

УДК 691.328

*Дорофеев В. С., д. т. н., проф.,  
Выкиданец С. Н., асс.,  
ОГАСА, г. Одесса*

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
ПОВРЕЖДЕННОСТИ НА ХАРАКТЕР  
ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ  
ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ  
ДЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

*В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния конструктивных факторов на формирование технологической поврежденности бетона. Проведенные исследования позволили подтвердить участие наполнителей в организации структуры бетона, образовании и развитии трещин. Также уточнено влияние количества минерального наполнителя на величину относительной поперечной силы трещинообразования. Установлены зависимости технологической поврежденности ( $K_{пс}$ ,  $K_{пл}$ ), призмной прочности и относительной критической наклонной трещины на относительную поперечную силу трещинообразования.*

*Ключевые слова: технологическая поврежденность, трещинообразование, дисперсность, коэффициент технологической поврежденности, трещины, деформативность*

**Последние исследования.** Проведенный авторами анализ показывает, что трещины присутствуют практически на всех структурных уровнях КСМ. Предложены классификации этих трещин в зависимости от размерных факторов и их «опасности» в материале. При этом отмечается, что зафиксированные трещины существуют в структуре материала еще до приложения к ним эксплуатационных нагрузок [7].

Выполненные ранее исследования свидетельствуют о необходимости рассмотреть характер образования нормальных и наклонных трещин, и преобразование одной из них в критическую (магистральную)

трещину в железобетонных балках под действием длительной нагрузки. В основе методики определения поперечной силы трещинообразования для данного исследования лежит принцип оценивания появления и развития трещин в железобетонных элементах с помощью коэффициентов технологической поврежденности.

**Актуальность.** Поскольку влияние технологических трещин на прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов нуждается в изучении и исследованиях, изыскания в этом направлении представляют научный интерес.

По мнению авторов [1], микроструктура композиционных строительных материалов представляет собой материал типа "блок в блоке" между отдельными блоками, на различных масштабных уровнях сосуществуют поверхности раздела или наследственные трещины.

Объемные эксплуатационные деформации разных знаков развиваются как в каждом блоке, так и в структуре в целом. На этапе увеличения объема происходит частичное смыкание масштабных трещин (особенно их параллельных участков) и увеличение ширины раскрытия на участках разнонаправленных деформаций. Этап уменьшения объема характеризуется увеличением ширины раскрытия трещин.

Как при увеличении объема материала, так и при его уменьшении происходит концентрация напряжений растяжения в вершине наследственной трещины, что вызывает ее подрастание. Таким образом, в структуре материала появляется новая структурная неоднородность – эксплуатационные трещины.

Проведенный авторами [1] анализ показал, что технологическая поврежденность определяется в значительной степени дисперсностью наполнителя. При этом изменяется протяженность поверхностных трещин при сохранении их "рисунка". Рисунок трещин представляет собой завершенные или незавершенные четырех-, пяти- или шестиугольники. Таким образом, верно предположение, что бетон разделен на своеобразные структурные блоки,

внешними границами которых являются технологические трещины.

Оценка прочности и трещиностойкости бетонных и железобетонных конструкций невозможна без учета механизмов зарождения и развития трещин, а также разработанных методик надежного определения критериев трещиностойкости. Бетон и железобетон, являясь неоднородными материалами, имеют свои особенности поведения трещин. Даже при отсутствии трещин распределение напряжений в них существенно отличается от распределения в однородном теле. В зависимости от соотношения свойств компонентов и характеристик контакта этих компонентов трещины могут развиваться в различных зонах материала [2, 3].

Технологические трещины предопределяют возникновение градиентов деформаций по величине и направлению, изменяющих начальное деформативное состояние бетонных и железобетонных конструкций. Деформации и напряжение за счет подрастания и образования новых технологических трещин способствуют увеличению поврежденности материала [4, 5, 6].

**Цели и задачи.** Известно, что трещины, являясь одним из важных структурных параметров, определяющих комплекс физико-технических свойств, как материала, так и конструкции из него, влияют на прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов. Поэтому на основании ранее проведенных исследований важно рассмотреть характер образования нормальных и наклонных трещин, развитие наклонных и преобразование одной из них в критическую (магистральную) трещину в железобетонных балках под действием длительной нагрузки.

