

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.5

УДК 624.012.26

Приймак А.Б., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
ORCID 0009-0009-9070-643X, e-mail: personalrav_@ukr.net

Максименко О.П., д.т.н., професор,
ORCID: 0000-0003-0846-9869, e-mail: 0976776379max@gmail.com

Самохвал В.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0585-7225, email: volsamokhval@gmail.com

Стасько Є.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
email: Chinchopara@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Pryimak Anna, Postgraduate student

Maksimenko Oleg, Doctor of technical sciences, Professor of Metallurgy department

Samokhval Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metallurgy department

Stasko Yevhen, Postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРМАТУРНИХ ПРОФІЛІВ ДІАМЕТРОМ 16 ММ

Метою дослідження є аналіз показників механічних властивостей арматурного прокату за існуючою технологією та оцінка міри впливу на ці показники параметрів дослідного прокатування, визначених з урахуванням критерію сталості процесу за значенням середньої результуючої поздовжніх сил пластично деформованого розкату. За результатами аналізу даних встановлено, що існуюча технологія забезпечує надійне виконання вимог нормативної документації за всіма контрольованими показниками. Зокрема, границя міцності прокату змінюється у межах від 509 до 581 Н/мм², за середньоарифметичного 546 Н/мм² та стандартного відхилення 14,7 Н/мм². За результатами дослідного прокатування встановлено збільшення середнього значення границі плинності до 554 Н/мм² та зменшення стандартного відхилення до 10,1 Н/мм². Вплив умов дослідного прокатування підтверджено результатами тестів за критеріями Стюдента та Фішера. Тому пропонувані зміни в технології можуть бути впроваджені для забезпечення гарантованого дотримання показників механічних властивостей арматурного прокату.

Ключові слова: арматурні профілі; границя плинності; середньоарифметичне; стандартне відхилення; критерій сталості.

The purpose of the study is to analyze the mechanical properties of reinforcing bars using existing technology and assess the degree of influence on these parameters of experimental rolling, determined taking into account the process stability criterion by the value of the average resultant longitudinal forces of plastically deformed stock. According to the results of data analysis, it was found that the existing technology ensures reliable compliance with the requirements of regulatory documentation for all controlled indicators. In particular, the yield strength of the rolled steel varies within the range from 509 to 581 N/mm², with an average of 546 N/mm² and a standard deviation of 14.7 N/mm². According to the results of experimental rolling, an increase in the average value of the yield strength to 554 N/mm² and a decrease in the standard deviation to 10.1 N/mm² were established. The influence of experimental rolling conditions was confirmed by the results of tests using the Student and Fisher

criteria. Therefore, the proposed changes in technology can be implemented to ensure guaranteed compliance with the mechanical properties of reinforcing steel.

Keywords: reinforcing bar; yield strength; average; standard deviation; stability criterion.

Постановка проблеми

Профілі для армування залізобетонних конструкцій є одним з найбільш затребуваних видів довгомірного прокату. Згідно даних Всесвітньої асоціації виробників сталі світовий експорт гарячекатаних арматурних прутів та стрижнів за 2023 рік становив 15,5 млн. т [1]. Тобто, він перевищував експорт всіх інших прутів та стрижнів (12,2 млн. т), але поступався показникам експорту катанки (22,6 млн. т) та профілів (20,1 млн. т). Припускаючи, що обсяги експорту (402,8 млн. т) приблизно відповідають обсягам внутрішнього споживання, можна стверджувати, що на арматурні профілі припадає приблизно 19% від загального виробництва довгомірного прокату, за винятком труб. Зважаючи на значимість арматурних профілів для будівельної індустрії, металурги приділяють значну увагу поліпшенню якості та удосконаленню технологій, обладнання і супутніх процесів для виготовлення такої продукції.

Для споживачів арматурних профілів найбільш важливими показниками якості є механічні властивості, точніше певний комплекс властивостей, що забезпечує поєднання високої міцності та достатньої пластичності. Відповідно, виробники сталевих арматур значні ресурси виділяють на забезпечення виготовлення продукції не тільки у відповідності до вимог нормативної документації, але й з перевищенням таких показників, де це можливо. Тому, дослідження з забезпечення виготовлення продукції з гарантованим досягненням показників механічних властивостей зберігають свою актуальність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Згідно вимог нормативної документації [2], в Україні виготовляють 14 профілерозмірів прокату арматурного з періодичним профілем діаметром від 6 до 40 мм. За обсягами виробництва найбільш поширеними профілерозмірами є арматурний прокат діаметром 10, 12, 14 мм для монолітних бетонних конструкцій, та 16 мм і більше, для конструкцій товщиною понад 250 мм [3]. З встановлених класів міцності арматурних профілів, найбільші обсяги виробництва припадають на прокат періодичного профілю класів А400С та А500С [3]. Прокат останнього з вказаних класів міцності відноситься до термо-механічно-зміцнених [4]. Тобто, комплекс механічних властивостей такого прокату забезпечується шляхом гарячого прокатування та термічної обробки з прокатного нагріву. Саме термічна обробка в потоці прокатного стану дозволяє досягти збільшення міцності зі збереженням пластичності.

