

ЗАСТОСУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ У РЕЗЕРВУАРОБУДУВАННІ ПІСЛЯ НОРМАЛІЗУВАЛЬНОГО ПРОКАТУВАННЯ

А.Ю. Барвінко, Ю.П. Барвінко, А.М. Яшник

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: tanksweld@gmail.com

У роботі досліджено структуру та в'язкість в площині X–У листового прокату сталей класу міцності S355 і 420. Показано, що застосування нормалізувального прокатування не забезпечує листовому прокату сталі S355+N стан, рівноцінний стану після нормалізації. В результаті проведення нормалізувального прокатування, завдяки додатковому обтисненню листа в температурній області біля температури A_{c3} , у сталі формується смугаста структура, яка має високу анізотропію механічних властивостей. Формування вираженої волокнистої структури призводить до крихкого стану металу в площині X–У при розрахунковій температурі. Для запобігання крихкому шаруватому руйнуванню необхідно застосовувати конструкційні сталі класу міцності S355 і S420, виготовлені згідно зі стандартом ДСТУ EN 10025-3:2007, в стані після нормалізації та обмежувати вміст сірки $S \leq 0,010 \%$. У разі використання зазначених сталей в стані після нормалізувального прокатування рекомендується застосовувати метал товщиною не більше 15 мм, що забезпечить безпечну роботу металу у зварних вузлах у напрямку товщини. Додатковим критерієм стійкості листового прокату сталей S355 і S420 до крихкого шаруватого руйнування, крім групи якості прокату Z, запропоновано використовувати такий показник, як робота удару, що визначається на зразках з V-подібним надрізом в площині прокатування X–У (по вісі листа). Бібліогр. 24, табл. 10, рис. 3.

Ключові слова: конструкційні сталі класу міцності 355 і 420, нормалізувальне прокатування, крихке шарувате руйнування, вертикальні циліндричні сталеві резервуари

Вступ. У зв'язку із переходом будівельної галузі на застосування конструкційних сталей, які виготовляються згідно зі стандартами ДСТУ EN 10025, актуальним є питання відповідності механічних властивостей цих сталей та їхніх зварних з'єднань вимогам чинної нормативної бази України. Традиційно в Україні для зварних металоконструкцій використовувалися вуглецева сталь Ст3сп5-зв [1] (клас міцності S255) і низьколегована сталь 09Г2С-12 [2] (клас міцності S325 за товщини $10 \leq t \leq 20$ мм), які постачалися в гарячекатаному стані або після нормалізування. Вказані сталі мають високу пластичність, достатній рівень холодостійкості та хорошу зварюваність, що обумовило широке їх застосування у відповідальних конструкціях [3], зокрема для вертикальних циліндричних резервуарів [4]. Конструкційні сталі згідно з ДСТУ EN 10025-2-S355J2+N [5], ДСТУ EN 10025-3-S355N(NL) [6] та ДСТУ EN 10025-3-S420N(NL) [6] відносяться до більш високого класу міцності й доволі часто постачаються після нормалізувального прокатування. Особливістю вказаних сталей є їх випуск металургійними комбінатами з низьким вмістом сірки: $S \leq 0,010 \%$ та фосфору: $P \leq 0,015 \%$, що має забезпечувати їхню високу холодостійкість [3].

У стандартах [5, 6] зазначається, що стан сталі після нормалізувального прокатування є рівноцінним (еквівалентним) стану після нормалізації.

Водночас в роботах [7–9] відмічено, що на відміну від нормалізації, в процесі нормалізувального прокатування на завершальній стадії проводиться додаткова деформація металу в аустенітній області за близьких до точки A_{c3} значеннях температури, що дозволяє при достатніх обтисненнях отримати дрібнозернисту структуру завдяки багаторазовій повній рекристалізації [9]. У цьому разі додаткова деформація має призводити до більшої структурної неоднорідності в порівнянні із нормалізованим станом і, відповідно, до більшої анізотропії механічних властивостей металу [10]. З цієї точки зору представляється доцільним проведення додаткових досліджень властивостей листового прокату сталей, що виготовляються згідно з ДСТУ EN [5, 6] у стані нормалізувального прокатування, які широко застосовуються в будівництві з метою врахування їхніх особливостей. У випадку вертикальних циліндричних резервуарів необхідно брати до уваги роботу металу в напрямку товщини (Z-напрямок), що має місце при вварюванні патрубків (зварне з'єднання внапуск, що підсилює лист-стінку; T-подібне з'єднання приварюванням стінки до патрубка) та у вузлі сполучення «стінка-контурні листи днища». З метою запобігання виникненню шаруватого руйнування металу додатково проводиться післязварювальна термічна обробка (PWHT) для зняття зварювальних залишкових напружень в місцях вварювання

Таблиця 1. Нормативні вимоги до проведення післязварювальної термічної обробки (PWHT) місць врізок патрубків та люків в стінку вертикальних циліндричних резервуарів

Стандарт проектування	Марка сталі	Товщина поясу, мм	Діаметр патрубка, мм
API 650-13 [11]	S235	$t > 25$	≥ 300
	S275J0; S355J0; S355(J2 або K2); A841M, grade A, class 1, 2 (ReH ≥ 461 МПа)	$t > 13$	≥ 50
EN 14015 [12]	S275; S355	$t > 25$	≥ 300
	S420	$t > 20$	всі діаметри
ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [13]	ReH ≥ 345 МПа	$t > 25$	≥ 300

Примітки. 1. В таблиці наведено вимоги не для повного переліку марок сталей. 2. ReH – мінімальна гарантована границя текучості.

патрубків та люків у стінку з метою нівелювання їх впливу при роботі металу в напрямку товщини [11-13]. Умови, за яких необхідно проводити обробку PWHT місць зварювання патрубків в стінку суттєво відрізняються залежно від стандарту проектування (табл. 1).

Аналіз наведених у табл. 1 даних показує відсутність єдиного підходу до розв'язання питання вибору умов, за яких необхідно виконувати PWHT. Основними факторами, що впливають на необхідність її проведення є клас міцності сталі та діаметр отвору. Найжорсткіші вимоги висуваються у стандарті API 650-13 [11]: для сталі класу міцності S275J0 і більше за товщини листа $t \geq 13$ мм вже необхідно виконання PWHT. У стандарті EN 14015 [12]: для сталей S275 і S355 при товщині $t \geq 25$ мм, а для сталі класу міцності S420 при товщині $t \geq 20$ мм. Найменш жорсткі вимоги містить вітчизняний стандарт ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [13], що вимагає проведення додаткових досліджень для умов проведення PWHT.

