УДК 621.771:669.14.018. 291.3:621.771.2:620.193
DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-108-133

В. Г. Раздобрєєв, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992
Д. Г. Паламар, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248
О. І. Лещенко, м.н.с., ORCID 0000-0003-1877-8358
К. Ю. Ключніков, м.н.с., ORCID 0000-0003-2465-3244

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИРОБНИЦТВА КОРОЗІЙНОСТІЙКОГО І ВОГНЕСТІЙКОГО НАПРУЖЕНОГО АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ

Анотація. Метою роботи є дослідження сучасних способів виробництва в світі корозійностійкого та вогнестійкого напруженого високоміцного арматурного прокату, призначеного для попередньо напружених залізобетонних конструкцій. Питома вартість арматури визначається відношенням її вартості до розрахункового опору і знижується при підвищенні класу міцності прокату. В Україні для виготовлення попередньо напруженого високоміцного арматурного прокату діаметром 6-40 мм періодичного профілю за ДСТУ 3760:2019 використовують економнолеговані марки сталі. Можливо також використовувати термічне зміцнення прокату з прокатного нагріву в потоці прокатного стану, або зі спеціального (окремого) нагріву. Застосовується також загартування, відпуск та також холодне деформування гладких профілів з подальшим нанесенням періодичного профілю. За Міждержавним ГОСТ 34028-2016 для країн Митного союзу напружений високоміцний арматурний прокат періодичного профілю класу А600п виготовляють в прутках і мотках діаметром 10-40 мм, а класів А800 і А1000 тільки в прутках діаметром 10-40 мм з економнолегованих марок сталей. В залежності від діаметру арматурного прокату використовують різні способи виробництва. В ГОСТ 34028-2016 записано чіткі вимоги до корозійної стійкості та методи її випробування.

В багатьох закордонних вимогах на виробництва високоміцного попередньо напруженого арматурного прокату в залежності від діаметру профілю (6-50 мм) та способу виробництва використовують вуглецеві сталі з різним максимальним вмістом вуглецю від 0,37 до 0,8 %, максимальним вмістом кремнію від 0,55 до 2,0 % та максимальним вмістом марганцю від 1,8 до 2,0 %. При цьому використовують термомеханічне зміцнення арматурного прокату з прокатного нагріву в потоці прокатних станів, загартування з окремого (спеціального) нагрівання з наступним відпуском та зміцнення механічною витяжкою з наступною низькотемпературною відпуском.

Корозія – головна причина пошкодження і руйнування залізобетонних конструкцій і будівель з попередньо напруженого арматурного прокату з вуглецевих сталей. Цю проблему у світі сьогодні вирішують із застосуванням нержавіючих сталей, які мають високу корозійну стійкість і вогнестійкість. Попередньо напружений арматурний прокат з нержавіючої сталі має більш високу

міцність і, особливо, пластичність, ніж з вуглецевої сталі. Для виробництва попередньо напруженого арматурного прокату діаметром від 5 до 75 мм використовують марки нержавіючих сталей. При виробництві періодичних профілів арматурного прокату з нержавіючої сталі існують два основні технологічні маршрути: гаряча прокатка і холодна прокатка. Перспективним шляхом є використання контрольованої гарячої прокатка та термомеханічна обробка. Зі зниженням температури прокатки підвищується твердість фази аустеніту. Для двофазних нержавіючих сталей це дозволяє досягти високих показників міцності та пластичності. Прикладом застосування попередньо напруженого високоміцного арматурного прокату у світі є: будівництво герметичних оболонок, які забезпечують запобіганню виходу радіоактивних речовин в навколишнє середовище при важких аваріях на атомних електростанціях; будівництво резервуарів для ядерних відходів; будівництво морських платформ для видобутку нафти; будівництво морських і річкових мостів, великопрольотних перекриттів, висотних споруд, доріг та інших подібних об'єктів.

Ключові слова: арматурний прокат, корозійна стійкість, економнолегована сталь, нержавіюча сталь, гаряча прокатка, холодне деформування.

Посилання для цитування: *Раздобрєєв В. Г., Паламар Д. Г., Лещенко О. І., Ключніков К. Ю.* Сучасні тенденції виробництва корозійно стійкого і вогнестійкого напруженого арматурного прокату. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 108-133. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-108-133

Вступ. Характерною особливістю використання високоміцного арматурного прокату класів А600, А800 і А1000, призначеного для попередньо напружених залізобетонних конструкцій, є її виробництво у вигляді стрижнів або мотків. Такі конструкції для житлового будівництва виробляють на заводах збірного залізобетону в основному агрегатопоточним способом з використанням натягу арматури електротермічним способом на упори форм або піддонів [1-4].

У світі існують дві основні технології попереднього напруження арматури: 1) «на упори», коли зусилля попереднього напруження передається на затверділий бетон за рахунок зчеплення або додаткових проміжних анкерів; 2) «на бетон», коли натяг арматури в каналах або пазах виробів здійснюється безпосередньо на бетон з постійним анкеруванням її по торцях виробів. В Україні та країнах колишнього СРСР застосовується, як правило, натяг «на упори», так як ця технологія простіше і дешевше [1-4].

У попередньо напружених залізобетонних конструкціях може використовуватися як термічно зміцнена стрижнева арматура, так і холоднодеформований арматурний прокат у мотках [1, 5]. Попередньо напружена арматура є носієм зовнішньої сили обтиску перерізу виробу і

працює спільно з бетоном як звичайна арматура, сприймаючи додатково до попереднього натягу зусилля розтягування або стискання, що виникають від дії зовнішніх навантажень.

Попередньо напружені залізобетонні вироби використовуються в зонах з підвищеною сейсмо- і вибухонебезпечністю [2-4, 6]. Питома вартість арматури визначається відношенням її вартості до розрахункового опору і знижується при підвищенні класу міцності прокату, у зв'язку з цим високоміцний арматурний прокат більш затребуваний, ніж гарячекатаний. Використовувати високоміцну арматуру при будівництві конструкцій без попереднього напруження не представляється можливим з огляду на те, що при виникненні великих напружень, що розтягують в певних ділянках бетону можуть утворюватися тріщини значного розкриття, які в подальшому позбавляють конструкцію заданих експлуатаційних властивостей і знижують корозійну та вогневу стійкості металу [1-4, 6].

Суть методу попередньо напружених залізобетонних виробів полягає в економічному ефекті, який досягається за рахунок використання високоміцної арматури. Крім цього, зниження чутливості до тріщин в ПНЗ виробах підвищує жорсткість, опір динамічним навантаженням, корозійну стійкість і довговічність будівельних конструкцій [4].

Мета роботи. Виконати аналіз сучасних тенденцій виробництва корозійностійкого і вогнестійкого напруженого арматурного прокату в світі.

Результати дослідження. Основним видом напруженого арматурного прокату в Західній Європі, Великої Британії, США, Канаді, Японії, Бразилії є стрижні діаметром 26-40 мм класу міцності 835/1030 і 26-36 мм класу міцності 1080/1230 (DIN 4227, JIS G3109, EN 10138, CAN CSA 6279, ASTM A 422, BS 4486 та інш.). В табл. 1 наведено сортамент та вимоги на механічні властивості високоміцного попередньо напруженого стрижневого арматурного прокату за вітчизняним ДСТУ 3760:2019 та закордонних стандартів.

Для виготовлення стрижневого попередньо напруженого арматурного прокату періодичного профілю за ДСТУ 3760:2019 використовують економнолеговані марки сталі, хімічний склад, яких наведено в табл. 2. Для виготовлення попередньо напруженого арматурного прокату періодичного профілю можна використовувати термічне зміцнення прокату з прокатного нагріву в потоці прокатного стану або зі спеціального (окремого) нагріву, а також холодне деформування гладких профілів з подальшим нанесенням періодичного профілю. Нажаль в цьому документі відсутні вимоги до виробництва та випробування арматурного прокату стійкого до корозійного розтріскування під напругою та вогнестійкості.

Таблиця 1 – Вимоги стандартів України, Росії ти закордонних країн до високоміцного попередньо напруженого стрижневого арматурного прокату.

