

АНІЗОТРОПІЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ А500С

Я. З. БЛІХАРСЬКИЙ

Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено зміну мікротвердості арматурного стрижня діаметром 20 mm зі сталі А500С в радіальному напрямку і встановлено товщину термозміцненого шару. Для оцінювання анізотропії характеристик міцності та пластичності за товщиною арматурного стрижня використали трубчасті зразки, робоча частина яких містила лише зміцнений шар стрижня, або лише матеріал серцевини. Побудовано умовні та істинні діаграми деформування за розтягу. Показано, що механічні характеристики матеріалу поверхневого шару арматурного стрижня суттєво відрізняються від характеристик його серцевини.

Ключові слова: арматура А500С, термозміцнений шар, серцевина, механічні властивості, трубчастий зразок.

Вступ. У сучасному монолітному та збірному залізобетонному будівництві замість арматури класу А400 використовують арматуру класу А500С та вищих класів [1]. Основними причинами цього є придатність арматурних стрижнів А500С до електродугового зварювання, а також те, що термомеханічне зміцнення низьковуглецевих сталей дає змогу отримати матеріал з унікальною композитною структурою, який поряд з високою міцністю поверхневого шару порівняно з арматурою А400 має пластичну серцевину, що знижує схильність до крихкого руйнування. Заміна марки арматури дає суттєвий економічний ефект, оскільки металоємність конструкцій знижується на 10...20%. Однак під час проектування виробів з поверхнево зміцненої арматури А500С необхідно враховувати анізотропію матеріалу арматурних стрижнів, яка визначає їх тривкість до статичних та циклічних навантажень, зміни температури та корозії [2–5], особливо за планування підсилення залізобетонних конструкцій, які експлуатуються [6–12]. Зокрема, під час математичного моделювання та розрахунків необхідно вважати арматурний стрижень шаруватим тілом з неоднорідною структурою та анізотропією механічних властивостей. Враховуючи особливості розрахунку залізобетонних конструкцій, армованих термозміцненою арматурою [13–15], метою роботи є визначити механічні характеристики окремих шарів стрижня зі сталі класу А500С за розтягу.

Методика досліджень. Товщину термозміцненого поверхневого шару арматурного стрижня А500С діаметром 20 mm встановлювали за результатами вимірювань мікротвердості в його поперечному перерізі. Шліф для цього готували з вирізаного поперек стрижня фрагмента арматури на полірувальному верстаті ВП-2. Мікротвердість визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М за навантаження на індентор 0,49 і 0,98 N. Щоб встановити оптимальне навантаження, як еталон використовували кристал кам'яної солі. Оптимальну кількість вимірів ($n = 3$) визначили на основі статистичної обробки результатів випробувань декількох типових мікрошліфів методом малих вибірок. Виявили, що зміна довір-

чого інтервалу виміру середнього значення мізерна, тобто збільшувати кількість вимірів недоцільно. За результатами вимірювань будували графічну залежність твердості від відстані до поверхні арматурного стрижня.

Для випробувань на розтяг використовували два види трубчастих зразків загальною довжиною $L = 140$ mm, товщиною стінки 3 mm і довжиною робочої зони $l = 60$ mm та 40 mm, виготовлених з термозміцненої арматури марки А500С діаметром 20 mm (рис. 1). Діаметри робочої зони зразків d і D вибирали так, щоб робоча зона містила лише поверхневий зміцнений шар арматури (рис. 1a), або лише матеріал серцевини (рис. 1b). Методом кореляції цифрових зображень (КЦЗ), ефективного під час визначення локальних деформацій як на гладких зразках [16], так і біля концентраторів напружень [17–20], вимірювали видовження зразка, створюючи на його поверхні анізотропний неповторюваний крапковий малюнок за допомогою еластичної аерозольної фарби білого кольору для тла та чорного для крапок.

