

ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ ТА КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ ТЕРМОЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ ЗІ СТАЛІ 35ГС

З. Я. БЛІХАРСЬКИЙ¹, Ю. В. ОБУХ²

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено вплив форми та розмірів дефектів на міцність сталеві термозміцненої арматури. Побудовано діаграми деформування арматури з різними типами дефектів. Вперше застосовано метод бінаризації зображень для обчислення площі зламів зразків арматури для встановлення істинних критичних напружень. Встановлено, що одиночні гострі дефекти є небезпечнішими, ніж система таких дефектів чи одиночні корозійні дефекти значної довжини. Показано перевагу використання істинних напружень для оцінювання міцності арматури.

Ключові слова: арматура, дефекти, корозійні пошкодження, міцність, істинні напруження, бінаризація зображень.

Стан сталеві арматури суттєво впливає на міцність та несучу здатність залізобетонних конструкцій, саме вона забезпечує несучу здатність розтягнутих зон залізобетонних балок, плит перекриття тощо. Під час виробництва цих конструкцій арматурні стрижні можуть зазнавати механічних пошкоджень, спричинених низькою культурою виробництва, а за їх експлуатації також і корозійних пошкоджень, внаслідок розтріскування захисного шару бетону і контакту арматури з агресивним середовищем. Тому важливо оцінити дію цих пошкоджень на міцність арматури, що дасть змогу, зокрема, уточнити коефіцієнти запасу міцності при виробництві та експлуатації залізобетонних конструкцій. Нижче досліджено вплив форми та розмірів дефектів на механічні характеристики арматури та запропоновано підхід до оцінки залишкової міцності пошкодженої арматури у складі залізобетонної конструкції.

Зразки, обладнання та методика досліджень. Для випробувань на розтяг використовували зразки арматури довжиною 400 mm з одно- та двосторонніми надрізами радіусом $R = 2$ та 6 mm, виконаними абразивним кругом, зразки з трьома такими надрізами з кроком між ними 50 mm, зразки з вирізами довжиною 100 mm, які імітували корозійні пошкодження, а також суцільну арматуру. Перерізи зразків у місцях надрізів та вирізів показано на рис. 1, вигляд зразків після випробувань – на рис. 2.

Зразки випробовували на розтяг на розривній машині EUS-40 до руйнування за швидкості переміщення рухомої траверси 2 mm/min. Реєстрували зусилля навантаження вбудованим динамометром машини та видовження тензометричним давачем переміщення (екстензометром). За допомогою аналого-цифрового перетворювача сигнали від динамометра та екстензометра фіксували персональним комп'ютером. Частота реєстрації даних 100 Hz. За результатами випробувань будували діаграми деформування зразків у вигляді залежностей умовних напружень у перерізі дефекту σ від відносної деформації зразка δ на базі 100 mm як і для стандартних зразків [1].

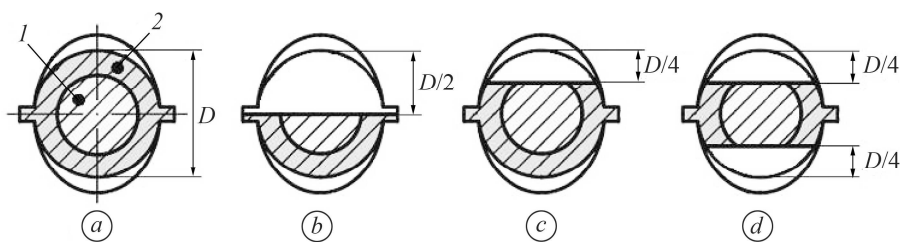


Рис. 1. Перерізи зразків арматури (1 – пластикна серцевина, 2 – зміцнений шар):
a – суцільна арматура, зразки W01, W02, W03; *b* – надріз або виріз на глибину половини діаметра, зразки S21, S22, S61, S62, GH1, GH2; *c* – виріз на глибину чверті діаметра, зразки GQ1, GQ2; *d* – двосторонній надріз на глибину чверті діаметра, зразки D21, D22, M21, M22, D61, D62, M61, M62.

