

УДК 614.8.

І.В. Рудешко, Ю.А. Отрош, к.т.н., доц., В.В. Золотарьов,
Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля.

ОЦІНКА ЗВАРЮВАЛЬНОСТІ ВОГНЕСТІЙКИХ СТАЛЕЙ МАРОК 06БФ ТА 06МБФ

Представлені результати випробувань прокату із вогнестійких сталей марок 06БФ і 06МБФ щодо схильності утворення холодних і шаруватих тріщин під час зварювання, а також холодостійкості зварних з'єднань.

Ключові слова: зварювальність, мікроструктура металу, навколошовна зона, вуглецевий еквівалент, холодні тріщини, шаруваті тріщини, крихке руйнування.

Постановка проблеми. Для вирішення питання можливості використання вогнестійких сталей марок 06БФ та 06МБФ у будівельних конструкціях, в першу чергу, потрібно оцінити їх зварювальність, а також схильність прокату до утворення холодних та шаруватих тріщин при зварюванні, холодостійкість зварних з'єднань.

Випробування на схильність до холодних тріщин. Згідно [1] можливість утворення холодних тріщин в зоні термічного впливу під час зварювання, по-перше, залежить від сумарного вмісту легуючих елементів, приведенного до величини вуглецевого еквіваленту C_3 . Відповідно до СП-53-102-2004 [2] для міцності прокату, що розглядається, $C_3 \leq 0,45\%$. Згідно з ТУ на постачання вогнестійкої сталі (ТУ 14-1-5399-2000) $C_3 \leq 0,42\%$, при цьому:

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + Ti + Nb + V}{5}, \quad (1)$$

де С, Мп, Сr, Мо, Ті, Nb, V – масові частки вуглецю марганцю, хрому, молібдену, титану, ніобію, ванадію у відсотках.

Вуглецевий еквівалент розглядається за результатами аналізу плавок, в такому випадку:

№ плавки	Марка сталі	C_3
1	06БФ	0,20
2	06БФ	0,20
3	06МБФ	0,38
4	06МБФ	0,41

Отримані результати показують, що, як вогнестійкі сталі в цілому, так і випробовуваний прокат, не схильні до утворення холодних тріщин, оскільки величина C_3 , визначена за стандартною формулою, перевищує величину C_3 , визначену за формулою (1) не більше ніж на 0,03%.

Іншою важливою характеристикою, що оцінює схильність зварного з'єднання до утворення холодних тріщин, являється максимальна твердість металу зони термічного впливу при зварюванні. Ці випробування проводились відповідно до ГОСТ 6996 «Методы определения механических свойств сварных соединений» на найбільш легованій сталі з тих, що розглядалися - 06МБФ (термічно покращений листовий прокат товщиною 20 мм). Для випробування твердості, напавлення проводилось за стандартними режимами, що передбачені СНІП П-23-81*, при цьому погонна енергія зварювання обиралась залежно від товщини випробувального прокату, відповідно до рекомендованих норм величини катетів шва, і дорівнювала $q/v=14$ кДж/см.

Твердість наплавленого металу вимірювалась за схемами, що показані на рис.1 а,б, крім цього була виміряна міцність навколо шовної зони по лінії, що розташована поблизу межі сплавлення, як місце, що має найбільшу швидкість охолодження. Результати вимірювання міцності металу наплавлених зразків наведені на рис. 2 та 3.

Допустима норма максимальної твердості - 350HV, відповідно ГОСТ 23118-99, що регламентує механічні властивості зварних з'єднань будівельних металоконструкцій. Відомо, що утворення холодних тріщин виключено при твердості $\leq 350\text{HV}$ [1].

Внаслідок цього, зварювання сталі 06МБФ, тим більше 06БФ, із застосуванням режимів що рекомендовані СНиП П-23-81* не викликає небезпеки утворення холодних тріщин, оскільки у нашому випадку $\text{HV}_{\text{max}} < 250$ од.

Зрештою, небезпека утворення холодних тріщин може проявитись при металографічному аналізі: у цьому випадку небезпечно утворення грубого мартенситу на навколо шовній ділянці [1].

В нашому випадку мікроструктура металу шва на межі сплавлення та на навколо шовній зоні представлена на рис 4.