Країна, стандарт	Клас міцності	d, мм	Механічні властивості			
			$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	σ_B, Н/мм^2	δ, %	A_{gt} або δ_p, %
Україна, ДСТУ 3760:2019	А600	8-40	≥600	≥700	δ_5≥12,0	A_{gt}≥5,0; -
	А800	8-40	≥800	≥1000	δ_5≥8,0	A_{gt}≥2,5; -
	А1000	8-40	≥1000	≥1250	δ_5≥7,0	A_{gt}≥2,5; -
РФ і країни митного союзу ГОСТ 34028-2016	Ап600	10-40	≥600	≥700	δ_5≥12,0	A_{gt}≥2,5; δ_p≥2,0
	А800	10-40	≥800	≥1000	δ_5≥8,0	A_{gt}≥2,5; δ_p≥2,0
	А1000	10-40	≥1000	≥1250	δ_5≥7,0	A_{gt}≥2,5; δ_p≥2,0
Європа, EN 10138-4	Y1030R	26,5; 32; 36; 40	-	≥1030	-	A_{gt}≥3,5; -
	Y1100R	15; 20	-	≥1100	-	A_{gt}≥3,5; -
	Y1230R	26,5; 32; 36; 40	-	≥1230	-	A_{gt}≥3,5; -
Японія, JIS G 3109-88	SD 930	10-36	≥930	≥1080	δ_5≥5,0	-; -
	SD 1080	10-36	≥1080	≥1230	δ_5≥5,0	-; -
Канада, CSA 6279 M1982	Gr800	19-36	≥875	≥1035	δ_{20}≥4,0	-; -
	Gr900	19-36	≥935	≥1100	δ_{20}≥4,0	-; -
США, ANSI ASTM A 722-90	Gr80	15-36	≥830	-	δ_{20}≥7,0	-; -
	Gr90	15-36	≥880	-	δ_{20}≥7,0	-; -
Велика Британія, BS-4486	800	26-40	≥835	-	δ_5≥6,0	-; -
ISO 6935-2:2019	B600R	6-50	≥600	≥720	δ_5≥10,0	-; -
	B700R	6-50	≥700	≥840	δ_5≥8,0	-; -

Таблиця 2 – Хімічний склад сталі для стрижневого попередньо напруженого арматурного прокату за ДСТУ 3760:2019.

Клас арматурного прокату	Масова частка елементів, %, не більше ніж						
	C	Si	Mn	P	S	N	As
A600	0,30	1,50	1,60	0,045	0,045	0,012	0,08
A800	0,37	2,40	2,30	0,040	0,040	0,012	0,08
A1000	0,32	2,40	2,30	0,040	0,040	0,012	0,08

При цьому характеристики міцності прокату повинні відповідати після електронагрівання до температур: класу А600 – 350 ºС, класу А800 – 400 ºС і класу А1000 – 450 ºС. За діючим стандартом дозволено при визначенні характеристик міцності арматурного прокату після електронагрівання замінити пічним нагріванням до температури на 50 ºС менше до відповідній температури зазначеного класу міцності та витримки за цієї температури протягом 15 хв. Відношення тимчасового опору до границі плинності ($\sigma_B/\sigma_{0,2}$) повинно бути для класу А600 $\sigma_B/\sigma_{0,2}\geq 1,08$, а для арматурного прокату класів А800 і А1000 відповідно $\sigma_B/\sigma_{0,2}\geq 1,05$. Спосіб виготовлення попередньо напруженого арматурного прокату періодичного профілю усіх класів міцності А600, А800 та А1000 за ДСТУ 3760:2019 визначає виробник за технологічним регламентом, затвердженим у встановленому порядку та на вимогу споживача виробник зазначає спосіб виготовлення у супроводжувальній документації. Треба зазначити, що прокатне обладнання та обладнання для проведення термічного зміцнення з прокатного нагріву в потоці прокатки дозволяє виробляти попередньо напружений арматурний прокат на металургійних підприємствах ПАТ «АрселорМіттал Кривій Ріг» та ПАТ «ДМК», які виробляють такий сортовий прокат. Слід додати, що для виробництва попередньо напруженого арматурного прокату можна використовувати економнолеговані марки сталі [1, 6, 7] (див. табл. 2) в поєднанні з режимами термічного зміцнення з прокатного нагріву в потоці прокатки, які мають високі показники корозійної стійкості та вогнестійкості [1, 6-9] і вважаються корозійно- і вогнестійкими.

За Міждержавним ГОСТ 34028-2016 для країн Митного союзу напружений арматурний прокат періодичного профілю класу А600п виготовляють в прутках і мотках, а класів А800 і А1000 тільки в прутках. Для виготовлення стрижневого попередньо напруженого арматурного прокату періодичного профілю усіх класів міцності А600п, А800 та А1000 за ГОСТ 34028-2016 використовують економнолеговані марки сталі хімічний склад, яких становить: C ≤0,32%; Si ≤2,40 %; Mn ≤2,30 %; P ≤0,040 %; S≤0,040 %; N ≤0,012 %. Характеристики міцності прокату

повинні відповідати після електричного нагрівання до температур для класів А600п і А800 – 400 ºС та класу А1000 – 450 ºС. Відношення тимчасового опору до границі плинності ($\sigma_B/\sigma_{0,2}$) повинно бути для класу А600п $\sigma_B/\sigma_{0,2}\geq 1,05$, а для арматурного прокату класів А800 і А1000 такої вимоги по $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ не має. При цьому вид відносного видовження (δ_p або δ_{max}) для прокату класів Ап600, А800 та А1000 встановлює замовник у замовленні. Якщо в замовлені відсутні дані про вид відносного видовження, то виробник сам встановлює вид відносного видовження і вказує його в документі про якість. Прокат арматурний періодичного профілю класів А600п, А800 та А1000 є корозійностійким, якщо зразки високоміцної арматури витримали випробування на стійкість до корозійного розтріскування за ГОСТ 31383 протягом не менш 100 годин в киплячому нітратному розчині, при напруженнях в навантажених стрижнях, рівних $0,9\sigma_{0,2}$.

Можна застосувати такі способи виробництва арматурного прокату: 1) гаряча прокатка періодичного профілю без контрольованого охолодження в потоці прокатного стану; 2) гаряча прокатка періодичного профілю з контрольованим охолодженням в потоці прокатного стану; 3) холодна обробка мотків гарячекатаного гладкого круглого прокату з нанесенням періодичного профілю; 4) холодна обробка гарячекатаного прокату періодичного профілю; 5) холодна правка та різання прокату на прутки при розмотці мотків. При виробництві високоміцного арматурного прокату періодичного профілю діаметром: 10, 11 і 12 мм використовують усі п’ять способів виробництва; 13, 14, 15, 16, 17, 18 та 19 мм використовують усі способи виробництва крім третього способу; 20, 22, 25, 28, 32, 36 і 40 мм використовують перші два способи виробництва.

Закордонний сортамент попередньо напруженого арматурного прокату пояснюється тим, що в цих країнах високоміцна стрижнева арматура використовується при натягу «на бетон» і головним завданням її застосування є можливість отримання найбільшого агрегатного зусилля попереднього напруження при високому ступені надійності і довговічності [1-3, 10]. При цьому технологія зміцнення арматури різна: термомеханічне зміцнення з прокатного нагріву в потоці прокатних станів; загартування з наступним відпуском з окремого (спеціального) нагрівання; зміцнення механічною витяжкою з низькотемпературною відпусткою гарячекатаної арматури.

При виробництві стрижневого попередньо напруженого арматурного прокату періодичного профілю за Європейським стандартом EN 10138-4 прути (стрижні) повинні виготовлятися з нелегованої високоякісної сталі по найменуванням по групам і номерами сталей за Європейським стандартом EN 10027-2 (масова частка хімічних елементів C, Si, Mn, P і S

не нормується) відповідно до prEN 10138-1:2000, 6.1: класу Y1030H зі сталі номер 1.1380; класу Y1100H зі сталі номер 1.1381; класу Y1230H зі сталі номер 1.1382. Маркування стрижнів повинно мати: а) номер даної частини даного Європейського стандарту; б) короткого найменування: 1) номеру Y для сталі для попередньо напруженої арматури; 2) номінального значення тимчасового опору розриванню в МПа; 3) літери H для гарячекатаного прута; в) номінального діаметру прута в мм; г) літера R для періодичного профілю. Наприклад, EN 10138-4 Y 1030 H 26,5 R. EN 10138-4 – номер даної частини даного Європейського стандарту. Y – сталь для попередньо напруженої арматури. 1030 – номінальне значення тимчасового опору розриванню (МПа). H – гарячекатаний прут. 26,5 – номінальний діаметр арматурного прокату (мм). R – арматурний прокат періодичного профілю. Також замість короткого найменування може використовуватися номер матеріалу, що означає: EN 10138-4-1.1380-26,5-R. Тобто записують замість номінального значення тимчасового опору розриванню номер матеріалу 1.1380. Попередньо напружений стрижневий арматурний прокат періодичного профілю повинен бути виготовлено методом гарячої прокатки. Якщо потрібна заключна обробка для досягнення певних властивостей, то для цього беруться до уваги наступні методи, окремо або в комбінації: 1) прискорене охолодження; 2) холодна пластична деформація; 3) додатковий відпуск. Серед додаткових вимог: 1) максимальна релаксація після 1000 годин при початковій силі, яка відповідає 70 % фактичній максимальній силі для арматурного прокату номінального діаметру стрижня ≤15 мм становить 6 %, а для арматурного прокату номінального діаметру стрижня >15мм становить 4 %; 2) розмах напружень циклу має становити 180 МПа за максимального напруження, що відповідає 70 % від значення фактичної максимальної сили при випробуванні на втому; 3) мінімальна довговічність при випробуванні на корозійне розтріскування в розчині NH_4SCN для окремого випробування для арматурного прокату діаметром: d=15 мм становить не менш 20 годин, 15<d≤25 не менш 60 годин, 25<d≤50 не менш 100 годин.