Картина трещин при обследовании железобетонной конструкции или элемента с их габаритами и ориентацией, дает возможность подготовить исходные данные для применения информации в математических моделях по определению концентрации напряжений у вершины трещин [13, 14, 15].

## Результаты исследований.

Рассмотрим влияние технологической поврежденности на трещинообразование железобетонных балок, нагруженных длительной нагрузкой.

Величина относительной поперечной силы трещинообразования ( $Q'_{\text{срс}}$ ) в зависимости от количества и качества наполнителя изменяется в пределах от 0,650 до 0,954 (на 46,8 %).

Влияние количества наполнителя на относительную поперечную силу трещинообразования отражено на рис. 1,а. Изменение  $H$  от 8 до 12 % от массы вяжущего при постоянной дисперсности  $S_y=100 \text{ м}^2/\text{кг}$  приводит к повышению  $Q'_{\text{срс}}$  от 0,650 до 0,769 (на 18,3 %).

При дисперсности  $S_y=200 \text{ м}^2/\text{кг}$  и изменении количества наполнителя от 8 до 12 %  $Q'_{\text{срс}}$  уменьшается от 0,753 до 0,718 на (4,9 %).

При фиксированной дисперсности  $S_y=300 \text{ м}^2/\text{кг}$  изменение количества наполнителя от 8 до 12 % от массы вяжущего приводит к уменьшению  $Q'_{\text{срс}}$  от 0,954 до 0,836 (на 14,1 %).

Следует отметить, что максимальное изменение  $Q'_{\text{срс}}$  (18,3 %) достигается при изменении  $H$  от 8 до 12 % и  $S_y=100 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Минимальное изменение относительной поперечной силы трещинообразования достигается при изменении количества наполнителя от 8 до 12 % и дисперсности  $S_y=200 \text{ м}^2/\text{кг}$  (4,9 %).

Влияние качества (дисперсности) наполнителя на относительную поперечную силу трещинообразования отражено на рис. 1,б. Изменение дисперсности наполнителя от 100 до 200  $\text{м}^2/\text{кг}$  при его расходе 8 % ведет к повышению  $Q'_{\text{срс}}$  от 0,650 до 0,753 (на 15,8 %), а увеличение  $S_y$  до 300  $\text{м}^2/\text{кг}$  приводит к дальнейшему более интенсивному увеличению относительной поперечной силы трещинообразования до 0,954 (27 %).

При постоянном количестве наполнителя 12 % и при изменении дисперсности от 100 до 200  $\text{м}^2/\text{кг}$  происходит уменьшение  $Q'_{\text{срс}}$  от 0,769 до 0,718 (на 7,1 %), а при увеличении дисперсности до 300  $\text{м}^2/\text{кг}$   $Q'_{\text{срс}}$  возрастает до 0,836 (на 16,4 %).