Комплекс механічних властивостей арматурного прокату, відповідно до вимог стандартів [2] та [5], включає показники, значення яких для арматури класу А500С становлять:

- | | |
|---|-----------------------------------|
| – границя плинності (верхня) | – $R_{eH} > 500 \text{ Н/мм}^2$; |
| – границя міцності | – $R_m > 600 \text{ Н/мм}^2$; |
| – відношення границі міцності до границі плинності; | – $R_m/R_{eH} > 1,08$; |
| – відносне видовження після розриву | – $A > 14\%$; |
| – повне відносне видовження за максимального навантаження | – $A_{gt} > 5\%$. |

Поєднання високої міцності, що відображається показником границі плинності понад 500 Н/мм^2 , та пластичності, показником якої є відносне видовження понад 14 %, за даними [6], досягається за рахунок формування по периметру профілю певної мікроструктури. Серцевина профілю має переважно ферито-перлітну мікроструктуру, а поверхневі прошарки мають мікроструктуру відпущеного мартенситу. У роботі [7] наведено результати досліджень механічних властивостей кожної з таких складових з використанням стандартних зразків, які вирізались з відповідних ділянок поперечного перерізу. Автори роботи стверджують, що шар відпущеного мартенситу має майже вдвічі більшу міцність ($R_{p0,2} = 806 \text{ Н/мм}^2$), ніж ферито-перлітове ядро ($R_{eH} = 435 \text{ Н/мм}^2$). За результатами досліджень, описаних в роботі [6], підтверджено відмінності механічних властивостей, обумовлені зміною мікроструктури для різних зон поперечного перерізу термооброблених арматурних профілів. Так, для арматурного профілю номінальним діаметром 28 мм, границя плинності для осьової, перехідної та поверхневої зон поперечного

перерізу становила, відповідно: 430, 464 та 651 Н/мм². Випробування на розтяг зразків у вигляді відтинків профілю дали значення границі плинності 574 Н/мм². Для відносного видовження по зонам поперечного перерізу профілю отримано значення: 14,18; 13,74 та 7,87 %, відповідно для осової, перехідної та периферійної зон, а для відтинку профілю — 9,8 %.

Наведені дані свідчать, що застосування термічної обробки з прокатного нагріву дозволяє виготовляти арматурні профілі з оптимальним поєднанням міцності та пластичності з малоуглецевих марок сталі. Але поєднання операцій прокатування та термічної обробки вимагає забезпечення стабільності технологічних параметрів. Це стосується забезпечення стабільності швидкісного та температурного режимів прокатування, а також мінімізації відхилень розмірів профілю і дотримання режимів термообробки. Для забезпечення стабільності технологічних параметрів прокатування в роботах [8, 9] пропонується на етапі розробки технології враховувати критерій поздовжньої сталості процесу. Забезпечення сталості процесу прокатування ще на етапі розробки технології дозволить мінімізувати відхилення технологічних параметрів та гарантовано отримувати прокат з заданими показниками механічних властивостей.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз показників механічних властивостей арматурного прокату за існуючою технологією та оцінка міри впливу на ці показники параметрів дослідного прокатування, визначених з врахуванням критерію сталості процесу за значенням середньої результуючої поздовжніх сил пластично деформованого розкату.

Основною задачею досліджень було визначення міри впливу технологічних параметрів дослідного прокатування на показники механічних властивостей арматурного прокату. Для цього виконано аналіз статистичних характеристик контрольованих показників механічних властивостей прокату виготовленого за звичайною технологією та налаштуваннями дослідного прокатування. Також до задач дослідження відноситься визначення можливості використання критерію сталості процесу для поліпшення показників якості арматурного прокату за показниками механічних властивостей.