За стандартом ISO 6935-2:2019 при виробництві попередньо напруженого термічно зміцненого арматурного прокату діаметром від 6 до 25 мм класу B600R використовують сталь такого складу: C≤0,37 %; Si≤0,55 %; Mn≤1,80 %; P ≤0,040 %; S≤0,040 %. При виробництві високоміцного термічно зміцненого арматурного прокату діаметром 32 мм і вище можливо використовувати сталь такого складу: C≤0,40 %; Si≤1,00 %; Mn≤2,00 %; P ≤0,040 %; S ≤0,040 %. За цим же стандартом в світі виробляють арматурний прокат класу B700R зі сталі такого складу: C≤0,50 % (можливо підвищення вмісту вуглецю до 0,45 %); Si=0,55 % (підвищення вмісту Si до 1 %); Mn=1,80 % (підвищення вмісту Mn до

2,00 %); P ≤0,040 %; S ≤0,040 %. Якщо прутки виготовляються виключно способом мікролегування з подальшим холодним деформуванням без гартування і відпуску для високоміцного арматурного прокату B600D-R максимальний вміст C, Si и Mn повинно не перевищувати 0,45 %, 1,00 % и 2,00 % відповідно. За стандартом ISO 6935-2:2019 при виробництві попередньо напруженого термічно зміцненого арматурного прокату діаметром від 6 до 50 мм класу B700R використовують сталь такого складу: C≤0,50 %; Si≤2,00 %; Mn≤2,00 %; P ≤0,040 %; S ≤0,040 %. Виробництво попередньо напруженого арматурного прокату здійснюють такими способами: гарячою прокаткою, холодною прокаткою, холодним деформуванням. Випробування на корозійне розтріскування під напругою попередньо напруженого арматурного прокату проводять за вимогами стандарту ISO 8044.

За стандартом Японії JIS G 3109-88 виготовляють попередньо напружений арматурний прокат періодичного профілю з нелегованої сталі з вмістом вуглецю в межах 0,45-0,80 %, а в стандартах Канади, США, Південної Америці та Великої Британії вміст вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору та сірки не нормується. В усіх закордонних стандартах показниками якості високоміцного арматурного прокату є: границя плинності умовна $\sigma_{0,2}$, тимчасовий опір при розриванні $\sigma_в$, відносне видовження після розривання на базі 5-ти (δ_5) або 20-ти (δ_{20}) діаметрі прокату або повне відносне видовження за максимального навантаження A_{gt}, релаксаційна стійкість, корозійна стійкість, вогнестійкість, міцність при випробуванні на втому.

Корозія – головна причина пошкодження і руйнування залізобетонних конструкцій і будівель з попередньо напруженого арматурного прокату з вуглецевих сталей [1, 6, 7, 10-17, 19, 21]. Цю проблему у світі сьогодні вирішують із застосуванням нержавіючих сталей, які мають високу корозійну стійкість і вогнестійкість. Серед традиційних методів запобігання корозії арматури з вуглецевої сталі – збільшення товщини бетонного шару, який покриває залізобетону конструкцію або вироби, застосують додавання спеціальних добавок в бетон, наносять захисні покриття на арматурний прокат (цинкування або полімерне покриття), застосовують інгібітори корозії або катодний захист і т.д. Проте, ці захисні заходи – лише тимчасові і лише незначно підвищують термін служби конструкції.

Залізобетонні конструкції, найбільш схильні до дії хлоридів, які виявляються через вплив морського середовища або солей, які використовують проти обмерзання особливо ті частини конструкції, які піддаються циклам змочування і висихання. Це можуть бути морські конструкції, схильні до змочування і висихання (наприклад, в зонах

припливів або бризок) або в дорожніх спорудах або на автостоянках, що піддаються впливу солей для захисту від обмерзання доріг.

Напружувана стрижнева арматура, яка має невисокі пластичні характеристики, може бути схильна до крихкого корозійного руйнування. При певних умовах розтягуючи напруги інтенсифікують розвиток місцевих пошкоджень виразкового характеру, що призводить до корозійної крихкості арматури. Це найбільш небезпечно для стрижнів малого діаметра. Особливим випадком корозії під напругою є корозійне розтріскування, яке може розвиватися приховано, не викликаючи ушкоджень захисного шару бетону, але приводить до раптового руйнування конструкцій. Корозійне розтріскування арматури може бути результатом або виборчого анодного розчинення заліза в зоні дна концентраторів напруг і мікротріщин, що розвиваються, або наводнювання.

Використання попередньо напруженого арматурного прокату з нержавіючої сталі значно зростає в різних частинах світу, особливо на Близькому і Далекому Сході та в Північній Європі і Північній Америці.

Нержавіючі корозійностійкі сталі, що застосовуються для армування бетону, є корозійностійким замінником вуглецевих сталей. Їх підвищена міцність забезпечує зниження маси, а більш висока вартість компенсується при першому ж ремонті споруд з арматурою з вуглецевих сталей. Цей факт доведений при експлуатації споруд із застосуванням багатьох елементів з корозійностійкої сталі на прибережних нафтогазових родовищах в Північному морі.

Застосування для залізобетонних мостів арматури з корозійностійкої сталі дозволяє спростити способи і варіанти рішень для запобігання появи корозії і захисту від неї. Довговічність нержавіючої корозійностійкої сталі достатня для того, щоб витримати повністю проектний термін служби – 120 років для залізобетонних мостів.

Нержавіючі сталі зазвичай визначаються як ті, які містять не менше 12 % хрому в якості легуючого компонента. Присутність хрому призводить до утворення тонкого шару стабільного оксиду хрому на поверхні сталі. Оксидний шар є пасивним і дуже стійким до атмосферної корозії. Більш того, оксидний шар миттєво самовідновлюється в умовах окислення, так що тріщини, дефекти або пошкодження поверхні не впливають на корозійну стійкість. Нержавіюча сталь зберігає пасивність в бетоні при низьких рівнях *pH* і високих концентраціях хлоридів, тому вони використовуються в конструкціях, схильних до ризику корозії, викликаної хлоридом.

Для виробництва попередньо напруженого арматурного прокату використовують марки нержавіючих сталей, що і при виробництві

ненапруженого арматурного прокату (табл. 3) [18], а в табл. 4 наведено сортамент та вимоги до механічних властивостей попередньо напруженого арматурного прокату з нержавіючих марок сталей, що виробляються в деяких країн світу.

Таблиця 3 – Хімічний склад нержавіючих сталей, мас. %

Хімічний елемент	Марка сталі						
	1.4301	1.4311	1.4597	1.4404	1.4429	1.4462	1.4362
C	0,043	0,024	0,053	0,018	0,020	0,019	0,023
Si	0,4	0,4	0,8	0,5	0,5	0,4	0,5
Mn	0,8	1,5	7,5	1,5	1,7	1,6	1,5
Ni	8,9	8,6	1,9	11,3	11,1	5,5	4,7
Cr	18,1	18,6	16,3	18,2	18,3	22,9	23,2
Mo	0,4	0,4	0,3	2,5	2,7	2,8	0,2
Cu	0,4	0,4	3,0	0,1	0,3	0,2	0,2
N	0,040	0,140	0,205	0,046	0,132	0,150	0,081
S_{ppm}	85	13	2	13	6	3	5

Таблиця 4 – Сортамент та нормовані механічні властивості арматурного прокату з нержавіючих марок сталей закордонних виробників.