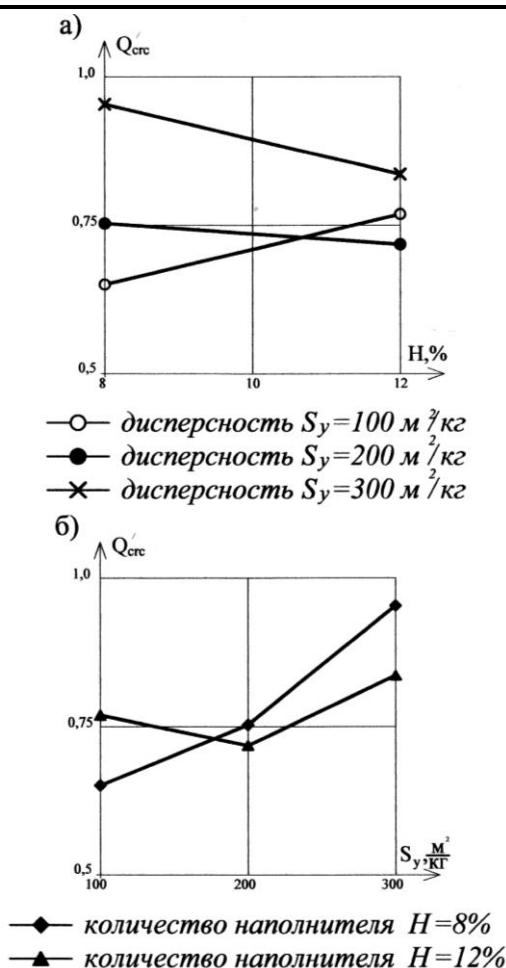


Рис. 1. Влияние количества (а) и дисперсности (б) наполнителя на относительную поперечную силу трещинообразования

Следует отметить, что максимальное изменение  $Q'_{crs}$  (27 %) достигается при изменении  $S_y$  от 200 до 300 м<sup>2</sup>/кг при постоянном  $H=8$  %. Минимальное изменение  $Q'_{crs}$  достигается при постоянном  $H=12$  % и изменении  $S_y$  от 100 до 200 м<sup>2</sup>/кг (7,1 %).

Делая предварительный вывод по анализу влияния количества и качества наполнителя на относительную несущую способность бетона, хочется отметить, что подтверждается участие наполнителей в организации структуры, образовании и развитии трещин, а также прочности и деформативности бетонных и железобетонных элементов.

В частности, при изменении количества наполнителя от 8 до 12 % от массы вяжущего при постоянных дисперсностях  $S_y=100$  м<sup>2</sup>/кг а при изменении количества наполнителя от 8 до 12 % от массы вяжущего при постоянных дисперсностях

$S_y=200$  и 300 м<sup>2</sup>/кг наблюдается уменьшение поперечной силы трещинообразования бетона.

При изменении же дисперсности от 100 до 300 м<sup>2</sup>/кг наблюдается следующее: при фиксированном  $H=8$  % поперечная сила трещинообразования увеличивается с максимальным значением изменения и максимальным значением поперечной силы трещинообразования; при фиксированном  $H=12$  % происходит увеличение, а затем уменьшение поперечной силы трещинообразования.

Величина относительной поперечной силы трещинообразования в зависимости от технологической поврежденности, призмной прочности и относительной критической наклонной трещины изменяется в пределах от 0,650 до 0,954 (на 46,8 %).

На рис. 2,а показана нелинейная квадратичная зависимость вида

$$Q'_{crs} = 1,35 - 1,67K_{пЛ} - 0,322K_{пЛ}^2.$$

Коэффициенты квадратичного уравнения найдены, решив систему трех уравнений с тремя неизвестными в табличной форме по формуле (1) между относительной поперечной силой трещинообразования и технологической поврежденностью, выраженной при помощи коэффициента технологической поврежденности, измеренного по характерной наклонной линии (36,5 см) для образцов балок.

$$\Sigma y = an + b\Sigma x + c\Sigma x^2$$

$$\Sigma xy = a\Sigma x + b\Sigma x^2 + c\Sigma x^3 \quad (1)$$

$$\Sigma x^2 y = a\Sigma x^2 + b\Sigma x^3 + c\Sigma x^4$$

Как видно из графика (рис. 2,а), с увеличением технологической поврежденности от  $K_{пЛ} = 0,266$  до  $K_{пЛ} = 0,367$  (на 38 %) величина относительной поперечной силы трещинообразования уменьшается от 0,883 до 0,694 (на 27,2 %).

На рис. 2,б показана нелинейная квадратичная зависимость вида:

$$Q'_{crs} = 1,418 - 2,04K_{пЛ} + 0,107K_{пЛ}^2.$$

Коэффициенты квадратичного уравнения найдены, решив систему трех уравнений с тремя неизвестными в табличной форме по формуле (1) между относительной поперечной силой трещинообразования и технологической

поврежденностью, выраженной при помощи коэффициента технологической поврежденности, измеренного по характерной наклонной линии (31,1 см) для образцов балок. Как видно из графика (рис. 2,б), с увеличением технологической поврежденности от  $K_{ПЛ} = 0,243$  до  $K_{ПЛ} = 0,372$  (на 53 %) величина относительной поперечной силы трещинообразования уменьшается от 0,929 до 0,674 (на 37,8 %).