Виклад основного матеріалу

Аналіз показників механічних властивостей виконано для арматурного профілю номінальним діаметром 16 мм. За звичайною технологією, із застосуванням прокатування в одну нитку, профіль прокатують за 18 проходів. Формування арматурного профілю здійснюється за два проходи в блоці консольних клітей з валками діаметром 210 мм. У блок надходить підкат діаметром 20 мм, який прокатують на прутковому стані у складі шести клітей чорнової групи ($D_b = 650$ та 550 мм), 6 клітей проміжної групи ($D_b = 450$ мм) та чотирьох клітей чистової групи ($D_b = 380$ мм). Вихідною заготовкою слугує квадратна заготовка зі стороною 160 мм довжиною до 12 м. У проміжній та чистовій групах стану застосовано систему калібрів «овал – круг». Готовий профіль, швидкість виходу якого з чистової кліті становить 21,1 м/с, піддають термічній обробці, яка зводиться до охолодження водою в трьох секціях та послідовному охолодженню повітрям.

Параметри дослідного прокатування визначали з врахуванням критерію сталості процесу за показником середньої результуючої поздовжньої сили для існуючих калібрів [9]. Згідно розрахунків, для надійного забезпечення сталості процесу, рекомендовано скорегувати режим натягнення в клітях чистової групи за рахунок зміни зазорів між валками. Коригування зазорів по клітям чистової групи, з метою забезпечення однакових значень критеріїв сталості процесу по клітям, призводить до відповідних змін швидкісного режиму та величини натягнення між клітями. Зміни швидкісного режиму визначали з врахуванням умови постійності секундних об'ємів в процесі неперервного прокатування.

Показники механічних властивостей, як для існуючої технології, так і для дослідного прокатування, визначали за результатами випробувань на розтяг [5], які проводили за звичайними регламентами, передбаченими діючою системою виробничого контролю. Відповідно до цієї системи, зокрема згідно вимог ДСТУ EN 10080:2009 [10], випробування проводять «на виробі з повним поперечним перерізом», тобто на відтинку профілю з необробленою поверхнею. Довжина проби, яка відбирається від партії прокату для випробувань механічних властивостей, становить до 400 мм.

Відповідно до вимог стандарту ДСТУ-3760:2019, для контролю механічних властивостей «... відбирають один зразок від кожних 30 т продукції, але не менше ніж три зразки від партії ...» [2]. Партія складається з прокату одного діаметру, одного класу та однієї плавки-ковша. Для постачання прокату за характеристичними величинами або гарантованими мінімальними значеннями партію прокату розділяють на окремі контрольні партії масою не більше ніж 70 т [2].

Для визначення статистичних характеристик механічних властивостей прокату, виготовленого за звичайною технологією з термообробкою з прокатного нагріву, було оброблено дані поточних випробувань для арматурного профілю діаметром 16 мм із сталі марки Ст 3 пс. Вибірка даних включала результати випробувань однієї кампанії прокатування, яка складалась з 17 різних плавок, розділених на 52 контрольні партії масою близько 60 т. Для кожної контрольної партії відбиралось по три проби для визначення показників механічних властивостей. Тобто, для прокату, виготовленого за звичайною технологією, загальний обсяг вибірки становив 156 вимірів. Статистичні характеристики контрольованих показників механічних властивостей прокату наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Статистичні характеристики механічних властивостей арматурного профілю діаметром 16 мм за звичайною технологією

Статистична характеристика параметру	Границя плинності R_{eH} , Н/мм ²	Границя міцності R_m , Н/мм ²	Відносне видовження після розриву A , %	Відношення R_m / R_{eH}	Відн. видовж. за максимальн. навантаження A_{gt} , %
Мінімальне	509	613	16,5	1,15	6,3
Максимальне	581	680	26,5	1,23	13,3
Середнє	546,3	650,3	21,9	1,2	9,6
Стандартне відхилення	14,7	13,7	2,0	0,02	1,3
Коефіцієнт варіації	0,0269	0,021	0,0913	0,0136	0,1347

Згідно отриманих даних, всі показники механічних властивостей перевищують мінімальні значення, визначені стандартом [2] як бракувальні. Перевірка відповідності статистичних характеристик контрольованих параметрів, відповідно до вимог додатку В стандарту [2], дала такі результати для границі плинності:

- відповідність середнього генеральної сукупності

$$\bar{X} \geq X_{def} + 1,64 \cdot S;$$

$$546 \geq 500 + 1,64 \cdot 14,7 = 524 (H / \text{мм}^2);$$

- відповідність стандартного відхилення генеральної сукупності

$$S < 80 H / \text{мм}^2; \quad 14,7 < 80 H / \text{мм}^2;$$

- відповідність коефіцієнту варіації для границі плинності

$$S / \bar{X} < 0,08; \quad 14,7 / 546 = 0,027 < 0,08;$$

- коефіцієнт можливостей процесу, як статистичний показник стабільності

$$C_{pk} = \frac{\bar{X} - LSL}{3 \cdot S}; \quad C_{pk} = \frac{546 - 500}{3 \cdot 14,7} = 1,043;$$

де $\bar{X}$ — середнє арифметичне генеральної сукупності; X_{def} — бракувальне значення показника властивостей; S — стандартне відхилення (середньоквадратичне відхилення) параметру в генеральній сукупності; LSL — нижня межа специфікації (допустиме значення).

Отже, границя плинності прокату за даними вибірки, отриманої за результатами поточного контролю властивостей і умовно прийнятої як генеральна сукупність, відповідає вимогам стандарту [2], як за абсолютними показниками, так і за статистичними характеристиками.

Для інших показників механічних властивостей отримано аналогічні результати відповідності статистичних характеристик вимогам нормативної документації. Це свідчить, що існуюча технологія забезпечує надійне виконання вимог нормативної документації по всім показникам механічних властивостей, а отримання продукції з невідповідними показниками можливо лише за суттєвих порушень технології.

Дослідне прокатування проводили на тому самому комплекті валків, змінюючи лише налаштування клітей чистової групи. Обсяг дослідного прокатування становив дві плавки загальною масою близько 460 т.

Статистичні характеристики, визначені по даним чотирьох контрольних партій для кожної з двох плавки дослідного прокатування, а також узагальнені дані, наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Статистичні характеристики показників властивостей за даними вибірок дослідного прокатування

Статистична характеристика параметру	Границя плинності R_{eH} , Н/мм ²			Відносне видовження після розриву А, %			Відношення R_m / R_{eH}			Відн. видовж. за максимальн. навантаження A_{gt} , %		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Мінімальне	543	537	537	20,5	18	18	1,17	1,16	1,16	8,2	7,9	7,9
Максимальне	558	572	572	26	24,5	26	1,2	1,21	1,21	12,1	11,9	12,1
Середнє	550	557	553,7	22,91	22,00	22,4	1,19	1,18	1,2	10,23	9,99	10,1
Стандартне відхилення	5,09	12,52	10,1	1,89	2,50	2,227	0,01	0,01	0,013	1,23	1,90	1,529
Коефіцієнт варіації	0,009	0,022	0,018	0,082	0,113	0,099	0,009	0,011	0,011	0,12	0,190	0,151

Примітки: а — дані плавки 412266; b — дані плавки 422276; c — узагальнені дані дослідного прокатування.

За даними табл. 2, основні контрольовані показники механічних властивостей прокату дослідного прокатування відповідають вимогам стандарту [2]. Зокрема, для границі плинності перевірено відповідність за такими статистичними характеристиками:

- середнє окремої вибірки перевищує бракувальне значення
 $x'_i > X_{def} \quad 553,7 > 500 \text{ Н/мм}^2$;
- стандартне відхилення окремої вибірки не перевищує встановленого значення
 $S_0 < 45 \text{ (Н/мм}^2\text{)} \quad 10,1 < 45 \text{ Н/мм}^2$;
- коефіцієнт варіації окремої вибірки не перевищує встановленого значення
 $S_0 / x'_i < 0,05, \quad 0,018 < 0,05$.

Крім цього, відповідно до вимог ДСТУ EN 10080:2009 [10], перевіряли відповідність середнього значення контрольованих параметрів інтервалу надійності для встановленої ймовірності. Згідно пункту 7.2.3.1 стандарту [10], ймовірність для границі плинності встановлена на рівні 95 %, а для відносного видовження за максимального навантаження A_{gt} та відношення границі міцності до границі плинності R_m / R_{eH} ймовірність встановлено 90 %. Відповідно, для загальної вибірки дослідного прокатування використовували співвідношення

$$x'_i \geq X_{def} + k \cdot S_0,$$

де k — коефіцієнт, визначений кількістю вимірів вибірки та встановленою ймовірністю для показника властивостей.

Для вибірки дослідного прокатування з загальною кількістю значень 24, згідно табличних даних [10], отримуємо: для границі плинності ($p = 0,95$) $k = 2,12$, для інших показників ($p = 0,90$) $k = 1,72$.