Країна, стандарт	Клас міцності	d, мм	Механічні властивості			
			$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	A_{gt}, %
Велика Британія, BS-6744:2016+A2	Gr 650	10-50	≥650	≥715	$\delta_5 \geq 14,0$	$A_{gt} \geq 5,0$
Німеччина, DIN 488	Bst 600	12-50	≥600	≥670	$\delta_5 \geq 15,0$	$A_{gt} \geq 5,0$
	S 670/800	18-75	≥670	≥800	$\delta_5 \geq 10,0$	$A_{gt} \geq 5,0$
Австрія, NORM B420	Bt 600	10-50	≥600	≥670	$\delta_5 \geq 15,0$	-
США, ASTM A706/A706M	G 80 (550)	10-55	≥550	≥690	$\delta_5 \geq 10,0$	-

Попередньо напружений арматурний прокат зі нержавіючих марок сталей використовується при проектуванні залізобетонних конструкцій за такими нормативними документами ЄС та Великій Британії: Технічний звіт 51 Товариства бетону, «Керівництво з використання арматури з нержавіючої сталі, 1998»; BS 6744:2016 Додаток до звіту Північного інноваційного центру «Керівництво з використання арматури з нержавіючої сталі в бетоні»; рекомендації британського агентства по автомобільним дорогам «BA 84/02»; Технічний звіт «Використання

арматури з нержавіючої сталі в мостах», доступному в BSSA. Арматурний прокат з нержавіючих марок сталей проходить обов'язкову сертифікацію за системами менеджменту якості, що відповідають міжнародним вимогам ISO 9001 та вимогам Британського співдружності CARES.

Використання арматури з нержавіючої сталі демонструють стійку тенденцію до розширення в багатьох країнах. Її позитивний вплив на експлуатаційну довговічність будівельних конструкцій перевірено і підтверджено. Часто рекомендують аустенітні стали завдяки хорошому поєднанню корозійної стійкості та вогнестійкості в бетоні, міцності і пластичності. Економічні та технічні переваги надають також двофазні стали. Вони рівноцінні або перевершують аустенітні по корозійної стійкості, але мають більш високі значення тимчасового опору руйнуванню і границі плинності (табл. 5) [19].

Таблиця 5 – Порівняння властивостей при розтягуванні арматурного прокату періодичних профилей з нержавіючої сталі 1.4301 і вуглецевої сталі (холоднодеформована, 8 мм).

Показник	Вуглецева сталь	Нержавіюча сталь
R_m, *МПа*	600	880
$R_{p0,2}$, *МПа*	560	670
$R_m/R_{p0,2}$	1,07	1,31
A_{gt}, *%*	7,5	21,0
A_{5d}, *%*	12,0	35,0
Примітка: R_m – тимчасовий опір розриванню; $R_{p0,2}$ – умовна границя плинності; A_{gt} – повне видовження при максимальному навантаженні; A – видовження при розриванні на базі 5-ти діаметрів арматурного прокату.		

З даних табл. 5 витікає, що арматурний прокат з нержавіючої сталі має більш високу міцність і, особливо, пластичність, ніж з вуглецевої сталі. Попередньо напружений арматурний прокат з нержавіючих сталей, наприклад сталі аустенітного класу або аустеніто-феритного (двофазова або дуплекс сталь) класу, відрізняються високим опором втоми і пластичністю. У них розсіювання енергії пластичної деформації щонайменше в 2 рази більше, ніж у вуглецевих сталей, і це дає значну перевагу при реалізації будівельних проектів в зонах сейсмічної активності.

Арматурний прокат з аустенітних та двофазових нержавіючих сталей зберігає високі механічні властивості при підвищених температурах: границя плинності і тимчасовий опір знижуються лише поступово при підвищенні температури, тоді як у вуглецевих сталей ці властивості різко

падають при температурах вище +500 °С. Крім того будівельні конструкції, армовані нержавіючої сталлю, менш схильні до розтріскування бетону завдяки мінімальному утворенню оксидів на поверхні арматури при високих температурах. Обидва ці фактори сприяють кращому збереженню цілісності конструкції в разі пожежі.

Аустенітні нержавіючі сталі не мають ділянки переходу з пластичного в крихкий стан поблизу 0 °С, що характерно для вуглецевих сталей. Таким чином вони є гарним матеріалом для криогенного застосування, оскільки зберігають дуже високу в'язкість при температурах до -196 °С. Двофазні сталі не слід застосовувати при температурах нижче -50 °С.

Прокат з аустенітних і двофазових сталей вважають немагнітними (парамагнітним), хоча їх магнітна проникність різна в залежності від хімічного складу і методів холодної обробки тиском. Арматурний прокат з аустенітної та аустеніто-феритної нержавіючої сталі використовують, коли є необхідність регулювати або зменшувати вплив магнітного поля, наприклад, в будівлях медичного призначення, для радіо- і телевізійних передавачів, в містах з високим рівнем комп'ютеризації, аеропортах (станції управління повітряним транспортом) і об'єктах біоархітектури.

Аустенітні і аустеніто-феритні сталі мають низьке значення теплопровідності, що дозволяє використовувати їх в будівлях з метою обмеження теплових мостів і створення кращої теплоізоляції. Аустенітні сталі і, в меншій мірі, двофазні (дуплексні) сталі мають більш сильне термічне розширення, ніж звичайні вуглецеві. Це врівноважується зниженою теплопровідністю, що знижує швидкість теплового розширення. В даний час відсутні повідомлення про будь-які проблеми в бетонних спорудах, пов'язаних з тепловим розширенням нержавіючого арматурного прокату.

Головний недолік арматури з нержавіючої сталі – її первісна вартість. Ціни на нержавіючу сталь приблизно в 6-10 разів вище, ніж на вуглецеву. Однак ціна арматури – тільки невелика частина загальних витрат на будівельний проект. В кінцевому підсумку різниця виявляється мінімальною. Численні дослідження, засновані на розрахунку вартості життєвого циклу і проведені в країнах Північної Америки і Європи на базі багаторічного моніторингу споруд, показали, що застосування арматурного прокату з нержавіючих сталей є економічним рішенням на шляху оптимізації загальної вартості спорудження, особливо зниження витрат на його обслуговування.

У виробництві періодичних профілів арматурного прокату з нержавіючої сталі існують два технологічні маршрути: гаряча прокатка і холодна прокатка (рис. 1).

Холодна прокатка обмежена порівняно малими діаметрами, оскільки

для пластичного деформування потрібні великі зусилля. Гладку круглу сталь теж можна використовувати в якості арматури, але в цій роботі розглядаються тільки ребристі (профільовані) арматурні профілі діаметром 5-50 мм. Продукцію меншого діаметру можна виробляти як сортовий прокат в бунтах.

Холоднодеформовані прутки або дріт, холоднокатані періодичні профілі з аустенітних і двофазних сталей мають високу міцність у поєднанні з хорошою пластичністю. Висока ступінь деформаційного зміцнення аустенітних нержавіючих сталей дозволяє досягти високих рівнів границі плинності (500 Н/мм^2 і вище) і відносне видовження при максимальному навантаженні (A_{gt}), яке перевищує 15 %.

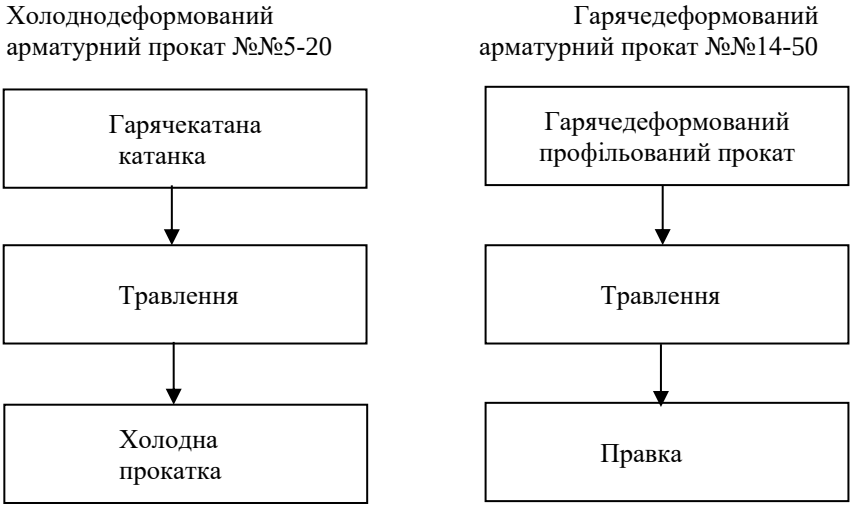

Рисунок 1 – Схеми виробництва нержавіючих холодно- і гарячедеформованого арматурного прокату періодичного профілю.

