

**МОДЕЛЮВАННЯ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ СТИСНУТОГО БЕТОНУ ЗА ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

**SIMULATION OF THE DEFORMATION DIAGRAM OF COMPRESSED CONCRETE UNDER THE ACTION OF DYNAMIC LOADS**

**Ромашко-Майструк О.В., к.т.н., ORCID: 0000-0003-3353-2268, Ромашко В.М., д.т.н., доц., ORCID: 0000-0003-3448-7489 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Romashko-Maistruk O.V., PhD (Tech.), Romashko V.M., D. Sc. (Tech.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)**

**Здійснено моделювання діаграми деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень. Основна увага приділена впливу швидкості прикладання навантаження на її визначальні параметри. Встановлено ступінь залежності коефіцієнта динамічного зміцнення та рівня критичної деформативності стиснутого бетону як від швидкості його деформування, так і від рівня пружно-пластичності (класу).**

**This article is aimed at modeling the deformation diagram of compressed concrete under the action of dynamic loads of various intensities. Modeling of the specified diagram is proposed to be carried out by transforming the standard (normalized) deformation diagram of compressed concrete obtained during static load tests. The main attention is paid to the influence of the load rate on its defining parameters: on the strength and "critical" deformations of compressed concrete. A critical analysis of the studies published today on the dynamic increase factor (DIF) of compressed concrete, the level of elasticity modulus growth and changes in its "limit" deformability under the dynamic loads action is given. The dependence degree of the DIF and the level of compressed concrete critical deformability was determined not only on the strain rate of its, but also on the level of elastic-plasticity (class).**

**The analytical relationship between the above-mentioned static and dynamic characteristics of compressed concrete is established using the hypothesis of invariance and independence from the loading mode of the specific potential energy of the material ultimate deformation (destruction). The relationship between the coefficients of compressed concrete elastic-plastic properties under the static and dynamic loads action, depending on the strain rate of its, was also established. The indicated coefficients of concrete elastic-plastic properties under the dynamic and static loads action are connected with each**

**other using the initial modulus of elasticity. The expediency of using concrete and reinforced concrete elements and structures in calculation methods is not standardized modulus, but the initial modulus of concrete elasticity, which coincides with the initial modulus of its deformations, is substantiated.**

**Ключові слова:**

бетон, діаграма, швидкість деформування, коефіцієнт динамічного зміцнення, рівень критичної деформативності  
concrete, diagram, strain rate, dynamic increase factor, level critical deformability

**Вступ.** Основною особливістю сучасних деформаційних моделей є те, що всі вони ґрунтуються на використанні повних діаграм деформування бетону. Отримують такі діаграми шляхом випробування стандартних зразків (призм або циліндрів) статичним навантаженням за сталої швидкості деформування бетону  $\dot{\varepsilon}$ . Функції, якими описують отримані діаграми деформування бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , проводять через характерні параметричні точки, визначені за певними граничними умовами. І тут вкрай важливо, щоб ці умови були універсальними, а зазначені точки мали фізичний зміст та описувалися лише фізичними величинами без використання жодних числових значень. Інакше кожен раз, за будь-якої зміни швидкості деформування бетону  $\dot{\varepsilon}$ , доведеться корегувати саму функцію стандартної діаграми його деформування  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , отриманої за результатами випробувань статичним навантаженням. Це стає вкрай актуальним для всіх бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, що проектуються на сприйняття будь-яких динамічних навантажень. Такі навантаження можуть бути різної інтенсивності, оскільки пов'язуються не тільки з певними технологічними процесами, але й з так званими «позаштатними» або аварійними ситуаціями та навіть з бойовими діями. Водночас, згідно тверджень багатьох дослідників [1-6], швидкість деформування матеріалів і конструкцій за прикладання таких навантажень може коливатися в доволі широких межах (табл. 1). Тому, за вказаних обставин, дійсні діаграми деформування бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , представлені полігональними функціями вищих порядків [7], завжди потребуватимуть постійного уточнення або корегування через неминучу змінність коефіцієнтів вказаних поліномів.

З вищенаведеного випливає, що на роль універсальної може претендувати лише така аналітична залежність  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , яка в математичному відношенні залишатиметься незмінною на всьому діапазоні швидкостей деформування бетону, тобто без будь-якого коригування описуватиме діаграму деформування бетону за дії будь-яких навантажень. Тоді для будь-якої подібної функції завжди залишатимуться актуальними лише загальні закономірності та особливості змін найважливіших фізико-механічних характеристик бетону залежно від швидкості його деформування.

