

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПИТОМОЇ ЕНЕРГІЇ РУЙНУВАННЯ ТЕРМОЗМІЩЕНОЇ АРМАТУРИ

К. ЗАНГ<sup>1</sup>, Ю. В. МОЛЬКОВ<sup>2</sup>, Ю. М. СОБКО<sup>3</sup>,  
Я. З. БЛІХАРСЬКИЙ<sup>3</sup>, Р. Є. ХМІЛЬ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Університет Янцзе, Китай;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

За результатами експериментальних досліджень з використанням методу цифрової кореляції зображень досліджено зміну механічних характеристик матеріалу сталеві термозміщеної арматури по товщині стрижня. Побудовано умовні та істинні діаграми деформування суцільної арматури і виготовлених з неї стандартних зразків. Визначено питому енергію руйнування для різних зон термозміщеної арматури. Показано необхідність врахування зміни механічних характеристик по товщині стрижня під час проектування будівельних конструкцій, а також переваги питомої енергії руйнування як інваріантної характеристики матеріалу.

**Ключові слова:** арматура, сталь, механічні характеристики, цифрова кореляція зображень, істинна діаграма руйнування, енергія руйнування.

Під час проектування залізобетонних елементів конструкцій їхню несучу здатність визначають з урахуванням фізико-механічних характеристик арматурних стрижнів. Тут важливим є використання науково обґрунтованих методик для достовірної оцінки несучої здатності будівельних елементів конструкцій, зокрема балок, плит перекриття тощо, особливо за їх армування термозміщеною арматурою. Характерним для неї є зміна механічних характеристик по товщині стрижня.

Для визначення механічних характеристик арматурних стрижнів використовують циліндричні зразки, які випробовують згідно зі стандартними методиками [1–3]. Під час їх виготовлення з арматури знімають зовнішній зміцнений шар металу, а отже, встановлюють механічні характеристики серцевини стрижня. Також випробовують суцільні арматурні стрижні, а характеристики їх визначають на основі побудованих діаграм руйнування в координатах "умовне напруження  $\sigma$ –відносне видовження  $\delta$ ", не встановлюючи при цьому істинних напружень та деформацій.

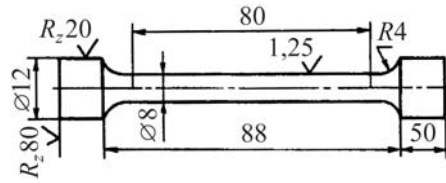
Нижче на підставі випробувань зразків різного діаметра, виготовлених шляхом проточування термозміцнених арматурних стрижнів, визначили механічні характеристики різних зон матеріалу арматури. Для побудови діаграм деформування в умовних та істинних координатах використали сучасний високоточний метод вимірювання переміщень і деформацій – цифрову кореляцію зображень (ЦКЗ) [4, 5].

Мета роботи – дослідити деформування і руйнування термозміщеної арматури та оцінити зміну її механічних характеристик по товщині стрижня для обґрунтованого їх вибору під час розрахунку елементів залізобетонних конструкцій.

**Методика досліджень.** Використовували три типи зразків: тип I – необроблений арматурний стрижень  $\varnothing 12$  mm, загальна довжина якого 200 mm, а довжина робочої частини 120 mm; тип II і III – циліндричні стандартні зразки (рис. 1)  $\varnothing 10$  і 8 mm, робоча довжина 100 і 80 mm, відповідно, виготовлені із того ж арматурного стрижня.

Рис. 1. Стандартний циліндричний зразок для визначення механічних характеристик.

Fig. 1. Standard specimen for mechanical testing.



Зразки розтягували на розривній машині до руйнування за швидкості переміщення рухомої траверси 2 mm/min. Реєстрували зусилля навантаження вбудованим динамометром машини FPZ-100, а видовження за допомогою тензOMETричного екстензометра. Використовуючи аналого-цифровий перетворювач (АЦП), записували сигнали від динамометра та екстензометра і реєстрували за допомогою персонального комп'ютера.

Паралельно з цим промисловою цифровою камерою Tourcam UCMOS 10000КРА, яка жорстко закріплена до нерухомої траверси машини FPZ-100, реєстрували зображення поверхні зразка під час його деформування. Зображення використовували для обробки методом ЦКЗ. Їх роздільна здатність 10 МР (3584×2748 pixels), формат \*bmp. Під час навантаження серійно фотографували ділянку поверхні зразка, причому перший кадр відповідав моменту початку навантаження, а частота зйомки (1 fps) рівна частоті реєстрації зусилля навантаження за допомогою АЦП. Така частота зйомки дає можливість з достатньою точністю встановити для кожного зображення зусилля, прикладене до зразка у момент його реєстрації, а також є достатньою для фіксування зображення у момент, наближений до руйнування зразка. Під час випробувань зразків отримали масив зображень (150...200 шт. для кожного зразка), обробивши які методом ЦКЗ, встановили розподіл переміщень і деформацій на кожному етапі навантаження (рис. 2).

