

## Тріщиностійкість термонапруженої арматури і вплив на неї коливань температури

М. С. Когут, Р. В. Гуменюк

Львівський національний аграрний університет, Львів, Україна

*Досліджено вплив термічного і силового навантаження на міцність сталеної арматури за тріщиностійкістю. Проаналізовано характер руйнування зразків із арматурних сталей 35ГС і 25Г2С залежно від коливань температури по довжині арматурних прутків при визначенні тріщиностійкості.*

**Ключові слова:** термонапруження, тріщиностійкість, температура вимірювання.

**Вступ.** Забезпечення надійності та довговічності залізобетонних елементів плит, ригелів, колон на будівництві нерозривно пов'язане з розробкою технологій підвищення їх міцності з використанням термонапруженої сталеної пруткової арматури після попереднього електронагрівання та деформування [1, 2], яка потребує модернізації окремих операцій.

Рекомендації щодо випробувань на міцність сталеної пруткової арматури наведені у нормативних документах [3–6]. Деякі напрацювання з побудови математичних моделей електротермічної арматури для будівельної галузі запропоновано в роботі [7]. Разом з тим ефективного контролю температури арматурних прутків по їх довжині після попереднього електронагрівання та деформування практично немає. Відсутні також методики оцінки міцності термонапруженої арматури за критеріями механіки руйнування [8].

Мета дослідження – модернізація установки СМЖ-129Б для подовження арматурних прутків та контролю температури по їх довжині після попереднього електронагрівання та деформування, а також оцінка тріщиностійкості арматурних сталей 35ГС і 25Г2С, що підлягали попередньому електротермічному напруженню.

**Методика дослідження.** Базою для проведення технічної модернізації стала конструкція діючої установки, що експлуатується на виробництві та відповідає нормативним рекомендаціям [9], а також попередні дослідження авторів [10].

Дослідження проводили на модернізованій установці СМЖ-129Б, що призначена для попереднього деформування (температурного подовження) шляхом електронагріву гарячекатаної арматури стандартного профілю, яку використовують для виготовлення на виробництві напружених залізобетонних виробів.

Установка (рис. 1) складається з нерухомого та рухомого контактів 1 і 6 відповідно, рами 4 та електроустаткування 5. На рамі зварної конструкції з профільного прокату (швелера) встановлені всі вузли і електроустаткування.

До передніх поздовжніх балок рами 4 кріплять п'ять зварних кронштейнів 3, які утворюють стелаж для арматурних прутків. У верхній частині