Fig. 1. Cuts of rebar specimens (1 – plastic core, 2 – heat-treated layer): *a* – walled rebar specimens W01, W02, W03; *b* – cut or groove on half diameter depth of specimens S21, S22, S61, S62, GH1, GH2; *c* – groove on quarter diameter depth specimens GQ1, GQ2; *d* – multiple cuts on depth quarter diameter specimens D21, D22, M21, M22, D61, D62, M61, M62.

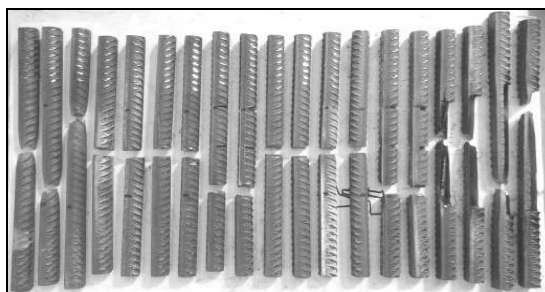


Рис. 2. Зразки після випробувань.

Fig. 2. Specimens after testing.

Площу зламів арматурних стрижнів обчислювали з цифрових фотографій зламів з використанням оригінального програмного комплексу математичних перетворень розробленого та апробованого [2, 3] у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка. Це програмне забезпечення має такі процедури обробки зображень: мультипорогова бінаризація, поліпшення контрасту, сегментація, морфологічна фільтрація, виділення меж, а також визначення геометричних параметрів об'єктів інтересу. Для сегментації зображень використали автоматичний режим роботи, який застосовує методи оптимізації функції вартостей. Ця функція описує належність пікселів на зображенні тому чи іншому об'єкту. Кількість об'єктів задавали вручну як апріорні дані. Класифікували об'єкти автоматично на основі методів кластерного аналізу. Залежно від якості вхідного зображення в окремих випадках застосували комбінації вищезгаданих процедур поліпшення зображень. Незначне погіршення чіткості країв обробленого зображення несуттєве і не впливало на загальний розподіл площі об'єктів. Вхідні зображення з однаковими параметрами обробляли групами, що значно зменшило тривалість постпроцесорних операцій. Узагальнений алгоритм визначення площі зламу арматурного стрижня (рис. 3) такий: згладжування медіанною фільтрацією з апертурою 9×9 pixels для усунення адитивних та імпульсних шумів; виокремлення поверхонь алгоритмом watershed [4, 5]; розбиття на класи алгоритмом k-means [6]; бінаризація за двома порогоми для присвоєння класу, що відповідає зламу; операція замикання (послідовні операції нарощування та ерозії) з розміром ядра 10×10 pixels [7]; визначення площі методом виділення контуру за методом Suzuki [8] з обчисленням площі за формулою Гріна.



Рис. 3. Зображення зламу арматурного стрижня: *a* – вихідне, *b* – після виокремлення поверхонь з розбиттям на класи, *c* – після бінарзації із замиканням.

Fig. 3. Images of rebar fracture: *a* – after capturing and inputing, *b* – after surfaces identification with classes selection, *c* – after binarization with closing.

Результати випробувань та їх аналіз. На рис. 4*a* показано діаграми деформування зразків бездефектної арматури та зразків з вирізами на глибину $1/2$ та $1/4$ діаметра арматури D . Як бачимо, наявність вирізу зменшує усереднені напруження текучості і збільшує критичні значення деформації порівняно з бездефектною арматурою. Зокрема, для вирізу $1/4D$ (крива 3) напруження текучості зменшуються у 1,3 рази, а деформація зростає в 1,5 рази. Для вирізу $1/2D$ цей ефект значно менший і діаграми деформування (крива 2) мало відрізняються порівняно з бездефектною арматурою. Це пояснюється тим, що під час шліфування арматури на глибину $1/4D$ знімається частина зміцненого шару матеріалу і співвідношення площі зміцненої складової до площі пластичної серцевини арматури у перерізі зразка змінюється, тоді як за шліфування на $1/2D$ це співвідношення відповідає такому для суцільної арматури. Це узгоджується із результатами, отриманими раніше [9] для стандартних зразків, виточених із зміцненої арматури. Таким чином, для залізобетонної балки, у якій арматура розтягнутої зони прокопородувала на товщину зміцненого шару, слід знизити допустиме навантаження, водночас допустимий прогин можна не зменшувати.