Одним з критеріїв якості листового прокату та його опору шаруватому руйнуванню, який отримав широке розповсюдження на практиці, є гарантована його відповідність класу якості Z15, Z25, Z35 за результатами випробувань на розтягуван-

ня зразків в напрямку товщини листа [14, 15]. Однак, слід зазначити, що на величину відносного звуження ψ_z впливає в основному наявність у сталі скупчень неметалевих включень значної протяжності [3, 16, 17]. В нашому ж випадку можна очікувати підвищену структурну смугастість металу та низький вміст глобулярних неметалевих включень. З огляду на те, що розвиток тріщин визначається в'язкістю металевої матриці [16], застосування вказаного критерію може виявитися недостатнім. Крім того, визначення відносного звуження ψ_z відбувається за додатної температури, яка не відповідає розрахунковій температурі експлуатації, що також не може повною мірою гарантувати відсутність крихкого шаруватого руйнування зварної металоконструкції під час її подальшої експлуатації.

У зв'язку з вищенаведеним оцінка стійкості крихкому шаруватому руйнуванню листового прокату сталей S355 і S420 в площині прокатування X–Y проводилася на основі оцінювання величини ударної в'язкості за результатами випробувань стандартних зразків Шарпі з V-подібним надрізом.

Характеристика вихідних матеріалів та методи-ка досліджень. Для дослідження стійкості листо-

Таблиця 2. Хімічний склад листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

Джерело даних	Масова частка, %											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	Nb	Ti
S355J2+N, $t = 25$ мм, нормалізувальне прокатування												
Контрольний аналіз ІЕЗ	0,14	1,34	0,18	0,022	0,016	0,036	0,03	0,05	0,028	< 0,005	0,023	0,015
S355J2+N, $t = 20$ мм, нормалізувальне прокатування												
Контрольний аналіз ІЕЗ	0,15	1,37	0,20	0,017	0,009	не визначалося		0,028	–	0,023	0,017	
ДСТУ EN10025-2:2007, табл. 4	$\leq 0,23$	$\leq 1,70$	$\leq 0,60$	$\leq 0,35$	$\leq 0,35$	–		–	$\leq 0,55$	–	$\leq 0,13$	
P355NL2, $t = 20$ мм, нормалізація												
Контрольний аналіз ІЕЗ	0,17	1,33	0,33	0,009	0,002	0,036	0,045	0,010	0,033	0,006	0,033	0,003
ДСТУ EN10028-3:2018, табл. 1	$\leq 0,18$	1,10...1,70	$\leq 0,50$	$\leq 0,020$	$\leq 0,005$	$\leq 0,30$	$\leq 0,50$	$\leq 0,70$	0,025	$\leq 0,10$	$\leq 0,05$	$\leq 0,03$
S420NL, $t = 25$ мм, нормалізація												
Контрольний аналіз ІЕЗ	0,13	1,50	0,26	0,015	$\leq 0,002$	0,07	0,07	0,05	0,041	0,054	0,035	< 0,005
ДСТУ EN 10025-3:2007, табл. 3	$\leq 0,22$	0,95...1,80	$\leq 0,65$	$\leq 0,030$	$\leq 0,025$	$\leq 0,35^*$	$\leq 0,85$	$\leq 0,60$	–	V+Nb+Ni $\leq 0,26$ %		

*Mo+Cr $\leq 0,38$ %.

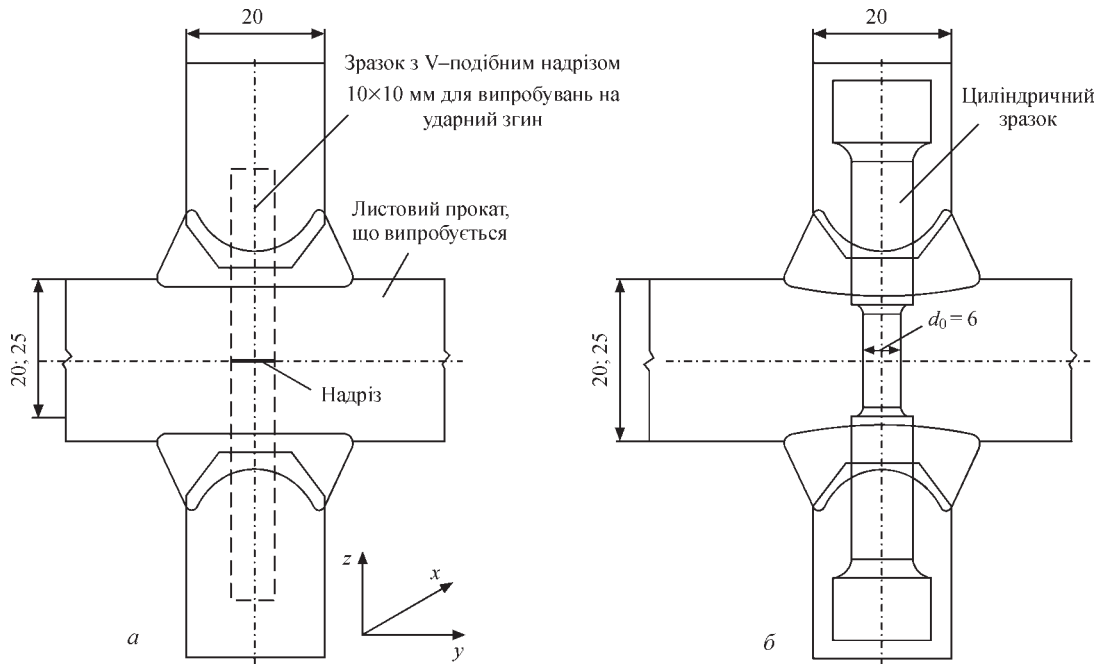


Рис. 1. Схема вирізання зразків з хрестоподібних зварних з'єднань: а – на ударний згин з виконанням надрізів в площині X-Y; б – на розтяг для визначення класу якості сталі

вого прокату сталей S355 і S420 проти крихкого шаруватого руйнування виготовлювалися хрестоподібні заготовки [18] (рис. 1), з яких вирізали зразки для визначення ударної в'язкості KCV_{x-y} з надрізом в площині X-Y та зразки для визначення величини поперечного звуження при розтягуванні в напрямку товщини металу [15].