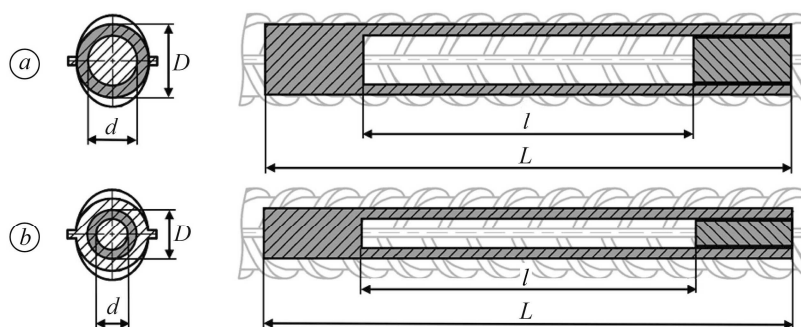


Рис. 1. Схема трубчастих зразків з арматури для визначення механічних характеристик зміцненого шару (a) та серцевини (b).

Fig. 1. Tubular reinforced concrete specimens for determination of mechanical characteristics of the hardened layer (a) and the core layer (b) (schematically).

Трубчасті зразки розтягували на розривній машині EUS-20 (рис. 2) до руйнування за швидкості переміщення рухомої траверси 2 mm/min. Зусилля навантаження вимірювали вбудованим динамометром машини. Сигнал від динамометра за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) реєстрували персональним комп'ютером. Частота реєстрації становила 1 Hz. За результатами випробувань будували діаграми деформування зразків у координатах умовні напруження σ –відносна деформація δ на базі робочої довжини зразка. Паралельно промисловою цифровою камерою Tourcam UCMOS 10000KPA реєстрували зображення поверхні зразка під час його деформування. Роздільна здатність зображень 10 MP (3584×2748 точок). Під час навантаження серійно фотографували ділянку поверхні зразка, причому перший кадр відповідав початку навантаження, а частота зйомки 1 fps рівна частоті реєстрації зусилля навантаження за допомогою АЦП. Така частота дала можливість з достатньою точністю встановити для кожного зображення зусилля, прикладене до зразка у момент його реєстрації, а також була достатньою для фіксування зображення у момент, близький до руйнування зразка. Зображення використовували для обробки методом КЦЗ. В результаті встановили розподіл переміщень і деформацій у зоні утворення шийки на кожному етапі навантаження.

Істинні напруження у перерізі трубчастого зразка в місці утворення шийки визначали за формулою

$$S_i = P_i / F_i, \quad (1)$$

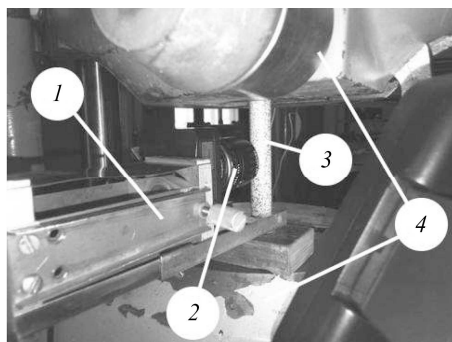
де P_i – миттєве значення зусилля навантаження; F_i – миттєве значення площі поперечного перерізу трубчастого зразка, яке обчислюємо за формулою

$$F_i = \frac{\pi}{4} \left(D_i^2 - (D_i - 2b_0(-e_{zi}))^2 \right). \quad (2)$$

Тут D_i – миттєве значення зовнішнього діаметра зразка, яке визначаємо прямим вимірюванням методом КЦЗ; b_0 – початкова товщина стінки зразка; e_{zi} – миттєве значення деформації зразка в радіальному напрямку, яке за умов одновісного розтягу приймаємо рівним значенню колової деформації e_{xi} , яке визначаємо методом КЦЗ. За результатами вимірювань локальної деформації методом КЦЗ під час розтягу зразка та обчисленими за формулою (1) миттєвими значеннями істинних напружень будували істинні діаграми деформування у координатах істинні напруження S –локальна деформація e .

Рис. 2. Випробувальний стенд з можливістю застосування методу кореляції цифрових зображень:
1 – рухома платформа; 2 – цифрова камера;
3 – трубчастий зразок;
4 – захвати випробувальної машини.

