

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТЕРМОЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ ТА ЇЇ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ЗА МІКРОТВЕРДІСТЮ

Я. З. БЛІХАРСЬКИЙ

Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено зміну фізико-механічних характеристик термозміцненої арматури методом вальцювання з розділенням. Встановлено значення істинних напружень та деформацій для різних зон арматури. Досліджено зміну мікротвердості в поперечному перерізі термозміцненої арматури та зварного з'єднання. Показано, що зварювання змінює структуру термозміцненого шару та послаблює механічні характеристики в локальному об'ємі. Побудовано істинні діаграми руйнування для різних зон термозміцненої арматури. Показано кореляцію між мікротвердістю та напруженнями пластичності для середньої зони.

Ключові слова: *термозміцнена арматура, мікротвердість за Вікерсом, зварне з'єднання, напруження пластичності, істинна деформація, істинні напруження, метод цифрових кореляцій зображень.*

The change of physical and mechanical characteristics of thermally strengthened rebar by the method of rolling with separation is investigated. The values of true stresses and strains for different rebar zones are established. The change in microhardness in the cross-section of the thermally strengthened rebar and a welded joint is investigated. It is shown that welding changes the structure of the thermally-strengthened layer and weakens the mechanical characteristics in the local volume. True failure diagrams are constructed for different zones of thermally-strengthened rebars. The correlation between microhardness and yield strengths for the middle zone is shown.

Keywords: *thermally-strengthened rebar, microhardness according to Vickers method, welded joint, yield strength, true strain, true stresses, digital image correlation method.*

Вступ. Для армування залізобетонних конструкцій широко використовують термозміцнену арматуру та її зварні з'єднання [1]. Термозміцнення арматури реалізують методом вальцювання з розділенням через нагрівання і різке охолодження [2]. В поверхневому шарі відбуваються зміни структури, яка характеризується сумішшю бейніту і мартенситу. В центральній зоні формується структура фериту і перліту. Технологія виготовлення каркасу залізобетонних виробів охоплює приварювання до термозміцненої арматури поперечних стрижнів. В результаті у поверхневому шарі несучої термозміцненої арматури змінюються механічні характеристики в локальному об'ємі. Оцінити ці зміни та визначити механічні характеристики на основі стандартних методів у зоні зварювання неможливо. Для цього необхідно використати підхід, який базується на встановленні залежностей між мікротвердістю в локальному об'ємі та механічними характеристиками.

Дослідження [2] показали, що зварюваність термічно зміцненої сталі є задовільною, а знеміцнення при цьому становить 5...9%. Показано, що корозійна тривкість такої арматури в морському середовищі знижується на 5...9%.

Нижче досліджено та встановлено зміни мікротвердості термозміцненої арматури для поперечного перерізу та зони зварного з'єднання. Визначено механіч-

ні характеристики різних зон арматурних стрижнів та встановлено кореляційні залежності з мікротвердістю.

Методика досліджень. Досліджували міцність і мікротвердість термозміцненої сталі A500C \varnothing 20 mm для різних зон. Для визначення мікротвердості в поперечному перерізі виготовляли фрагменти заввишки 20 mm із арматурного стрижня, а також зі зварного з'єднання. Підготували шліфи на полірувальному верстаті ВП-2. За допомогою приладу ПМТ-3М визначали мікротвердість на фрагменті із арматури, а також зі зварного з'єднання. У двох напрямках (рис. 1) встановлювали зміну мікротвердості в перерізі термозміцненої арматури (А–А), у зоні зварного з'єднання в арматурі \varnothing 20 mm (В–В) та у привареному перпендикулярно стрижні \varnothing 10 mm (С–С). За результатами вимірювань мікротвердості виявлені зони, де відбувались зміни. Наступний етап – випробування циліндричних зразків з різними зонами мікротвердості на розтяг для визначення механічних характеристик у локальних об'ємах з використанням методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [2–5]. Для цього проточували термозміцнену арматуру до діаметрів, що відповідають зміні мікротвердості. Значення істинних деформацій визначали за розтягу проточених зразків на довжину 100 mm. При цьому реєстрували зусилля розтягу на комп'ютері та синхронно зображення поверхні проточеної ділянки. За зареєстрованими зображеннями оцінювали видовження та розраховували відносну деформацію, дотримуючись вимог ДСТУ та рекомендації [3–6].