Досліджувалися зразки листового прокату сталей S355J2+N [5], P355NL2 [19] і S420NL [6] товщиною $t = 20$ мм та $t = 25$ мм. Хімічний склад та вид термічної обробки сталей наведено в табл. 2. Вказані сталі є мікролегованими ніобієм Nb та алюмінієм Al, а сталь S420NL додатково легована ванадієм V. Фактичний вміст сірки для сталей

Таблиця 3. Механічні властивості основного металу випробуваних зразків зі сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

Джерело даних	σ_r , МПа	$\sigma_{ш'}$, МПа	σ_t/σ_b	δ_5 , %	Ψ , %	Ударна в'язкість KCV_{x-y} , Дж/см ² , за температури:					
						-20 °C		-30 °C		-50 °C	
						L	T	L	T	L	T
S355J2+N, t = 25 мм											
Випробування ІЕЗ	345,1	495,3	0,69	35,9	72,9	265; 352; 214	168; 192; 185	163; 170; 171; 179	63; 60; 58; 57	—	—
	346,8	492,8	0,70	35,0	73,9	277	182	171	59,5	—	—
S355J2+N, t = 20 мм											
Випробування ІЕЗ	410	530	0,77	33	67	282; 275; 291	131; 163; 127	306; 287; 304	141; 134; 140	—	—
	402	526	0,76	37	71	283	140	299	138	—	—
ДСТУ EN 10025-2:2007	≥ 345	470 – 630	—	≥ 22	—	≥ 34	Не нормується	—	—	—	—
P355NL2, t = 20 мм											
Випробування ІЕЗ	414	544	0,76	31	—	—	—	—	241; 282; 329	73; 104; 113	—
	410	549	0,75	33	—	—	—	—	284	97	—
ДСТУ EN 10028-3:2018	≥ 345	490 – 630	—	≥ 22	—	—	—	—	—	—	≥ 34
S420NL, t = 25 мм											
Випробування ІЕЗ	430	583	0,73	33	66,2	—	—	327; 344; 338	246,4...333,6	160; 120; 138; 139	—
	433	589	0,74	33	67,3	—	—	336	294,1	139	—
ДСТУ EN 10025-3:2007	≥ 400	520 – 680	—	≥ 19	—	—	—	—	≥ 29	≥ 34	—

Примітка. L – випробування на повздовжніх зразках, T – випробування на поперечних зразках.

P355NL2 і S420NL становить $S = 0,003$ мас. %. Для сталі S355J2+N вміст сірки $S = 0,016$ мас. % при $t = 25$ мм і $S = 0,009$ мас. % при $t = 20$ мм. Механічні властивості зазначених сталей наведені в табл. 3.

Мікрошліфи для металографічних досліджень вирізали вздовж напрямку прокатування та полірували до 14 класу чистоти з використанням алмазних паст. Для проявлення мікроструктури зразки протравлювали у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти. Мікроструктуру досліджували за допомогою мікроскопу НЕОРНОТ-32. Твердість за Віккерсом заміряли на твердомірі М-400 LECO при навантаженнях 98 мН і 9,8 Н. Вміст неметалевих включень в досліджуваних зразках визначали на полірованих непротравлених мікрошліфах [21].

Аналіз експериментальних даних табл. 2, 3 показує, що хімічний склад і механічні властивості сталей S355J2+N, P355NL2 і S420NL відповідають вимогам [5, 6, 19]. Величина співвідношення границя текучості/тимчасовий опір $\sigma_T/\sigma_{пл} \leq 0,75$ є близькою до вимог [13]. При цьому за температури $T = -30$ °C величина ударної в'язкості KCV_{-30} для

сталі S355J2+N завтовшки 25 мм, що визначена із застосуванням поперечних зразків, відповідає вимогам [6] для сталі S355NL. За результатами контрольних випробувань сталі P355NL2 і S420NL можна віднести до одного класу міцності S420.

Результати досліджень та їх обговорення.

Результати дослідження якості прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL в напрямку товщини [15] представлено в табл. 4. Аналіз цих даних показує, що до групи найнижчої якості Z15 належить сталь S355J2+N в товщині $t = 25$ мм, яка постачається в стані нормалізувального прокатування з підвищеним вмістом сірки 0,016 %. Конструкційна сталь S355J2+N ($t = 20$ мм) після нормалізувального прокатування і нормалізованої сталі P355NL2 та S420NL належать до групи високої якості Z35, що пов'язано з більш низьким вмістом сірки: $S \leq 0,010$ % [3]. З наведених даних можна зробити висновок, що основним фактором, який впливає на показник якості прокату вищенаведених сталей (групу Z), є вміст сірки в сталі, а не вид термічної обробки [3].

На другому етапі досліджень була визначена ударна в'язкість зазначених сталей в площині про-

Таблиця 4. Дослідження на групу якості Z листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

Номер зразка	Марка сталі, товщина листа	Стан постачання сталі	Ψz, %	Група якості Z	Масова доля сірки, %
1	S355J2+N, $t = 25$ мм	Нормалізувальне прокатування	22,0	Z15	0,016
2					
3					
1	S355J2+N, $t = 20$ мм	Нормалізувальне прокатування	41	> Z35	0,009
2			42		
1	P355NL2, $t = 20$ мм	Нормалізація	69,1	> Z35	0,002
2			73,2		
1	S420 NL, $t = 25$ мм	Нормалізація	66,2	> Z35	0,002
2			67,3		

Таблиця 5. Вплив виду термічної обробки (стану постачання) на ударну в'язкість KCV_{x-y} листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2 та S420NL2 при розташуванні надрізу в площині X–У

Стандарт, марка сталі, товщина листа	Масова доля сірки, %	Вид термічної обробки	Ударна в'язкість KCV_{x-y} , Дж/см ² , за температури:	
			–30 °C	–50 °C
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 25$ мм	0,016	Нормалізувальне прокатування	11,4; 9,6; 8,1 9,7	—
ДСТУ EN10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм	0,002	Нормалізація	58,9; 51,6; 67,4 59,3	26,9; 13,4; 27,7 22,7
ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм	0,002	Нормалізація	19,9; 18,2; 16,3 18,1	21,0; 21,7; 19,9 20,9
ДСТУ Б В.2.6-183:2011	$\leq 0,010$	Будь-яка	$\geq 35,0$; при $R_y \leq 360$ МПа; $\geq 50,0$; при $R_y > 360$ МПа поперечні зразки*	
ДСТУ EN 10025-2:2007	$\leq 0,035$	Нормалізувальне прокатування	$\geq 34,00$ (27 Дж) повздовжні зразки*	—
ДСТУ EN 10025-3:2007	$\leq 0,025$	Нормалізація або нормалізувальне прокатування	$\geq 29,00$ (23 Дж) поперечні зразки*	$\geq 20,00$ (16 Дж) поперечні зразки*
ДСТУ EN10028-3:2018	$\leq 0,005$	Нормалізація	$\geq 37,50$ (30 Дж) поперечні зразки*	$\geq 34,00$ (27 Дж) поперечні зразки*

Примітка. *Ударна в'язкість (робота удару) в площині X–У не нормується.