## Швидкість деформування бетону за найпоширеніших динамічних навантажень

Тип динамічного навантаження	Швидкість деформування $\dot{\varepsilon}$ , $\text{с}^{-1}$
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	$10^{-1} \dots 10^4$

**Аналіз останніх досліджень.** Зазвичай вивчення основних характеристик стиснутого бетону за дії динамічних навантажень зводиться до дослідження коефіцієнта динамічного зміцнення (*DIF*), рівня зростання модуля пружності та змін його «граничної» деформативності.

Всі відомі на сьогодні залежності *DIF* можна розділити на 3-и окремі групи, пов'язуючи їх, відповідно, з тривалістю дії динамічного навантаження  $\tau$  [8], зі швидкістю зростання напружень  $\dot{\sigma} = d\sigma / dt$  [9-11] та швидкістю деформування бетону  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$  [12-18]. Аналіз основних недоліків всіх цих залежностей наведено в роботі [19]. Особливої уваги заслуговують функції останньої групи та спільний недолік, властивий для всіх вказаних груп залежностей *DIF*. Мова йде про те, що практично всі відомі на сьогодні функції *DIF* не враховують впливу на нього пружно-пластичних властивостей бетону. Тоді як експериментальні дослідження показують, що *DIF* суттєво залежить від класу бетону [20-22].

Щодо модуля пружності бетону, то згідно експериментальних досліджень рівень його зростання також залежить від класу бетону [2, 23, 24]. Водночас, всі пропонувані на сьогодні залежності з розрахунку рівня зростання модуля пружності  $E_{c,d} / E_c$  приймаються сталими [25, 26] або пов'язуються лише зі швидкістю деформування бетону  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$  [10, 11, 27].

Загалом результати експериментальних досліджень деформативності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень є вкрай суперечливими. В одних роботах вказується, що зі зростанням швидкості деформування бетону рівень його «граничної» деформативності зменшується [12, 28, 29], в інших же – навпаки, зростає [30-32]. Якщо в перших роботах наводиться певне (логічне) обґрунтування такої поведінки бетону, то в других воно абсолютно відсутнє. Спільним же недоліком всіх згаданих робіт, як і європейських стандартів [9, 11] є те, що рівень деформативності  $\varepsilon_{cl,d} / \varepsilon_{cl}$  жодним чином не пов'язується з класом бетону.

Таким чином, отримання аналітично обґрунтованих залежностей щодо зміни основних фізико-механічних характеристик бетону за дії динамічних

навантажень дозволить вести подальшу розбудову універсальної моделі його деформування.

**Постановка мети і задач досліджень.** Дані дослідження спрямовані на моделювання діаграми деформування бетону в залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень. При цьому, основну увагу приділено аналітичним залежностям з прогнозування найважливіших міцнісних та деформативних характеристик стиснутого бетону, що описують цю діаграму.

**Методика досліджень.** В основу даних вишукувань покладено загальні закономірності фізико-математичного моделювання процесу деформування бетону за дії як статичних [33-35], так і динамічних навантажень, а також закон збереження потенціальної енергії деформування матеріалів [36-38] за вказаних режимів завантаження.

**Результати досліджень.** Загальновідомо, що бетон є пружно-пластичним композиційним матеріалом. Тому діаграма його деформування, як і визначальні характеристики, що її описують (модуль пружності  $E_c$ , міцність на стиск  $f_{ck}$  та відповідні критичні деформації  $\varepsilon_{c1}$ ), є залежними від швидкості завантаження або швидкості деформування бетону  $\dot{\varepsilon}$  (рис. 1). Інакше кажучи, за динамічних навантажень зазначені характеристики сягатимуть значень  $E_{c,d}$ ,  $f_{ck,d}$  та  $\varepsilon_{c1,d}$ .