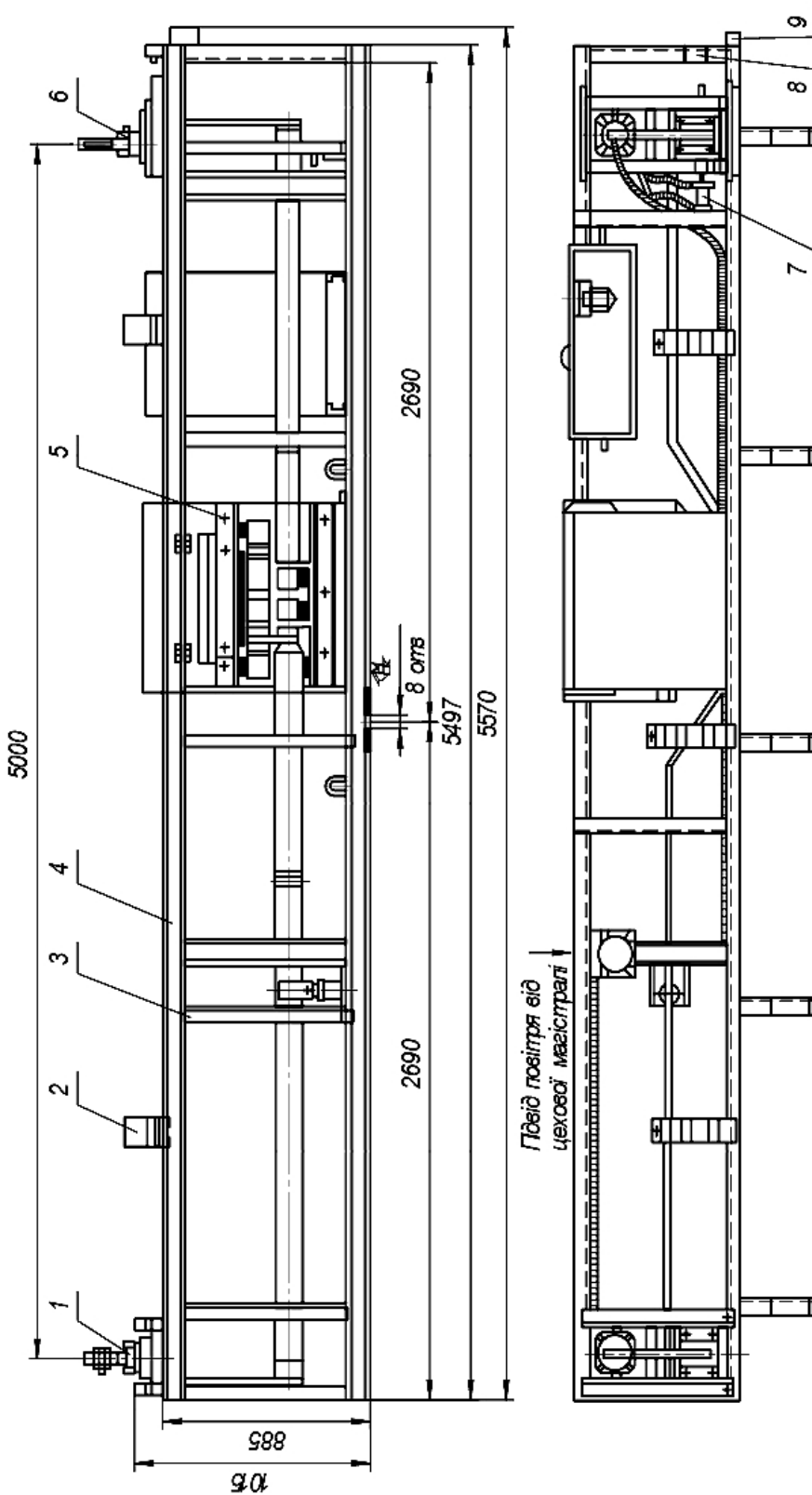


Рис. 1. Загальний вигляд модернізованої установки СМЖ-129Б для подовження арматурних прутків шляхом електронагрівання.

рами між контактами в кронштейнах встановлено три підтримуючих рольганги 2. У кінці рами на чотирьох роликах закріплено рухомий контакт б зварної конструкції, що несе контактну губку, пневмоциліндр затиску і важіль з притиском. Для переміщення рухомого контакту служить пневмоциліндр підтяжки 7. Нерухомий контакт 1, аналогічний рухомому контакту, встановлений на протилежному кінці рами. На рамі з боку рухомого контакту встановлені кінцевий вимикач 8 і кнопка управління 9 роботою установки.

Установка працює наступним чином. Стиснуте повітря подають від цехової магістралі через пневморозподільник в пневмоциліндри затиску та підтяжки, в результаті цього затискні важелі займають крайнє верхнє положення, а рухомий контакт – початкове положення для підтяжки. У контактні губки укладають два арматурні прутки, що підлягають подовженню. До прутків підводять рухомий та нерухомий контакти.

За рахунок переміщення рухомого контакту під дією стиснутого повітря здійснюється затиск прутків з подальшою їх підтяжкою.

Після відповідної витримки, яку задає реле часу, електричний струм подається до кінцевих частин прутків. Живлення від електромережі до рухомого контакту підводиться через набір гнучких мідних шин. Нагріваючись від проходження електричного струму, прутки подовжуються, в результаті чого переміщується рухомий контакт, що знаходиться під дією розтягуючої сили, яку задає циліндр підтяжки. Наявність підтяжки забезпечує точну фіксацію початкового положення рухомого контакту і запобігає викривленню арматури на ділянці між контактами, що дозволяє контролювати розрахункову величину подовження арматурних прутків (рис. 1). При цьому величину необхідного подовження прутків регулюють затисними гвинтами. Після досягнення необхідної величини подовження прутків гвинти торкаються торцевою поверхнею штифтів мікроперемикача, що призупиняє подальший нагрів прутків.

Нагріті прутки знімають вручну за кінці і укладають впритул один до одного в піддон. Якщо нагріті прутки не знято, температура в них підтримується автоматично.

