С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 30–34. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>.

4. Сосновский, Л. А. Статическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. Минск: Наука і тэхніка, 1987. 288 с.

5. Сосновский, Л. А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов. Москва–Гомель: ФЦНТП «Безопасность» – НПО «Трибофатика», 2000. 304 с.

6. Сенько, В. И. Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете: пособие / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский. Гомель: УО «БелГУТ», 2005. 191 с.

7. Основы трибофатики: лабораторный практикум / под ред. Л. А. Сосновского. Гомель: БелГУТ, 1999. 44 с.

8. Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. Минск, БНТУ, 2006. 216 с.

9. Леонович, С. Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии / С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семи-

- нара / под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. Брест: БрГТУ, 2001. С. 442–444.
10. Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний конструкций бетона по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Вознищик // Наука и техника. 2013. № 2. С. 33–39.
 11. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: в 2 ч. / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский, О. Ю. Чернякевич, А. В. Степанова; под ред. С. Н. Леоновича. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 1. 390 с.
 12. Леонович, С. Н. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. Брест: БГТУ, 2006. 379 с.
 13. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление / С. Н. Леонович [и др.]; под ред. С. Н. Леоновича. Минск: БНТУ, 2021. 353 с.

Поступила 04.04.2024

Подписана в печать 28.06.2024

Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Malyuk V. V., Malyuk V. D., Leonovich S. N. (2021) Methodology for Examining Reinforced Concrete Structures of Port Facilities (Sakhalin Island). *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, (5–6), 67–74 (in Russian).
2. Malyuk V. V., Malyuk V. D., Leonovich S. N. (2022) Analysis of the Results of the Survey of Reinforced Concrete Structures of Port Facilities (Sakhalin Island 1927–2018). *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, (1), 3–9. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-3-9> (in Russian).
3. Malyuk V. V., Malyuk V. D., Leonovich S. N. (2022) Improvement of Design Methods and Technology of Concrete Works (on the Example of Sakhalin Island). *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, (2), 30–34. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34> (in Russian).
4. Sosnovsky L. A. (1987) *Static Mechanics of Fatigue Failure*. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 288 (in Russian).
5. Sosnovsky L. A., Makhutov N. A. (2000) *Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage in Problems of Machine Life and Safety*. Moscow–Gomel: Federal Target Scientific and Technical Program “Safety” – Scientific and Production Association “Tribo-Fatigue”. 304 (in Russian).
6. Senko V. I., Sosnovsky L. A. (2005) *Basic Ideas of Tribo-Fatigue and Their Study at A Technical University*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 191 (in Russian).
7. Sosnovsky L. A. (ed.) (1999) *Basics of Tribo-Fatigue*. Gomel: Belarusian State University of Transport. 44 (in Russian).
8. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2006) *Non-Destructive Testing of Concrete in Monolithic Construction: Improvement of Means and Methods*. Minsk, Belarusian National Technical University. 216 (in Russian).
9. Leonovich S. N. (2001) Algorithm for Calculating the Durability of Reinforced Concrete Structures under Chloride Aggression. *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus': sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar* [Prospects for the Development of New Technologies in Construction and Personnel Training in the Republic of Belarus: Collection of Works of the VII International Scientific and Methodological Seminar]. Brest, Brest State Technical University, 442–444 (in Russian).
10. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Voznishchik A. V. (2013) Analysis of Methodologies for Non-Destructive Testing of Concrete Structures in Accordance with Existing State Standards and Norms of European Union. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (2), 33–39 (in Russian).
11. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack Resistance and Durability of Structural Concrete at Temperature and Corrosion Zonal Influences. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 390 (in Russian).
12. Leonovich S. N. (2006) *Strength of Structural Concrete during Cyclic Freezing-Thawing from the Perspective of Fracture Mechanics*. Brest, Brest State Technical University. 379.
13. Leonovich S. N., Polonina E. N., Sadovskaya E. A., Shalyi E. E. (2021) *Predicting the Durability of Reinforced Concrete Structures under the Combined Effects of Carbonization and Chloride Aggression and Their Restoration*. Minsk, Belarusian National Technical University. 353 (in Russian).

Received: 04.04.2024

Accepted: 28.06.2024

Published online: 31.01.2025