

УДК 624.012.35:620.173/174

ОСНОВНІ ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ ЗА ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Канд. техн. наук О. В. Ромашко-Майструк, д-р техн. наук В. М. Ромашко

MAIN FEATURES OF CONCRETE DEFORMATION UNDER THE ACTION OF DYNAMIC LOADS

PhD(Tech.) O. V. Romashko-Maistruk, Dr. Sc.(Tech.) V. M. Romashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288924>



Анотація. Стаття присвячена особливостям загальної моделі деформування стиснутого бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень. Основна увага приділена загальновідомому коефіцієнту динамічного зміцнення бетону (DIF). Класифіковано та проаналізовано основні переваги і недоліки існуючих на сьогодні методів і способів його визначення. Аналітично отримано обґрунтовану залежність коефіцієнта DIF від швидкості деформування стиснутого бетону. Ефективність запропонованої методики визначення коефіцієнта DIF оцінено

порівнянням результатів відповідних теоретичних розрахунків з оприлюдненими експериментальними даними окремих дослідників.

Ключові слова: модель деформування, бетон, швидкість деформування, питома потенціальна енергія, коефіцієнт динамічного зміцнення.

Abstract. This article is devoted to the features of the general model of compressed concrete deformation in concrete and reinforced concrete elements and structures under the dynamic loads action. The proposed model is a further in-depth development of the previously developed generalized deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance to force effects. It is based on the hypothesis of invariability and independence from the loading mode of the specific potential energy of concrete ultimate deformation (destruction) in a standard sample. A critical analysis of the research results by other authors published today on the above-mentioned subject has been performed.

The main attention is paid to the well-known dynamic increase factor (DIF). The main advantages and disadvantages of the currently existing methods and ways of its determination have been classified and analyzed. An analytically justified function of its maximum possible values under the dynamic loads action was obtained. The various factors influence on the DIF_u limit values for compressed concrete is taken into account using an integrated parameter – the well-known coefficient of elastic-plastic concrete properties k . The dependence of intermediate DIF values on the compressed concrete deformation rate under the different intensity dynamic loads action is proposed.

The effectiveness of the developed method of determining the DIF coefficient for compressed concrete according to the proposed dependence was evaluated by comparing the theoretical calculations results with individual researchers experimental data. Similar comparisons were also made with the calculations results performed according to well-known European methods of the CEB FIB.

Keywords: deformation model, concrete, deformation rate, specific potential energy, dynamic increase factor.

Вступ. Давно відомо, що навіть ті бетонні та залізобетонні конструкції, що запроєктовані на дію лише статичних або квазістатичних навантажень, у дійсності сприймають динамічні навантаження різної інтенсивності. Ідеться про окремі навантаження, пов'язані не тільки з певними технологічними процесами, але й так званими «позаштатними» або аварійними ситуаціями. Швидкість їх прикладання та швидкість деформування матеріалів і конструкцій при цьому можуть коливатися в доволі широких межах. Тому, зважаючи на думку переважної більшості дослідників [1-7], згідно з європейськими рекомендаціями [8, 9] зв'язок між типом навантаження та швидкістю деформування бетону $\dot{\epsilon}$ можна подати як табл. 1.

Загалом бетон належить до групи пружно-пластичних матеріалів. Тому

цілком очевидно, що його основні фізико-механічні характеристики (міцність на стиск f_c і розтяг f_{ct} , модуль пружності E_c , відповідні критичні деформації ϵ_{c1} та ϵ_{ct1} тощо) будуть безпосередньо залежати від швидкості завантаження або швидкості деформування $\dot{\epsilon}$ (рис. 1). Над встановленням таких залежностей і досі продовжують працювати багато дослідників. Однак виявленню основних закономірностей зазначених зв'язків перешкоджають доволі суттєві розбіжності в результатах експериментальних досліджень. Зазвичай їхня кількість зростає зі збільшенням швидкості деформування бетону та зумовлюється такими факторами:

- відсутністю єдиних стандартизованих методів випробувань динамічним навантаженням;

- використанням зразків різних за формою та геометричними розмірами;
- застосуванням дослідних зразків із відмінними видами та пропорціями компонентів (заповнювачів), а отже, різними статичними міцностями;
- випробуванням зразків різного

віку, витриманих у різних температурно-вологісних умовах;

- визначенням статичної міцності бетону за різних статичних швидкостей його деформування;
- впливом різних інерційних ефектів та ефектів тертя.