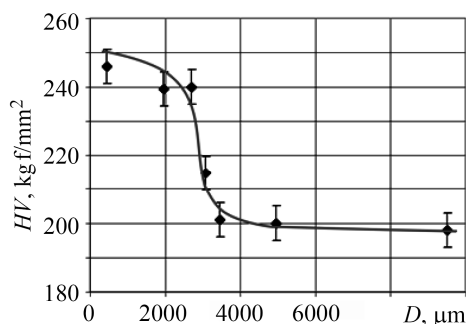
Fig. 2. Testing setup with the equipment for digital images correlation technique application: 1 – adjustable platform;
2 – digital camera; 3 – tubular specimen;
4 – testing machine grippers.



Результати досліджень. Графічний розподіл мікротвердості за товщиною арматурного стрижня А500С вказує на анізотропію механічних властивостей матеріалу в радіальному напрямку (рис. 3). Починаючи від поверхні стрижня і до відстані 2700 μm , мікротвердість знижується несуттєво – від 250 до 235 HV. Однак на відстані більшій за 2700 μm вона різко зменшується. Від 3450 μm і аж до серцевини стрижня мікротвердість змінюється мало і коливається в межах 195...205 HV.

Рис. 3. Розподіл мікротвердості поперечного січення арматурного стрижня А500С від його поверхні до серцевини.

Fig. 3. Microhardness distribution of the cross-section of A500S rebar from its surface to the core surface.



З огляду на це, можна умовно виокремити три шари матеріалу арматурного стрижня. Шар матеріалу від поверхні до глибини 2,7 mm вважаємо термозміцненим, далі маємо перехідний шар товщиною 0,8 mm, а від глибини 3,5 mm до осі стрижня – однорідний матеріал серцевини. Базуючись на результатах вимірювання мікротвердості, для випробувань розтягом виготовили трубчасті зразки двох видів – зі зовнішнім діаметром $D = 18$ mm та 12 mm, робоча зона яких містила лише зміцнений шар, або лише матеріал серцевини стрижня, відповідно (рис. 4).

В результаті випробувань отримано умовні та істинні діаграми деформування різних шарів арматури (рис. 5). На умовній діаграмі деформування матеріалу серцевини спостерігаємо ділянку та “зуб” текучості, який відсутній для термо-

зміцненого шару. Як умовна, так і істинна діаграма деформування матеріалу термозміцненого шару лежать значно вище, ніж для матеріалу серцевини, однак останній має менші відносне видовження і критичну локальну деформацію.

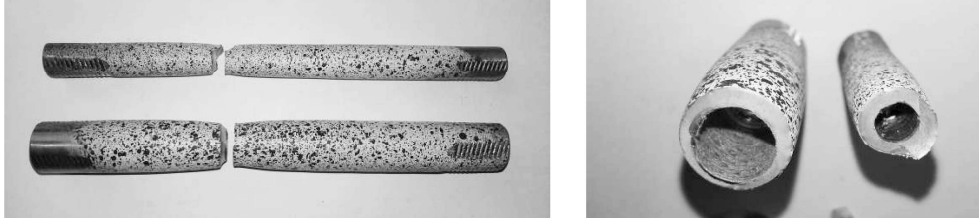


Рис. 4. Трубчасті зразки після випробувань розтягом.

Fig. 4. Tubular specimens after tensile testing.

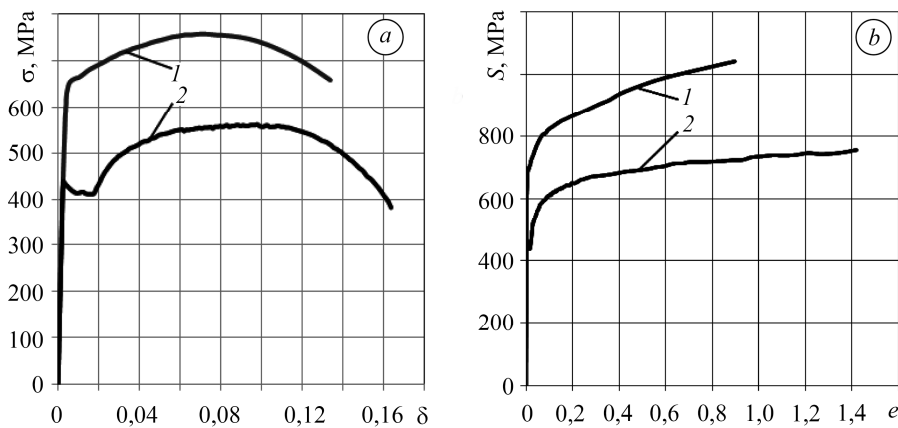


Рис. 5. Умовні (а) та істинні (б) діаграми деформування матеріалів зміцненого шару (1) та серцевини арматури (2).