На противагу цьому гарячекатані прутки з аустенітної сталі зазвичай мають більш низьке значення границі плинності через процес рекристалізації, який протікає при гарячій обробці тиском. Наприклад, границя плинності стали марки 1.4301 в стані після холодної прокатки дорівнює приблизно 300 Н/мм^2. Для підвищення міцності в гарячекатаному стані потрібна модифікація хімічного складу (добавка азоту) і/або обробка в теплому стані [20]. Аустенітні сталі 1.4311 (304LN) і 1.4404 або 1.4429 (316LN) можуть служити альтернативою сталей 1.4301 і 1.4404 в процесі

гарячої прокатки. До аустенітних нержавіючих сталей широко застосовують зміцнення азотом. У стані відпалу вплив добавки азоту проявляється в підвищенні значень границі плинності на 50-70 Н/мм^2 при підвищенні добавок азоту на кожні 0,1 % N. Однак аустенітна сталь досягає значення границі плинності рівня 450 Н/мм^2 в звичайному стані після прокатки. Ще один спосіб досягти підвищеної міцності – регулювання режиму гарячої прокатки з метою зменшити розмір зерна (ефект Холла-Петча) або навіть загальмувати рекристалізацію. Зниження температури кінця прокатки дозволяє отримати частково рекристалізовану мікроструктуру зі збереженням деякої деформації в структурі і підвищений рівень границі плинності. Цей процес схожий з теплою обробкою тиском сталей і сплавів [20].

Значення границі плинності двофазних сталей приблизно вдвічі вище, ніж у аустенітних у стані відпалу. У гаряче-і холоднокатаних періодичних профілів зі сталі 1.4462 легко досягаються значення 500 і 650 Н/мм^2 відповідно (рис. 2) [20].

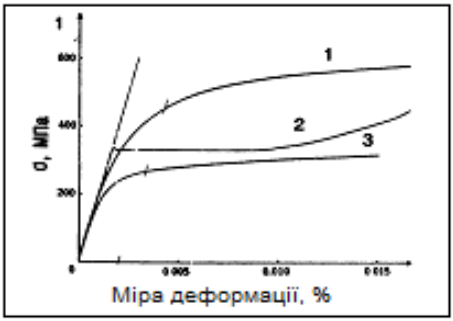

Рисунок 2 – Криві напруга-деформація аустенітних (304L, 316L), вуглецевих і двофазних (1.4462) сталей.
1 – двофазна (1.4462);
2 – вуглецева сталь;
3 – аустенітні сталі 304L, 316L.

Значне деформаційне зміцнення двофазних сталей 1.4462 і 1.4362 дозволяє отримати досить високу міцність. При цьому пластичність вище, ніж у вуглецевої сталі [20]. Крім цього за даними проф. Алана Манна з Інституту сталевих конструкцій (Велика Британія) та інш. [21], встановлено, що при проектуванні основна різниця між аустенітними і вуглецевими сталями полягає в їх механічних властивостях, оскільки границя плинності і модуль пружності корозійностійких сталей були нижче. Це обумовлює великі припуски на вигин, однак фактична величина менше теоретичної, оскільки деформація, як в холоднодеформованих профілів, швидко підвищує міцність елементів шляхом наклепу. Такий високий коефіцієнт деформаційного зміцнення пояснює, наприклад, застосування цих сталей в якості матеріалу для штангового кріплення

(профільований арматурний прокат для гірничих шахт) в гірничій справі. При перевантаженні в очікуванні гірничого удару вони піддаються деформації і зміцненню, попереджаючи, таким чином, про наближення руйнування, на відміну від альтернативних їм вуглецевих матеріалів, які руйнуються без попередження. Ще однією перевагою нержавіючих сталей служить збереження міцності при більш високих у порівнянні з вуглецевими сталями температурах і, отже, їх вища вогнестійкість. Крім того, при використанні в низькотемпературних умовах вони не проходять через критичну температуру крихкості. У висновку проф. А. Манн стверджує, що нержавіючі сталі підходять для використання в залізобетоні незважаючи на те, що коефіцієнт їх розширення на 40 % вище цього показника у бетону. Це спростовує колишні теорії армування, згідно з якими метал і бетон повинні мати близькі коефіцієнти розширення для досягнення міцного зв'язку в композиті.

Термомеханічна обробка з контрольованою гарячої прокаткою, яка застосовується до двофазних нержавіючих сталей, також дозволяє досягти високої міцності, а особливо високої пластичності. Зі зниженням температури прокатки підвищується твердість фази аустеніту. Завдяки високим механічним властивостям арматура з двофазних сталей дає додаткову економію металу, так як при даному навантаженні можна використовувати прутки меншого поперечного перерізу.

В Північній Америці (США, Канада, Мексика) попередньо напружений профільований арматурний прокат з нержавіючої корозійностійкої сталі виготовляють в двох формах: як суцільний стрижень і як плакованих виріб, що має сердечник з вуглецевої сталі і тонку оболонку з корозійностійкої сталі. При формуванні стрижня для забезпечення зчеплення серцевини і покриття матеріал піддається термічній обробці, під час якої міцність нержавіючого покриття зростає, досягаючи, в залежності від діаметру стрижня, величин більше 900 Н/мм^2. Це вище, ніж для вуглецевої сталі, тобто з'являється можливість зменшити діаметр стрижня, знизивши, таким чином, вартість матеріалу.

В Великій Британії (див. табл. 3) найбільш широко використовуються арматурний прокат з нержавіючих сталей сплави 1.4301, 1.4436 і все частіше 1.4462. Сплав 1.4301 є основною аустенітною сталлю, тоді як сплав 1.4436 також є аустенітною сталлю, але з мінімальним додаванням 2,5 % молібдену, що потрібно для підвищення стійкості арматурного прокату до піттінг-корозії. Сплав 1.4462 є дуплекс сталлю. Арматурний прокат зі сплаву 1.4429 зазвичай використовується в Північній Америці і рідше в Європі. Він має високу корозійну стійкість і забезпечує чудові механічні властивості при роботі з прутками великого діаметру. Два останні сплави за стандартом BS 6744:2016 використовуються для спеціальних,

висококорозійних застосувань. Сплави отримують електродуговим процесом. Після цього відбувається вторинний процес рафінування, або AOD процес (зневуглецювання киснем аргону), або VOD (зневуглецювання киснем в вакуумі). Перед гарячої прокаткою сталі безперервно відливають в заготовки. Арматурний прокат отримують безпосередньо гарячою прокаткою. Також після гарячої прокатки можливо застосування холодного деформування.

Арматурний прокат з нержавіючих сталей не схильні до старіння через їх аустенітну структуру, і, отже, немає необхідності проводити випробування на повторний вигин. Випробування на вигин включено в BS 6744:2016. Випробування на втомну міцність, яка зазначена для нержавіючих сталей в BS 6744:2016, аналогічна визначенню втомних характеристик при випробуванні для вуглецевих сталей за стандартом BS 4449:2005. Це означає, що нержавіючі сталі можуть бути замінені в розрахунках на втому замість вуглецевих сталей без значних модифікацій конструкції.

Відповідним критерієм оцінки корозійної стійкості нержавіючої сталі в бетонної конструкції може служити потенціал виразкової корозії (потенціал пітингутворення): чим вище потенціал пітингутворення, тим вище корозійна стійкість. Виразкова корозія (англ. Pitting, від англ. Pit - покриватися ямками) – корозія металів, яка призводить до утворення пітингу, тобто виразок, порожнин в металі, що починаються з його поверхні. Зовні пітинг проявляється у вигляді появи заглиблень на поверхні металу. Пітинги виникають головним чином в захисному шарі (нанесеному або утворився природним чином) по місцях різних дефектів (тріщин від внутрішніх напружень, пор, мікровключень, виходу на поверхню границь зерен, дислокацій і т. п.).

Прокатна окалина або її залишки на сталевих поверхнях – одна з причин виразкової корозії. Виразкова корозія спостерігається в розчинах хлорного заліза, суміші соляної та азотної кислот, морській воді і багатьох інших агресивних середовищах. Руйнування спостерігається при наявності в корозійному середовищі іонів-активаторів процесу (*Cl, Br, I*) і пасиваторів.

Провели прискорені корозійні випробування аустенітних і двофазних нержавіючих сталей наступних марок: 1.4301, 1.4311, 1.4597, 1.4404, 1.4429, 1.4362 і 1.4462 (табл. 3) [19], використовуючи потенціостат для побудови потенціодинамічних поляризаційних кривих. Випробування провели на трьох різних режимах. Ці вельми агресивні середовища можуть відповідати умовам служби мостових опор, занурених у морську воду або підданих дії агентів проти обледеніння.

Двофазна сталь 1.4462 мала найвищу стійкість до виразкової корозії, і її можна рекомендувати для найбільш важких умов. Сталь 1.4362 має більш низький потенціал пітингутворення, ніж сталь 1.4462, але все ж більш високий, ніж аустенітних сталей. Аустенітні сталі з високим вмістом азоту також показують досить високий потенціал пітингутворення. У лужному середовищі молібден не забезпечує підвищеної стійкості до виразкової корозії, як це можна спостерігати при порівнянні зі сталями 1.4031 і 1.4404 з низьким вмістом азоту і сталями 1.4311 і 1.4429 з підвищеним азотом. Це відрізняється від звичайної поведінки нержавіючих сталей. Мабуть, двофазна сталь 1.4362 може стати більш економічною альтернативою аустенітної сталі.

