

ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ І ДЕФОРМАТИВНОСТІ ТЕРМОЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ

Я. З. БЛІХАРСЬКИЙ¹, О. П. МАКСИМЕНКО²

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

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

Досліджено зміну міцнісних і деформаційних характеристик різних структурних шарів термозміцненої арматури А500С. Побудовано умовні та істинні діаграми руйнування за розтягу циліндричних зразків різного структурного стану, виготовлених з арматурного стрижня. Встановлено зміну механічних характеристик арматурної сталі для різних структурних станів та показано їх особливості під час руйнування. Розраховано істинні напруження руйнування арматурної сталі А500С за істинними деформаціями, визначеними методом цифрової кореляції зображень для різного структурного стану матеріалу арматури.

Ключові слова: *термозміцнена арматурна сталь А500С, істинні напруження, істинна деформація, цифрова кореляція зображень.*

The strength characteristics of different structural layers of heat-strengthened rebar steel А500С are studied. The analysis of the true fracture diagrams are received in experiments for specimens with different diameters, which contain a combination of different structural layers of the investigated rebar steel showed a change in their strength by 25% and deformability by 34%. The coefficient of transverse narrowing is calculated in the neck area, that varied depending on the diameter of the specimen from 0,3 for a solid rebar to 0,48 for grinded rebar with a diameter of 10 mm, which does not contain heat-strengthened and transition layers.

Keyword: *heat-strengthened rebar steel А500С, true deformation, true stress, digital image correlation.*

Вступ. Арматурну сталь широко використовують для виготовлення залізобетонних конструкцій. Щоб суттєво підвищити її міцність та морозостійкість, застосовують поверхневу термічну обробку, створюючи термозміцнений шар завтовшки до 3 mm [1]. В результаті технологічної поверхневої термічної обробки міцність і деформаційні характеристики в поперечному перерізі є змінні. Внаслідок механічних пошкоджень або зварювання пошкоджується термозміцнений шар і виникають ділянки, де опір матеріалу деформуванню знижується до 10...20% [2]. З огляду на тривалий термін експлуатації, а також вплив агресивного середовища на залізобетонні конструкції, необхідно достовірно оцінювати ступінь зниження їх механічних характеристик за руйнування термозміцненого шару і враховувати його під час встановлення їх залишкового безпечного ресурсу. Беручи до уваги, що такі зміни виникають у визначених обмежених об'ємах металу, зі значною концентрацією напружень і деформацій, таку оцінку міцності необхідно робити на основі локальних підходів.

Мета роботи – оцінити вплив характеристик міцності і деформативності різних структурних зон термозміцненої арматури А500С на опір руйнуванню, щоб враховувати його під час встановлення допустимих експлуатаційних навантажень на залізобетонні конструкції.

Контактна особа: О. П. МАКСИМЕНКО, e-mail: maksymenko@ipm.lviv.ua

Методика досліджень. Випробовували циліндричні зразки, виготовлені із термозміцненої арматури А500С з початковим зовнішнім діаметром 20 mm. Середню частину арматурного стрижня проточували на довжину $l = 100$ mm до різних діаметрів D_i (див. таблицю), дотримуючись вимог ДСТУ за випробування на розтяг [3]. Під час випробувань реєстрували зусилля навантаження, а також зміни у зображенні проточеної ділянки поверхні зразка кожні 0,5 s, поступово навантажуючи зразок до розриву. Також визначали видовження робочої частини зразка цифровим індикатором. Методика досліджень передбачала встановлення локальних істинних деформацій та напружень на основі обробки зареєстрованих зображень методом цифрової кореляції (ЦКЗ) [4].

D , mm	F_0 , m ² ×10 ⁻⁶	$\sigma_{0,2}$	σ_B	S	e_y	k_{μ}
		MPa				
20	314	585	719	1370	0,89	0,30
19	284	552	665	1360	0,91	0,35
18	254	559	671	1328	0,93	0,37
17	227	555	665	1296	0,97	0,41
16	201	566	641	1285	1,08	0,42
15	177	491	622	1210	1,12	0,44
14	154	478	611	1180	1,18	0,47
13	133	469	599	1090	1,21	0,48
12	113	451	589	1022	1,34	0,48
11	95	448	575	981	1,37	0,48
10	79	440	563	975	1,41	0,48

Для реєстрації зображень використовували 9.1 Мр монохроматичну цифрову камеру “Grasshopper 3” фірми Flir з об’єктивом Computar F25\2.8. Камеру разом з двома освітлювачами розміщували на платформі, яку кріпили до нижньої станини навантажувальної машини Р-100. Відстань від об’єктива до зразка 300 mm, при цьому на зареєстрованих зображеннях спостерігали всю проточену ділянку зразка. Для реєстрації зусилля з давача тиску навантажувальної машини використовували цифровий перетворювач Е14-440 з програмним комплексом PowerGraph. Експериментальна установка показана на рис. 1.