Fig. 5. Engineering (a) and true (b) stress-strain curves of the rebar hardened layer (1) and the core material (2).

На основі побудованих діаграм визначили механічні характеристики матеріалу шарів арматури (див. таблицю). Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ матеріалу зміцненого шару більша майже в 1,5 рази порівняно з матеріалом серцевини. Границя міцності σ_T є більшою на $\sim 35\%$, як і істинний опір розриву R_m . Найбільш структурно-чутливою характеристикою матеріалу є критична локальна деформація e_m , яка є на 60% менша для матеріалу зміцненого шару порівняно з матеріалом серцевини.

Механічні характеристики матеріалу арматури А500С

Матеріал	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Границя міцності σ_T , МПа	Опір розриву R_m , МПа	Відносне видовження δ , %	Критична локальна деформація e_m	Мікротвердість HV, kgf/mm ²
Зміцнений шар	650	760	1040	13,4	0,89	242
Серцевина	440	560	760	16,4	1,42	200
Суцільна арматура	570	650	920	15,3	0,95	—

Порівнюючи ці характеристики з усередненими, визначеними для суцільного арматурного стрижня з трьома шарами матеріалу, бачимо, що його міцність та пластичність займає проміжне положення, що узгоджується з результатами попередніх досліджень [16].

За відношенням $\sigma_T/\sigma_{0,2}$ можна прогнозувати тенденції опірності матеріалів термозміцненого шару та серцевини руйнуванню за циклічних навантажень, тобто в умовах втоми. Так, для термозміцненого шару воно становить 1,17, а для матеріалу серцевини – 1,27. Отже, згідно з працею [21], матеріал термозміцненого шару є циклічно знеміцнений ($\sigma_T/\sigma_{0,2} < 1,2$), а матеріал серцевини – циклічно стабільний ($1,2 > \sigma_T/\sigma_{0,2} > 1,4$), а значить, термозміцнений шар є більш схильним до утворення втомних тріщин, що слід враховувати під час інженерних розрахунків.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що товщина термозміцненого шару металу арматурного стрижня діаметром 20 mm зі сталі А500С становить ~ 3 mm. Показано, що характеристики міцності цього шару є на ~ 50% вищі порівняно з матеріалом серцевини стрижня, водночас характеристики пластичності нижчі. Це вказує на необхідність під час інженерних розрахунків вважати термозміцнений арматурний стрижень двофазним суцільним тілом та враховувати відмінність механістичної поведінки цих фаз за дії силового навантаження.

РЕЗЮМЕ. Исследовано изменение микротвердости арматурного стержня диаметром 20 mm из стали А500С в радиальном направлении и установлена толщина термоупрочненного слоя. Для оценки анизотропии характеристик прочности и пластичности по толщине арматурного стержня использовали трубчатые образцы, рабочая часть которых содержала либо упрочненный слой стержня, либо материал сердцевинны. Построены условные и истинные диаграммы деформирования при растяжении. Показано, что механические характеристики материала поверхностного слоя арматурного стержня значительно отличаются от характеристик его сердцевинны.

SUMMARY. The microhardness distribution of the 20 mm rebar made of А500S steel in a radial direction is investigated and the thickness of the hardened layer is established. To evaluate the anisotropy of the strength and plasticity characteristics of a rebar, tubular samples are used the gauge section of which contains either only a hardened layer or only a core material. Engineering and true stress-strain curves under tensile testing are constructed. It is shown that mechanical characteristics of the hardened layer of the rebar are significantly different from those of its core.