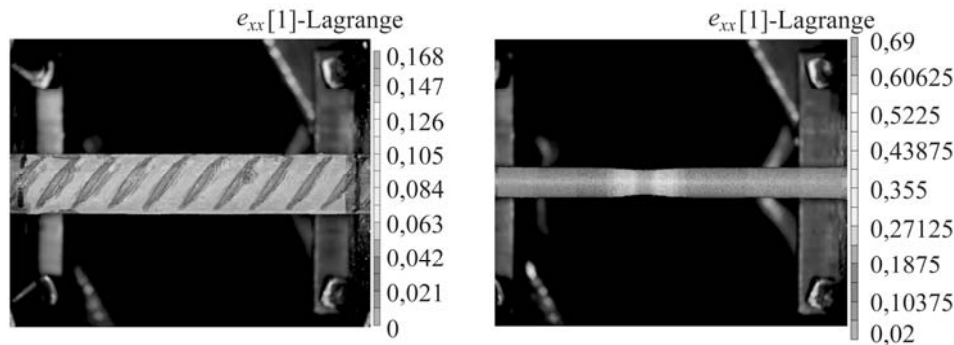


Рис. 2. Розподіл деформації на поверхні арматурного стрижня (а) і циліндричного зразка (b) за критичного навантаження, отриманий методом ЦКЗ.

Fig. 2. Strain distribution on the surface of reinforcement bar (a) and cylindrical specimen (b) under critical loading, obtained using a digital correlation method (DIC) method.

**Результати та їх обговорення.** За зусиллям навантаження  $P$  та видовженням робочої частини зразка  $\Delta l$  обчислювали умовні напруження  $\sigma = P/F_0$  (де  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу арматурного стрижня або циліндричного зразка) і відносне видовження  $\delta = \Delta l/l_0$  (де  $l_0$  – початкова робоча довжина зразка) та будували умовну діаграму деформування  $\sigma$ - $\delta$  [1]. Використовуючи опцію програмного забезпечення методу ЦКЗ “віртуальний екстензометр”, реєстрували відносне видовження зразка так як і тензOMETричним екстензометром. За результатами вимірювань “віртуальним екстензометром” будували діаграму  $\sigma$ - $\delta$  (рис. 3a), яка практично збігається з побудованою за стандартною методикою [6].

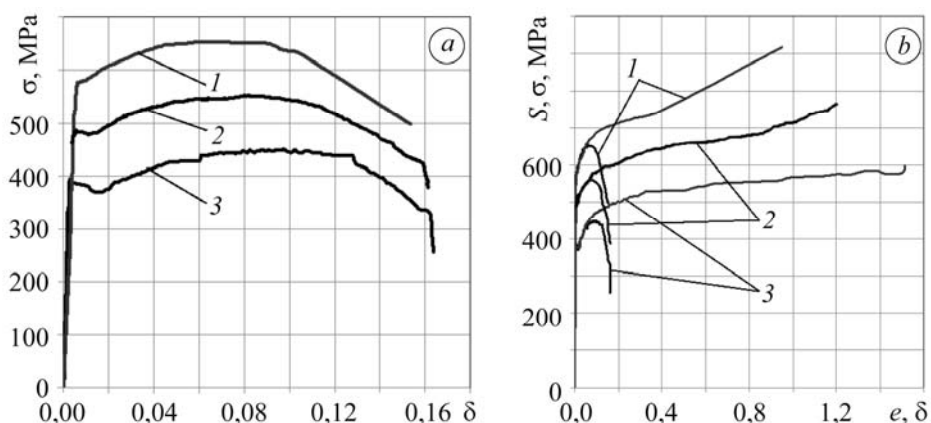


Рис. 3. Умовні (а) та істинні (b) діаграми деформування матеріалу арматури: 1 – необроблений стрижень (тип I); 2 – зразок Ø10 mm (тип II); 3 – зразок Ø8 mm (тип III).

Fig. 3. Engineering (a) and true (b) stress-strain curves of reinforcement steel: 1 – intact reinforcement bar (type I); 2 – specimen Ø10 mm (type II); 3 – specimen Ø8 mm (type III).