Структура металу шва дрібнозерниста, являє собою ферито-перлитну суміш з дендритною сіткою вільного фериту. Структура навколо шовної зони, що складається з ферито-перлитної суміші з часто повторюючимися відрізками бейніту, порівняно дрібнозерниста.

Структура відрізків нормалізації та неповної перекристалізації мало чим відрізняється від структури основного металу, (рис. 4в). Отримана мікроструктура також свідчить про відсутність можливості формування холодних тріщин в зварних з'єднаннях сталей. Слід вважати, що поява небезпечного дефекту зварних з'єднань – холодних тріщин, у нових сталях практично виключена.

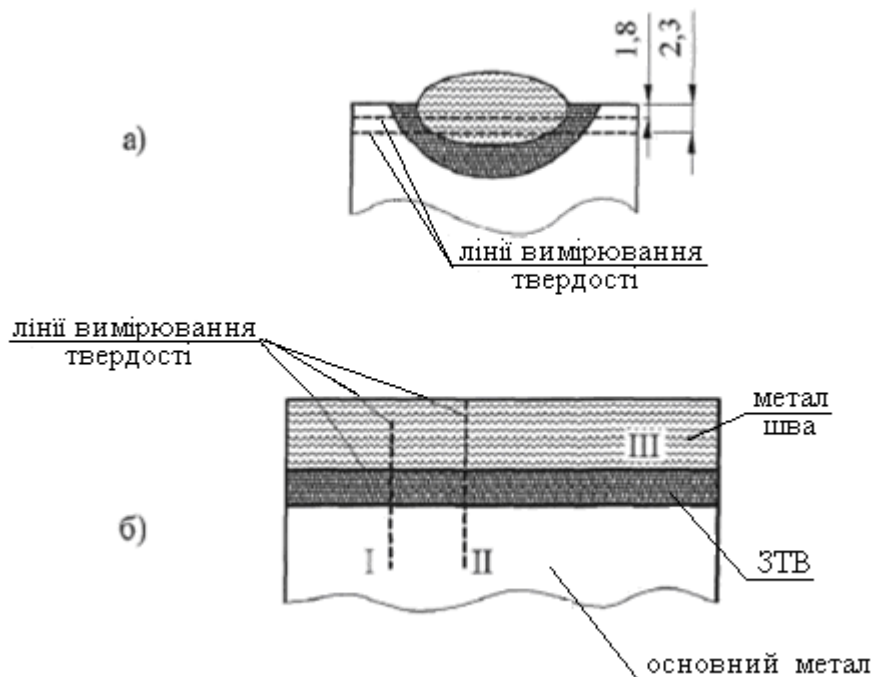
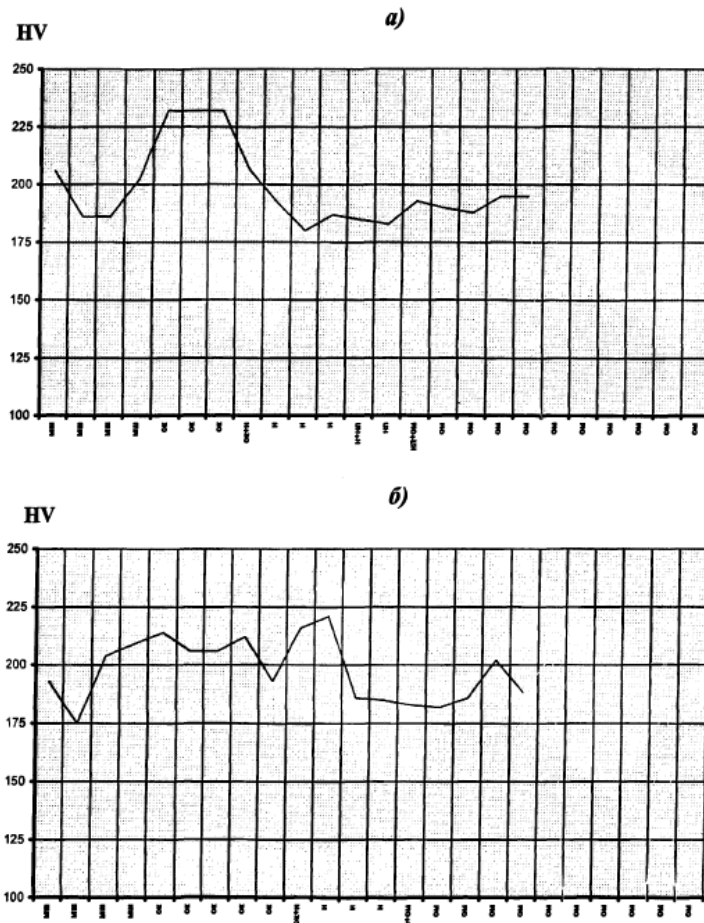
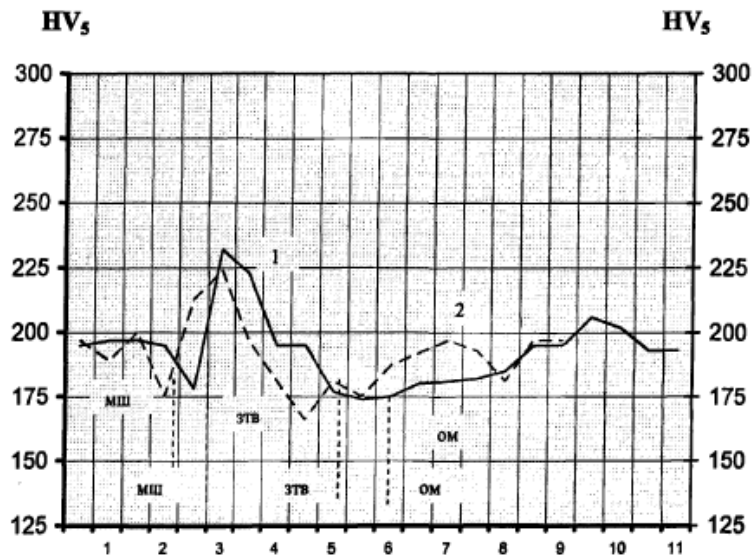