1. *Bearing capacity of RC beams reinforced with high strength rebars and steel plate / T. Bobalo, Y. Blikharskyu, R. Vashkevich, M. Volynets // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 230. – P. 02003.*
2. *Selejdak J., Khmil R., and Blikharsky Z. The influence of simultaneous action of the aggressive environment and loading on strength of RC beams // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 183. – P. 02002.*
3. *Pradhan B. and Bhattacharjee B. Rebar corrosion in chloride environment // Construction and Building Materials. – 2011. – 25, № 5. – P. 2565–2575.*
4. *Kos Ž., Gotal L., and Klimenko E. Developing a model of a strain (deformation) of a damaged reinforced concrete pillar in relation to a linear load capacity // Tehnički glasnik. – 2017. – 11, № 4. – P. 150–143.*
5. *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. 128–133.*
(*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.*)
6. *Experimental study of the strengthening effect of reinforced concrete columns jacketed under service load level / P. Krainskyi, Y. Blikharskyu, R. Khmil, Z. Blikharskyu // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 183. – P. 02008.*

7. *Influence of loading level on the bearing capacity of RC columns strengthened by jacketing* / P. Krainskyi, Y. Blikharskyi, R. Khmil, P. Vegeera // MATEC Web of Conferences. – 2018. – **230**. – P. 02013.
8. *Brózda K., Selejdak J., and Koteš P.* The analysis of beam reinforced with FRP bars in bending // Procedia Engineering. – 2017. – **192**. – P. 64–68.
9. *Development of the procedure for the estimation of reliability of reinforced concrete beams, strengthened by building up the stretched reinforcing bars under load* / R. Khmil, R. Tytarenko, Y. Blikharskyi, P. Vegeera // Eastern-European J. of Enterprise Technologies. – 2018. – **95**, № 5/7. – P. 32–42.
10. *Blikharskyi Z., Khmil R., and Vegeera P.* Shear strength of reinforced concrete beams strengthened by P.B.O. fiber mesh under loading // MATEC Web of Conf. – 2017. – **116**. – P. 02006.
11. *Vegeera P., Vashkevych R., and Blikharskyi Z.* Fracture toughness of RC beams with different shear span // MATEC Web of Conf. – 2018. – **174**. – P. 02021.
12. *Fracture toughness of RC beams on the shear, strengthening by FRCM system* / Z. Blikharskyi, P. Vegeera, R. Vashkevych, T. Shnal // MATEC Web of Conf. – 2018. – **183**. – P. 02009.
13. *The increase of seismic stability for existing industrial buildings* / A. Kramarchuk, B. Ilnytskyi, O. Lytvyniak, A. Grabowski // AIP Conf. Proceedings. – 2019. – **2077**. – P. 020029.
14. *Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement* / J. Cairns, G. A. Plizzari, Du Yingang, D. W. Law, C. Franzoni // ACI Materials J. – 2005. – **102**, № 4. – P. 102–129.
15. *Rafi M. M., Lodi S. H., and Nizam A.* Chemical and mechanical properties of steel rebars manufactured in Pakistan and their design implications // J. of Materials in Civil Engng. – 2014. – **26**, № 2. – P. 338–348.
16. *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.)
17. *Аналіз напружено-деформованого стану зони передруйнування 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.)
18. *Вплив водню на опірність руйнуванню листової сталі 65Г* / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штайюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 4. – С. 36–40.
(*Influence of hydrogen on the fracture resistance of 65G sheet steel* / Ya. L. Ivanyts'kyi, S. T. Shtayura, Yu. V. Mol'kov, T. M. Lenkovs'kyi // Materials Science. – 2012. – **47**, № 4. – P. 457–461.)
19. *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. 8–24.
(*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.)
20. *Визначення характеристик тріщиностійкості сталі 17Г1С за поперечного зсуву* / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штайюра, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков // Фіз.-хім. механіка матеріалів – 2013. – **49**, № 5. – С. 73–78.
(*Determination of the parameters of crack resistance for 17G1S steel under transverse shear* / Ya. L. Ivanyts'kyi, S. T. Shtayura, T. M. Lenkovs'kyi, Yu. V. Mol'kov // Materials Science. – 2014. – **49**, № 5. – P. 637–643.)
21. *Терентьев В. Ф.* Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2003. – 254 с.

Одержано 09.10.2018