Зображення деформівної поверхні зразка реєстрували монохроматичною цифровою камерою Grasshopper 3 з об'єктивом Gomputar F25/2.8, яка встановлена на спеціальному пристрої випробувальної установки EUS-20, а зусилля розтягу – за показами давача тиску випробувальної установки з допомогою цифрового перетворювача E14-440 з програмним комплексом Power Graph. Визначали загальне видовження зразка та встановлювали деформації у двох координатах ϵ_x і ϵ_y . За результатами випробувань будували повні рівноважні діаграми та визначали напруження розтягу. Істинні напруження визначали як відношення зусилля розтягу до біжучої площі поперечного перерізу у поточний момент часу, яку розраховували за результатами ЦКЗ [3]. Отримані значення істинних напружень та деформацій для різних зразків за цим підходом використовували для встановлення кореляції між напруженнями, отриманими шляхом визначення мікротвердості відповідної зони, та напруженнями, знайденими за розтягу зразків. За встановленою мікротвердістю у зрізі зварного з'єднання можна оцінювати область в околошовній локальній зоні, де змінюються механічні характеристики. За зміною напружень у зоні зварювання можна встановити зниження міцності арматурного стрижня, що необхідно враховувати під час розрахунку ресурсу роботи залізобетонної балки.

Результати досліджень. Розподіл мікротвердості для термозміцненої арматури A500C у поперечному перерізі прутка \varnothing 20 mm (лінія А–А, рис. 1) подано на рис. 2а. Максимальне значення мікротвердості до 300 HV спостерігали у при-

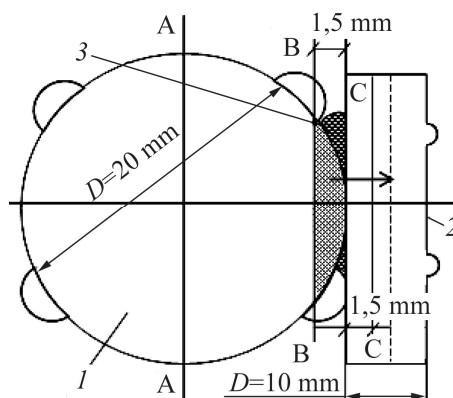


Рис. 1. Схема вимірювання мікротвердості в термозміцненій арматурі і зварному з'єднанні: 1 – основна; 2 – поперечна; 3 – зварний шов.

Fig. 1. Scheme of microhardness measurement in a thermally strengthened rebar and a welded joint: 1 – main; 2 – transverse; 3 – weld.

поверхневому шару товщиною до 2 мм, де структура характеризується сумішшю бейніту і мартенситу, що відповідає площі обмеженій діаметром 20...16 мм. Наступний перехідний шар завтовшки ~3 мм знаходиться в зоні від 16 до 10 мм зі змінною мікротвердістю від 250 до 200 HV. Решта площі в поперечному перерізі належить до середньої зони з однаковою мікротвердістю 200 HV і обмежена \varnothing 10 мм, що відповідає структурі перліту. Аналогічно досліджували мікротвердість у зоні зварного шва (рис. 2b).

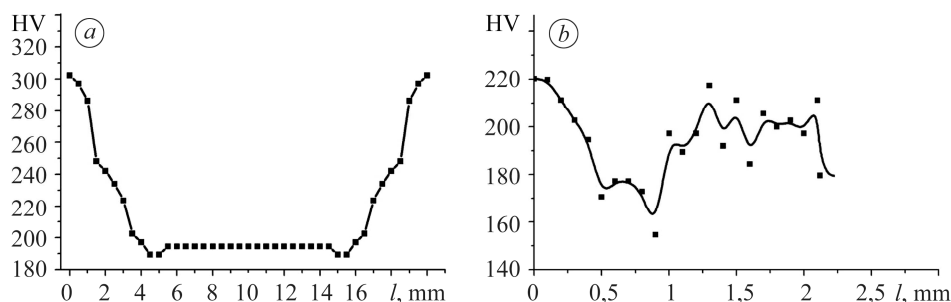


Рис. 2. Розподіл мікротвердості в термозміцненій арматурі (лінія А–А, рис. 1) (a) та в зоні зварювання (В–В) (b).

Fig. 2. Distribution of microhardness in the thermally-strengthened rebar (line A–A, Fig. 1) (a) and in the welding zone (B–B) (b).

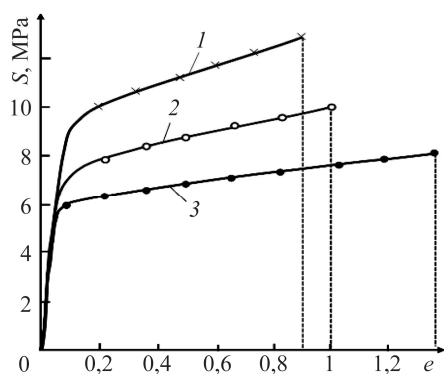


Рис. 3. Істинні діаграми руйнування зразків арматури: 1 – арматура $D = 20$ mm; 2 – 16 mm; 3 – 10 mm.

Fig. 3. True diagrams of fracture of rebar samples: 1 – rebar with $D = 20$ mm; 2 – 16 mm; 3 – 10 mm.