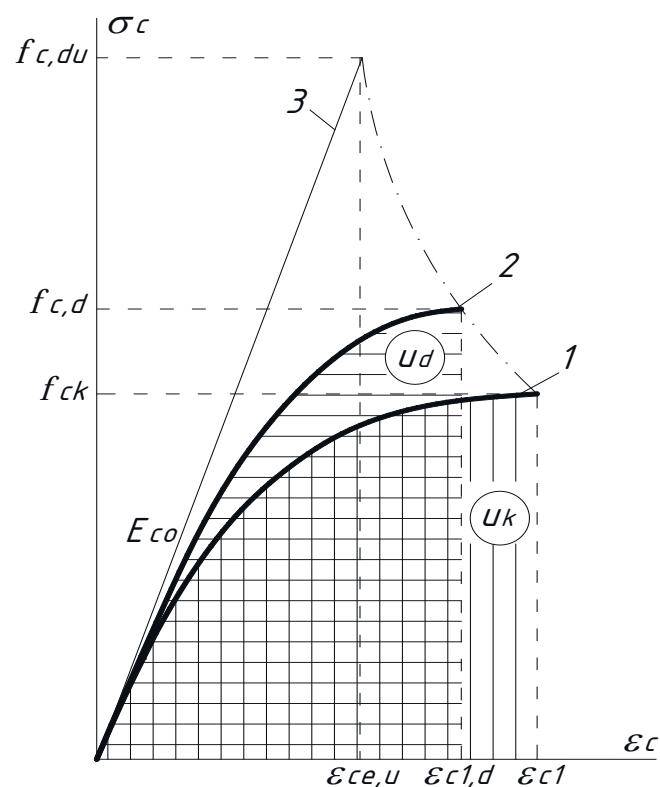


Рис.1. Епюри питомої потенціальної енергії руйнування бетону при завантаженні: 1 - стандартизованому короткочасному (статичному); 2 - динамічному; 3 - миттєвому динамічному

Для встановлення аналітичного зв'язку між вищезгаданими статичними та динамічними характеристиками стиснутого бетону використаємо відому гіпотезу незмінності та незалежності від режиму завантаження питомої потенціальної енергії граничного деформування (руйнування) бетону [36, 37].

За допомогою зазначеної гіпотези та неправильної дробово-раціональної функції  $\sigma_c - \varepsilon_c$  [34] було встановлено аналітичний зв'язок між граничною міцністю стиснутого бетону  $f_{ck,du}$  за дії динамічного навантаження, близького до миттєвого ( $\varepsilon_m = 10^3 c^{-1}$ ), та його стандартною міцністю  $f_{ck}$  за дії статичного навантаження ( $\varepsilon_s = 10^{-6} c^{-1}$ ). В роботі [19] він представлений функцією граничних значень коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону

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

де  $k$  - загально визнаний коефіцієнт пружно-пластичних властивостей бетону за дії статичних навантажень  $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$ .

В діапазоні швидкостей деформування бетону  $10^{-6} c^{-1} \leq \varepsilon \leq 10^3 c^{-1}$  за використання вищезгаданої гіпотези отримаємо рівняння

$$\frac{k \cdot f_{ck}^2}{(k-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left( \frac{k-1}{k-2} \right)^2 \ln(k-1) \right] = \frac{k_d \cdot f_{ck,d}^2}{(k_d-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(k_d-1)^2}{(k_d-2)} - \left( \frac{k_d-1}{k_d-2} \right)^2 \ln(k_d-1) \right], \quad (2)$$

де  $k_d$  - коефіцієнт пружно-пластичних властивостей бетону за дії динамічних навантажень  $k_d = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1,d} / f_{ck,d}$ .

Розв'язок цього рівняння за допомогою методів числового аналізу дозволив отримати загальну залежність коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону, функціонально пов'язану з його граничними значеннями та швидкістю деформування бетону [19]

$$DIF = f_{ck,d} / f_{ck} = DIF_u^{((1+\log(\varepsilon/\varepsilon_s))/9)^2} \quad \text{для} \quad \varepsilon \geq 10^{-6} c^{-1}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon$  - швидкість деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень;  $\varepsilon_s$  - максимальна швидкість деформування стиснутого бетону за дії статичних (квазістатичних) навантажень,  $\varepsilon_s = 10^{-5} c^{-1}$ .

Зв'язок коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону з його класом за різних швидкостей деформування відображають графіки на рис. 2.