Таблиця 6. Ударна в'язкість KCV_{X-Y} листового прокату сталі S355J2+N завтовшки $t = 20$ мм після різних видів термічної обробки

Стандарт, марка сталі	Вид термічної обробки	Ударна в'язкість KCV_{X-Y} , Дж/см ² , за температури:		
		-20 °C	0 °C	+20 °C
ДСТУ EN 10025-2:2007 S355J2+N	Нормалізувальне прокатування	<u>28; 5; 5,5</u> 9,7	<u>5,5; 26; 24</u> 18,5	<u>26; 37; 15</u> 26
	Нормалізувальне прокатування + високотемпературний відпуск ($T = 650$ °C, 1 год)	<u>11; 13; 7</u> 10,3	<u>7; 27; 23</u> 19	—
Вимоги стандарту ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [13] до величини KCV	Для всіх видів термообробки	$\geq 35,0$ поперечні зразки*	—	—
Вимоги стандарту ДСТУ EN 10025-2:2007 [5] до величини KCV (KV)	Нормалізувальне прокатування	$\geq 34,75$ (27 Дж) повздовжні зразки*	—	—

Примітка. *Ударна в'язкість (робота удару) в площині X-Y не нормується.

катування KCV_{X-Y} (табл. 5, 6) та вплив на неї високотемпературного відпуску $T = 650$ °C (імітація PWHТ) для сталі S355J2+N (табл. 6).

Аналіз наведених у табл. 5, 6 результатів вказує на те, що у разі вмісту сірки $S \leq 0,010$ % основним фактором, що впливає на в'язкість прокату в площині X-Y, стає вид термічної обробки сталі. Так, за результатами випробувань на ударний згин сталь S355J2+N, $t = 20$ мм, після нормалізувального прокатування має низьку ударну в'язкість в площині X-Y: $KCV_{-20} = 9,7$ Дж/см² (табл. 6), що менше ніж це вимагається стандартом – $KCV_{-20} \geq 35$ Дж/см² [13]. При цьому листовий прокат належить до класу якості Z35: $\psi_z = 41$ %, з низьким вмістом сірки: $S = 0,009$ %.

Високий рівень в'язкості в площині X-Y, яка задовольняє вимогам [19], має нормалізована сталь P355NL2, $t = 20$ мм, вміст сірки $S = 0,002$ %: $KCV_{-30} = 59,3$ Дж/см² (табл. 5), що підтверджується також і випробуваннями на розтягування в напрямку товщини: $\psi_z = 69$ %. Для сталі S420NL2, $t = 25$ мм, в стані нормалізації при вмісті сірки: $S = 0,002$ % і високій пластичності в напрямку площини $\psi_z = 66$ % (табл. 4, 7) ударна в'язкість в площині X-Y дорівнює $KCV_{-30} = 18...24$ Дж/см² (табл. 5, 7), що не задовольняє вимозі $KCV_{-30} \geq 29,75$ Дж/см² [6]. Однак на відміну від сталі S355J2+N метал осьової зони

після нормалізації зберігає достатню в'язкість [6, 13] до температури $T = -20$ °C, а в разі проведення високотемпературного відпуску критична температура знижується до $T = -30$ °C (табл. 7).

Дослідження залежності ударної в'язкості KCV_{X-Y} осьової зони сталі S355J2+N, $t = 20$ мм, вміст сірки $S = 0,009$ % (табл. 6) від температури показали, що навіть за температури $T = +20$ °C вона знаходиться в нижній зоні S-подібної кривої, відповідно і ризик утворення ламелярних тріщин навіть при зварюванні в заводських умовах за додатної температури може бути достатньо високим. Високотемпературний відпуск не впливає на в'язкість сталі S355J2+N в площині X-Y.

За результатами металографічних досліджень було встановлено, що мікроструктура сталей S355J2+N, P355NL2 і S420NL є феритно-перлітною (рис. 2). Оцінка смугастості [20] цих сталей (табл. 8) показує, що S355J2+N після нормалізувального прокатування має значно більший ступінь смугастості, ніж P355NL2 і S420NL.

З аналізу мікроструктури сталей (рис. 2) видно, що на відміну від S355J2+N, де перліт є пластинчастим (рис. 2, а, б), в сталі P355NL2 після нормалізації утворюється сорбітоподібний перліт з розорієнтованими зернами (рис. 2, в). У фериті спостерігається велика кількість виділень карбідів, що перетворює феритну складову на

Таблиця 7. Ударна в'язкість KCV_{X-Y} в площині X-Y листового прокату сталі S420NL завтовшки $t = 25$ мм після нормалізації та високотемпературного відпуску

Температура випробування зразків, °C	Ударна в'язкість KCV , Дж/см ²	
	у стані постачання (нормалізація)	після високотемпературного відпуску ($T = 650$ °C, 1 год)
0	<u>104; 105; 95</u> 101	<u>33; 81; 39</u> 51
-10	<u>51; 74; 48</u> 58	<u>82; 91; 62</u> 78
-20	<u>51; 97; 45</u> 64	<u>48; 61; 38</u> 49
-30	<u>20; 16; 29; 31</u> 24	<u>65; 37; 38</u> 47
-50	<u>21; 22; 20</u> 21	<u>20; 11; 9</u> 13