Нагрів арматурного прутка діаметром  $D = 14$  мм зі сталі 35ГС (будівельна марка А-400 або А-III) та діаметром  $D = 12$  мм зі сталі 25Г2С (будівельна марка А-800 або Ат-5) проводили на описаній вище модернізованій установці з загальною довжиною між кріпильними контактами 6000 мм. Режими нагрівання укладених в ложементи установки прутків наступні: сила струму 700 А, напруга 36 В. Нагрівання кожного прутка здійснювали автоматично до досягнення його видовження до 290 мм. У фіксованих точках по довжині, висвердлювали отвори  $\varnothing 8$  мм на глибину  $h = 8$  мм, куди вставляли термопари типу ХА (хромель-алюмель) на відстані  $l = 1000$  мм одна від одної.

Параметри арматурних прутків і технічна характеристика модернізованої установки наведені нижче:

Діаметр прутків, що нагрівають, мм .....	10...25
Довжина електронагріваючої частини прутка, мм .....	3000...5000
Число прутків, що одночасно нагрівають, шт .....	2
Встановлена потужність трансформатора, кВА .....	40
Тиск повітря в системі (не менше), МПа .....	0,49

Зусилля затиску прутка, Н .....	4900
Зусилля підтяжки прутка, Н .....	2000+300
Витрати повітря, м <sup>3</sup> /год .....	1,5
Швидкість нагріву, °С/хв .....	100
Температура нагріву, °С .....	300...450
Габаритні розміри (довжина, ширина, висота), мм .....	5570×1100×1350
Маса установки, кг .....	820

Місця кріплення термопар до арматурних прутків захищали ізоляцією, а затиск термопар проводили самозатискачами. Матеріал термоізоляції – азбестовий лист товщиною 6 мм. Його обмотували по периметру прутка у два шари і в'язали спеціальним шнуром. З метою зниження теплових втрат при нагріванні проводили також теплоізоляцію проміжних опор нагрівального апарату установки.

Контроль температури виконували після під'єднання кінців термопар до багатоканального приладу типу КСП-2, який реєстрував результат вимірювання на стрічці після повного циклу нагрівання прутка. Температуру нагрівання по довжині кожного прутка вимірювали у шести фіксованих точках почергово: на початку нагріву і після витримки тривалістю 1,5 і 3 хв.

**Результати та їх обговорення.** Результати вимірювань температури двох прутків досліджуваних марок сталей представлені на рис. 2 і 3.

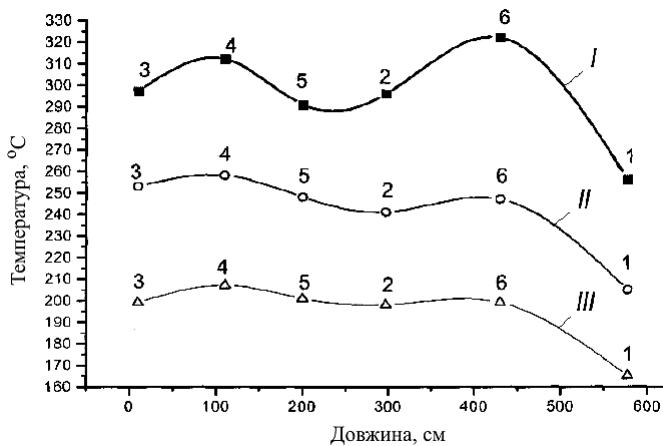


Рис. 2. Зміна температури по довжині арматурного прутка  $\varnothing 14$  мм зі сталі 35ГС при різній тривалості нагріву: I –  $t = 0$ ; II –  $t = 1,5$  хв; III –  $t = 3$  хв.

По довжині арматурних прутків виявлено зростання температури в точках 4 і 6, і її зниження в точці 1 (рис. 2), а також зростання температури в точках 5 і 6 і зниження в точці 2 (рис. 3) залежно від часу нагрівання. Видно, що зі збільшенням часу нагрівання прутків перепади температури у фіксованих точках по їх довжині мають менш виражений характер (рис. 2, 3).

Такі зміни температури для досліджуваних сталей 35ГС і 25Г2С стали предметом подальших експериментів щодо встановлення їх міцності за трициностійкістю ( $K_{1c}$ ).