Водночас, в процесі розв'язку рівняння (2), було встановлено зв'язок між коефіцієнтами пружно-пластичних властивостей бетону за дії статичних та динамічних навантажень залежно від швидкості його деформування

$$k_d = 1 + (k-1) \cdot (\log(\varepsilon_m / \varepsilon) / 9) + k / 5 \cdot (9 - \log(\varepsilon_m / \varepsilon)) \cdot (\log(\varepsilon_m / \varepsilon) / 18)^2, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_m$  - швидкість деформування стиснутого бетону за дії миттєвого динамічного навантаження, обмежена величиною  $\varepsilon_m = 10^3 c^{-1}$ .

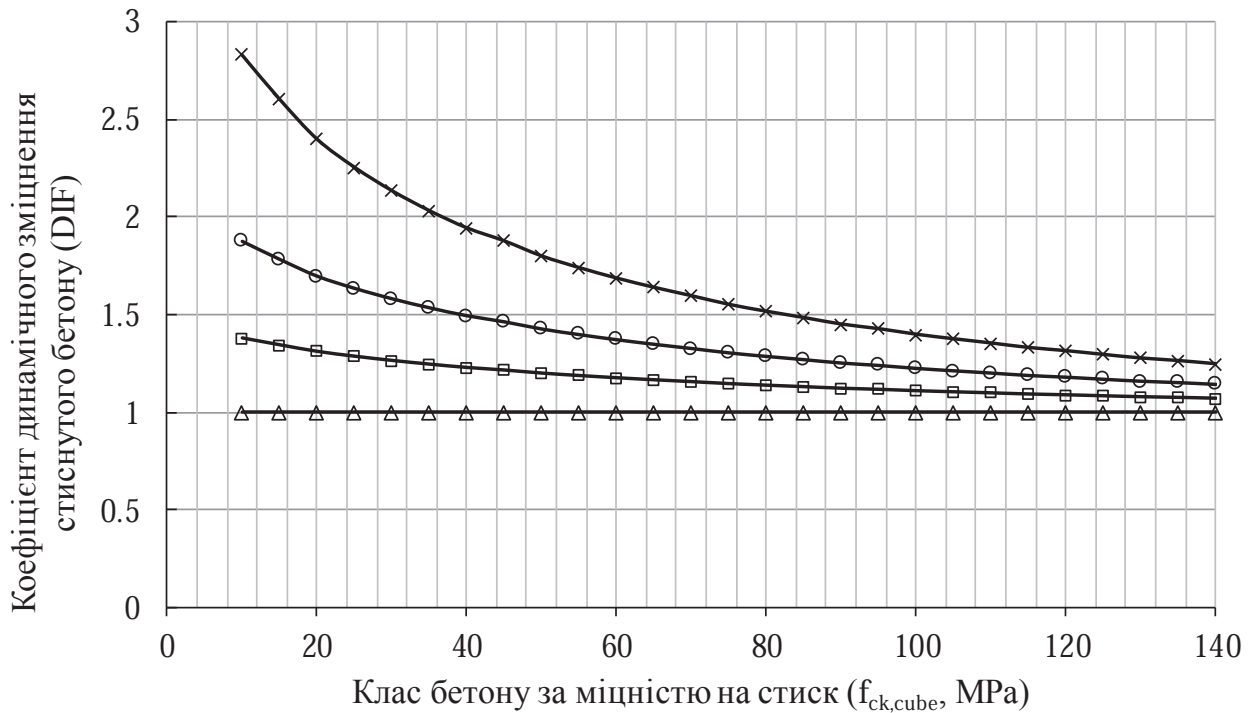


Рис. 2. Коефіцієнт динамічного зміцнення стиснутого бетону залежно від його класу за швидкості деформування бетону:  $\Delta$  -  $\varepsilon = 10^{-6} c^{-1}$ ;  $\square$  -  $\varepsilon = 10^{-1} c^{-1}$ ;  $\circ$  -  $\varepsilon = 10^1 c^{-1}$ ;  $\times$  -  $\varepsilon = 10^3 c^{-1}$

З іншої сторони коефіцієнти пружно-пластичних властивостей бетону за дії динамічних та статичних навантажень пов'язані між собою через початковий модуль пружності наступною залежністю

$$k_d = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1,d} / f_{ck,d} = k \cdot f_{ck} / \varepsilon_{c1} \cdot \varepsilon_{c1,d} / f_{ck,d} \cdot$$

(5)

Функціональний зв'язок коефіцієнта пружно-пластичних властивостей стиснутого бетону з його класом за різних швидкостей деформування бетону відображають графіки на рис. 3.