Отже, для границі плинності

$$553,7 \geq (500 + 2,12 \cdot 10,1 = 521,4 \text{ (Н / мм}^2\text{)});$$

– для відносного видовження A_{gt} $10,1 \geq (5 + 1,72 \cdot 1,529 = 7,63 \text{ (\%)});$

– для відношення R_m / R_{eH} $1,2 \geq (1,08 + 1,72 \cdot 0,013) = 1,102.$

Коефіцієнт можливостей процесу за показником границі плинності становить

$$C_{pk} = \frac{553,7 - 500}{3 \cdot 10,1} = 1,77.$$

Отримане значення коефіцієнту можливостей процесу для вибірки границі плинності дослідного прокатування суттєво перевищує цей показник для звичайної технології. Для більшості застосувань вважається, що перевищення значення $C_{pk} > 1,33$, свідчить про високу стабільність процесу і можливість надійного дотримання показників якості продукції. Отже, пропонувані зміни в технології прокатування арматурного профілю забезпечують надійне дотримання показників якості та стабільність процесу.

За результатами розрахунків, всі статистичні характеристики показників властивостей за вибірками дослідного прокатування відповідають вимогам стандартів [2] та [10].

Наступним етапом аналізу була перевірка відповідності показників властивостей дослідного прокатування даним поточного контролю. Тобто перевірялась гіпотеза про однорідність вибірок або про однаковість дисперсій дослідної вибірки та генеральної сукупності.

Попередньо оцінили закон розподілу величин у цих вибірках. Як видно з рис. 1, розподіл даних як генеральної сукупності, так і даних вибірки дослідного прокатування, приблизно відповідають нормальному закону. Проте для вибірки границі плинності дослідного прокатування спостерігається незначне зміщення середнього значення у бік більших значень, а саме: для генеральної сукупності 546 МПа; для загальної вибірки дослідного прокатування 554 МПа. Також на рисунку відображено зменшення стандартного відхилення цього показника для вибірки дослідного прокатування у порівнянні з стандартним відхиленням генеральної сукупності, відповідно 10,1 МПа проти 14,7 МПа.

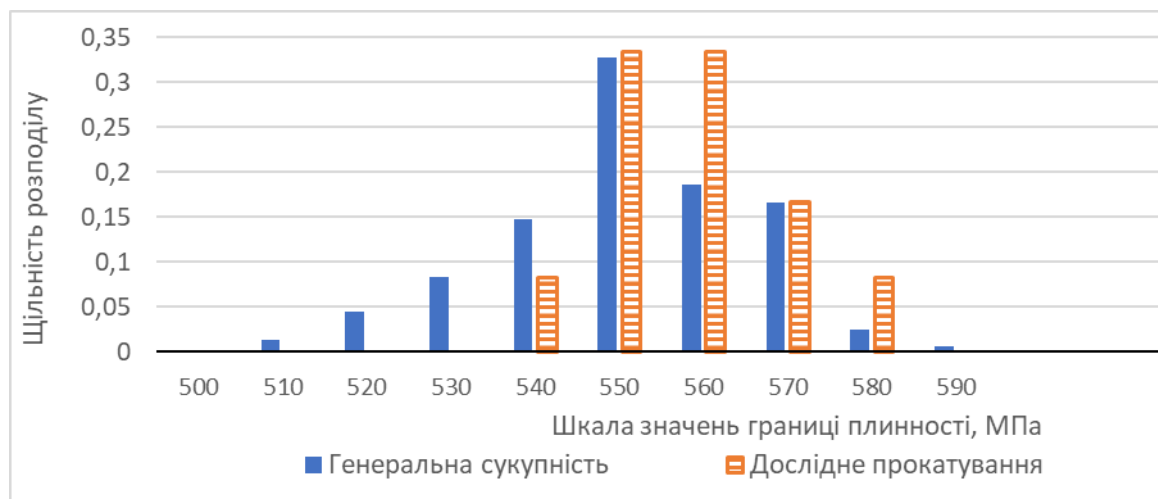


Рис. 1. Розподіл значень границі плинності для генеральної сукупності (поточний контроль) та вибірки дослідного прокатування