Рисунок 1 – Схема зміни твердості металу шліфів, виготовлених із зразків Кінцеля (а) та Ван дер Віна (б).



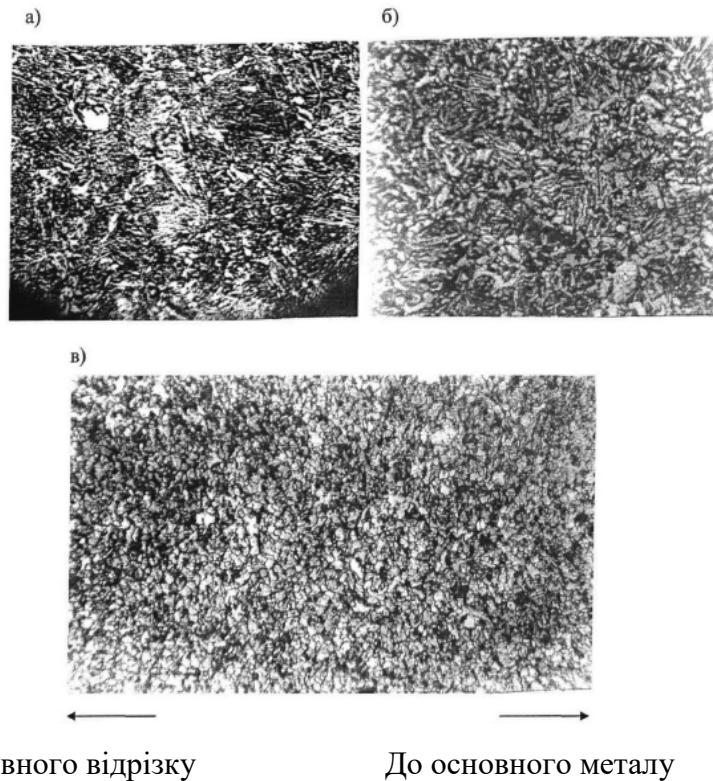
Протяжність відрізків вимірювання HV, мм (відстань між ординатами – 0,5 мм)

Рисунок 2 – Розподіл твердості на різних відрізках ЗТВ шва, наплавленого на пластини товщиною 20 мм з термічно покращеної сталі 06МБФ: а – на відстані 2,3мм, і б – на відстані 1,8 мм від поверхні наплавлення.



Протяжність відрізка вимірювання HV₅, мм

Рисунок 3 – Розподіл твердості впоперек характерних відрізків зварного з'єднання – металу шва, зони термічного впливу та основного металу на зразках Ван дер Віна з термічно покращеної сталі 06МБФ.



