

УДК 624.014

I.B. Рудешко, Ю.А. Отрош, В.В. Золотарьов,
Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

ОСОБЛИВОСТІ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОГНЕСТІЙКИХ СТАЛЕЙ

В роботі розглянуто і проведено порівняльний аналіз хімічного складу і механічних властивостей нових вогнестійких і звичайних будівельних сталей. Представлені особливості хімічного складу і механічних властивостей вогнестійкої сталі японської фірми Kawasaki Steel.

Ключові слова: вогнестійка сталь, вогнестійкість, хімічний склад, мікролегування, механічні властивості.

Постановка проблеми. В наш час в усіх розвинутих країнах велика увага приділяється дослідженням вогнестійкості будівельних конструкцій, розробці нових матеріалів, що мають підвищену вогнестійкість, а також нових методів і матеріалів для захисту конструкцій від пожежі. Будівельні норми України, Росії, ряду європейських держав, США і Японії передбачають захист сталевих конструкцій за допомогою вогнестійких покриттів. Але використання захисних фарб, обмазок і інших покриттів дуже часто супроводжується погіршенням санітарно-гігієнічних норм робочих місць, додатковими трудовими і матеріальними затратами, іноді, значним збільшенням ваги конструкції, а також її вартості.

Зменшити, а іноді, і усунути вказані негативні явища, дозволяє використання сталей із нормованими на достатньо високому рівні характеристиками міцності, за умовами короткочасної дії нагрівання при пожежі в інтервалі температур 500-700°C, тобто сталей із високою вогнестійкістю. Особливість вимог, що пред'являються до вогнестійких сталей, полягає в тому, що вони мають забезпечити працездатність конструкції, як при нормальних умовах експлуатації (в тому числі і при низьких температурах), так і в умовах короткочасної дії високих температур під час пожежі. Тому, вогнестійкі сталі повинні мати повний комплекс механічних і технологічних властивостей, характерних будівельним сталям.

Аналіз останніх досліджень. Розробкою вогнестійкої сталі займалися багато країн світу. Найбільших досягнень в цьому питанні було досягнуто Японією, Англією, США, Росією. Японська фірма Kawasaki Steel, що розробила вогнестійку сталь (KSFR) із збільшеною міцністю при підвищених температурах, успішно її застосувала під час будівництва фабрики по виробництву і обробці пакувальних матеріалів. Використання цієї сталі дозволило повністю відмовитись від захисного шару металевих конструкцій у пакувальному цеху і суттєво зменшити його товщину в адміністративному корпусі.

У таблиці 1 представлені хімічні складу сталі KSFR [1], а у таблиці 2 властивості KSFR сталей при кімнатній температурі.

Таблиця 1 – Хімічні складу сталі KSFR

№ п/п	Марка сталі	Товщина, мм	C	Si	Mn	P	S	Ce
1.	SM400B (FR)	16	0,09	0,30	0,81	0,005	0,003	0,35
2.	SM400B (FR)	40	0,09	0,30	0,81	0,005	0,003	0,35
3.	SM490B (FR)	16	0,10	0,26	0,78	0,006	0,003	0,43
4.	SM490B (FR)	60	0,90	0,25	0,83	0,005	0,003	0,43

Таблиця 2 –Механічні властивості KSFR сталей при нормальній температурі

Марка сталі	Товщина,мм	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне видовження, %
SM400B (FR)	16	275	454	34
		269	455	33
	40	304	429	38
		307	432	39
SM490B (FR)	16	410	551	24
		377	558	22
	60	336	492	39
		342	491	37

В таблиці 3 представлені хімічні склади вогнестійких сталей (FR) і звичайних [2].

Таблиця 3 – Хімічний склад сталі у %

№ п/п	Марка сталі	Товщина, мм	C	Si	Mn	P	S	Ce
1.	SM400-FR	20	0,19	0,30	0,85	0,013	0,002	0,34
2.	SM490-FR	20	0,10	0,30	1,00	0,011	0,002	0,42
3.	SM400	20	0,16	0,12	0,55	0,014	0,004	0,26
4.	SM490	20	0,17	0,40	1,33	0,008	0,004	0,41

Випробування зразків при температурі 600°C показали наступні результати (SM490-FR і SM490, відповідно): умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$ -224 та 122 МПа, тимчасовий опір 363 та 178 МПа. Сталь SM490-FR на відміну від сталі SM490 зберігає високе значення модуля пружності до 700°C, деформація повзучості під навантаженням 196 МПа при 600°C не перевищує 1 %. Таким чином, на підставі вище приведених результатів механічних випробувань встановлено, що сталь SM490-FR при 600°C зберігає більше 2/3 міцності, що визначена при кімнатній температурі.