Побудова істинної діаграми руйнування [3] передбачає безперервну ресстрацію зміни площі поперечного перерізу зразка в місці утворення шийки і визначення біжучого відносного звуження  $\psi_i$ :

$$\psi_i = \frac{F_0 - F_i}{F_0}, \quad (1)$$

де  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу зразка;  $F_i$  – її біжуче значення. Величину  $\psi_i$  визначали шляхом вимірювання зміни діаметра зразка у шийці під час навантаження, використовуючи при цьому ЦКЗ. За величиною  $\psi_i$  знаходили істинну деформацію:

$$e_i = \ln \frac{1}{1 - \psi_i}. \quad (2)$$

Істинні напруження  $S_i$  в шийці зразка визначали за формулою

$$S_i = P_i / F_i \quad (3)$$

та будували діаграму “істинні напруження  $S$ –істинна деформація  $e$ ” [6].

Паралельно під час випробування зразків істинну деформацію  $e$  визначали безпосереднім вимірюванням переміщень у місці утворення шийки. Як показано раніше [6, 7], локальна деформація рівна істинній, обчислений за формулою (2), за умови її визначення з використанням оптимальної бази вимірювання переміщень (для сталі вона становить 10...20  $\mu\text{m}$ ). За результатами вимірювань будували істинну діаграму, яка практично збігається із класичним варіантом побудови. Побудовані (рис. 3b) істинні діаграми для суцільного арматурного стрижня і зразків Ø10 і 8 mm. Визначені під час випробувань усереднені механічні характеристики подано у табл. 1.

Таблиця 1. Механічні характеристики матеріалу арматури

Тип зразка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$S$ , МПа	$e$ , %
I	570	650	14,4	920	95
II	482	550	15,0	770	119
III	395	450	16,2	600	146

Аналіз результатів досліджень показує, що границя міцності  $\sigma_B$  для арматурного стрижня є більша на 15 та 30%, ніж для зразків типу II і III, відповідно. Ра-

зом з тим відносне видовження  $\delta$  змінюється в межах 11%. Істинні напруження руйнування  $S$  для арматурного стрижня є більші на 15 і 34% порівняно зі зразками типу II і III, відповідно. Величина  $S$  є на 30% більшою за умовну границю міцності  $\sigma_B$  для всіх типів зразків. Істинна критична деформація  $e$  є у 7–9 разів більша, ніж відносне видовження  $\delta$  і змінюється для різних типів зразків у межах 35%.

Таким чином, результати визначення механічних характеристик зразків різних типів, виготовлених із єдиного арматурного стрижня, суттєво відрізняються між собою. Особливо це проявляється у деформаційних характеристиках, які встановлені на основі істинних діаграм деформування. Загалом, із підвищенням характеристик міцності  $\sigma_B$ ,  $S$ , знижуються деформаційні характеристики  $\delta$  і  $e$ , тобто погіршується опірність матеріалу крихкому руйнуванню. Найоб'єктивнішу інформацію про здатність пластичного матеріалу чинити опір руйнуванню дає енергетичний підхід, який використовує питому енергію руйнування – інваріантну характеристику міцності матеріалу, що найточніше характеризує пружно-пластичне руйнування [8, 9]. Побудувавши істинні діаграми деформування, можна визначити питому енергію деформування для всіх типів зразків за формулою

$$W = \int_0^e S(e) de. \quad (4)$$

Графічно енергія деформування  $W$  відповідає площі під істинною діаграмою  $S \sim e$ . Приймаємо, що за досягнення енергії деформування критичного значення, тобто енергії руйнування, матеріал руйнується

$$W(S, e) = W_c. \quad (5)$$

Вважаємо, що енергію руйнування матеріалу можна подати як суму складових енергій деформування

$$W = W_x + W_y + W_z = W_c, \quad (6)$$

де  $W_y$ ,  $W_x$ ,  $W_z$  – енергія деформування у напрямках осей координат  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ .

Отже, для визначення складових енергій  $W_y$ ,  $W_z$  і  $W_x$  необхідно побудувати діаграми деформування у трьох головних напрямках. Деформацію  $e_y$  визначаємо безпосередньо із експерименту за розтягу циліндричних зразків методом ЦКЗ, а  $e_x$  і  $e_z$  – за переміщеннями вздовж осей  $Ox$  і  $Oz$  у шийці під час деформування зразка.

За деформаціями  $e_x$  і  $e_z$ , беручи до уваги, що для циліндричного зразка  $e_x = e_z$ , із діаграми  $S_y \sim e_y$  визначаємо істинні напруження  $S_x$  і  $S_z$ , припускаючи, що залежність деформацій від напружень однакова для деформування у всіх трьох напрямках, оскільки матеріал ізотропний.

Діаграми деформування для трьох типів зразків подані на рис. 4. Індеси I–III для складових енергій  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  відповідають типу зразка. Усереднені значення, отримані під час випробувань трьох зразків кожного типу, наведені у табл. 2.