Таблиця 1

Швидкість деформування бетону залежно від типу навантаження

Тип навантаження		Швидкість деформування $\dot{\epsilon}$, с^{-1}
Тривалої дії (повзучість)		$10^{-10} \dots 10^{-6}$
Статичні, квазістатичні		$10^{-6} \dots 10^{-5}$
Динамічні	Зіткнення з кораблями, транспортними засобами, вибух газу	$10^{-5} \dots 10^{-2}$
	Авіакатастрофи, ударні хвилі	$10^{-3} \dots 10^0$
	Землетруси	$10^{-2} \dots 10^1$
	Ракетні удари, падіння каменів, забивання паль	$10^{-1} \dots 10^2$
	Сильні вибухи	$10^{-1} \dots 10^4$
	Ядерні, термоядерні та астрофізичні вибухи	$10^2 \dots 10^8$

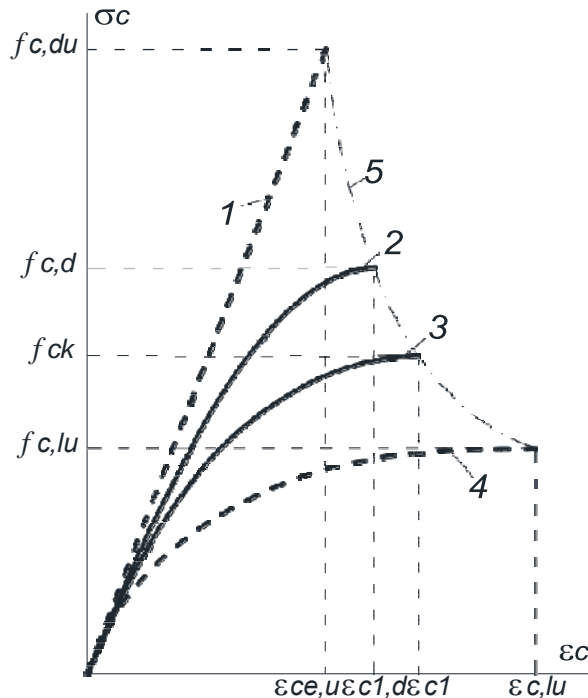


Рис. 1. Діаграми деформування стиснутого бетону $\sigma_c - \epsilon_c$ залежно від швидкості зростання деформацій: 1 – $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$; 2 – $\dot{\epsilon} = 10^2 \dots 10^{-2} \text{с}^{-1}$; 3 – $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \dots 10^{-6} \text{с}^{-1}$; 4 – $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$; 5 – крива граничних деформацій

Переважає більшість досліджень бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій за динамічних навантажень завжди пов'язувалася безпосередньо чи опосередковано з коефіцієнтом динамічного зміцнення бетону (*DIF*). Тому всі пропонувані на сьогодні залежності з його визначення можна умовно поділити на три групи.

У дослідженнях першої групи коефіцієнт *DIF* пропонується визначати за тривалістю дії динамічного навантаження τ [10, 11]. За таких обставин урахувати вплив будь-яких факторів чи ефектів на величину коефіцієнта динамічного зміцнення бетону, як і його інші характеристики, практично неможливо.

До другої групи слід віднести функції, у яких коефіцієнт *DIF* розраховується за швидкістю зростання напружень $\sigma = d\sigma / dt$ [8, 9, 12]. Контролювати цей параметр в експериментальних дослідженнях вкрай складно, а про врахування впливу якихось факторів чи ефектів на величину коефіцієнта динамічного зміцнення бетону в цьому випадку взагалі не йдеться.

Найбільш поширеними можна вважати залежності третьої групи, що подані переважно як степеневі або логарифмічні функції [13-17]. У них коефіцієнт динамічного зміцнення бетону пов'язується зі швидкістю деформування бетону $\epsilon = d\epsilon / dt$, а вплив інерційних ефектів на коефіцієнт динамічного зміцнення бетону – з прискоренням деформування бетону $\epsilon = d\epsilon / dt$ [18, 19]. Однак усі залежності цієї групи, як і функції двох попередніх груп, є чисто емпіричними. А тому їх використання в узагальнених моделях деформування бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях залишається доволі проблематичним.

Зважаючи на вищезгадане, можна стверджувати, що пошук аналітично обґрунтованих залежностей коефіцієнта динамічного зміцнення бетону й надалі

залишатиметься одним з найважливіших завдань у теорії залізобетону.