Один з прикладів використання вогнестійкої сталі – будівля City Park Plaza Building [3], що являється найбільшою в Японії стоянкою для автомобілів і нараховує 17 поверхів з розташуванням 1800 машин. Розрахунки вказують на те, що каркаси цієї будівлі, що виготовлені з вогнестійкої сталі, можуть експлуатуватись без вогнезахисного покриття.

Інший приклад використання вогнестійкої сталі – торговельний центр Nagasakiya. Покрівлю атріуму в цьому центрі виконано із вигнутих легких сталевих каркасів і закінчено алюмінієвими панелями. Будівля має магазини у підвальному приміщенні на першому і другому поверхах, а також паркувальні місця на третьому поверсі та даху. Конструкцію даху атріуму спроектовано таким чином, щоб витримати температурний вплив від згорання великої кількості товарів і матеріалів, що знаходяться у підземному поверсі, а також у разі пожежі у торговельних залах на першому і другому поверхах. Проведені випробування показали, що температура сталі в атріумі покрівлі не перевищуватиме 600°C, що, дозволяє використовувати сталеву конструкцію без захисного покриття.

Постановка завдання та його вирішення. Особливість вимог, що пред'являються до вогнестійких сталей, полягає в тому, що вони мають забезпечити працездатність конструкції, як при нормальних умовах експлуатації (в тому числі і при низьких температурах), так і в умовах короткочасної дії високих температур під час пожежі. Тому, вогнестійкі сталі повинні мати повний комплекс механічних і технологічних властивостей, характерних будівельним сталям, а також нормовані характеристики міцності і пластичності, що відповідають умовам нормальної експлуатації (+20°C), ударну в'язкість, що визначена при низьких температурах, достатню технологічну пластичність, гарантовану зварювальність.

Спеціально проведені лабораторні дослідження дозволили встановити основні вимоги щодо хімічного складу і технологічної схеми виробництва прокату із вогнестійкої сталі [4,5]. Сталь повинна мати низький вміст вуглецю ($<0,1\%$), щоб знизити її зміцнення при підвищених температурах. Основу легування сталі складає сполучення Nb-Mo.

Крім того, сталь мікролегується ванадієм, що сприяє підвищенню вогнестійкості, за рахунок виділення дисперсних частинок карбонітридів при 570-620°C.

Слід обмежити вміст марганцю ($\leq 0,1\%$), який знижує високо температурну міцність прокату [6].

Режими термічної і термомеханічної обробки мають забезпечувати формування у феритній матриці розвиток структури, що сприяє збереженню міцності при нагріванні. За кордоном такі сталі поставляються після термомеханічної прокатки [7]. На вітчизняних металургійних заводах подібне обладнання відсутнє. Тому, в умовах вітчизняних можливостей, випробування вогнестійких сталей можливо проводити безпосередньо після гарячої прокатки за звичайними режимами, або після термічного поліпшення, тому що ці обробки сприяють формуванню потрібної структури у сталях.

На підставі результатів випробувань [10], для виробництва прокату, завтовшки 8-50мм були розроблені ТУ 14-1-5399-2000 «Прокат листовий с підвищеною огнестійкістю для сталевих конструкцій».

До ТУ увійшли дві сталі – звичайної міцності 06БФ і підвищеної міцності 06МБФ.

Вимоги щодо хімічного складу і властивостей цих сталей приведені у таблицях 4, 5 та 6.

Таблиця 4 – Хімічний склад (%) вогнестійких сталей за ТУ 14-1-5399-2000

галь	Клас міцності	C	Mn	Si	S, ≤	P, ≤	V	Mo	Nb	Cr	Ni
06БФ	C255	0,07-0,09	0,6-0,8	0,15-0,35	0,01	0,02	0,05-0,08	-	0,02-0,04	0,1-0,3	0,1-0,3
06МБФ	C345	0,08-0,10	0,6-0,9	0,15-0,35	0,01	0,02	0,06-0,09	0,08-0,20	0,02-0,04	0,5-0,8	0,1-0,3

Примітка: N $\leq 0,012\%$; Al=0,02-0,06%; T 0,015-0,035%; Cu $\leq 0,2\%$.