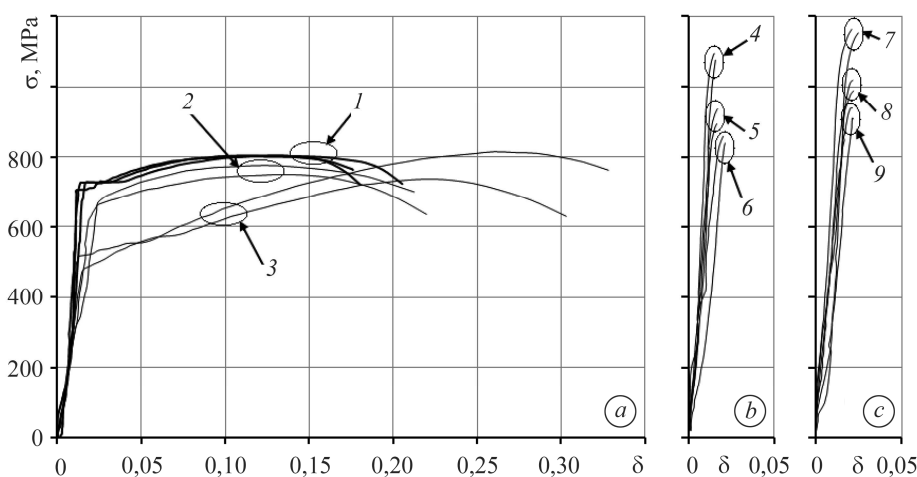


Рис. 4. Діаграми деформування зразків арматури з різними типами дефектів (див. таблицю): 1 – W01, W02, W03; 2 – GH1, GH2; 3 – GQ1, GQ2; 4 – M21, M22; 5 – D21, D22; 6 – S21, S22; 7 – M61, M62; 8 – D61, D62; 9 – S61, S62.

Fig. 4. Diagrams of rebar specimens deformation with various types of defects (see table): 1 – W01, W02, W03; 2 – GH1, GH2; 3 – GQ1, GQ2; 4 – M21, M22; 5 – D21, D22; 6 – S21, S22; 7 – M61, M62; 8 – D61, D62; 9 – S61, S62.

Діаграми деформування зразків з надрізами, які мають типовий для крихкого руйнування вигляд, показано на рис. 4*b, c*. Вплив радіуса надрізу виявили, по-

рівнявши діаграми деформування на рис. 4b з відповідними на рис. 4с. Як бачимо, критичні напруження для зразків з радіусом надрізів 6 mm дещо більші (в середньому на 5%), ніж з радіусом 2 mm.

Результати випробувань арматурних стрижнів з дефектами

Зразок	Тип дефекту	R, mm	P, kg	δ	F_0	F_k	σ^*	S_k
					mm ²		MPa	
W01	Непошкоджена арматура	∞	25639	0,192	314	186	801	1351
W02			25703	0,219	314	188	803	1340
W03			25735	0,202	314	214	804	1178
S21	Односторонній надріз 1/2D	2	16250	0,021	190	180	839	885
S22			15131	0,020	173	160	858	927
D21	Двосторонній надріз 1/4D	2	17315	0,011	190	178	894	953
D22			19846	0,014	208	196	936	992
M21	Три двосторонні надрізи 1/4D	2	11627	0,016	106	101	1076	1128
M22			18066	0,015	162	152	1094	1165
S61	Односторонній надріз 1/2D	6	15995	0,013	173	162	907	968
S62			15028	0,018	157	146	939	1009
D61	Двосторонній надріз 1/4D	6	28669	0,022	276	258	1019	1089
D62			20970	0,022	208	198	989	1038
M61	Три двосторонні надрізи 1/4D	6	19024	0,025	162	153	1152	1219
M62			19189	0,042	162	156	1162	1205
GH1	Вирізи 100 mm 1/2D	∞	12403	0,244	157	79	775	1539
GH2			11987	0,263	157	69	749	1703
GQ1	Вирізи 100 mm 1/4D	∞	21076	0,361	254	118	814	1750
GQ2			17880	0,347	238	105	737	1669