Постановка мети і задач досліджень. Такі дослідження спрямовані на розроблення основ загальної моделі деформування бетону в залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень. При цьому одним із ключових завдань слід вважати отримання аналітичної залежності коефіцієнта динамічного зміцнення бетону. Саме теоретично обґрунтована функція

$DIF = f(\epsilon)$ дасть змогу моделювати діаграму деформування бетону за дії динамічних навантажень будь-якої інтенсивності.

Основний матеріал досліджень

Методика досліджень. В основу таких досліджень покладено фізико-математичне моделювання процесів деформування бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій загалом [20] і закон збереження потенціальної енергії деформування матеріалів за різних режимів їхнього навантаження зокрема.

Результати досліджень. Зазвичай за потенціальну енергію деформування матеріалу приймають енергію, що накопичується в еталонному зразку за його пружного деформування. Саме ця енергія дорівнює роботі, що виконується зовнішніми силами на переміщеннях, обумовлених згаданим деформуванням матеріалу. Інакше кажучи, робота, виконана зовнішнім навантаженням, перетворюється в потенціальну енергію деформування еталонного бетонного зразка. Відомо, що частина потенціальної енергії все ж таки втрачається або «розсіюється» у вигляді тепла при протіканні різних процесів, пов'язаних з деформуванням матеріалу самого зразка. Зазвичай ці втрати є незначними, тому ними повністю нехтують.

Розглянемо загальний випадок деформування еталонного зразка у вигляді елементарного паралелепіпеда розмірами $dx \times dy \times dz$ (рис. 2) з абсолютно

пружного матеріалу. Повну потенціальну енергію його деформування, що

накопичується при цьому, можна обчислити за відомим виразом

$$dU = \frac{1}{2} \sigma_x dz dy \cdot \varepsilon_x dx + \frac{1}{2} \sigma_y dz dx \cdot \varepsilon_y dy + \frac{1}{2} \sigma_z dx dy \cdot \varepsilon_z dz, \quad (1)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – поздовжні напруження та викликані ними поздовжні деформації матеріалу у напрямку осей x, y, z відповідно.

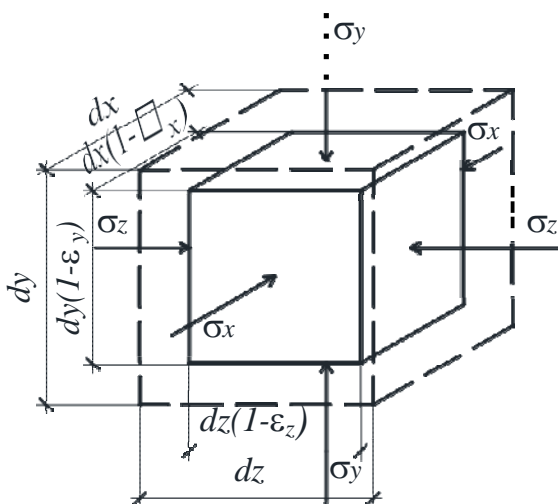


Рис. 2. Загальний випадок пружного деформування еталонного зразка

Важливо пам'ятати, що потенціальна енергія пружного деформування завжди накопичується у зворотній формі: при розвантаженні зразка вона знову переходить в енергію зовнішніх сил або ж перетворюється в кінетичну енергію.

Водночас величина питомої потенціальної енергії деформування u , що накопичується в одиниці об'єму матеріалу зразка dV , може бути розрахована за формулою

$$u = \frac{dU}{dV} = \frac{1}{2} (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z), \quad (2)$$

а в разі одновісного напружено-деформованого стану – за виразом

$$u_2 = \frac{dU}{dV} = \frac{1}{2} \sigma_z \cdot \varepsilon_z = \frac{1}{2} E_{co} \cdot \varepsilon_{c,du}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{f_{c,du}^2}{E_{co}}, \quad (3)$$

де E_{co} – початковий модуль пружності бетону;

$f_{c,du}$ та $\varepsilon_{c,du}$ – міцність стиснутого бетону та відповідні їй критичні деформації бетону за дії динамічних навантажень.

Загалом подібне деформування бетону можливе лише за його миттєвого завантаження $\varepsilon \rightarrow \infty$, тобто коли пластичні деформації взагалі не встигають проявитися. У всіх інших випадках потенціальну енергію деформування стиснутого бетону необхідно розраховувати за діаграмою його деформування.