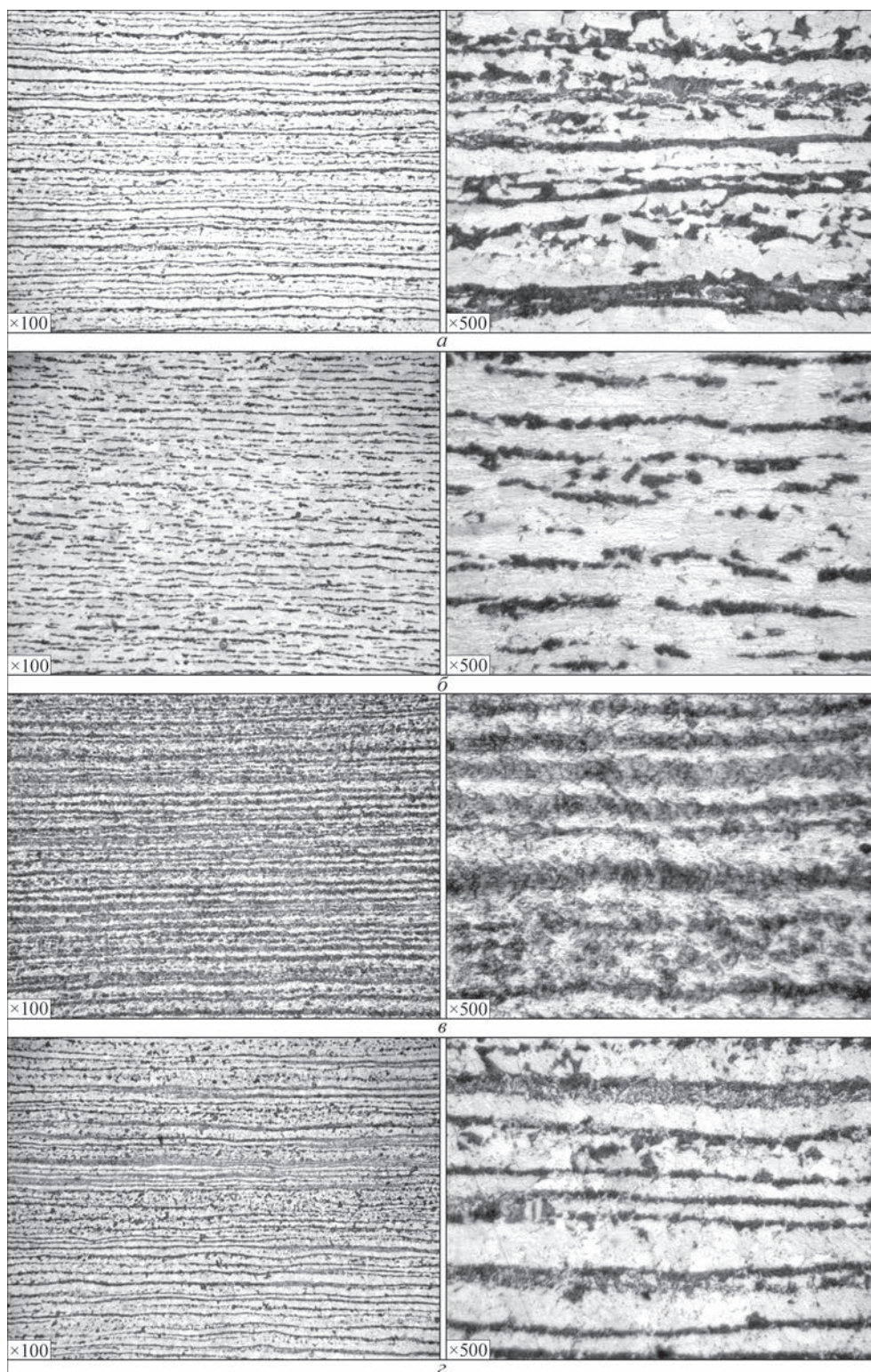


Рис. 2. Мікроструктура осьової зони сталей, що досліджені: *а* – сталь S355J2+N, товщина 20 мм; *б* – сталь S355J2+N, товщина 25 мм; *в* – сталь P355NL2, товщина 20 мм; *г* – сталь S420NL2, товщина 25 мм

Таблиця 8. Смугастість структури листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL згідно з ДСТУ 8974:2019 [20]

Стандарт, марка сталі, товщина	Оцінювання смугастості
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм	рис. 8(4), шкала 3, ряд Б ($\times 100$)
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 25$ мм	рис. 8(4), шкала 3, ряд Б ($\times 100$)
ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм	рис. 8(3), шкала 3, ряд Б ($\times 100$)
ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм	рис. 9(5), шкала 3, ряд В ($\times 100$)

феритно-карбідну суміш. Це призводить до збільшення твердості фериту сталі P355NL2 у порівнянні з S355J2+N (табл. 9) та зменшенню механічної неоднорідності структури. В сталі S355J2+N ($t = 20$ мм, 25 мм) спостерігається більша різниця між величинами твердості феритної та перлітної складових, вміст карбідів у фериті є невисоким (табл. 9, рис. 2, а, б).

Сталь S420NL займає проміжне положення: в ній утворюється як пластинчатий, так і сорбітоподібний перліт (рис. 2, з), виділення карбідів у фериті відсутні. Механічна неоднорідність структури (різниця у твердості фериту і пластинчатого перліту) HV0,098N дещо нижча, ніж для сталі S355J2+N, $t = 20$ мм (табл. 9). Для сорбітоподібного перліту різниця твердості з феритом досягає 943HV, що значно більше, ніж для сталі S355J2+N (табл. 9). Але в цьому випадку негативний вплив механічної неоднорідності менший через меншу смугастість прокату та більшу в'язкість сорбіто-

подібного перліту, ніж пластинчатого. Для сталі S355J2+N спостерігається збільшення перлітної складової в осьовій зоні [7], що пов'язано із дифузійною вуглецю до центру листа. Це призводить до збільшення інтегральної твердості HV (9.8N) і різниці у твердості HV0,098N фериту і пластинчатого перліту (анізотропія структури) для осьової зони (табл. 9). Відповідно, в осьовій зоні слід очікувати мінімальну в'язкість металу по товщині листа.

Беручи до уваги те, що для досліджених сталей характерні дрібнодисперсні неметалеві включення, які суттєво не впливають на в'язкість металу (табл. 10), можна зробити висновок, що основною причиною зниження в'язкості в площині X–У для листового прокату сталі S355+N, підданого нормалізувальному прокатуванню, є утворення в результаті такої обробки вираженої смугастої структури з формуванням волокон фериту та перліту, які мають високу анізотропію механічних властивостей (рис. 2, а, б, табл. 9).

Таблиця 9. Результати замірів твердості металу листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

Стандарт, марка сталі, товщина, місце вимірювання	Твердість складових мікроструктури HV (0,098 N)		Різниця твердості фериту та перліту, МПа	Інтегральна твердість HV (9,8N), МПа
	структурна складова	твердість, МПа		
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм осьова частина	Ферит	1088; 1088; 1264; 1176 1154	720	1548; 1548; 1450; 1470 1504
	Перліт	1813; 1784; 1813; 1686 1874		
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм поверхнева частина	Ферит	1284; 1245; 1264; 1274 1266	713	1450; 1499; 1499; 1480 1482
	Перліт	1931; 1931; 1813; 1764; 1979		
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N $t = 25$ мм осьова частина	Ферит	1587; 1587; 1587; 1587 1587	392	1597; 1637; 1558; 1558 1587
	Перліт	1891; 2009; 2009; 2009 1979		
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N $t = 25$ мм поверхнева частина	Ферит	1528; 1646; 1646; 1528 1587	304	1529; 1539; 1666; 1588 1580
	Перліт	1813; 1813; 1930; 2009 1891		
ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм осьова частина	Ферит	1646; 1744; 1617; 1646 1663	294	1646; 1852; 1627; 1752 1719
	Сорбітоподібний перліт	1970; 1852; 2009; 1999 1957		
ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм поверхнева частина	Ферит	1499; 1548; 1617; 1499 1540	214	1646; 1646; 1656; 1558 1626
	Сорбітоподібний перліт	1617; 1744; 2009; 1646 1754		
ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм, осьова частина	Ферит	1303; 1480; 1401; 1480 1416	593	1784; 1833; 1612; 1950 1795
	Перліт	2009; 2009; 2009; 2009 2009		
	Сорбітоподібний перліт	2244; 2519; 2254; 2421 2359	943	
ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм, поверхнева частина	Ферит	1324; 1480; 1372; 1372 1387	390	1637; 1735; 1735; 1656 1691
	Перліт сорбітоподібний	1715; 1784; 1784; 1784 1777		
	Перліт	2225; 2401; 2450; 2254 2332	945	