Вплив кількості надрізів проявляється однаково для зразків з надрізами радіусом 2 і 6 mm. Їх збільшення підвищує критичні напруження σ^* , зокрема, для зразків з двостороннім надрізом вони більші на 5%, ніж з одностороннім, а для зразків з потрійним двостороннім надрізом на 10% більші, ніж з одиночним двостороннім. Критична деформація зразків при цьому змінюється в межах розкиду експериментальних даних. Це свідчить про те, що система дефектів типу надрізів є менш небезпечною для арматури у залізобетонній конструкції, ніж одиночний глибокий дефект. Подібний результат отримано [10, 11] для системи тріщин у нескінченній пластині, де показано, що коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині одиночної тріщини вищий, ніж за системи таких тріщин за однакового навантаження.

Вплив дефектів на міцність арматури оцінювали також за критичними істинними напруженнями S_k , які обчислювали за формулою

$$S_k = P/F_k,$$

де P – критичне зусилля, F_k – площа зламу зразка.

Обчисливши площу зламів зразків (див. таблицю), визначили критичні істинні напруження (рис. 5). Як бачимо, для зразків з надрізами радіусом 2 і 6 mm (зразки S21...M62) істинні напруження S_k мало відрізняються від умовних σ^* . Це

пояснюється тим, що ці зразки зруйнувалися крихко, без значного зменшення площі робочого перерізу. Для зразків з вирізами (GH1...GQ2) та суцільної арматури (W01...W03) істинні напруження у 1,5–2 рази більші за умовні, оскільки ці зразки руйнувалися після суттєвого звуження у робочій зоні – утворення шийки. Ці результати вказують на доцільність використання істинних напружень для оцінювання несучої здатності арматури. Це дає можливість точніше встановити критичні навантаження для залізобетонної конструкції з дефектами, зокрема, за комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів [12, 13]. Переваги застосування істинних напружень для оцінювання напружено-деформованого стану також показано в праці [9].

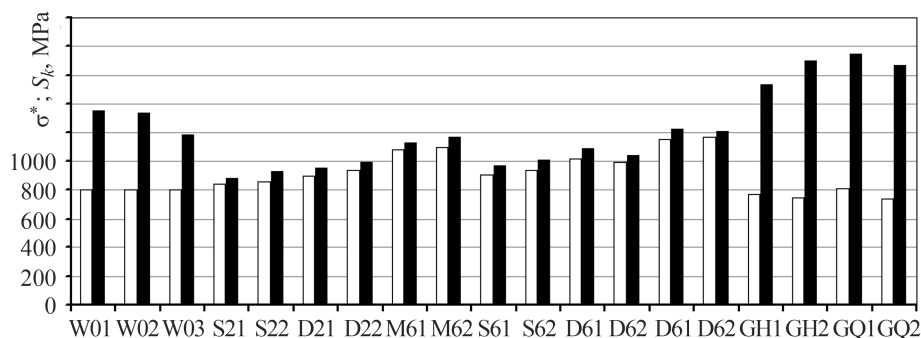


Рис. 5. Критичні умовні σ^* (□) та істинні S_k (■) напруження арматурних стрижнів з дефектами.

Fig. 5. Critical conditional σ^* (□) and true S_k (■) stresses of burs with defects.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що найнебезпечнішими для термозміцненого арматурного стрижня є одиночні дефекти типу надрізів з малим радіусом при вершині, оскільки вони створюють найвищу концентрацію напружень і понижують критичну деформацію арматури на базі 100 mm, що може бути причиною руйнування конструкції за дії навантаження. Система дефектів однакового розміру є менш небезпечною, ніж одиночний дефект, оскільки сприяє перерозподілу напружень і в цілому зменшує їх концентрацію, понижуючи імовірність спонтанного руйнування. Втрата арматурою зміцненого шару внаслідок корозії збільшує критичну деформацію арматури з одночасним зменшенням критичних напружень. Це призводить до зниження імовірності крихкого руйнування і зменшує жорсткість конструкції. Оцінювати залишкову міцність арматури з дефектами ліпше за істинними напруженнями, оскільки можна значно точніше встановити допустиме зовнішнє навантаження на конструкцію.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние формы и размеров дефектов на прочность стальной термоупрочненной арматуры. Построены диаграммы деформирования арматуры с различными типами дефектов. Впервые применен метод бинаризации изображений для вычисления площади изломов образцов арматуры с целью установления истинных критических напряжений. Установлено, что одиночные острые дефекты являются более опасными, чем система таких дефектов или одиночные длинномерные коррозионные дефекты. Показано преимущество использования истинных напряжений для оценки прочности арматуры.