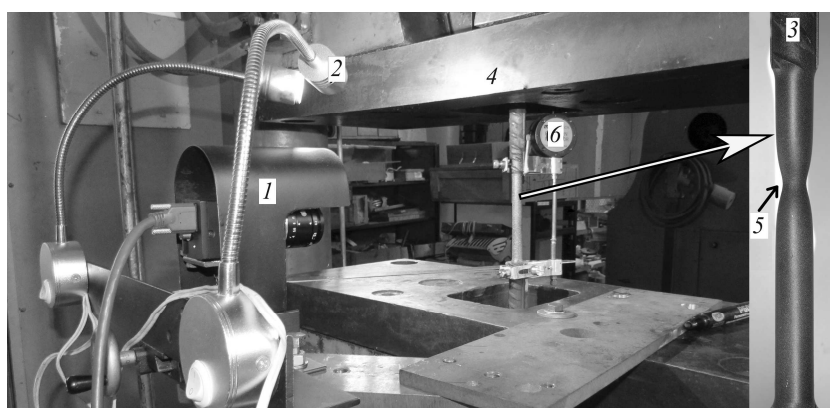


Рис. 1. Експериментальна установка: 1 – цифрова камера; 2 – лампи освітлення; 3 – зразок; 4 – захоп випробувальної машини; 5 – зона шийки; 6 – цифровий індикатор.

Fig. 1. Experimental setup: 1 – digital camera; 2 – lighting lamp; 3 – specimen; 4 – testing machine grippers; 5 – neck area; 6 – digital indicator.

Застосування методу ЦКЗ дало можливість визначити як загальне видовження зразка в осьовому напрямку, так і звуження проточеної ділянки. За допомогою віртуальних екстензометрів визначали переміщення поверхні матеріалу в області шийки, за якими розраховували локальні деформації у двох напрямках ϵ_x і ϵ_y , на різних базах вимірювання за різного ступеня деформування. Такі вимірювання дали змогу встановити деформації та їх співвідношення у локальному об'ємі у двох напрямках, а також об'єм матеріалу, де можна їх вважати однорідними і незалежними від бази вимірювання. За результатами обробки зареєстрованих зображень визначили не тільки локальні деформації, а і зміну діаметра шийки під час навантаження, що дало змогу розрахувати істинні напруження з врахуванням зміни площі поперечного перерізу зразка під час навантаження.

За пружного та пружно-пластичного деформування значення істинних напружень розраховують за різними методами. Зокрема, за методом Bridgmana [5] для встановлення істинних напружень у місці утворення шийки, де в матеріалі виникає тривісний напружено-деформований стан, враховують зміну геометрії зразка через введення коригувального коефіцієнта. Описано [6] низку аналітичних і експериментально-числових підходів для встановлення істинних напружень в місці утворення шийки та побудови істинних діаграм руйнування матеріалу. Водночас недостатня їх обґрунтованість та специфіка поведінки різних пружно-пластичних матеріалів вимагає подальших досліджень. Нижче отримано повні рівноважні діаграми та зміну розподілу деформацій в області шийки методом ЦКЗ, встановлено оптимальну базу вимірювання деформацій та розраховано істинні напруження з врахуванням кінетики зміни поперечного перерізу в локальному об'ємі, де напружено-деформований стан є однорідний для різних структурних зон термозміцненої арматури.

На основі аналізу отриманих експериментально змін видовження Δ_i від бази вимірювання b_i за розтягу циліндричних зразків сталі А500С різного діаметра встановлено, що деформація $\epsilon_i = \frac{\Delta_i}{b_i}$, розрахована на базі $b = 1$ mm, є оптималь-

ною для оцінки локальних деформаційних характеристик досліджуваного матеріалу. Раніше дослідження для вибору оптимальної бази вимірювання показали суттєву її залежність від розміру зерна матеріалу і схеми навантаження [7]. Загалом мінімальну базу вимірювання визначає мінімальний об'єм матеріалу, де можна вважати, що формується однорідний напружено-деформований стан.

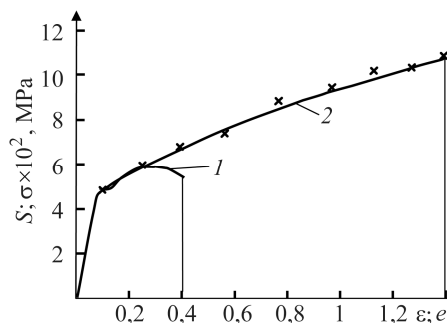
Істинні напруження, в т.ч. після утворення шийки, визначено з врахуванням зміни діаметра шийки d_i за формулою $S = P_i / F_i$, де P_i – навантаження; $F_i = \pi d_i^2 / 4$ – істинна площа поперечного перерізу. Діаметр шийки визначали за зареєстрованими зображеннями, використовуючи спеціально розроблені алгоритми обробки.