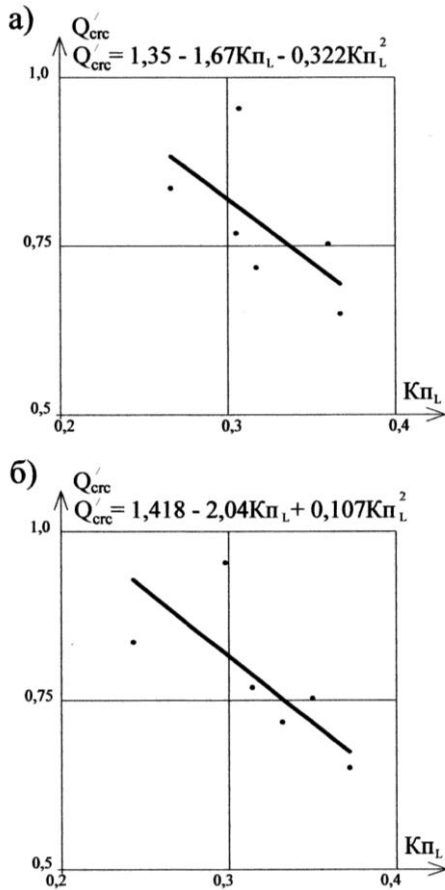


Рис. 2. Зависимость относительной поперечной силы трещинообразования от технологической поврежденности, измеренной на поверхности образцов балок по наклонным линиям длиной 36,5 см (а) и 31,1 см (б)

На рис. 2,б показана нелинейная квадратичная зависимость вида:

$$Q'_{cr} = 1,418 - 2,04K_{ПЛ} + 0,107K_{ПЛ}^2.$$

Коэффициенты квадратичного уравнения найдены, решив систему трех уравнений с тремя неизвестными в табличной форме по формуле (1) между относительной поперечной силой трещинообразования и технологической поврежденностью, выраженной при помощи коэффициента

технологической поврежденности, измеренного по характерной наклонной линии (31,1 см) для образцов балок. Как видно из графика (рис. 2,б), с увеличением технологической поврежденности от  $K_{ПЛ} = 0,243$  до  $K_{ПЛ} = 0,372$  (на 53 %) величина относительной поперечной силы трещинообразования уменьшается от 0,929 до 0,674 (на 37,8 %).

На рис. 3,а показана нелинейная квадратичная зависимость вида

$$Q'_{cr} = 1,07 - 0,0343K_{ПЛ} - 3,19K_{ПЛ}^2.$$

Коэффициенты квадратичного уравнения найдены, решив систему трех уравнений с тремя неизвестными в табличной форме по формуле (1) между относительной поперечной силой трещинообразования и технологической поврежденностью, выраженной при помощи коэффициента технологической поврежденности, измеренного по характерной поперечной линии (15 см) для образцов балок. Как видно из графика (рис. 3,а), с увеличением технологической поврежденности от  $K_{ПЛ} = 0,226$  до  $K_{ПЛ} = 0,370$  (на 63,7 %) величина относительной поперечной силы трещинообразования уменьшается от 0,899 до 0,621 (на 44,8 %).

На рис. 3,б показана нелинейная квадратичная зависимость вида:

$$Q'_{cr} = 2,51 - 3,49K_{Пс} + 1,67K_{Пс}^2.$$

Коэффициенты квадратичного уравнения найдены, решив систему трех уравнений с тремя неизвестными в табличной форме по формуле (1) между относительной поперечной силой трещинообразования и технологической поврежденностью, определенного по площади (225 см<sup>2</sup>) для образцов балок. Как видно из графика (рис. 3,б), с увеличением технологической поврежденности от  $K_{Пс} = 0,67$  см/см<sup>2</sup> до  $K_{Пс} = 1,22$  см/см<sup>2</sup> (на 82 %) величина относительной поперечной силы трещинообразования уменьшается от 0,921 до 0,687 (на 34,1 %), а потом увеличивается от 0,687 до 0,738 (на 7,4 %).