Вираз (5) дозволяє доволі просто прогнозувати рівень деформативності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень

$$\frac{\varepsilon_{c1,d}}{\varepsilon_{c1}} = \frac{k_d}{k} \cdot DIF. \quad (6)$$

Варто підкреслити, що рівень деформативності стиснутого бетону слід пов'язувати з його максимальними критичними  $\varepsilon_{c1,d}$ , а не з граничними деформаціями  $\varepsilon_{cu,d}$ , оскільки останні є змінними та залежать від стану елемента чи конструкції.

Функціональний зв'язок рівня деформативності стиснутого бетону з його класом за різних швидкостей деформування відображають графіки на рис. 4.

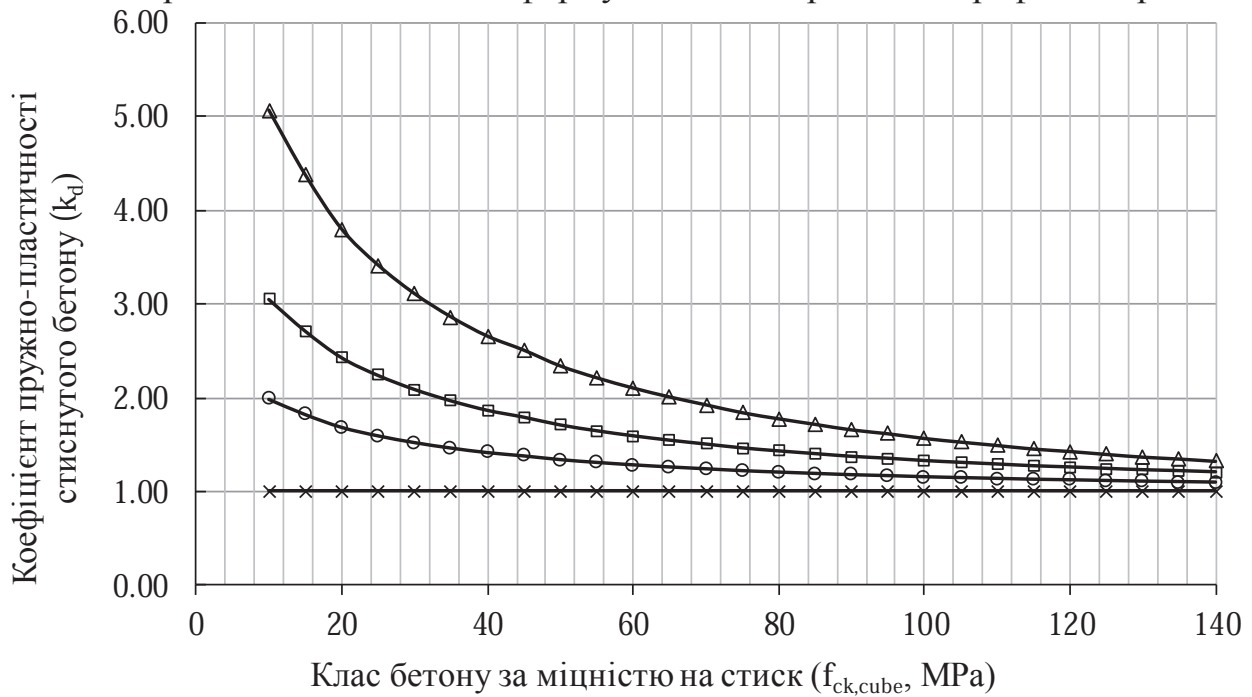


Рис. 3. Коефіцієнт пружно-пластичності стиснутого бетону залежно від його класу за швидкості деформування бетону:  $\Delta$  -  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} c^{-1}$ ;  $\square$  -  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} c^{-1}$ ;  $\circ$  -  $\dot{\epsilon} = 10^1 c^{-1}$ ;  $\times$  -  $\dot{\epsilon} = 10^3 c^{-1}$