До навколошовного відрізка

До основного металу

Рисунок 4 – Мікроструктура металу біля шовної зони наплавлених швів на зразки Кінцеля (а) та Ван дер віна (б,в) зі сталі 06МБФ.

а, б – структура біля шовної зони поблизу границі плавлення.

в – границі нормалізації і неповної перекристалізації.

а – х200; б,в – х300.

Оцінка схильності щодо утворення шаруватих тріщин. Схильність сталі щодо утворення, при зварюванні, небезпечних шаруватих тріщин характеризується величиною z – властивостей [3]. Механічні властивості сталі 06МБФ за товщиною прокату (в z – напрямку) наведені у табл.1. Випробування проводились за ГОСТ 288870-90 на циліндричних зразках, вирізаних з прокату 30 та 40 мм, оскільки прокат схильний до шаруватих тріщин, саме на великих товщинах, вісь зразка нормальна до площини прокату, робочий діаметр 6 мм, робоча довжина – 15 та 20 мм відповідно.

Таблиця 1 – Механічні властивості сталі 06МБФ в z -напрямку

Товщина прокату, мм	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	ψ_z , %
30	428	551	76
	457	567	76
	432	563	77
40	389	488	81
	391	488	82
	373	490	81

Очевидно, що випробувальний прокат має дуже високі z – властивості. Відповідно ГОСТ 28870-90 найкращі сорти сталі мають $\psi_z = 35\%$. У нашому випадку можна стверджувати про ізотропію властивостей товстолистового прокату. В цьому випадку поява шаруватих тріщин виключена.

Високі z – властивості вогнестійких сталей пояснюються їх чистотою за неметалічними включеннями [4].

Отримані результати підтверджують припущення про гарну зварювальність нових сталей, і під час зварювання такого прокату не будуть утворюватись шаруваті тріщини. За отриманими результатами можна стверджувати про поставку прокату з гарантіями по $\psi_z = 50\%$.

Оцінка опору зварних з'єднань щодо крихкого руйнування. Випробування на ударний згин у відповідній мірі характеризують холодостійкість зварних з'єднань [5]. Висока ударна в'язкість зазвичай свідчить про високу холодостійкість зварних з'єднань прокату [6].

Випробування прокату на ударний згин проводили на поперечних зразках з U та V – подібними надрізами в інтервалі температур від +20 до -70°C. Крім величини ударної в'язкості, реєстрували частку волокна (B) в ізломі зразку і величину звуження (ψ_u, ψ_v) на дні надрізу.

Заздалегідь встановлено, що ударна в'язкість вищезазначених сталей дуже висока. Наприклад, для термічно покращеної сталі 06МБФ $KCV^{-60} \geq 100$ Дж/см². Отриманий результат дозволив вперше ввести гарантії по ударній в'язкості на зразках з гострим надрізом при -60°C. Гарантії по ударній в'язкості за критерієм $KCV \geq 29$ Дж/см² знаходяться для сталі СтЗсп (С255) при +20°C, для сталі 09Г2С (С234) у кращому випадку – при -20°C.

Для порівняння розглянемо результати випробування сталі 06МБФ і СтЗсп у прокаті з однаковою товщиною – 12мм. Показники КСУ та КСВ для сталі 06МБФ на порядок вище ніж у сталі СтЗсп. Так, наприклад, KCV^{-70} для сталі 06МБФ знаходиться в рамках 100...230 Дж/см², аналогічний показник у сталі СтЗсп приблизно 3 Дж/см². При -40°C KCV^{-40} для сталі 06МБФ знаходиться в рамках 260...270 Дж/см², для сталі СтЗсп $KCV^{-40} = 10...15$ Дж/см². При -40°C відносне звуження на дні надрізу (ψ_u, ψ_v) в зразках зі сталі 06МБФ знаходиться в рамках 28...34%, частка волокна в ізломі (B_u, B_v) – 50...70%, у зразках із сталі СтЗсп відносне звуження на дні надрізу – 0...11%, частка волокна в ізломі – 0...3%.

Порівнюючи результати випробувань сталі 06МБФ зі сталлю 09Г2С можна сказати, що в інтервалі температур до -70°C сталь 06МБФ показує результати стабільніші, ніж у сталі 09Г2С. При температурах -40°C та нижче, сталь 06МБФ має ударну в'язкість в декілька разів вищу, ніж сталь 09Г2С. Показники пластичності сталі 06МБФ також значно вищі.