**Выводы.** 1. Анализ механизмов зарождения и развития трещин позволяет заключить, что технологические трещины определяют возникновение градиентов деформаций по величине и

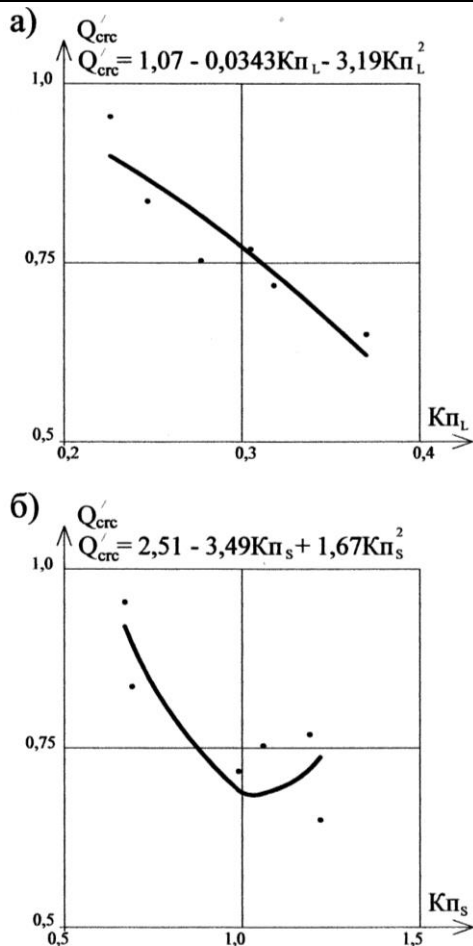


Рис. 3. Зависимость относительной поперечной силы трещинообразования от технологической поврежденности, измеренной на поверхности образцов-балок по поперечной линии (а) и площади (б).

направлению, изменяющих начальное деформативное состояние бетонных и железобетонных конструкций. Деформации и напряжения за счет подрастания и образования новых технологических трещин способствуют увеличению поврежденности материала.

2. Изучено влияние количества минерального наполнителя ( $H=8$  и  $12\%$  от массы вяжущего), а также дисперсности ( $S_y=100, 200$  и  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  по каждому количеству) на величину относительной поперечной силы трещинообразования. Подтверждается участие наполнителей в организации структуры бетона, образовании и развитии трещин, а также прочности и деформативности бетонных и железобетонных элементов. Минимальное значение относительной поперечной силы трещинообразования получено при  $H=8\%$  и  $S_y=100 \text{ м}^2/\text{кг}$  ( $Q'_{crс}=0,650$ ), а максимальные значения

получены при  $H=8\%$  и изменении  $S_y$  от  $200$  до  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  (наибольшее  $Q'_{crс}=0,954$  при  $S_y=300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), при этом, максимальные изменения достигали  $31,3\%$ .

3. Установлены зависимости технологической поврежденности ( $K_{п_S}, K_{п_L}$ ), призмочной прочности и относительной критической наклонной трещины на относительную поперечную силу трещинообразования. Данные зависимости являются нелинейными квадратичными уравнениями. При влиянии технологической поврежденности получено уравнение вида:

$$Q'_{crс} = 1,35 - 1,67K_{п_L} - 0,322K_{п_L}^2,$$

показывающее, что с увеличением технологической поврежденности величина  $Q'_{crс}$  уменьшается.

4. Анализ напряженно – деформированного состояния железобетонных элементов без поперечной арматуры показал, что на начальном этапе развития наклонные трещины, как и нормальные, развиваются по энергетически выгодному пути – траекториям технологических трещин. Поэтому, управляя технологической поврежденностью, можно изменять условия работы, кинетику роста и траекторию магистральных трещин.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций: Монография. – О.: Город мастеров, 1998. – 168 с.
2. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учебное пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 288с.
3. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. – М.: Стройиздат., 1982. – 196с.
4. Лучко Й.Й., Чубріков В.М., Лазар В.Ф. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування /НАН України; Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Капенка. – Львів: Каменяр, 1999. – 348с.
5. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707с.
6. Черепанов Г.Л. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1983. – 294с.

7. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции: Структура, самоорганизация, свойства. - Одесса – 2010 – 56 с.

8. Hutchinson J. W. Singular behavior at the end of tensile crack in a hardening material // J. Mech. Phys. Solids. 1968. V. 16. P. 13-31.

9. Rice J. R., Rosengren G. F. Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material// J. Mech. Phys. Solids. 1968. V. 16. P. 1-12.

10. Riedel H., Rice J. R. Tensile crack in creeping solids/ In: Fracture Mechanics. Twelfth Conference ASTM STP 700. 1980. P. 112-130.

#### REFERENCES:

1. Dorofeyev V.S., Vyrovoy V.N., (1998). Tehnologicheskaja povrezhdennost' stroitel'nyh materialov i konstrukcij: Monografija. [Technological damage of building materials and structures: monograph] - Gorod masterov, 168.

2. Zaitsev Yu.V., (1991), Mehanika razrushenija dlja stroitelej: Uchebnoe posobie dlja stroitel'nyh vuzov, [Mechanics of Destruction for Builders: A Textbook for Building Universities.], Vysshaja shkola, 288.

3. Zaitsev Yu.V. (1982), Modelirovanie deformacij i prochnosti betona metodami mehaniki razrushenij. [Modeling of deformations and strength of concrete by the methods of fracture mechanics], Storojizdat, 196.

4. Luchko YY, Chubrikov V. Lazar V., (1999), Micnist', trishhinostijkist' i dovgovichnist' betonih ta zalizobetonih konstrukcij na zasadah mehaniki rujnuvannja [Strength, crack resistance and durability of concrete and reinforced concrete structures on the basis of fracture mechanics] NAN Ukraïni; Fiz.-meh. in-t im. G.V. Kapenka. – L'viv: Kamenjar, 348.

5. Muskhelishvili N.I. (1966), Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoj teorii uprugosti. [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. - M: Nauka, 707.

6. Cherepanov G.L. (1983), Mehanika razrushenija kompozicionnyh materialov, [Mechanics of destruction of composite materials]. Nauka, 294.

7. Vyrovoy V.N., Dorofeyev V.S., Sukhanov V.G., (2010), Kompozicionnye stroitel'nye materialy i konstrukcii: Struktura, samoorganizacija, svojstva. [Composite

building materials and structures: Structure, self-organization, properties], Odessa, 56.

8. Hutchinson J. W. (1968), Singular behavior at the end of tensile crack in a hardening material// J. Mech. Phys. Solids. (1968). V. 16., 13-31.

9. Rice J. R., Rosengren G. F., (1968), Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material// J. Mech. Phys. Solids. V. 16., 1-12.

10. Riedel H., Rice J. R., (1980), Tensile crack in creeping solids/ In: Fracture Mechanics. Twelfth Conference ASTM, 700., 112-130.

#### АНОТАЦІЯ

У статті наведені результати експериментально-теоретичних досліджень впливу конструктивних чинників на формування технологічної пошкодженості бетону. Проведені дослідження дозволили підтвердити участь наповнювачів в організації структури бетону, утворенні та розвитку тріщин. Також уточнено вплив кількості мінерального наповнювача на величину відносної поперечної сили тріщиноутворення. Встановлені залежності технологічної пошкодженості ( $K_{pS}$ ,  $K_{pL}$ ), призмової міцності і відносної критичної похилої тріщини на відносну поперечну силу тріщиноутворення.

Ключові слова: технологічна пошкодженість, тріщиноутворення, дисперсність, коефіцієнт технологічної пошкодженості, тріщини, деформативність

#### ANNOTATION

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the influence of constructive factors on the formation of technological damage to concrete. The research allowed to confirm the filling part in the organization structure of the concrete, the formation and development of cracks. Also, the effect of the amount of mineral filler on the value of the relative transverse cracking force is specified. The dependencies of process damage ( $K_{pS}$ ,  $K_{pL}$ ) prism strength and relative critical crack inclined relative to a transverse force cracking.

Keywords: technological damages, cracking, dispersibility, rate of technological damage, cracks, deformability