Результати досліджень. За результатами експериментальних досліджень побудовано повну діаграму деформування в координатах “ P - Δ ” для різних баз вимірювання видовження, яке визначали методом ЦКЗ. Площа під цією діаграмою виражає роботу, виконану зусиллям P за деформування об'єму зразка висотою Δ_i [8]. На основі отриманих результатів будували класичну діаграму руйнування в координатах напруження–деформації (σ - ϵ), а також істинну діаграму руйнування в координатах істинні напруження S –істинна деформація e (S - e). На рис. 2 наведено діаграми σ - ϵ (крива 1, база визначення деформацій 100 mm), а також S - e (крива 2, база 1 mm), отримані за результатами випробувань зразка $D = 14$ mm, виготовленого із арматури А500С.

Під час аналізу отриманих результатів встановлено, що істинні напруження S_i за запропонованим підходом на 20% перевищують напруження, розраховані на основі класичного підходу [5]. Значення отриманих істинних напружень корелюють із отриманими в праці [7] на основі локального критерію.

Рис. 2. Діаграми руйнування зразка $D = 14$ mm із арматурної сталі A500C:
1 – умовна; 2 – істинна.

Fig. 2. Fracture diagrams of the specimen $D = 14$ mm for rebar steel A500C:
1 – engineering; 2 – true.

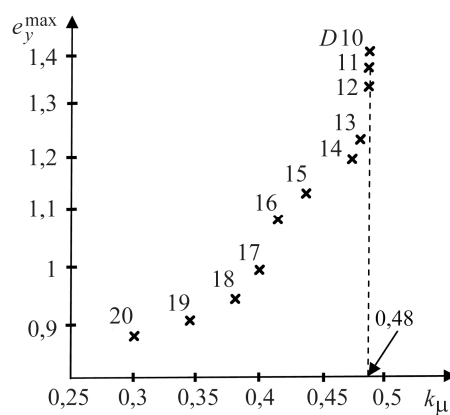


Результати досліджень з визначення характеристик міцності σ , S і деформативності e_x , e_y дали можливість встановити коефіцієнт поперечного звуження зразків $k_\mu = |e_x^{\max} / e_y^{\max}|$, який розрахований перед моментом руйнування. Результати, отримані під час випробування зразків різного діаметра, подано у таблиці.

Коефіцієнт поперечного звуження k_μ , який аналогічний коефіцієнту Пуассона, характеризує пружно-пластичні властивості матеріалу у шийці і змінюється залежно від діаметра зразка (рис. 3). Зокрема, для суцільної арматури A500C, яка містить всі структурні шари матеріалу, коефіцієнт поперечного звуження знаходиться у межах 0,3...0,37, а для внутрішніх шарів арматури, яким відповідають зразки діаметром 13...12 mm і які не мають термозміцнених і перехідних шарів, він досягає сталого значення 0,48 (рис. 3) Таким чином, термозміцнений шар в арматурі підвищує її міцність, але водночас знижує пластичні властивості.

Рис. 3. Залежність коефіцієнта поперечного звуження k_μ від деформацій руйнування e_y^{\max} для зразків різного діаметра D20...D10, виготовлених з арматурної сталі A500C.

Fig. 3. Dependence of the transverse narrowing coefficient k_μ on fracture deformations e_y^{\max} for specimens of different diameters D20...D10, made of rebar A500C steel.



ВИСНОВКИ

На основі отриманих результатів встановлено, що найвищим опором руйнуванню володіє повна арматура A500C з термозміцненим поверхневим шаром. Зниження міцності (S) на 25% і зростання деформативності (e_y) на 34% спостерігаємо для серцевини арматурного стрижня ($D = 10$ mm). Також встановлено, що для пружної зони деформування відношення поперечної e_x до поздовжньої e_y складових деформації становить 0,27, а у пластично-деформованому матеріалі

серцевини арматури за зменшення діаметра зразка, це відношення поступово зростає і досягає 0,48.

1. *Термомеханическое упрочнение арматурной стали полученной методом прокатки-разделения* / В. А. Шеремет, М. И. Костюченко, И. Н. Смияненко, Е. В. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 6. – С. 55–57.
2. *Бліхарський З. Я., Обух Ю. В.* Вплив механічних та корозійних пошкоджень на міцність термозміцненої арматури зі сталі 35ГС // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2018. – **54**, № 2. – С. 273–278.
(*Blikhars'kyi Z. Ya. and Obukh Y. V.* Influence of the mechanical and corrosion defects on the strength of thermally hardened reinforcement of 35GS steel // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 2. – P. 128–133.)
3. *ДСТУ EN 10002-1:2006* Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Ч. 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2001, IDT). – Введ. 01.07.2008.
4. *Максименко О. П., Франкевич Л. Ф., Сахарук О. М.* Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів // *Електроніка та інформаційні технології*. – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.
5. *Bridgman P. W.* *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. – New York: McGraw Hill, 1952. – 362 p.
6. *Stress-strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review* / S. Tu, X. Ren, J. He, and Z. Zhang // *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2020. – **43**. – P. 3–19.
7. *Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень* / Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, М. Войтович // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 4. – С. 18–24.
(*Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique* / Ya. L. Ivanyts'kyi, Yu. V. Mol'kov, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyi, M. Wójtowicz // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 4. – P. 488–495.)
8. *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.)

Одержано 22.07.2020