Таблиця 10. Оцінка забрудненості неметалевими включеннями листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL [21]

Стандарт, марка сталі, товщина	Забрудненість					
	глобулярними оксидами			сульфідами		
	бал і	серія	товщина, мкм	бал і	серія	товщина, мкм
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм	0,5	тонка	від 3 до 8	0,5	тонка	від 2 до 4
ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 25$ мм	1,0			0,5	тонка	від 13 до 76
ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм	1,5			0,5	тонка	від 2 до 4
ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм	0,5			не виявлено		

Наявність такої анізотропії є причиною крихкого руйнування під час випробування на ударний згин в площині X–Y [10] для сталі після нормалізувального прокатування, в процесі якого проводиться додаткова його деформація в аустенітній області при температурах близьких до точки A_{c3} , що обумовлює утворення вираженої волокнистої структури. В сталях P355NL2 і S420NL, підданих нормалізації, завдяки зменшенню рівня смугастості та зниженню механічної анізотропії між феритом та перлітом, а також утворенню дрібнозернистої структури сорбітоподібного перліту з розорієнтованими границями (рис. 2, в, г, табл. 9) в'язкість металу в площині X–Y значно зростає і, відповідно, відбувається перехід від крихкого грубокристалічного руйнування [22] для сталі S355J2+N до крихко-в'язкого для сталі P355NL2 і S420NL (рис. 3 а, в). Значна анізотропія механічних властивостей між волокнами фериту та перліту в сталі S355J2+N також проявляється в шаруватому руйнуванні металу у випадку випробування на ударний згин зразків Шарпі, вирізаних вздовж прокату (рис. 3, б), внаслідок об'ємного напруженого стану перед фронтом тріщини [16].

Слід очікувати, що завдяки низькому вмісту неметалевих включень в сталі після нормалізу-

вального прокатування деформація металу осьової зони під час зварювання відбуватиметься в інтервалі температур, де матеріал має достатню пластичність, відповідно, шарувате руйнування буде відсутнє. Прояв крихкого або квазікрихкого шаруватого руйнування може відбуватися при подальшій експлуатації зварної конструкції при низьких температурах за наявності тріщиноподібних дефектів в осьовій зоні прокату у разі дії розтягувальних зусиль в напрямку товщини. Такими ініціювальними дефектами можуть бути наявні розшарування металу або окремі протяжні скупчення неметалевих включень у сталі. У цьому випадку для попередження таких шаруватих руйнувань важливо застосовувати листовий прокат із контролем суцільності та обмежувати вміст сірки $S \leq 0,010$ % і фосфору: $P \leq 0,015$ %.

Таким чином, структура сталі S355J2+N [5] після нормалізувального прокатування є волокнистою, з вираженою анізотропією, яка відрізняється від структури, отриманої після нормалізації. Відповідно, це стосується і механічних властивостей [10], наприклад в'язкості металу в площині прокатування X–Y. Це означає, що для використання сталей [5, 6] після нормалізувального прокатування для резервуарів або інших відпові-

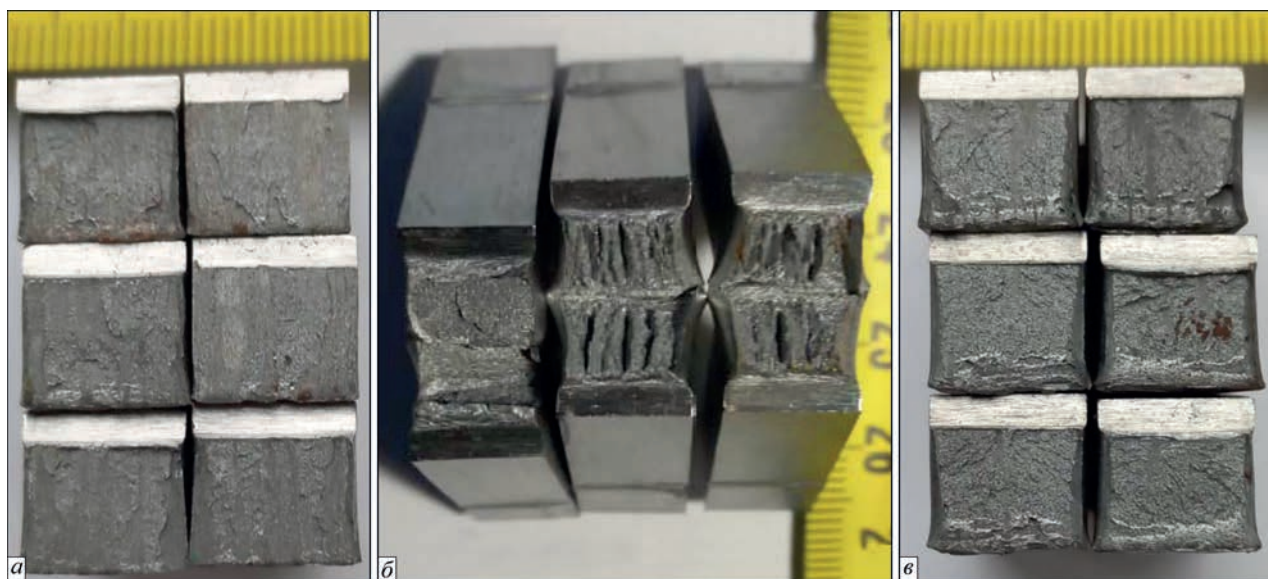


Рис. 3. Злами зразків Шарпі сталей, що досліджені: а – сталь S355J2+N, товщина 20 мм, надріз в площині X–Y (осьова зон), температура випробувань $T = 0$ °С; б – сталь S355J2+N, товщина 25 мм, повздовжній зразок, температура випробувань $T = -20$ °С; в – сталь S420NL2, товщина 25 мм, надріз в площині X–Y (осьова зон), температура випробувань $T = -30$ °С

дальних конструкцій (мости, платформи тощо) у вузлах, де потрібно враховувати роботу металу в напрямку товщини, необхідно застосовувати додаткові умови [23, 24]. Для циліндричних сталевих резервуарів доцільно обмежити товщину листової сталі, що постачається після нормалізувального прокатування, величиною $t \leq 15$ мм, для якої норматив [15] не передбачає вимоги по забезпеченню групи якості Z.