Для перевірки однорідності вибірок використали критерій Бартлетта [11]. Число ступенів свободи генеральної сукупності становить $n_1 = (156 - 1) = 155$; вибірки дослідного прокатування — $n_2 = (24 - 1) = 23$, а для об'єднаної вибірки $N = n_1 + n_2 = 178$. Дисперсія об'єднаної вибірки, наприклад для показників границі плинності, визначається зі співвідношення

$$S_{\Sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i \cdot S_i^2)}{N} \quad S_{\Sigma}^2 = \frac{(155 \cdot 14,7^2 + 23 \cdot 10,1^2)}{178} = 201,35 (H / \text{мм}^2).$$

Значення критерію Бартлетта розраховують за формулою [11]

$$B = \frac{N \cdot \ln(S_{\Sigma}^2) - \sum_{i=1}^k (n_i \cdot \ln(S_i^2))}{1 + \frac{1}{3 \cdot (k-1)} \cdot \left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n_i} \right) - \frac{1}{N} \right]}.$$

Для випадку порівняння двох вибірок ($k=2$) значень показника границі плинності, отримуємо

$$B = 4,62.$$

Критичне значення критерію, відповідно до розподілу χ^2 для рівня значимості 0,05 і числа ступенів свободи $N=178$, становить 210. Так як розраховане значення критерію значно менше за критичне, гіпотеза про однаковість дисперсій підтверджується. Тобто, статистичні характеристики вибірки значень границі плинності дослідного прокатування відповідають статистичним характеристикам вибірки цього показника для генеральної сукупності. Для інших показників властивостей прокату перевірка однорідності вибірок по дисперсіям також виконуються.

Аналогічна перевірка однорідності дисперсій дослідної та поточної вибірок за критерієм Фішера не виконується. Розрахункове значення F-тесту, який згідно [12] визначають як відношення дисперсій двох вибірок, дорівнює

$$F = \frac{14,7^2}{10,1^2} = 2,12.$$

Критичне значення критерію Фішера для рівня ймовірності 0,95, ступенів свободи чисельника 155 та знаменника 23, становить 1,80. Так як розрахункове значення критерію перевищує критичне, дисперсії вибірок не можуть бути визнані статистично рівнозначними – гіпотеза про їх однаковість відхиляється. Це можна трактувати як наявність впливу умов дослідного прокатування.

Перевірка гіпотези про належність середніх значень показників властивостей до однієї сукупності, виконана за критерієм Стьюдента [12], також не підтверджується. Розраховане значення t-критерію становить 2,40, а критичне значення для рівня значимості 0,05 та числа ступенів свободи 178, дорівнює 2,26. Це може свідчити, що різниця між середніми значеннями вибірок показників властивостей дослідного прокатування та поточного контролю, обумовлена впливом умов дослідного прокатування. Тобто, рекомендовані зміни в технології прокатування забезпечують поліпшення показників механічних властивостей.

Узагальнюючи отримані дані, можна стверджувати, що пропонувані зміни в технології прокатування арматурного профілю діаметром 16 мм забезпечують збільшення середнього значення та зменшення стандартного відхилення границі плинності та несуттєві зміни статистичних характеристик для інших показників властивостей.

Висновки

Результати аналізу статистичних характеристик механічних властивостей арматурного прокату діаметром 16 мм, виготовленого за існуючою технологією, свідчать, що ця технологія забезпечує надійне виконання вимог нормативної документації по всім контрольованим показникам. Зокрема, границя міцності прокату змінюється у межах від 509 до 581 Н/мм², за середньоарифметичного 546 Н/мм² та стандартного відхилення 14,7 Н/мм². Розподіл цього показника приблизно відповідає нормальному, а межі зміни не перевищують межі відхилень трьох стандартних відхилень.

Для інших показників механічних властивостей, таких як відносне видовження після розриву, відношення границі міцності до границі плинності, відносне видовження за максимального навантаження, також підтверджена відповідність вимогам нормативної документації.

За результатами дослідного прокатування, яке передбачало зміну налаштувань клітей чистової групи стану з метою забезпечення однакових значень критерію сталості процесу за значенням середньої результуючої поздовжньої сили пластично деформованого розкату, для границі плинності встановлено збільшення середнього значення до 554 Н/мм² та зменшення стандартного відхилення до 10,1 Н/мм². За цими та іншими статистичними характеристиками границя плинності дослідного прокатування відповідає вимогам нормативної документації. При цьому, вибірка показників границі плинності для дослідного прокатування має розподіл близький до нормального та, згідно тесту Бартлетта, статистично однорідна з генеральною сукупністю, отриманою для існуючої технології. Разом з тим, невиконання тестів за критеріями Стюдента (для середніх) та Фішера (для дисперсій), свідчить, що вплив умов дослідного прокатування є достатньо значимим і забезпечує поліпшення показників якості продукції. Тому пропонувані зміни в технології можуть бути впроваджені для забезпечення гарантованого дотримання показників механічних властивостей арматурного прокату.