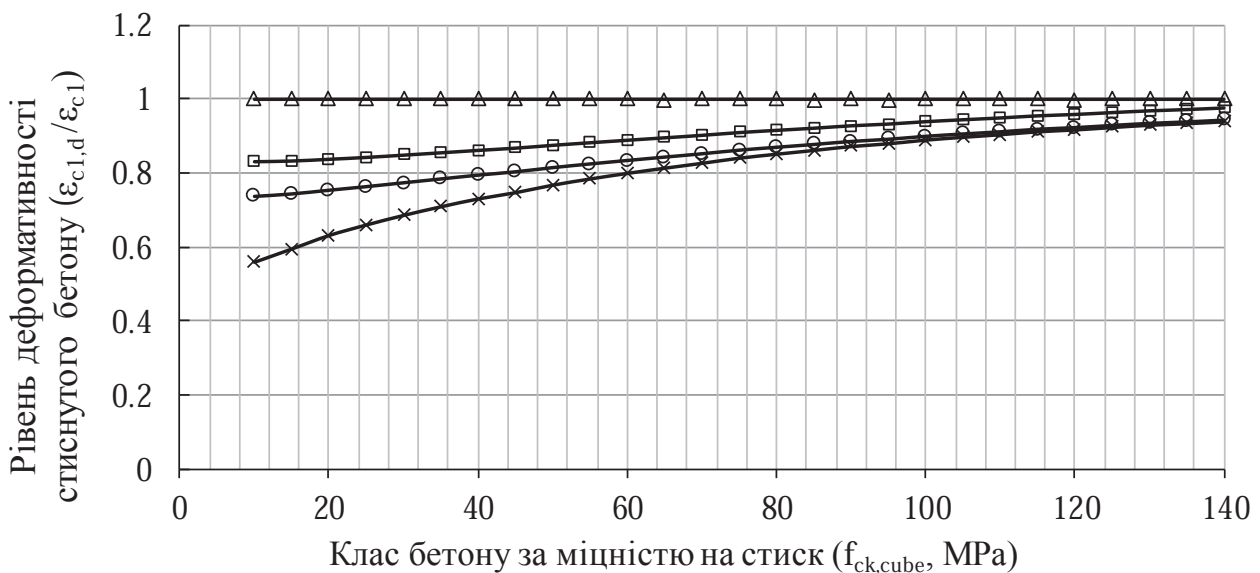


Рис. 4. Залежність рівня деформативності стиснутого бетону від його класу за швидкості деформування бетону:  $\Delta$  -  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} c^{-1}$ ;  $\square$  -  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} c^{-1}$ ;  $\circ$  -  $\dot{\epsilon} = 10^1 c^{-1}$ ;  $\times$  -  $\dot{\epsilon} = 10^3 c^{-1}$

Окремо варто сказати про рівень зростання модуля пружності бетону  $E_{c,d} / E_c$  за дії динамічних навантажень. Потреба у його розгляді взагалі

відпадає, якщо в методиках розрахунку використовувати модуль деформацій бетону, пов'язаний з його початковим значенням, тобто з початковим модулем пружності бетону  $E_{co}$ . Причина в тому, що чисто пружне деформування бетону відбувається лише у випадку його миттєвого динамічного завантаження ( $E_{co} = E_{c,du}$ ). Саме за відсутності пластичних деформацій коефіцієнт пружно-пластичності бетону будь-якого класу сягає мінімального значення ( $k_d = 1$ ).