Високотемпературний відпуск, що імітував проведення PWHT для сталі S355J2+N після нормалізувального прокатування не зменшує суттєво смугастість і механічну неоднорідність між феритом та перлітом, тому після його проведення відсутнє збільшення ударної в'язкості KCV_{X-Y} в площині X–Y (табл. 6). Для нормалізованої сталі S420NL високотемпературний відпуск сприяє подальшій коагуляції карбідів, що підвищує об'ємну долю сорбітоподібного перліту і, відповідно, зменшує механічну неоднорідність між перлітом та феритом. У результаті перехідна температура зміщується в область нижчих температур: з $T = -20$ °C до $T = -30$ °C (табл. 7).

Висновки

1. Застосування нормалізувального прокатування не забезпечує листовому прокату сталі S355+N стан, рівноцінний стану після нормалізації. В результаті проведення нормалізувального прокатування, завдяки додатковому обтисненню листа в температурній області біля температури A_{c3} , в сталі формується мікроструктура, яка має виражену смугастість і в якій утворюються волокна фериту та перліту, що мають високу анізотропію механічних властивостей. Формування такої волокнистої структури призводить до крихкого руйнування металу в площині X–Y при розрахунковій температурі.

Для осьової зони листа анізотропія структури є максимальною. Відповідно, в цій зоні слід очікувати мінімальну в'язкість металу по товщині листа, й її можливо розглядати як ймовірне місце утворення ламелярних тріщин.

2. Забезпечення якості сталевого прокату Z відповідно до ДСТУ EN 10164:2009, що визначається при розтягуванні зразків у перпендикулярному до поверхні виробу напрямку, може бути недостатнім для запобігання крихкому шаруватому руйнуванню металу в зварних з'єднаннях у разі застосування сталей після нормалізувального прокатування з низьким вмістом сірки: $S \leq 0,010$ %. В цьому випадку як додаткову умову стійкості листового прокату сталей S355 і S420 крихкому шаруватому руйнуванню, крім групи якості прокату Z, рекомендується використовувати такий показник, як мінімальна робота удару, яка визначається на зразках з надрізом в площині прокату X–Y (по вісі листа) KV_{X-Y} і величина якої, до накопичення статичних даних, пропонується приймати згідно

ДСТУ–Н Б EN 1993-1-10:201: $KV_{X-Y} \geq 27$ (40) Дж або згідно з ДСТУ EN 10025-2:2007 та ДСТУ EN 10025-3:2007, залежно від умов експлуатації, типу конструкції та ступеню відповідальності зварних вузлів. Температура випробувань зразків визначається з урахуванням вимог відповідного стандарту на проектування металокопункцій резервуарів, мостів тощо.

3. Для металокопункцій резервуарів групи А (стінка, контурні листи днища) за умови необхідності врахування роботи металу в напрямку товщини пропонується використовувати листовий прокат сталей S355 і S420 в стані після нормалізації або нормалізації з високотемпературним відпуском. При цьому вміст сірки в сталі не має перевищувати $S \leq 0,010$ %, і для неї необхідно проводити контроль на суцільність. У випадку застосування сталей в стані нормалізувального прокатування для стінки та контурних листів днища резервуарів доцільно обмежувати товщину листа величиною $t \leq 15$ мм, для якої не передбачено вимоги щодо забезпечення спеціальних властивостей у перпендикулярному напрямку до поверхні листа.

Автори висловлюють подяку за підтримку в проведенні досліджень ПрАТ «Укрсталь Конструкція».

Список літератури

1. ДСТУ 8803:2018 *Прокат товстолистовий з вуглецевої сталі звичайної якості. Технічні умови.*
2. ДСТУ 8541:2015 *Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови.*
3. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Руденко А.В. (2002) *Строительная сталь.* Москва, Металлургиздат.
4. Билецкий С.М., Голинько В.М. (1983) *Индустриальное изготовление негабаритных сварных конструкций.* Киев, Наукова думка.
5. ДСТУ EN 10025-2:2007 *Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 2. Технічні умови постачання нелегованих конструкційних сталей.*
6. ДСТУ EN 10025-3:2007 *Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 3. Технічні умови постачання зварувальних дрібнозернистих конструкційних сталей, підданих нормалізації або нормалізувальному прокатуванню.*
7. Матвиенков С.А., Шебаниц Э.Н., Тарасенко О.С. и др. (2012) Производство стали и проката стали марки S355...N для изготовления металлоконструкций под строительством НСК «Олимпийский» в Киеве. *Металл и литье Украины*, 2-3 (225-226), 35–38.
8. Faria, R., Gorni, A., Matsubara, D. et al. (2019) Influence of the Normalizing Rolling Parameters on the Toughness of a Nb, V and Ti Microalloyed Steel Processed in the Gerdau Plate Mill. *Iron & Steel Technology Conference – AISTech 2019, Association for Iron and Steel Technology, Pittsburgh, May 2019.* DOI:10.33313/377/191.
9. Хайстеркамф Ф., Хулка К., Матросов Ю.И. и др. (1999) *Низкоуглеродистые низколегированные стали.* Москва, СП Итермет Инжиниринг.
10. Броек Д. (1980) *Основы механики разрушения.* Москва, Высшая школа.
11. API 650 (2020) *Welded tanks for oil storage 13th edition.*
12. EN 14015-2017. *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above, CEN/TC 265, Secretariat: BSI.*
13. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 *Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти і нафтопродуктів. Загальні технічні умови.* Мінрегіон України.

14. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010 Єврокод 3. *Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд.*
15. ДСТУ EN 10164:2009. *Вироби сталеві з поліпшеними деформаційними властивостями у перпендикулярному напрямку до поверхні виробу. Технічні умови постачання.*
16. Гиренко В.С., Бернацкий А.В., Рабкина М.Д. и др. (1987) Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений. *Проблемы прочности*, 3, 70–76.
17. Laddha, S.S., Pandurang, S.S., Deepashri, D.N. (2016) Lamellar Tearing: A Failure Case Study// *Journal of Failure Analysis and Prevention*, https://www.researchgate.net/publication/304577342_Lamellar_Tearing_A_Failure_Case_Study
18. Поздняков В.Д., Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П. и др. (2012) Хладостойкость и сопротивляемость слоистому разрушению сварных соединений стали 06ГБ-390. *Автомат. сварка*, 3, 45–49.
19. ДСТУ EN 10028-3:2015 *Вироби пласкі сталеві для використання під тиском. Частина 3. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі.*
20. ДСТУ 8974:2019 *Металграфічний метод оцінювання мікроструктури листів та стрічки.*
21. ДСТУ ISO 4967:2017 *Сталь. Визначення вмісту неметалевих включень. Металграфічний метод оцінювання за стандартними шкалами.*
22. ДСТУ 3715-98 *Метали. Види поверхонь руйнування (зломів).*
23. Girenko, V.S., Bernatskii, A.V., Rabkina, M.D. et al. (1987) Lamellar, lamellar-brittle, and lamellar-ductile failure of welded joints. *Strength of Materials*, 19, 372–378.
24. ДСТУ – Н Б EN 1993-1-10:2012 Єврокод 3. *Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-10. Властивості трицистичності і міцності матеріалу у напрямку товщини прокату.*
8. Faria, R., Gorni, A., Matsubara, D. et al. (2019) Influence of the Normalizing Rolling Parameters on the Toughness of a Nb, V and Ti Microalloyed Steel Processed in the Gerdau Plate Mill. *Iron & Steel Technology Conf. – AISTech 2019, Association for Iron and Steel Technology, Pittsburgh, May 2019*. DOI:10.33313/377/191.
9. Khaisterkamp, F., Hulka, K., Matrosov, Yu.I. et al. (1999) *Niobium-containing low-alloy steels*. Moscow, SP Internet Engineering [in Russian].
10. Broek, D. (1980) *Fundamentals of mechanics of fracture*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
11. API 650 (2020) *Welded tanks for oil storage. 13th edition*.
12. EN 14015-2017. *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above, CEN/TC 265, Secretariat: BSI*.
13. DSTU B V.2.6-183:2011 *Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. Specifications*. Minregion Ukrainy [in Ukrainian].
14. DSTU-N B EN 1993-1-1:2010 Eurocode 3. *Design of steel structures - Pt 1-1. General rules and rules for buildings* [in Ukrainian].
15. DSTU EN 10164:2009 *Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product. Technical delivery conditions* [in Ukrainian].
16. Girenko, V.S., Bernatsky, A.V., Rabkina, M.D. et al. (1987) Lamellar, lamellar-brittle and lamellar-ductile failure of welded joints. *Problemy Prochnosti*, 3, 70–76 [in Russian].
17. Laddha, S.S., Pandurang, S.S., Deepashri, D.N. (2016) Lamellar tearing: A failure case study. *J. of Failure Analysis and Prevention*, https://www.researchgate.net/publication/304577342_Lamellar_Tearing_A_Failure_Case_Study
18. Poznyakov, V.D., Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P. et al. (2012) Cold resistance and lamellar fracture resistance of welded joints on steel 06GB-390. *The Paton Welding J.*, 3, 35-39.
19. DSTU EN 10028-3:2015 *Flat products made of steels for pressure purposes. Pt 3: Weldable fine grain steels, normalized* [in Ukrainian].
20. DSTU 8974:2019 *Metallographic method for determination of microstructure of sheets and bands* [in Ukrainian].
21. DSTU ISO 4967:2017 *Steel. Determination of content of nonmetallic inclusions. Metallographic method of evaluation using standard diagrams* [in Ukrainian].
22. DSTU 3715-98 *Metals. Types of rupture surfaces (fractures)* [in Ukrainian].
23. Girenko, V.S., Bernatskii, A.V., Rabkina, M.D. et al. (1987) Lamellar, lamellar-brittle, and lamellar-ductile failure of welded joints. *Strength of Materials*, 19, 372–378.
24. DSTU – N B EN 1993-1-10:2012 Eurocode 3. *Design of steel structures. Pt 1-10. Properties of crack resistance and strength through the rolled stock thickness* [in Ukrainian].

References

1. DSTU 8803:2018 *Rolled plate from carbon steel of general quality Specifications* [in Ukrainian].
2. DSTU 8541:2015 *High-strength rolled steel. Specifications* [in Ukrainian].
3. Skorokhodov, V.N., Odesskij, P.D., Rudenko, A.V. (2002) *Building steel*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
4. Biletsky, S.M., Golinko, V.M. (1983) *Industrial production of oversized welded structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. DSTU EN 10025-2:2007 *Hot rolled products of structural steels. Pt 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*.
6. DSTU EN 10025-3:2007 *Hot rolled products of structural steels — Pt 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels* [in Ukrainian].
7. Matvienkov, S.A., Shebanits, E.N., Tarasenko, O.S. et al. (2012) Production of steel and rolled steel of S355...N grade for manu-

APPLICATION OF STRUCTURAL STEELS IN ABOVE-GROUND CYLINDRICAL TANKS CONSTRUCTION AFTER NORMALIZED ROLLING

A.Yu. Barvinko, Yu.P. Barvinko, A.M. Yashnyk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: tanksweld@gmail.com

The work investigates the structure and ductility of sheet rolled steels of the strength class 355 and 420 in the plane X-Y. It is shown that the use of normalized rolling does not provide sheet rolled steel S355+N the state, which is equivalent to the state after normalization. As a result of carrying out normalized rolling, due to the additional compression of the sheet in the temperature region near the temperature A_{c3} , a banded structure is formed in steel, which has a high anisotropy of mechanical properties. The formation of such a fibrous structure leads to a brittle state of the metal in the plane X-Y at a design metal temperature. To prevent brittle layered fracture, it is necessary to use structural steels of the strength class S355 and S420, produced in accordance with the standard DSTU EN 10025-3:2007 in a state after normalization and limit the content of sulphur $S \leq 0.010\%$. In the case of using the mentioned steels in the state after normalized rolling, it is recommended to use a metal with a thickness of not more than 15 mm, which will provide a safe service of a metal in welded assemblies over the direction of thickness. An additional criterion for stability of sheet rolled steels S355 and S420 to the brittle layered fracture, in addition to the rolled metal quality Z group, it is proposed to use such an indicator as impact energy, which is determined on the specimens with a V-shaped notch in the plane of rolling X-Y (along the sheet axis). 24 Ref., 10 Tabl., 3 Fig.

Keywords: structural steels of strength class 355 and 420, normalized rolling, lamellar-brittle failure, above-ground cylindrical steel tanks

Надійшла до редакції 03.04.2023