перечної арматури (С–С, рис. 1). Для визначення характеристик опору руйнуванню та деформуванню різних зон термозміцненої арматури випробовували циліндричні зразки. Одну партію зразків виготовляли зі суцільної арматури, другу – проточували до \varnothing 16 mm, а третю до $D = 10$ mm.

Результати випробувань та визначені характеристики для трьох партій зразків подані у вигляді діаграми руйнування “істинні напруження–істинна деформація” на рис. 3 та у таблиці.

Для середньої зони, де матеріал у поперечному перерізі однорідний за структурою і механічними властивостями, підтверджується зв'язок між мікротвердістю за Вікерсом HV та границею плинності, $3 HV = \sigma_{0,2}$ [7]. Зокрема, для серцевини напруження плинності за розтягу арматури проточеної до $D = 10$ mm стано-

Вимірювали мікротвердість у цій зоні для встановлення її впливу на зміну структури основної термозміцненої арматури після приварювання поперечного стрижня. Результати вимірювань мікротвердості в зоні зварного шва (рис. 2b) свідчать, що на глибині до 3 mm мікротвердість поверхнього шару основної ($D=20$ mm) термозміцненої арматури зменшується до 200 HV і досягає значення, характерного для середньої зони ($D=10$ mm), та відповідає структурі перліту. Тобто під час приварювання поперечної арматури мікротвердість термозміцненої арматури в поверхневому шарі змінилась. Отже, фізико-механічні характеристики арматури в локальному об'ємі знизилась. Аналогічну картину зміни мікротвердості в межах до 200 HV спостерігали в зоні зварного шва для по-

вить $\sigma_{0,2} = 598$ МПа, що практично збігається зі значеннями, встановленими за апроксимаційною залежністю. Границя плинності для термозміцненої арматури, визначена за мікротвердістю, відрізняється від встановленої за розтягу суцільного стрижня, а також проточеного до $D = 16$ mm, оскільки їх міцнісні і деформаційні характеристики є змінні у поперечному перерізі.

Механічні характеристики та мікротвердість для різних зон арматури

D, mm	$\sigma_{0,2}$	σ_B	S	e	HV
	МПа				
20	780	810	1360	0,88	300
16	720	770	1285	1,08	240
10	598	662	975	1,40	200

Встановлена мікротвердість у зоні зварного шва (В–В, рис. 1) практично збігається зі значеннями середньої зони. Це вказує на те, що міцнісні і деформаційні характеристики металу цієї області такі ж, як для середньої зони арматури. Істинні напруження S, визначені в локальному об'ємі методом ЦКЗ, для цієї зони відрізняються на 25...30% порівняно зі значеннями, отриманими для термозміцненої арматури. Приварювання поперечної арматури до несучої термозміцненої знижує її міцність в локальному об'ємі, що викликає підвищену концентрацію напружень у цій області. Це необхідно враховувати під час розрахунку напружено-деформованого стану та визначення довговічності залізобетонних конструкцій, армованих термозміцненою арматурою.

ВИСНОВКИ

Визначено розподіл мікротвердості термозміцненої арматури А500С та зварного з'єднання. Встановлено кореляційні залежності між мікротвердістю та границею плинності, визначеними з використанням методу ЦКЗ для середньої зони термозміцненої арматури. Встановлено, що міцність термозміцненої арматури в локальному об'ємі приварювання знижується на 25...30%.

1. *Strength of reinforced concrete beams strengthened under loading with additional reinforcement with different levels of its pre-tension* / В. Kovalchuk, Y. Blikharsky, J. Selejdak, Z. Blikharsky // *Lecture Notes in Civil Eng.* – 2021. – **100**. – Р. 227–236.
2. *Термомеханическое упрочнение арматурной стали, полученной методом прокатки-разделения* / В. А. Шеремет, М. И. Костюченко, И. Н. Смьяненко, Е. В. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2002. – № 6. – С. 55–57.
3. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – **40**, № 5. – С. 67–72.
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P. Analysis of the elastoplastic deformation of the material of the process zone* // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 5. – Р. 67–72.)
4. *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. – Р. 488–495.)
5. *Вплив водню на опірність руйнуванню листової сталі 65Г* / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2011. – № 4. – С. 36–41.
6. *Hydrogen influence on fracture of sheet carbon steel* / Y. L. Ivanytskyi, S. T. Shtayura, Y. V. Mol'kov, T. M. Lenkovskyi // *Int. J. Fract.* – 2012. – № 1. – Р. 17–23.
7. *Мильман Ю. В., Чигунова С. И., Гончарова И. В. К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования* // *Электронная микроскопия и прочность материалов.* – 2008. – Вып. 15. – С. 3–10.

Одержано 22.07.2020