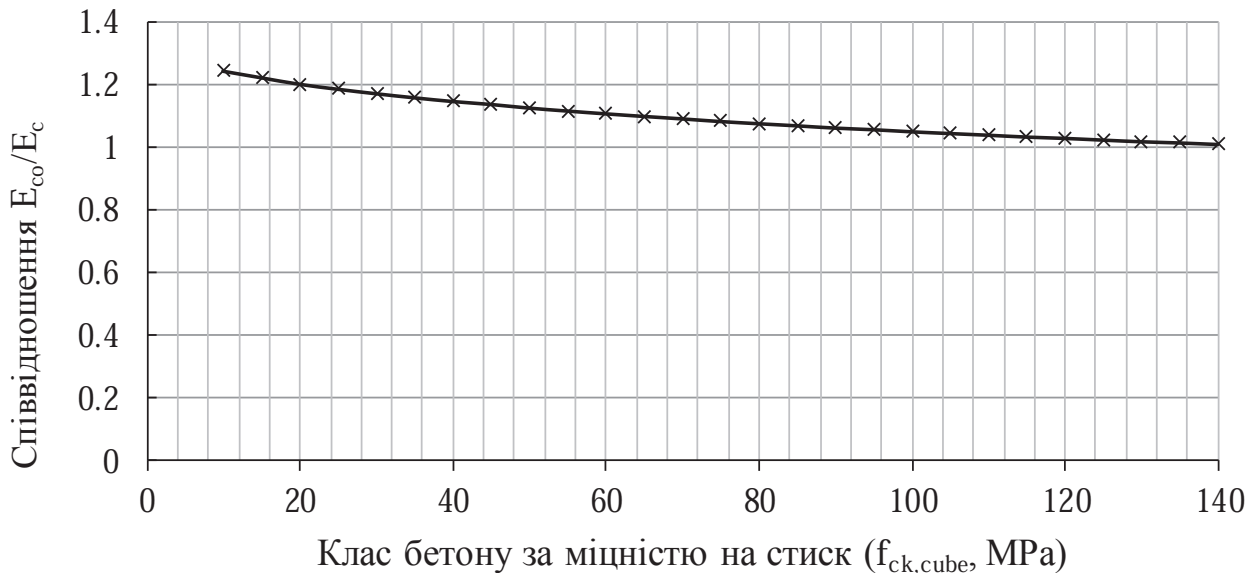


Рис. 5. Залежність рівня зростання модуля пружності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень від його класу

**Висновки.** Таким чином, завдяки запропонованій в роботах [36, 37] енергетичній моделі деформування бетону, отримано аналітично обґрунтовані залежності:

- коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону  $DIF$  та його граничних значень  $DIF_u$ ;
- рівня критичної деформативності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень  $\varepsilon_{c1,d} / \varepsilon_{c1}$ ;
- коефіцієнта пружно-пластичності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень  $k_d$ .

Вкрай важливо, що всі ці залежності пов'язані не лише зі швидкістю деформування стиснутого бетону  $\varepsilon$ , але й із загальновизнаним коефіцієнтом пружно-пластичних властивостей бетону за нормованих (стандартизованих) статичних випробувань -  $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$ . А це, в свою чергу, дозволяє не тільки прогнозувати міцність  $f_{ck,d}$  та критичні деформації  $\varepsilon_{c1,d}$  стиснутого бетону за будь-якої швидкості його деформування, але й доволі просто моделювати діаграму деформування стиснутого бетону в бетонних та залізобетонних елементах і конструкціях в діапазоні динамічних навантажень



різної інтенсивності (рис. 6).

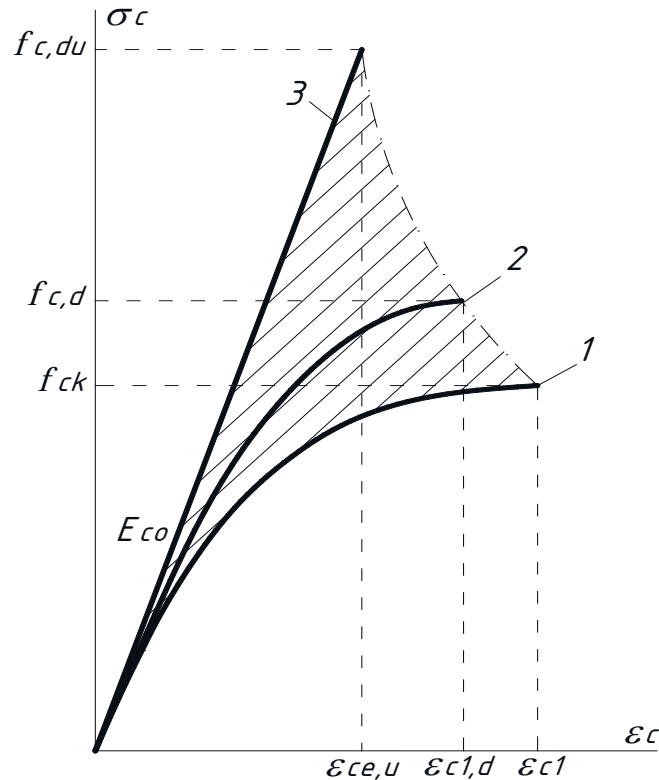


Рис.6. Універсальна діаграма деформування стиснутого бетону при завантаженні: 1 - стандартизованому короткочасному (статичному); 2 - динамічному; 3 - миттєвому динамічному

Загалом можна констатувати, що вищенаведені результати досліджень відкривають доволі широкі можливості в розробці універсальної методики розрахунку як бетонних, так і залізобетонних елементів та конструкцій за дії навантажень будь-якої інтенсивності та тривалості.