Рекомендації на основі результатів корозійних випробувань можна дати, використовуючи класифікацію умов служби за Європейським стандартом EN 206-1. Кожен клас відповідає навколишніх умов з потенційним ризиком посилення корозійних явищ в конструкції. Марки сталей, придатні для використання в середовищах різних класів представлені в табл. 6.

Таблиця 6 – Рекомендовані марки сталей відповідно до класів корозійного впливу за стандартом EN 206-1.

Клас	Визначення	Марка сталі
XC	Корозія, яка викликана карбонізацією	1.4597, 1.4301, 1.4404, 1.4311, 1.4429
XD	Корозія, яка викликана хлоридами іншими, ніж хлориди морського походження	1.4362, 1.4311, 1.4429
XS	Корозія, яка викликана хлоридами з морської води	1.4462
XF	Вплив замерзання/відтавання, в присутності або відсутності агентів проти обледеніння	1.4462

Нижче наведемо приклади використання арматурного прокату з нержавіючих марок сталей у світі.

Результати польових випробувань в США [22], де існує серйозна проблема корозії арматурного прокату в мостах, плаковані корозійностійкої сталлю 304 стрижні були встановлені в прогонових будовах моста в м. Хемілтон Тауншіп в 1983-1984 рр. Умови експлуатації моста важкі. Нещодавно був проведений огляд арматурного прокату і з моста взяті чотири зразки. Вони містили дев’ять стрижнів, які були в

чудовому стані, і корозії корозійностійкої сталі відзначено не було. Для порівняння під пластмасовою кінцевою кришкою, які використовують на відрізних кінцях, була значна корозія на зразках з вуглецевої сталі.

Для армування прогонової будови моста в м. Детройті, шт. Мічиган, встановленого в 1982 р були застосовані суцільні стрижні зі сталі 304; інспекція моста була проведена після десяти років служби. Встановлено відсутність пошкодження бетону під дією корозії без будь-яких результатів впливу на стрижні через їх розміщення в бетоні.

У доповіді, опублікованій Трідуейемом, Коксом і Брауном в «Працях інституту інжнерів-будівельників» представлені результати випробувань на вплив зовнішнього середовища, проведених Фондом досліджень будівель з метою визначення характеристик експлуатації різних матеріалів в бетонних призмах, що містять хлоридні добавки чотирьох різних концентрацій [22]. При десятирічному терміні служби тільки аустенітна корозійностійка сталь характеризується повною придатністю до експлуатації в призмах, що містять 3,2 % хлоридних іонів (що еквівалентно 5 % по масі цементу). На феритні корозійностійкі сталі 405 і 430 вплинула висока концентрація хлоридів, і їх придатність до експлуатації погіршилася. Ще через 12 років зовнішній вигляд стрижнів виявився таким же, як і в день їх установки. Цей термін вважається най тривалішим строком випробувань у всьому світі.

Арматура з корозійностійкої сталі була застосована при спорудженні та ремонті собору св. Павла (м. Лондон, Велика Британія). За часів «великої реставрації» собору (1925-1930 рр.) пройшло лише 12 років з моменту відкриття Гаррі Бріерлі корозійностійкої сталі (1913 р.) На будівництво основи восьми опор було витрачено 120 т арматури з корозійностійкої сталі. По периферії купола щоб уникнути подальшого поширення тріщин було встановлено плосколанковий ланцюг, який також виготовлено з аустенітної корозійної стали. Вони служать ось уже понад 90 років. Протягом цього періоду більшість металевих кріплень і закрепів кам'яної кладки були замінені на аустенітну корозійну сталь. Це служить безсумнівним свідченням довговічності і ефективності застосування аустенітної корозійної стали в будівництві, в тому числі в умовах прояву гальванічної корозії.

Тривалі випробування, які проводяться в США, показали, що застосування корозійностійкої сталі для виготовлення арматурного прокату бетонних мостів збільшує вартість конструкції приблизно на 6-16 %. При заміні будівель перехід на арматурний прокат з корозійностійкої сталі замість вуглецевої додає приблизно 7,9 % до витрат. Це зіставляється з вартістю ремонту, що досягає 15,6% загальної вартості конструкції в поточних цінах. І це без урахування вартості переривання транспортного потоку.

В Австралії побудовано міст *Gateway Bridge* при використанні попередньо напруженого високоміцного арматурного прокату з нержавіючої сталі, термін експлуатації 300 років, яке визначено фірмою англійською фірмою Aecom з використанням прогнозного моделювання. У Франції при будівництві фірмою Valbruna UK Ltd резервуарів для ядерних відходів використовували високоміцний арматурний прокат з нержавіючої сталі. Прогнозне моделювання фірмою Aecom показало, що гарантований термін служби цих побудованих резервуарів не менш 300 років. Також прикладом застосування попередньо напруженого високоміцного нержавіючого арматурного прокату у світі є: будівництво герметичних оболонок, які забезпечують запобіганню виходу радіоактивних речовин в навколишнє середовище в разі внутрішньої аварії з розривом великих трубопроводів і втратою теплоносія на атомних електростанціях (АЕС), а також в разі зовнішніх подій: землетрусів, цунамі, ураганів, смерчів, падінь на АЕС літаків, вибухів, ракетних ударів по АЕС; будівництво морських платформ для видобутку нафти; будівництво морських і річкових мостів, великопрольотних перекриттів, висотних споруд, доріг та інших подібних об'єктів. При цьому будівництво герметичних оболонок АЕС є вимогою МАГАТЕ після відомої аварії на Чорнобильської АЕС та на АЕС у м. Фукусіма в Японії.

Є ще приклади використання виробів з нержавіючого арматурного прокату. Доктор П. Харіссон вважає [21], що є безліч «прихованих» областей застосування корозійностійких сталей в будівлях з обробкою з цегляної кладки. Наприклад, профільованих металевих виробів з нержавіючих сталей у вигляді вбудованих елементів виробляють майже виключно з аустенітних марок: 304L (номінально 17-19 % Cr, 9-12 % Ni, максимально 0,03 % C) або 316L (номінально 16,5-18,5 % Cr, 11-14,5 % Ni, 2-3 % Mo, максимально 0,03 % C). Застосування останньої сталі забезпечує підвищену корозійну стійкість, особливо в середовищах, які вміщують хлориди, а добавка молібдену зменшує точкову корозію. В даний час закрепи для стін полегшеної кладки виконуються виключно зі сталі марки 304, в тому числі при ремонтних роботах на стінах, де закрепи раніш були з вуглецевої сталі з цинковим покриттям, які руйнувались корозією.

Висновки

1. Проведено аналіз сучасного стану виробництва корозійностійкого і вогнестійкого напруженого арматурного прокату високої міцності у світі і в Україні.

2. Встановлено, що в Україні для виготовлення попередньо напруженого високоміцного арматурного прокату діаметром 6-40 мм періодичного профілю за ДСТУ 3760:2019 в якості матеріалу використовують економнолеговані марки сталі та здійснюють термічне зміцнення прокату з прокатного нагріву в потоці прокатного стану або зі спеціального (окремого) нагріву загартування та відпуску, а також холодне деформування гладких профілів з подальшим нанесенням періодичного профілю. Нажаль в ДСТУ 3760:2019 відсутні вимоги до виробництва та випробування арматурного прокату стійкого до корозійного розтріскування під напругою та вогнестійкості.

3. Показано, що за Міждержавним ГОСТ 34028-2016 для країн Митного союзу напружений високоміцний арматурний прокат періодичного профілю класу А600п виготовляють в прутках і мотках діаметром 10-40 мм, а класів А800 і А1000 тільки в прутках діаметром 10-40 мм з економнолегованих марок сталей. В залежності від діаметру арматурного прокату використовують різні способи виробництва і в ГОСТ 34028-2016 записано чіткі вимоги до корозійної стійкості та методи її випробування.

4. Встановлено, що в багатьох закордонних вимогах на виробництва високоміцного попередньо напруженого арматурного прокату в залежності від діаметру профілю (6-50 мм) та способу виробництва використовують вуглецеві сталі з різним максимальним вмістом вуглецю від 0,37 до 0,8 %, максимальним вмістом кремнію від 0,55 до 2,0 % та максимальним вмістом марганцю від 1,8 до 2,0 %. При цьому використовують термомеханічне зміцнення арматурного прокату з прокатного нагріву в потоці прокатних станів або загартування з окремого (спеціального) нагрівання з наступним відпуском та зміцнення механічною витяжкою з наступною низькотемпературною відпусткою гарячекатаного арматурного прокату. Однак, головною причиною пошкодження і руйнування залізобетонних конструкцій і будівель з попередньо напруженого арматурного прокату з вуглецевих сталей є корозійні процеси, які виникають в цих конструкціях.