Як бачимо, енергія руйнування, визначена для різних зон арматурного термоміцненого стрижня, змінюється не більш як на 10%. Аналіз результатів досліджень вказує на те, що під час розрахунку несучої здатності залізобетонних елементів конструкцій необхідно враховувати зміну як міцнісних, так і деформаційних характеристик залежно від типу зразка. Разом з тим енергія руйнування,

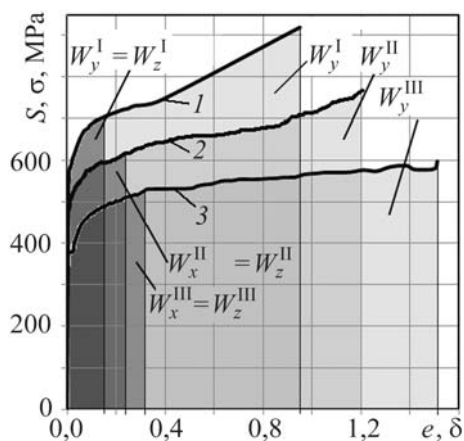


Рис. 4. Визначення питомої енергії руйнування із істинних діаграм деформування арматури:

1 – необроблений стрижень;  
2 – зразок  $\varnothing 10$  mm; 3 – зразок  $\varnothing 8$  mm.

Fig. 4. Determination of strain energy density from true stress-strain curves of reinforcement steel: 1 – intact reinforcement bar; 2 – specimen  $\varnothing 10$  mm; 3 – specimen  $\varnothing 8$  mm.

визначена на основі істинних діаграм,  $\epsilon$  інваріантною характеристикою матеріалу, яку необхідно використовувати для таких розрахунків.

**Таблиця 2. Істинні деформації, напруження та питома енергія деформування матеріалу арматури**

Тип зразка	$\epsilon$			$S$ , МПа			$W$ , MJ/m <sup>3</sup>			
	$\epsilon_{yc}$	$\epsilon_{xc}$	$\epsilon_{zc}$	$S_{yc}$	$S_{xc}$	$S_{zc}$	$W_{yc}$	$W_{xc}$	$W_{zc}$	$W_c$
I	0,95	0,16	0,16	920	710	710	748,9	111,7	111,7	972,3
II	1,19	0,25	0,25	770	615	615	763,4	125,5	125,5	1014,4
III	1,46	0,32	0,32	600	530	530	781,9	150,6	150,6	1083,1

### ВИСНОВКИ

Встановлено, що міцнісні характеристики  $\sigma_B$  для зразків різного діаметра, виготовлених із термозміцненої арматури, змінюються в межах 30%, а деформаційні – 11%. Водночас істинні напруження  $S$  змінюються в межах 34%, а істинна деформація  $\epsilon$  – в межах 35%. Питома енергія руйнування для трьох типів зразків змінюється в межах 10%.

*РЕЗЮМЕ.* По результатам экспериментальных исследований с использованием метода цифровой корреляции изображений исследованы изменения механических характеристик материала стальной термоупрочненной арматуры по толщине стержня. Построены условные и истинные диаграммы деформирования сплошной арматуры и изготовленных из нее стандартных образцов. Определена удельная энергия разрушения для различных зон термоупрочненной арматуры. Показана необходимость учета изменения механических характеристик по толщине стержня при проектировании строительных конструкций, а также преимущества удельной энергии разрушения как инвариантной характеристики материала.

*SUMMARY.* On the base of experimental results obtained by a digital image correlation technique the change of the mechanical characteristics along the material thickness of the thermostrengthened concrete reinforcement steel bar are investigated. The engineering and true stress-strain curves for the intact reinforcement bar and for standard samples, made from it are built. The values of strain energy density for different zones of thermostrengthened reinforcement bar are calculated. The need to take into account the variation of the mechanical characteristics along the thickness of reinforcement bar when designing building structures and, also, the advantages of strain energy density as an invariant material property are shown.

1. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.
2. *Писаренко Г. С., Стрижало В. А.* Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
3. *Фридман Я. Б.* Механические свойства металлов. В 2-х ч.: Ч. I. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
4. *Chu T., Ranson W., and Sutton M.* Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Experimental Mech.* – 1985. – 25(3). – P. 232–244.
5. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review /* В. Pan, К. М. Qian, Н. М. Xie, and А. Asundi // *Measurement Scie. & Technol.* – 2009. – 20(6). – P. 062001–062007.
6. *Мольков Ю. В.* Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – 48, № 6. – С. 121–125.
7. *Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень /* Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – № 4. – С. 18–24.
8. *Gillemot L. F.* Criterion of crack initiation and spreading // *Engng. Fract. Mech.* – 1976. – 8. – P. 239–253.
9. *Schindler H. J.* Strain energy density as the link between global and local approach to fracture / Eds.: К. Ravi-Chandar et al. // *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Fract.* – Honolulu: Pergamon, 2001. – Reference ID: ICF 100494OR.

Одержано 10.07.2014