Список використаної літератури

1. World Steel in Figures 2024. World Steel Association AISBL. 2025. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
2. ДСТУ-3760:2019 Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій Загальні технічні вимоги.(чинний з 01.08.2019), К., Держспоживстандарт України, 2019. 18с.
3. Класифікація та види сталеві арматури. ТОВ «МЕТІНВЕСТ-СМЦ». 2020. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/klassifikatsiya-i-vidy-stalnoy-armatury/?srsltid=AfmBOoo3S5gWmTdZrJ5Tfh0gfWt7lRc6Wlie35fVKZNYbbkxZI2A5FT>
4. Клімов Ю., Сморгалов Д. Статистична оцінка механічних характеристик арматури класу А500С в мотках. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2023. № 13. с. 17 – 29. DOI: 10.32347/2522-4182.13.2023.17-29.
5. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1: 2019, IDT; ISO 6892-1: 2019, IDT). Чинний з 31.12.2023 р. ДП «УкрНДНЦ». 2023. 90 с.
6. Rappl S., Shahul Hameed M.Z., Krempaszky C., Osterminski K. Mechanical and Surface Geometric Properties of Reinforcing Bar and Their Significance for the Development of Near-Surface Notch Stresses. *Mathematics. Special Issue Computational Modelling and Simulation of Building Materials*. 2023. Vol. 11. Issue 8. <https://doi.org/10.3390/math11081910>
7. Fernandez, I., Bairán J.M., Marí A.R. 3D FEM model development from 3D optical measurement technique applied to corroded steel bars. *Constr. Build. Mater.* 2016, V. 124, p. 519–532.
8. Maksimenko O.P., Nikulin A.V., Loboiko D.I. Simulation the longitudinal stability of the rolling process in a stable mode. *Математичне моделювання*, 2020. №1(42). С. 109-115. DOI: 10.31319/2519-8106.1(42)2020.207005
9. Максименко О.П., Нікулін О.В., Приймак А.Б., Павлюк Р.Д. Методика вибору натягу смуги під час безперервної прокатки з урахуванням стійкості процесу. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2024. №3. С. 88 – 94. DOI:10.46299/j.isjea.20240306.08
10. ДСТУ EN 10080:2009 Сталь для армування бетону. Зварювальна арматурна сталь. Загальні вимоги. (EN 10080: 2005, IDT). Чинний з 01.01.2012), Держспоживстандарт України, 2012. 49с.
11. Arsham H., Lovric M. Bartlett's test. In: *International Encyclopedia of Statistical Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. p. 87 – 88. DOI: 10.1007/978-3-642-04898-2_132. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252322443>
12. Johnson R.A. Miller & Freund's Probability and statistics for engineering. Ninth Edition. Global edition. Pearson Education. 2018. 546 p. URL: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/33524/1/Richard%20A.%20Johnson_2018.pdf

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE REINFORCEMENT BARS WITH A DIAMETER OF 16 MM

Abstract

The mechanical properties of bars for reinforcing concrete structures, according to their purpose, must provide a combination of high strength and sufficient plasticity. Such a complex of properties for rolled products of strength class A500C is provided by heat treatment of finished profiles from rolling heating. Therefore, research aimed at ensuring the specified indicators of mechanical properties remains relevant at the present time and in the near future.

The purpose of the study is to analyze the indicators of mechanical properties of reinforcing rolled products using existing technology and assess the degree of influence on these indicators of the parameters of experimental rolling, determined taking into account the criterion of process stability by the value of the average resulting longitudinal forces of plastically deformed stock.

The objectives of the research were to determine the statistical characteristics of the mechanical properties of rolled steel using the existing technology and during experimental rolling, to analyze the compliance of these indicators with the requirements of regulatory documentation, to assess the degree of influence of experimental rolling conditions on the indicators of mechanical properties and to determine the possibility of using the criterion of rolling process stability to improve the quality of rolled steel in terms of mechanical properties. Experimental rolling involved changing the settings of the stands of the finishing group of the mill in order to ensure the same values of the criterion of process stability in terms of the average resulting longitudinal force of the plastically deformed stock.