5. Показано, що у світі використовують попередньо напружений високоміцний арматурний прокат з нержавіючої сталі, який має більш високі показники міцності і пластичності, а також корозійної стійкості і вогнестійкості, ніж такий же прокат з вуглецевої сталі. Для виробництва попередньо напруженого арматурного прокату діаметром від 5 до 75 мм використовують марки нержавіючих сталей, що і при виробництві ненапруженого арматурного прокату. При виробництві періодичних профілів арматурного прокату з нержавіючої сталі існують два основних технологічних маршрути: гаряча прокатка і холодна прокатка.

Перспективним шляхом є використання термомеханічної обробки з контрольованою гарячої прокаткою, яка застосовується до двофазних нержавіючих сталям і дозволяє досягти високих показників міцності а, особливо, пластичності.

6. Встановлено, що у світі застосовують попередньо напружений високоміцний арматурний прокат стійкий до різноманітних корозійних пошкоджень і стійкий до роботи в умовах високих температур (t≥+500 °С) при: будівництві герметичних оболонок, які забезпечують запобіганню виходу радіоактивних речовин в навколишнє середовище при важких аваріях на атомних електростанціях; будівництві резервуарів для ядерних відходів; будівництві морських платформ для видобутку нафти; будівництві морських і річкових мостів, великопрольотних перекриттів, висотних споруд, доріг та інших подібних об'єктів.

Перелік посилань

1. Кугушин А. А., Узлов И. Г., Калмыков В. В., Мадатян С. А., Ивченко А. В. Высокопрочная арматурная сталь. Москва : Металлургия, 1986. 272 с.
2. Звездов А. И., Михайлов К. В., Волков Ю. С. Предварительно-напряженный железобетон: состояние и перспективы развития. *Бетон и железобетон*. 2000. № 5. С. 2-4.
3. Звездов А. И., Михайлов К. В., Волков Ю. С. XXI век – век бетона и железобетона. *Бетон и железобетон.* 2001. № 1. С. 2-6.
4. Асатрян Л. В. Эффективность строительства с применением технологии преднапряжения железобетона. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2008. № 2. С. 55-57.
5. Юхвец И. А. Производство высокопрочной проволочной арматуры. Москва : Металлургия, 1973. 264 с.
6. Мадатян С. А. Сравнительнй анализ применения арматуры в железнобетонных конструкциях в России и за рубежом. *Вестник МГСУ.* 2013. № 11. С. 7-18.
7. Красовская Г. М., Крошков Б. В. Предварительно упрочненная арматура предварительно напряженных железнобетонных конструкций, стойкая против коррозионного растрескивания. *Защита строительных материалов и конструкций от коррозии: материалы Всесоюзного научно-технического совещания, Киев, ноябрь 1973.* С. 37-38.
8. Узлов И. Г., Раздобреев В. Г., Сидоренко О. Г., Шеремет В. А., Кекух А. В. Высокоэффективный термомеханически упрочненный прокат разных уровней прочности. *Сталь.* 2004. № 6. С. 83-87.
9. Узлов И. Г., Раздобреев В. Г., Сидоренко О. Г., Шеремет В. А., Кекух А. В., Мамаев А. В. Новые технологические решения термомеханического упрочнения арматурного проката различных классов прочности. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2004. № 5. С. 61-64.
10. Шеремет В. А., Кекух А. В., Раздобреев В. Г., Куваев В. Н., Иванов Д. А. Влияние режимов термомеханической обработки на структуру, механические и служебные свойства термоупрочненной арматуры класса А1000. *Изв. ВУЗов.*

Черная металлургия. 2004. № 11. С. 40-43.
11. Арматурный прокат для железобетонных конструкций и изделий. Справочное пособие. Под редакцией Ю. Т. Худика, А. В. Кекуха. Кривой Рог : СП «Мира», 2003. 115 с.
12. Подвальный А. М. Физико-химическая механика - основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона. *Бетон и железобетон.* 2000. № 5. С. 23-27.
13. Ягупов Б., Иванов А. К вопросу о силовом сопротивлении железобетона, поврежденного химкоррозией. *Бетон и железобетон.* 2010. № 4. С. 22-26.
14. Калмыков В. В., Узлов И. Г., Гречная И. Я., Раздобреев В. Г. Влияние особенностей структурного состояния конструкционной стали на ее коррозию в кислой среде. *Физико-химическая механика материалов.* 1999. Т. 35. № 2. С. 119-120.
15. Калмыков В. В., Гречная И. Я., Раздобреев В. Г. Влияние углерода и кремния на коррозионное поведение термически упрочненных арматурных сталей. *Сб. научн. трудов Донецкого Государственного Технического Университета.* Донецк : Изд-во ЛИК, 1998. С. 268-273.
16. Калмыков В. В., Раздобреев В. Г. Влияние структурных особенностей конструкционной стали на ее коррозию в 3%-ном растворе NaCl при переменном погружении. *Защита металлов.* 1999. Т. 35. № 6. С. 600-602.
17. Раздобрєєв В. Г. Вплив вуглицю на корозійну поведінку термічно зміцненного прокату. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії*, 2020. Вип. 34. С. 170-189.
18. Раздобрєєв В. Г., Паламар Д. Г. Сучасні тенденції виробництва корозійностійкого і вогнестійкого ненапруженого арматурного прокату. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії,* 2020. Вип. 34. С. 190-201.
19. Bourgin C., Chauveau E., Dermelin B. Stainless steel rebar: the choice of service life. *La Revue de Metallurgie. CIT*, 2006, 2, p.p. 89-98.
20. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей. Москва : Металлургия, 1982. 184 с.
21. Stainless Steel in construction industry. BSSA Conference Report. *Steel Times,* 1996, 1, p.p. 21-23.
22. Cochrane D. Y. Austenitic stainless steel – The solution to rebar corrosion. *Steel Times,* 1996, 1, p.p. 19-20.

References

1. Kugushin A.A., Uzlov I.G., Kalmykov V.V., Madatyan S.A., Ivchenko A.V. (1986). *Vysokoprochnaya armaturnaya stal' [High strength reinforcing steel]*. Moskva: Metallurgiya, 1986. 272. [In Russian].
2. Zvezdov A.I., Mikhaylov K.V., Volkov Yu.S. (2000). Predvaritel'no-napryazhennyy zhelezobeton: sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Prestressed reinforced concrete: state and development prospects]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete], 2000, 5,* 2-4. [In Russian].

3. 3 Zvezdov A.I., Mikhaylov K.V., Volkov Yu.S. (2001). XXI vek – vek betona i zhelezobetona [XXI century - the century of concrete and reinforced concrete]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete], 2001, 1,* 2-6. [In Russian].
4. Asatryan L.V. (2008) Effektivnost' stroitel'stva s primeneniyem tekhnologii prednapryazheniya zhelezobetona [Efficiency of construction using reinforced concrete prestressing technology]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka [Building materials, equipment, technologies of the XXI century], 2008, 2,* 55-57. [In Russian].
5. Yukhvets I.A. (1973). *Proizvodstvo vysokoprochnoy provolochnoy armatury [Production of high-strength wire reinforcement]*. Moskva: Metallurgiya, 1973. 264. [In Russian].
6. Madatyan S.A. (2013). Sravnitel'ny analiz primeneniya armatury v zheleznobetonnykh konstruktsiyakh v Rossii i za rubezhom [Comparative analysis of the use of reinforcement in reinforced concrete structures in Russia and abroad]. *Vestnik MGSU [MGSU Bulletin], 2013, 11,* 7-18. [In Russian].
7. Krasovskaya G.M., Kroshkov B.V. (1973). Predvaritel'no uprochnennaya armatura predvaritel'no napryazhennykh zheleznobetonnykh konstruktsiy, stoykaya protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Pre-hardened reinforcement of prestressed reinforced concrete structures, resistant to stress corrosion cracking]. *Zashchita stroitel'nykh materialov i konstruktsiy ot korrozii [Protection of building materials and structures from corrosion]: materialy Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya, Kiyev, noyabr' 1973.* 37-38. [In Russian].
8. Uzlov I.G., Razdobreyev V.G., Sidorenko O.G., Sheremet V.A., Kekukh A.V. (2004). Vysokoeffektivnyy termomekhanicheski uprochnennyy prokat raznykh urovney prochnosti [Highly efficient thermomechanically hardened rolled products of various strength levels]. *Stal' [Steel], 2004, 6,* 83-87. [In Russian].
9. Uzlov I.G., Razdobreyev V.G., Sidorenko O.G., Sheremet V.A., Kekukh A.V., Mamayev A.V. (2004). Novyye tekhnologicheskiye resheniya termomekhanicheskogo uprochneniya armaturnogo prokata razlichnykh klassov prochnosti [New technological solutions for thermomechanical hardening of reinforcing bars of various strength classes]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry], 2004, 5,* 61-64. [In Russian].
10. Sheremet V.A., Kekukh A.V., Razdobreyev V.G., Kuvayev V.N., Ivanov D.A. (2004). Vliyaniye rezhimov termomekhanicheskoy obrabotki na strukturu, mekhanicheskiye i sluzhebnyye svoystva termouprochnennoy armatury klassa A1000 [Influence of the modes of thermomechanical treatment on the structure, mechanical and service properties of heat-strengthened reinforcement of class A1000]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya [Izv. Universities. Ferrous metallurgy], 2004, 11,* 40-43. [In Russian].
11. *Armaturnyy prokat dlya zhelezobetonnykh konstruktsiy i izdeliy. Spravochnoye posobiye [Reinforcing bars for reinforced concrete structures and products. Reference manual]*. (2003). Yu.T. Khudik, A.V. Kekukh (Ed.). Krivoy Rog: SP «Mira», 2003. 115. [In Russian].
12. Podval'nyy A.M.(2000). Fiziko-khimicheskaya mekhanika - osnova nauchnykh predstavleniy o korrozii betona i zhelezobetona [Physicochemical mechanics is the