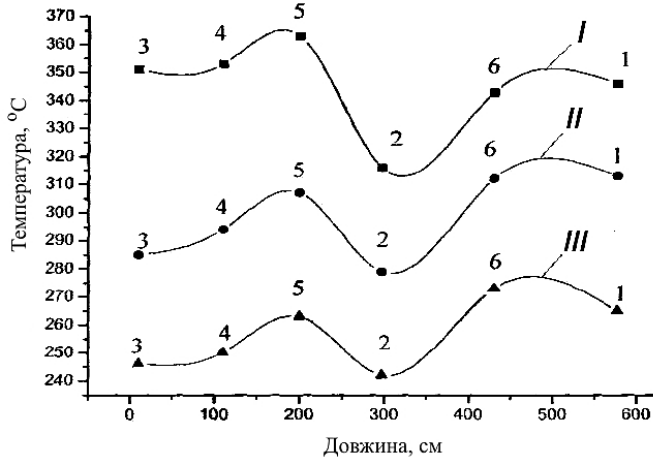


Рис. 3. Зміна температури по довжині арматурного прутка  $\varnothing 12$  мм зі сталі 25Г2С при різній тривалості нагріву: I –  $t = 0$ ; II –  $t = 1,5$  хв; III –  $t = 3$  хв.

Для вивчення міцності цих сталей за тріщиностійкістю ( $K_{1c}$ ) залежно від зміни температури прутків проведено додаткові дослідження згідно з методикою [8]. Методика передбачає осьовий розтяг циліндричного зразка (рис. 4) зовнішнього діаметра  $D$  з кільцевою тріщиною, нанесеною на дні кільцевого концентратора завглибшки  $(d_k - d)/2$  при жорстко фіксованому прогині за певний час його втомного деформування. Тут  $d_k$  і  $d$  – відповідно діаметр циліндра в площині кільцевого концентратора та кільцевої тріщини.

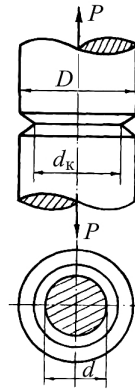


Рис. 4. Схема осьового розтягу циліндричного зразка з кільцевою тріщиною.

Тріщиностійкість ( $K_{1c}$ ) зразків, вирізаних із шести характерних ділянок по довжині прутків, які мали різні значення виміряних температур, визначали за формулою [8]

$$K_{1c} = \frac{P^*}{D\sqrt{D}} y, \quad (1)$$

де

$$y = \frac{0,7976\sqrt{1-\varepsilon}}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}\sqrt{1-0,8012\varepsilon}},$$

$y$  – безрозмірна функція, що залежить від відносного розміру кільцевої тріщини  $\varepsilon = d/D$ ;  $P^*$  – руйнівне зусилля за осьового розтягу циліндричного зразка діаметром  $D$  з початковою кільцевою тріщиною діаметра  $d$ .

Розміри зразків зі сталей 35ГС і 25Г2С були такими:  $D = 12$  мм;  $d_k = 10$  мм;  $d = 8 \pm 0,3$  мм і  $L_{\text{заг}} = 120$  мм. Гостроту дна кільцевого концентратора циліндричного зразка  $\rho \leq 0,1$  мм забезпечували шляхом кругового шліфування алмазним диском. Для виконання осьового розтягу використовували зразки з нарізною різьбою М12  $\times$  1,75 на кінцях.

Одержані дані тріщиностійкості  $K_{1c}$ , підраховані за формулою (1) після руйнування циліндричних зразків з кільцевою тріщиною шляхом осьового розтягу при швидкості переміщення активного захоплювача  $v = 1,0$  мм/хв на розривній машині марки Instron, подано в таблиці.

#### Тріщиностійкість досліджуваних сталей для шести значень виміряних температур по довжині прутків

№ точки на рис. 2, 3	Маркування сталей	$T, ^\circ\text{C}$	Довжина прутка у фіксованій точці вимірювання температури, см	$\sigma_T, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$K_{1c}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
3	Сталь 35ГС, пруток $\varnothing 14$ мм А-400 або А-III	297	10	860	1050	187,1
4		312	110	850	1030	182,0
5		291	200	850	1000	187,0
2		296	297	870	1000	178,0
6		322	430	820	980	152,0
1		256	577	870	1000	159,0
3	Сталь 25Г2С, пруток $\varnothing 12$ мм А-800 або Ат-5	351	10	1050	1360	264,0
4		353	110	1050	1360	265,0
5		363	200	1100	1420	303,2
2		316	297	1060	1350	262,0
6		343	430	1080	1310	280,1
1		346	577	1100	1370	294,0

**Примітка.** Наведені значення  $K_{1c}$  визначались як середні арифметичні після випробувань трьох циліндричних зразків, вирізаних із шести ділянок по довжині прутків досліджуваних сталей;  $\sigma_T$  – границя плинності;  $\sigma_B$  – границя міцності.