Так, за стандартизованого (квазістатичного) режиму завантаження (рис. 3) цю енергію пропонується обчислювати на основі неправильної дробово-раціональної функції $\sigma_c - \varepsilon_c$ [21-23] за виразом

$$u_1 = \frac{dU}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{c1}} \sigma_c d\varepsilon_c = \int_0^{\varepsilon_{c1}} \left[E_{co} \cdot \varepsilon_c - \frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c1}^2} \cdot \varepsilon_c^2 \right] \cdot \left[1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right] d\varepsilon_c = \frac{f_{ck} \cdot \varepsilon_{c1}}{(k-2)} \left[\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \frac{(k-1)^2}{(k-2)} \cdot \ln(k-1) \right], \quad (4)$$

де ε_c – поточні деформації стиснутого бетону;

f_{ck} та ε_{c1} – міцність стиснутого бетону та відповідні їй критичні деформації бетону за дії стандартизованих статичних навантажень;

$k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$ – характеристика деформативності стиснутого бетону.

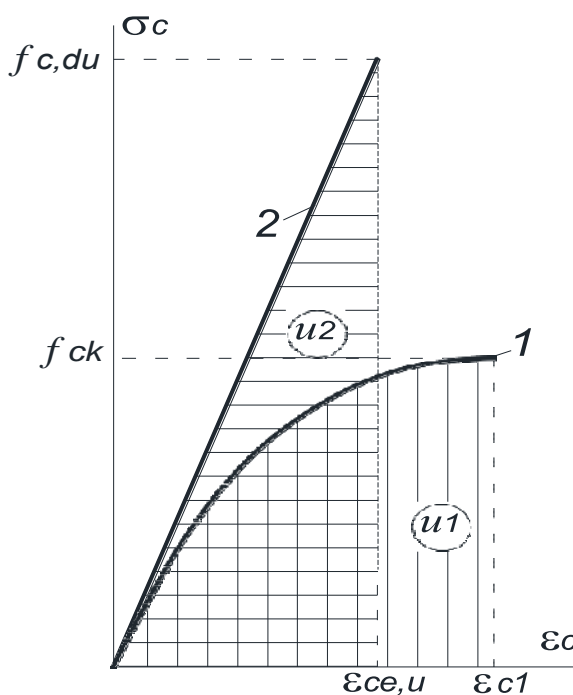


Рис. 3. Епюри потенціальної енергії граничного деформування бетону при завантаженні:

1 – стандартизованому короткочасному; 2 – миттєвому динамічному

Виходячи з гіпотези незмінності питомої потенціальної енергії граничного деформування (руйнування) бетону та при незалежності її від режиму завантаження самого бетону [24, 25] вирази (3) та (4) можна прирівняти, а граничні значення міцності стиснутого бетону за миттєвого прикладання динамічних навантажень, за

формулою (3), можна розрахувати за доволі простим виразом

$$f_{c,du} = \sqrt{2 \cdot E_{co} \cdot u} \quad (5)$$

У такому випадку функція граничних значень коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону з урахуванням залежності (4) і після певних перетворень набуде такого вигляду:

$$DIF_u = \frac{f_{c,du}}{f_{ck}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{(k-2)} \left[\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left(\frac{k-1}{k-2} \right) \ln(k-1) \right]} \quad (6)$$

Формула (6) показує, що граничні значення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону при його миттєвому завантаженні залежать лише від одного параметра – загально визнаного коефіцієнта пружно-пластичних

властивостей бетону $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} \cdot f_{ck}$. Гранично можливі значення коефіцієнта DIF для різних класів бетону за формулою (6) наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Граничні значення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону

Клас бетону	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45
DIF_u	2,829	2,603	2,398	2,254	2,134	2,031	1,943	1,876
Клас бетону	C40/50	C45/55	C50/60	C53/65	C56/70	C60/75	C65/80	C70/85
DIF_u	1,799	1,739	1,686	1,638	1,595	1,551	1,515	1,483
Клас бетону	C75/90	C80/95	C85/100	C90/105	C95/110	C100/115	C105/120	
DIF_u	1,45	1,426	1,398	1,374	1,353	1,33	1,313	

Зважаючи на граничні умови для коефіцієнта динамічного зміцнення бетону: $DIF = 1$ при $\varepsilon_{\square} = 10^{-6} c^{-1}$; $DIF = DIF_u$ при $\varepsilon_{\square} = 10^3 c^{-1}$, на підставі числового аналізу