basis of scientific ideas about the corrosion of concrete and reinforced concrete]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete], 2000, 5,* 23-27. [In Russian].

13. Yagupov B., Ivanov A. (2010). K voprosu o silovom soprotivlenii zhelezobetona, povrezhdennogo khimkorroziyey [On the issue of strength resistance of reinforced concrete damaged by chemical corrosion]. *Beton i zhelezobeton. [Concrete and reinforced concrete], 2010, 4,* 22-26. [In Russian].
14. Kalmykov V.V., Uzlov I.G., Grechnaya I.Ya., Razdobreyev V.G. (1999). Vliyaniye osobennostey strukturnogo sostoyaniya konstruktsionnoy stali na yeye korroziyu v kisloy srede [Influence of the peculiarities of the structural state of structural steel on its corrosion in an acidic environment]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov [Physical and chemical mechanics of materials], 1999, vol.35, 2,* 119-120. [In Russian].
15. Kalmykov V.V., Grechnaya I.Ya., Razdobreyev V.G. (1998). Vliyaniye ugleroda i kremniya na korrozionnoye povedeniye termicheski uprochnennykh armaturnykh staley [The effect of carbon and silicon on the corrosion behavior of heat-hardened reinforcing steels]. *Sb. nauchn. trudov Donetskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta [Sat. scientific. Proceedings of Donetsk State Technical University]*. Donetsk: Izd-vo LIK, 1998. 268-273. [In Russian].
16. 16 Kalmykov V.V., Razdobreyev V.G. (1999). Vliyaniye strukturnykh osobennostey konstruktsionnoy stali na yeye korroziyu v 3% - nom rastvore NaCl pri peremennom pogruzhenii [Influence of structural features of structural steel on its corrosion in 3% NaCl solution with alternating immersion]. *Zashchita metallov [Protection of metals], 1999, vol. 35, 6,* 600-602. [In Russian].
17. Razdobryeyev V.G. (2020). Vplyv vuhlytsyu na koroziynu povedinku termichno zmitsnennoho prokatu [Influence of carbon on corrosion behavior of thermally strengthened rolled metal]. *Fundamentalni i prykladni problemy chornoyi metalurhiyi [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2020, 34,* 170-189. [In Ukrainian]. DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-190-201
18. Razdobryeyev V.G., Palamar D.G. (2020). Suchasni tendentsiyi vyrobnytstva koroziynostiykoho i vohnestiykoho nenapruzhenoho armaturnoho prokatu [Modern trends in the production of corrosion-resistant and fire-resistant unstressed reinforcement]. *Fundamentalni i prykladni problemy chornoyi metalurhiyi [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 34,* 190-201. [In Ukrainian]. DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-170-189.
19. Bourgin C., Chauveau E., Dermelin B. (2006). Stainless steel rebar: the choice of service life. *La Revue de Metallurgie. CIT, 2006, 2,* 89-98. https://doi.org/10.1051/metal:2006159
20. Pickering F.B. (1982). *Physical Metallurgy and the design of steels: Materials science series.* Moskva: Metallurgy, 1982. 184. [In Russian].
21. Stainless Steel in construction industry (1996). BSSA Conference Report. *Steel Times, 1996, 1,* 21-23.
22. Cochrane D.Y. (1996). Austenitic stainless steel – The solution to rebar corrosion. *Steel Times, 1996, 1,* 19-20.

V. G. Razdobreev, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992
D. G. Palamar, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-9503-3248
O. I. Leshchenko, Junior Researcher, ORCID 0000- 0003-1877-8358
K. Yu. Kluychnikov, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-2465-3244

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

MODERN TRENDS IN THE PRODUCTION OF CORROSION-RESISTANT AND FIRE-RESISTANT PRESTRESSING REINFORCING BARS

Summary. The aim of the work is to study modern methods of production in the world of corrosion-resistant and fire-resistant high-strength reinforced rolled steel, designed for pre-stressed reinforced concrete structures. The specific cost of reinforcement is determined by the ratio of its value to the design resistance and decreases with increasing strength class. In Ukraine, economically alloyed steel grades are used for the production of prestressed high-strength reinforcing steel with a diameter of 6-40 mm of periodic profile according to DSTU 3760: 2019. It is also possible to use thermal strengthening of rolled products from rolling heating in the rolling mill stream, or from special (separate) heating. Hardening, tempering and also cold deformation of smooth profiles with the subsequent drawing of a periodic profile are also applied. According to the Interstate GOST 34028-2016 for the countries of the Customs Union, high-strength reinforcing steel of periodic profile of class A600p is made in bars and skeins with a diameter of 10-40 mm, and classes A800 and A1000 only in bars with a diameter of 10-40 mm from low-alloy steel grades. Depending on the diameter of the reinforcing steel, different production methods are used. GOST 34028-2016 contains clear requirements for corrosion resistance and methods of its testing.

Many foreign requirements for the production of high-strength prestressed reinforcement, depending on the diameter of the profile (6-50 mm) and the method of production use carbon steels with different maximum carbon content from 0.37 to 0.8%, maximum silicon content from 0.55 up to 2.0% and a maximum manganese content of 1.8 to 2.0%. Thermomechanical reinforcement of reinforcing steel from rolling heating in the flow of rolling mills, hardening from separate (special) heating followed by tempering and strengthening by mechanical extraction followed by low-temperature tempering are used.

Corrosion is the main cause of damage and destruction of reinforced concrete structures and buildings of prestressed reinforced steel from carbon steels. This problem in the world today is solved with the use of stainless steels, which have high corrosion resistance and fire resistance. Prestressed stainless steel reinforcement has higher strength and, especially, ductility than carbon steel. Stainless steel grades are used for the production of prestressed reinforcing steel with a diameter of 5 to 75 mm. In the production of periodic profiles of stainless steel reinforcement, there are two main technological routes: hot rolling and cold rolling. A promising way is the use of controlled hot rolling and thermomechanical treatment. As the rolling temperature decreases, the hardness of the austenite phase increases. For two-phase stainless steels, this allows to

achieve high strength and ductility. Examples of the use of prestressed high-strength rebar in the world are: the construction of sealed shells that prevent the release of radioactive substances into the environment in severe accidents at nuclear power plants; construction of tanks for nuclear waste; construction of offshore platforms for oil production; construction of sea and river bridges, long-span ceilings, high-rise buildings, roads and other similar facilities.

Keywords: reinforcing bars, corrosion resistance, fire resistance, economically alloyed steel, stainless steel, hot rolling, cold deformation.

For citation: *Razdobreev V.G., Palamar D.G., Leshchenko O.I., Kluychnikov K.Yu.* Suchasni tendentsiyi vyrobnytstva koroziynostiykoho i vohnestiykoho napruzhenoho armaturnoho prokatu [Modern trends in the production of corrosion-resistant and fire-resistant prestressing reinforcing bars.]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2021, *35*, 108-133. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-35-108-133

Стаття надійшла до редакції збірника 19.10.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)