Отже, для сталі 35ГС зниження тріщиностійкості ( $K_{1c}$ ) після попереднього нагріву до температур 322 і 256 $^\circ\text{C}$  (т. 6 і 1, таблиця) можна пояснити механізмом крихкого руйнування.

Для сталі 25Г2С з меншим вмістом вуглецю, фосфора і сірки та раціональним складом легуючих елементів (Cr, Ni, Cu) порівняно із сталлю 35ГС зафіксовано також певне зниження тріщиностійкості ( $K_{1c}$ ) після попереднього нагріву до температур 316 і 351 $^\circ\text{C}$  (т. 2 і 3, таблиця), для якої також

характерний механізм крихкого руйнування; причому значення  $K_{1c}$  в цьому випадку є вищими від значень  $K_{1c}$  для сталі 35ГС.

Отримані дані засвідчують меншу тріщиностійкість сталі 35ГС порівняно зі сталлю 25Г2С по всій довжині досліджуваних прутків, що можна пояснити підвищеними міцнісними характеристиками останньої, а також змінами механізмів руйнування від крихкого до квазікрихкого на окремих мікроділянках руйнування, що підтверджують фрактографічні дослідження цих зразків [10].

## Висновки

1. Розроблено методику електротермічного підвищення міцності і твердості сталюї арматури та контролю температури на модернізованій установці СМЖ-129Б. Вона дозволяє відслідковувати температурні зміни в часі по довжині прутків з моменту електронагрівання до їх кінцевого охолодження в процесі виготовлення деталей залізобетонних конструкцій.

2. При дослідженнях арматурних прутків діаметром 14 мм зі сталі 35ГС і діаметром 12 мм зі сталі 25Г2С було виявлено вплив температури на залишкові термонапруження, які зумовлюють зміну тріщиностійкості ( $K_{1c}$ ) вздовж прутків, що можна пояснити різним структурним станом на різних ділянках прутків у результаті термосилового навантаження (нерівномірного нагріву).

3. Методику осьового розтягу циліндричного зразка з кільцевою тріщиною можливо застосовувати для оцінки стану термонапруженої сталюї арматури під час вхідного контролю, що доповнить дані механічних випробувань на міцність за стандартною методикою.

## Резюме

Исследовано влияние термического и силового нагружения на прочность стальной арматуры по характеристике трещиностойкости. Проанализирован характер разрушения образцов из арматурных сталей 35ГС и 25Г2С в зависимости от колебаний температуры по длине арматурных прутков при определении трещиностойкости.

1. Савицький М. В., Пунагін В. М., Приходько А. П. Довговічність бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій. – Київ: УМК ВО, 1988. – 112 с.
2. Гнідець Б. Г., Завадяк П. П., Щеглюк М. Р. Залізобетонні конструкції з електротермічним попереднім напруженням. – Київ: Техніка, 1996. – 240 с.
3. ГОСТ 9.505-82. Методы коррозионных испытаний. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.
4. СНиП 2.03.01.84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: ЦИТП Гостроя СССР, 1989. – 80 с.
5. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.
6. ДСТУ 3760-98. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. – Київ: Держстандарт України, 1998. – 20 с.

7. Щеглюк М. Р. Математична модель електротермічного напруження арматури в умовах будівництва: Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів: Каменяр, 2004. – Вип. 6. – С. 170 – 178.
8. Козут М. С., Лебідь Н. М. Трициностійкість конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань із наплавками. – Львів: Арал, 2008. – 287 с.
9. ГОСТ 14890-69. Установка СМЖ-129Б для удлинения арматурных стержней. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 4 с.
10. Козут М. С., Гуменюк Р. В., Бужанський М. І. Фрактографічні дослідження арматурних сталей 35ГС і 25Г2С за умов попереднього електронагрівання та деформування // Вісн. Тернопільського держ. техн. ун-ту. – 2008. – 13, № 4. – С. 42 – 50.

Поступила 21. 12. 2009