результатів експериментальних досліджень [26, 27] було отримано універсальну залежність коефіцієнта DIF від швидкості деформування стиснутого бетону

$$DIF = DIF_u^{((1+\log(\varepsilon_{\square}/\varepsilon_{\square,s}))/9)^2} \quad \text{для} \quad \varepsilon_{\square} \geq 10^{-6} c^{-1}, \quad (7)$$

де ε_{\square} – швидкість деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень;

$\varepsilon_{\square,s}$ – максимальна швидкість деформування стиснутого бетону за дії квазістатичних навантажень, $\varepsilon_{\square,s} = 10^{-5} c^{-1}$.

Ефективність розробленої методики визначення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону була оцінена шляхом порівняння результатів теоретичних розрахунків за виразом (7) з експериментальними даними окремих дослідників [26, 27]. Вона відображена на графіках рис. 4-6. Водночас аналогічні порівняння були проведені з результатами

розрахунків, виконаних за загальновідомими європейськими методиками ЄКБ ФІБ [8, 9]. Отримані результати однозначно демонструють, що пріоритет щодо точності визначення коефіцієнта DIF належить пропонованій методиці, в основу якої покладено енергетичну модель деформування бетону та залізобетону [24, 25].

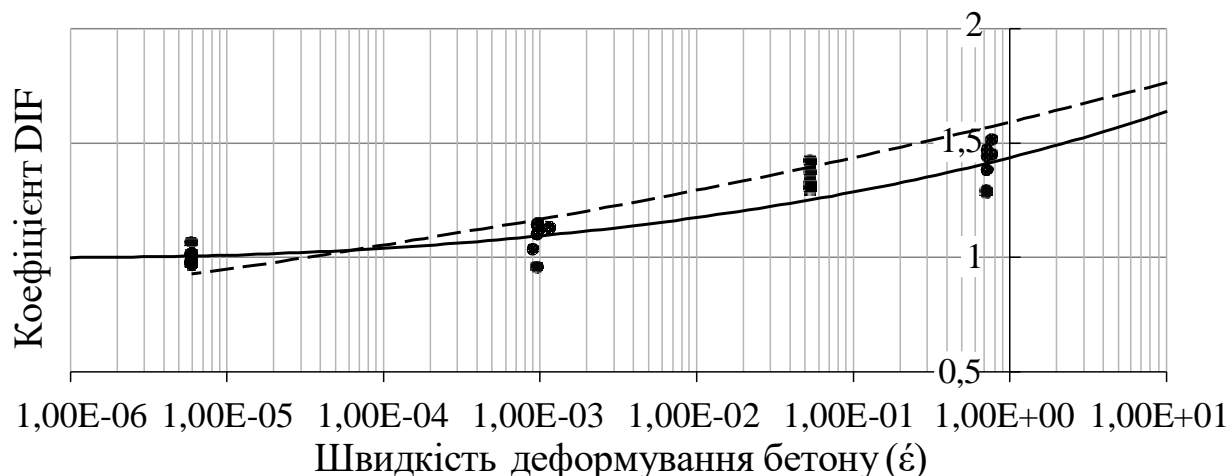


Рис. 4. Залежність DIF від швидкості деформування бетону міцністю $f_c = 26,89 MPa$:
 ● – за дослідями [26]; — — за формулою (7); - - - за СЕВ-FIP [8]