Таблиця 5 – Вимоги щодо механічних властивостей на розтяг вогнестійких сталей за ТУ 14-1-5399-2000

Сталь	Клас міцності	Товщина прокату, мм	Механічні властивості				
			При +20°C			При 600°	
			σ_B	σ_T	σ_5	σ_B^{600}	σ_T^{600}
			Н/мм ²			%	
06БФ	C225	8-50	380-500	255	22	180-300	135
06МБФ	C345	8-50	490-670	345	21	240-420	200

Таблиця 6. Ударна в'язкість вогнестійких сталей за ТУ 14-1-5399-2000

Марка сталі	Категорія	Товщина листа, мм	Ударна в'язкість, Дж/см ² при температурі, °C				
			КCU			KCV	
			-40	-70	+20	-20	-40
06БФ	C255	10-40	34	-	34	-	-
06МБФ	C345	8-10	39	34	39	34	29

Згідно міжнародної практики характеристики міцності вогнестійких сталей при 600°C мають складати від 1/2 до 2/3 значень, що отримані при кімнатній температурі.

Згідно ТУ 14-1-5399-2000 для сталі C255 це відношення складає 0,5, для сталі C355 – 0,6.

Як зазначалось вище, вогнестійкі сталі мають бути холодостійкими і гарно зварюватися, мати високі гарантії щодо ударної в'язкості.

Промислові партії вогнестійких сталей були виготовлені на ООО «Уральская сталь» із участю ЦНИИСК ім. Кучеренко [10]. Були виплавлені чотири плавки наступного хімічного складу (таблиця 7):

Таблиця 7 – Хімічний склад, ваг.%, промислових плавок вогнестійких сталей

№ п/п	Сталь	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	Nb	V	N
1	06БФ	0,04	0,34	0,66	0,010	0,004	0,14	0,11	0,15	-	0,024	0,019	0,04	0,06	0,010
2		0,07	0,22	0,51	0,008	0,005	0,11	0,10	0,11	-	0,034	0,024	0,03	0,05	0,008
3	06МБФ	0,09	0,32	0,63	0,007	0,004	0,76	0,20	0,16	0,08	0,032	0,026	0,02	0,06	0,010
4		0,10	0,33	0,79	0,008	0,003	0,66	0,10	0,13	0,12	0,041	0,023	0,02	0,06	0,008

Особливість хімічного складу плавок при $C \leq 0,10\%$: низький вміст шкідливих домішок $S \leq 0,005\%$, $P \leq 0,010\%$, що являється оптимальним для складу вищезазначених сталей. Позитивно на властивості цих сталей впливає наявність в хімічному складі хрому, нікелю і міді, як наслідок використання під час виплавки природно-легованих чавунів.

Під час вибору видів прокату і марок сталі для проведення випробувань, до уваги бралась можливість порівняння нових сталей зі стандартними, що широко використовуються у будівництві в наш час [8]. На підставі вищезазначеного, для вивчення вогнестійкості прокату в якості матеріалу досліджень були обрані сталі, що відрізняються за мікроструктурою і належать до різних класів міцності:

- гарячекатаний прокат товщиною 8-20мм звичайної міцності зі сталі ВСтЗсп (С255);
- прокат товщиною 8-20мм зі сталі підвищеної міцності 09Г2С (С345);
- гарячекатаний прокат із нової сталі товщиною 8-20мм марки 06БФ (С255);
- термічно зміцнений прокат товщиною 8-40мм зі сталі марки 06МБФ (С345).

Таким чином, поряд із новими вогнестійкими сталями марок 06БФ і 06МБФ, для порівняння досліджувались найбільш розповсюджені у практиці будівництва маловуглецева сталь ВСтЗсп і низьколегована сталь 09Г2С.

Механічні властивості вогнестійких гарячекатаних сталей 06БФ та 06МБФ представлені у таблиці 8.