According to the results of the analysis of the properties of rolled steel using the existing technology and experimental rolling, an increase in the average value of the yield strength from 546 N/mm² to 554 N/mm² and a decrease in the standard deviation from 14.7 N/mm² to 10.1 N/mm², respectively, was established. For other controlled indicators of properties, a positive effect of experimental rolling conditions was also revealed. Checks of statistical characteristics of samples of conventional and experimental rolling according to the Bartlett, Student and Fisher criteria indicate that the influence of experimental rolling conditions is quite significant and provides improvement of product quality indicators. Therefore, the proposed changes in technology can be implemented to ensure guaranteed compliance with the mechanical properties of reinforcing steel.

Reference

- [1] World Steel in Figures 2024. (2025) World Steel Association AISBL. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
- [2] DSTU-3760:2019 Prokat armaturnyi dlia zalizobetonnykh konstrukttsii Zahalni tekhnichni vymohy. [Rolled products for reinforcement of ferroconcrete structures. General specification]. (chynnyi z 01.08.2019) [Valid from 01.08.2019], K., Derzhspozhyvstandart Ukraine. 18 p.
- [3] Klasyfikatsiia ta vydy stalevoi armatury [Classification and types of steel reinforcement] (2020). TOV «METINVEST-SMTs». URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/klasyfikatsiya-i-vidy-stalnoy-armatury/?srsltid=AfmBOoo3S5gWmTdZrJ5Tfh0gfWt7lRc6Wlie35fVKZNYbbkxZIt2A5FT>
- [4] Klimov Yu., Smorkalov D. (2023) Statystychna otsinka mekhanichnykh kharakterystyk armatury klasu A500S v motkakh [Statistical evaluation of mechanical characteristics of class A500C reinforcement in coils]. *Budivelni konstrukttsii. Teoriia i praktyka* [Building structures. Theory and practice]. 2023. № 13. p. 17 – 29. DOI: 10.32347/2522-4182.13.2023.17-29.
- [5] DSTU EN ISO 6892-1:2022. Metalevi materialy. Vyprovuvannia na roztyahuvannia. Chastyna 1. Metod vyprovuvannia za kimnatnoi temperatury [Metallic materials. Tensile testing. Part 1. Method of test at room temperature] (EN ISO 6892-1: 2019, IDT; ISO 6892-1: 2019, IDT). Chynnyi z 31.12.2023 [Valid from 31.12.2023]. DP «UkrNDNTs». 90 p.
- [6] Rappl S., Shahul Hameed M.Z., Krempaszky C., Osterminski K. (2023) Mechanical and Surface Geometric Properties of Reinforcing Bar and Their Significance for the Development of Near-Surface Notch Stresses. *Mathematics. Special Issue Computational Modelling and Simulation of Building Materials..* Vol. 11. Issue 8. <https://doi.org/10.3390/math11081910>

- [7] Fernandez, I., Bairán J.M., Marí A.R. (2016) 3D FEM model development from 3D optical measurement technique applied to corroded steel bars. *Constr. Build. Mater.* V. 124, p. 519–532.
- [8] Maksimenko O.P., Nikulin A.V., Loboiko D.I. (2020) Simulation the longitudinal stability of the rolling process in a stable mode. *Mathematical modeling.* №1(42). C. 109-115. DOI: 10.31319/2519-8106.1(42)2020.207005
- [9] Maksymenko O.P., Nikulin O.V., Pryimak A.B., Pavliuk R.D. (2024) Metodyka vyboru natiahu smuhy pid chas bezperervnoi prokatky z urakhuvanniam stiikosti protsesu [Methodology for selecting strip tension during continuous rolling taking into account process stability]. *International Science Journal of Engineering & Agriculture.* №3. C. 88–94. DOI:10.46299/j.isjea.20240306.08
- [10] DSTU EN 10080:2009 Stal dlia armuvannia betonu. Zvariuvalna armaturna stal. Zahalni vymohy [Steel for reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. General]. (EN 10080: 2005, IDT). Chynnyi z 01.017.2012) [Valid from 01.017.2012]. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 49 p.
- [11] Arsham H., Lovric M. (2011) Bartlett`s test. In: *International Encyclopedia of Statistical Science.* Springer, Berlin, Heidelberg. p. 87–88. DOI: 10.1007/978-3-642-04898-2_132. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252322443>
- [12] Johnson R.A. (2018) *Miller & Freund`s Probability and statistics for engineering.* Ninth Edition. Global edition. Pearson Education. 546 p. URL: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/33524/1/Richard%20A.%20Johnson_2018.pdf

Надійшла до редколегії 01.04.2025