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.

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. *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 17-22 Jun 2007. Catania, Italy, 2007. Vol. 3. P. 1467-1471.

6. Zhang X., Ruiz G., Yu R. C., Poveda E., Porrás 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.

7. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та

залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkooho betonu. Pravyla proektuvannia. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 123 s.

**8.** 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.

**9.** CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Lausanne: Comité Euro-International du Béton, 1991. 437 p.

**10.** 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.

**11.** Fib Model Code 2010. Final draft. Fib Bulletin 66. 2012. Vol. 2. 377 p.

**12.** 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.

**13.** 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.

**14.** Tedesco J. W., Ross C. A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete. *ASME J. Press. Vessel Technol.* 1998. Vol. 120. P. 398-405.

**15.** 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.

**16.** Long K. S., Kasmuri M., Hasan A. S. Z., 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.

**17.** 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.

**18.** 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.

**19.** Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М. Основні особливості деформування бетону за дії динамічних навантажень. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2023. Вип. 205. С. 60-70.

Romashko-Maistruk O. V., Romashko V. M. Osnovni osoblyvosti deformuvannia betonu za dii dynamichnykh navantazhen, *Zb. nauk. prats UkrDUZT*. 2023. Vip. 205. S. 60-70.

**20.** 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. 51 p.

**21.** Kono S., Watanabe F., Kajitani A. Stress-strain relation of confined concrete under dynamic loading. In *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, de Borst et al. (Ed.). Swets & Zeitlinger, Lisse, Netherlands, 2001. P. 585-592.

**22.** Othman H., Marzouk H. Strain Rate Sensitivity of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 2016. Vol. 113, No. 2. P. 143-150.

**23.** Salman M., Al-Amawee A. The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete. *Journal of Engineering and Development*. 2006. Vol. 10, No. 2. P. 163-174.

24. Popovics J. A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. Final Report. American Concrete Institute - Concrete Research Council, Urbana, IL., 2008. 16 p.
25. Lydon F. D., Balendran R.V. Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1986. Vol. 16, No. 3. P. 314-324.
26. Lu X., Sun Q., Feng W., Tian J. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 231-239.
27. Peng S., Yu Z., Zhao Q., Du X., Xie X., Chen B., Zhang Y. Research on Dynamic Compressive Performance and Failure Mechanism Analysis of Concrete after High Temperature and Rapid Cooling. *Materials*. 2022. Vol. 15. 4642.
28. Hjorth O. Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten. Dissertation TU Braunschweig, 1976. 317 p.
29. Hughes B.P., Watson A.J. Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading. *Mag. Contr. Res.* 1978. Vol. 30(105). P. 189-199.
30. Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete. *ACI Journal*. 1953. Vol. 49. P. 729-744.
31. Bresler B., Bertero V.V. Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression: in Proceedings of 2nd Canadian Conference on Earthquake Engineering, Hamilton, Ontario, 1975. P. 1-13.
32. Rostasy F.S., Scheuermann J. and Sprenger K.H. Mechanical behaviour of some construction materials subjected to rapid loading and low temperature, *Betonwerk+Fertigteil-Technik*. 1984. Vol. 50(6). P. 393-401.
33. Ромашко В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций. *Міжнародний науковий журнал (International scientific journal)*. 2016. Вип. 3. С. 84-86.
- Romashko V. N. Obobshchennaya model deformirovaniya zhelezobetonnikh elementov i konstruktsii. *Mizhnarodnii naukovii zhurnal (International scientific journal)*. 2016. Vip. 3. S. 84-86.
34. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01. Львів, 2018. 533 с.
- Romashko V. M. Deformatsiino-sylova model oporu betonu i zalizobetonu: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Lviv, 2018. 533 s.
35. 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.
36. 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.
37. Ромашко В. М., Ромашко-Майструк О. В. Модель та методика розрахунку ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій. *Вісник ОДАБА: зб. наук. праць*. 2021. Вип. 84. С. 59-68.
- Romashko V. M., Romashko-Maistruk O. V. Model ta metodyka rozrakhunku resursu zalizobetonnykh elementiv i konstruktsii. *Visnyk ODABA: zb. nauk. prats*. 2021. Vyp. 84. S. 59-68.
38. 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.