SUMMARY. The influence of shape and size of the defects on strength of thermally hardened steel reinforcement is investigated. Stress-strain curves of reinforcement with different types of defects are built. For the first time a method of images binarization is used to calculate the fracture surface of specimens in order to establish true critical stresses. It has been found that

singular defects were more dangerous than the system of such defects, as well as long defects. The advantage of using true stresses for reinforcement bars strength evaluation is shown.

1. *ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.* – Введ. 01.01.86.
2. *Image segmentation based on the evaluation of the tendency of image elements to form clusters with the help of point field characteristics / R. J. Kosarevych, B. P. Rusyn, V. V. Korniy, T. I. Kerod // Cybernetics and Systems Analysis.* – 2015. – **51**, № 5. – P. 704–713.
3. *Комп'ютерний аналіз характерних елементів фрактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – **48**, № 4. – С. 53–60.
(*Computer analysis of the characteristic elements of fractographic images / R. Y. Kosarevych, O. Z. Student, L. M. Svirska, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // Materials Science.* – 2013. – **48**, № 4. – P. 474–481.)
4. *Beucher S. and Lantuejoul C. Use of watersheds in contour detection, International Workshop on image processing, real-time edge and motion detection/estimation.* – Rennes, 1979. – 12 p.
5. *Barnes R., Lehman C., and Mulla D. Priority-flood: an optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models // Computers & Geosciences.* – 2014. – **62**. – P. 117–127.
6. *Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bull. Acad. Polon. Sci.* – 1956. – **4**, № 12. – P. 801–804.
7. *Implementing continuous-scale morphology via curve evolution / G. Sapiro, R. Kimmel, D. Shaked, B. Kimia, A. M. Bruckstein // Pattern Recognition.* – 1993. – **26**, № 9. – P. 1363–1372.
8. *Suzuki S. and Abe K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Computer Vision, Graphics, and Image Processing.* – 1985. – **30**, № 1. – P. 32–46.
9. *Визначення механічних характеристик і питомої енергії руйнування термозміцненої арматури / К. Занг, Ю. В. Мольков, Ю. М. Собко, Я. З. Бліхарський, Р. Є. Хміль // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 6. – С. 50–54.
(*Determination of the mechanical characteristics and specific fracture energy of thermally hardened reinforcement / Q. Zhang, Yu. V. Mol'kov, Yu. M. Sobko, Ya. Z. Blikhars'kyi // Materials Science.* – 2015. – **50**, № 6. – P. 824–829.)
10. *Civelek M. B. and Erdogan F. Crack problems for a rectangular plate and an infinite strip // Int. J. of Fract.* – 1982. – **19**, № 2. – P. 139–159.
11. *Isida M. Effect of width and length on stress intensity factors of internally cracked plates under various boundary conditions // Int. J. of Fract. Mech.* – 1971. – **7**, № 3. – P. 301–316.
12. *Аналіз напружено-деформованого стану зони перед руйнування за двовісного навантаження пластины з центральною тріщиною / Du Yuanli, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський, Р. А. Ковальчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – **53**, № 1. – С. 78–83.
(*Analysis of the stress-strain state of the process zone of a plate with central crack under biaxial loading / Yu. Du, Yu. V. Mol'kov, T. M. Lenkovs'kyi, R. A. Koval'chuk // Materials Science.* – 2017. – **53**, № 1. – P. 86–92.)
13. *Іваницький Я. Л., Гембара О. В., Чепіль О. Я. Оцінювання довговічності елементів енергетичного обладнання з урахуванням впливу експлуатаційного середовища // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 1. – С. 93–101.
(*Ivanits'kyi Ya. L., Hembara O. V., and Chepil'O. Ya. Determination of the durability of elements of power-generating equipment with regard for the influence of working media // Materials Science.* – 2015. – **51**, № 1. – P. 104–113.)

Одержано 14.12.2017