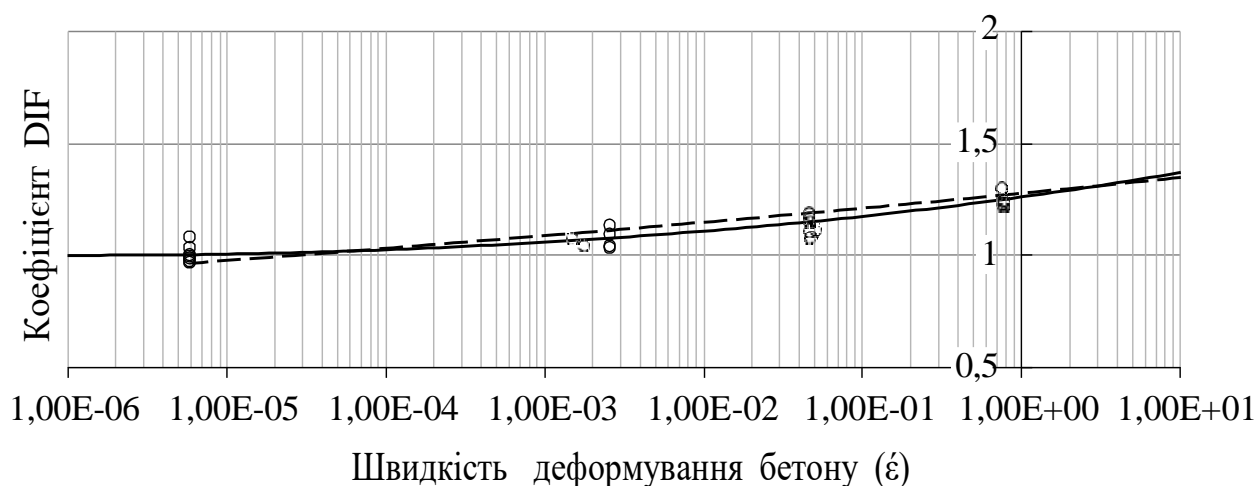


Рис. 5. Залежність DIF від швидкості деформування бетону міцністю $f_c = 60,32 MPa$:
 ○ – за дослідями [26]; — — за формулою (7); - - - за СЕВ-FIP [8]

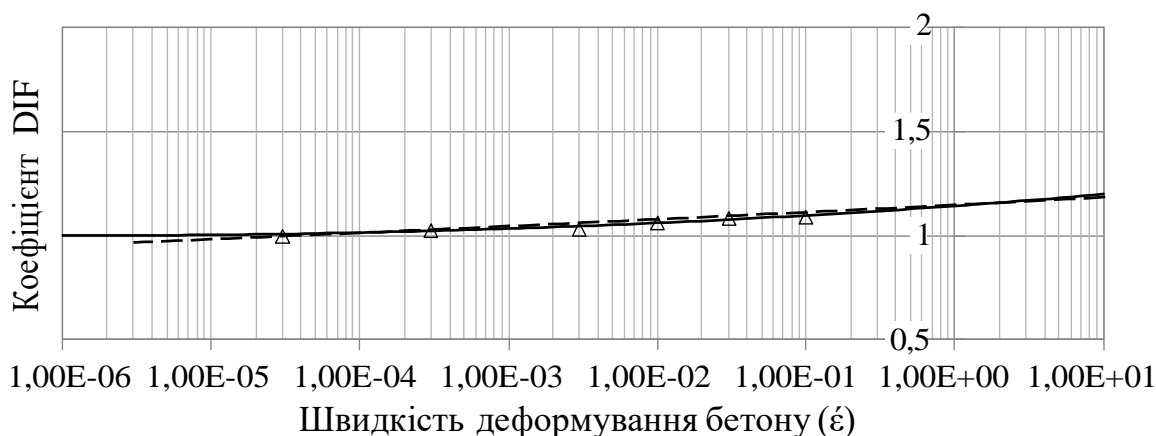


Рис. 6. Залежність DIF від швидкості деформування бетону міцністю $f_c = 110,8 \text{ MPa}$:
 Δ – за дослідом [27]; — — за формулою (7); - - - за СЕВ-FIP [8]

Висновки. Завдяки розробленій енергетичній моделі отримано аналітично обґрунтовану залежність граничних значень коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону DIF_u . Вкрай важливо, що ця залежність пов'язана лише з однією загальновідомою характеристикою деформативності стиснутого бетону за нормованих (стандартизованих) статичних випробувань – загально визнаним коефіцієнтом пружно-пластичних властивостей бетону $k = E_{co} \cdot \epsilon_{c1} / f_{ck}$. Більш того, отримана функція дає змогу прогнозувати не тільки проміжні значення

коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону DIF за будь-якої швидкості його деформування, але й весь процес деформування бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень різної інтенсивності.

Загалом можна стверджувати, що результати вищенаведених досліджень відкривають доволі широкі можливості в розробленні універсальної методики розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за дії навантажень будь-якої інтенсивності та тривалості.