Критичні точки в'язко-крихкого переходу випробувального прокату наведені в табл. 2. Очевидно, що сталь 06МБФ має більший опір крихким руйнуванням, ніж стандартні сталі СтЗсп та 09Г2С.

Таблиця 2 – Критичні точки в'язко-крихкого переходу випробувальних сталей

№ п/п	Марка сталі	Стан поставки	Товщина, мм	Критична температура, °C за критерієм						КСВ, Дж/см ²
				КСУ = 35 Дж/см ²	КСВ = 35 Дж/см ²	$\psi_u=7\%$	$\psi_v=4\%$	$B_u=50\%$	$B_v=50\%$	
1	06МБФ	ТП	10	<<-70	-40	<<-70	-40	-30	-30	270
2	06МБФ	ТП	12	<<-70	-65	<<-70	-65	-40	-40	370
3	06МБФ	ТП	20	<<-70	-70	<<-70	-70	-50	-25	270
4	06МБФ	ТП	30	<<-70	-70	<<-70	-70	-40	-20	370
5	06МБФ	ТП	40	<<-70	<<-70	<<-70	<<-70	-20	-20	370
6	06МБФ	ТП	40	<<-70	-60	<<-70	-60	-50	-30	370
7	СтЗсп	ГК	10	-30	0	-25	+10	+20	+20	100
8	СтЗсп	ГК	12	-35	+20	-20	+20	+20	+20	50
9	09Г2С	ГК	10	-40	+5	-40	+5	+20	+20	100
10	09Г2С	ГК	12	-70	-20	-70	-40	-10	-10	100

Також, слід зазначити, що у сталі 06МБФ не спостерігається значне зниження показників, при збільшенні товщини прокату.

Отриманий результат обумовлений такими факторами як формуюча, при термічному покращенні, дрібно дисперсна структура, низький вміст вуглецю, а також висока чистота за шкідливими домішками ($S < 0,005\%$).

Встановлено, що нові сталі мають холодостійкість на $\sim 40^\circ\text{C}$ нижчу, ніж стандартні сталі. Нові матеріали можуть застосовуватися у самих жорстких кліматичних умовах крайньої півночі та Далекого Сходу.

Висновки.

1. Встановлено, що досліджений прокат із вогнестійких сталей має високий комплекс механічних і технологічних властивостей, наперед за все, прокат підвищеної міцності зі сталі 06МБФ.

Прокат має високий опір крихким руйнуванням, високу ударну в'язкість при низьких температурах, до сталей у вітчизняній практиці вперше були висунуті вимоги щодо ударної в'язкості при мінус 60°C .

2. Встановлено, що вогнестійкі сталі мають гарну зварювальність.

Внаслідок низького вмісту вуглецю, легуючих і шкідливих домішок, сталь не має схильності щодо утворення холодних тріщин. Твердість навколо шовної зони $HV \leq 250$ од., при цьому, холодні тріщини не утворюються при $HV \leq 350$ од.

Сталь не схильна щодо утворення шаруватих тріщин, завдяки високим z -властивостям: $\psi_z \geq 75\%$.

Зварні з'єднання із нової сталі мають високий опір крихкому руйнуванню.

3. Вважаємо доцільним продовжувати дослідження технологічних властивостей вогнестійких сталей марок 06БФ та 06МБФ на предмет їх використання для будівельних конструкцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Одесский П.Д. Перспективные требования к сталям для металлических конструкций // Деформация и разрушение материалов. – 2005 - №1.- с.1120.
2. Ботвина Л.Р. Физические и механические критерии ударного разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2001 - т.67.- №8. - с.56-62.
3. Одесский П.Д. Микромеханические модели разрушения сталей для металлических конструкций // Физико-химическая механика материалов, 1992. - №2. - с. 20-25.
4. Шабалов И.П., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. – М.: ЗАО «Металлургиздат». - 2003.- 520с.
5. Штремель М.А. Измерение качества металла // Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справ. Изд. Т.1. Методы испытаний и исследования. - М: Интермет Инжиниринг. - 2004.- 688 с.
6. Георгиев М.Н., Межова Н.Я. Метод Шарпи в наших исследованиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. -2001. - т.67.-№7.- с.56-62.