Список використаних джерел

1. Rüsç H. Stahlbeton – Spannbeton, Band 1: Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1972. 358 p.
2. Bischoff P. and Perry S. Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates. *Materials and Structures*. 1991. Vol. 24, No. 6. P. 425-450. (SCOPUS).
3. Han N. Time Dependent Behaviour of High Strength Concrete: PhD Dissertation. Delft University of Technology, 1996. 317 p.
4. Ansell A. A Literature review on the shear capacity of dynamically loaded concrete structures. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, Concrete Structures. Report 89, 2005. 39 p.
5. Riisgaard B., Ngo T., Mendis P., Georgakis C. & Stang H. Dynamic Increase Factors for High Performance Concrete in Compression using Split Hopkinson Pressure Bar. In *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 2007. URL: <http://www.cprosam.dk/>.

6. Zhang X., Ruiz G., Yu R. C., Poveda E., Porras R. Rate effect on the mechanical properties of eight types of high-strength concrete and comparison with FIB MC 2010. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. P. 301-308. (SCOPUS). doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.037.
7. Zhang Q. B., Zhao J. A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behaviour of Rock Materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47. P. 1411-1478. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0463-y>.
8. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Lausanne: Comité Euro-International du Béton, 1991. 437 p.
9. Fib Model Code 2010. Final draft. Fib Bulletin 66. 2012. Vol. 2. 377 p.
10. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. Москва: Стройиздат, 1970. 271 с.
11. Grigoriev A. S., Shilko E. V., Skripnyak V. A., Chernyavsky A. G., Psakhie S. G. The numerical model of dynamic mechanical behavior of brittle materials based on the concept of the kinetic theory of strength. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. No. 3. P. 75-99. URL: <http://dx.doi.org/10.15593/perm.mech/2017.3.05>.
12. Fujikake K., Mizuno J., Suzuki A., Ohno T., Nonak T. Dynamic strain softening of concrete in compression under rapid loading. *WIT Transactions on the Built Environment: Structures under Shock & Impact*. 1998. Vol. 32. P. 481-491. URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-nvironment/35/6534>.
13. Dilger W. H., Koch R. and Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates. *ACI Journal*. 1984. Vol. 81, No. 1. P. 73-81. (SCOPUS).
14. Malvern L. E., Jenkins D. A., Tang T., Ross C. A. Dynamic compressive testing of concrete. *Proceedings of the Second Symposium on The Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*, 15-18 April 1985. Panama City Beach, Florida, 1985. P. 194-199.
15. Tedesco J. W., Ross C. A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete. *ASME J. Press. Vessel Technol.* 1998. Vol. 120. P. 398-405. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1115/1.2842350>.
16. Grote D. L., Park S. W., Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain-rates and pressures: I. Experimental characterization. *International Journal of Impact Engineering*. 2001. Vol. 25. P. 869-886. (SCOPUS). URL: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00020-3).
17. Long K. S., Kasmuri M., Hasan A. S. Z. and Hamid R. Dynamic Increase Factor of High Strength Concrete with Silica Fume at High Strain Rate Loading. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 857. P. 299-304. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.299>.
18. Lee S., Kim K.-M., Cho J.-Y. Investigation into Pure Rate Effect on Dynamic Increase Factor for Concrete Compressive Strength. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 210. P. 11-17. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.042>.
19. Sun B., Chen R., Ping Y., Zhu Z., Wu N., Shi Z. Research on Dynamic Strength and Inertia Effect of Concrete Materials Based on Large-Diameter Split Hopkinson Pressure Bar Test. *Materials*. 2022. Vol. 15. 2995. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.3390/ma15092995>.
20. Ромашко В.М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Львів, 2018. 533 с.
21. Ромашко В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций. *Міжнародний науковий журнал (International scientific journal)*. 2016. Вип. 3. С. 84-86. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2016_3_23.
22. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf.* 2017. Vol. 116. 02028. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602028>.
23. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 534-540. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.534>.

24. Romashko V. M. and Romashko O. V. Energy resource of reinforced concrete elements and structures for the deformation-force model of their deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. 012068. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012068>.

25. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Strength resource calculation of the reinforced concrete elements according to the energy criterion. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 269-276. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.034>.

26. Cowell W. L. Dynamic properties of plain Portland cement concrete. Technical Report No. R447, DASA 130181. US Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1966. P. 51.

27. Othman H., Marzouk H. Strain Rate Sensitivity of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 2016. Vol. 113, No. 2. P. 143-150. (SCOPUS). doi:10.14359/51688461.

Ромашко-Майструк Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василь Миколайович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylyivna, PhD(Tech.), associate professor at the Department of Industrial, Civil Construction and Engineering Structures, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasyl Mykolayovych, D. Sc.(Tech.), associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Статтю прийнято 27.09.2023 р.