Таблиця 8 – Механічні властивості гарячекатаної сталі 06БФ та 06МБФ

Марка сталі	Товщина мм	σ_T	σ_B	δ_5	KCU^{-70}	KCV^{-40}
		МПа		%	Дж/см ²	
06БФ	10	347-350	433-437	31-32	120-160	30-35
	12	387-390	458-473	25-26	0	0
06МБФ	8	500-600	570-675	16-24	112-250	95-240
	10	510-545	575-610	20-31	134-371	44-310
	12	467-505	535-555	24-31	222-370	48-380
	20	372-382	510-520	31-35	12-250	10-28
	30	378-382	520-535	27-31	5-10	7-18
	40	362-372	496-510	28-31	4-56	12-20

Низька ударна в'язкість листів, в першу чергу, великих товщин (20-40мм), пов'язана із ростом зерна, а також, із різнозернистістю. Тому, нові вогнестійкі сталі доцільно використовувати у термічно зміцненому стані.

Про механічні властивості термічно покращеного прокату можливо судити за результатами випробувань на розтяг, що були проведені на пласких зразках 450x30 мм натурних величин (табл. 9). Для порівняння, крім нових сталей, досліджували зразки із стандартних сталей марок 09Г2С (С345) і Ст3сп (С255).

Отримані результати повністю відповідають ТУ і характерні для мікролегованих сталей із достатньо високою чистотою за шкідливими домішками.

Таблиця 9 – Механічні властивості на розтяг вогнестійких та стандартних сталей

Марка сталі	Стан поставки	Товщина прокату	Переріз зразків	σ_T	σ_B	δ_5	δ_p	ψ
		мм		МПа		%		
06БФ	ТП	10	10x30	354	424	30	16	64
		12	12x30	418	506	25	13	61
		20	20x30	400	481	23	9	69
06МБФ	ТП	8	8x30	511	585	25,5	10	53
		10	10x30	497	564	26	13	59
		12	12x30	440	522	34	13	66
		20	20x30	419	530	23	10	73
		30	30x15	412	519	26	11	68
		40	40x15	402	492	31	11	64
Ст3сп	ГК	10	10x30	169	444	34	19	55
		12	12x30	317	499	27,3	17	57
09Г2С	ГК	10	10x30	386	531	24,5	14	60
		12	12x30	381	508	31	18	56

Примітка: приведені мінімальні значення з трьох випробувань на товщину. ТП – термічно поліпшені; ГК – гарячекатаний стан.

Випробування на міцність при підвищених температурах до 700°C проводились на зразках із робочим діаметром 6мм. Вище за 700°C вогнестійкість сталі оцінювати не доцільно, внаслідок наближення стану, коли характеристики міцності і модуль пружності стрімко падають.

У таблиці 10 на прикладі сталі 06МБФ при товщині прокату 12мм представлені результати випробувань зразків при підвищенні температури від +20°C до +700°C.

Межі міцності і тимчасового опору при температурі випробувань +600°C сталей 06БФ, 06МБФ і стандартних сталей для порівняння представлені у таблиці 11.

Таблиця 10 – Міцнісні властивості на розтяг вогнестійкої сталі 06МБФ при підвищених температурах

№ п/п	Товщина прокату, мм	Температура випробування	σ_T	σ_B
			МПа	
1	12	20	440	520
2		100	387,2	478,4
3		200	400,4	478,4
4		300	396	509,6
5		400	378,4	457,6
6		450	369,6	416
7		500	365,2	364
8		550	334,4	338
9		600	237,6	296,4
10		650	211,2	254,8
11		700	162,8	197,6

Таблиця 11 – Міцнісні властивості на розтяг вогнестійких та звичайних сталей при 600 °С

№ п/п	Марка сталі	Товщина прокату, мм	Стан поставки	σ_T	σ_B
				МПа	
1	06БФ	12	Гаряча прокатка	203	224
2			Покращення	238	247
3		20	Покращення	230	243
4	06МБФ	8	Гаряча прокатка	198	365
5			Відпуск, 740°C	266	311
6		10	Гаряча прокатка	267	307
7			Відпуск, 720°C	255	299
8		12	Гаряча прокатка	238	295
9			Відпуск, 700°C	243	285
10		20	Покращення	294	320
11		30	Покращення	261	291
12		40	Покращення	265	297
13		СтЗсп	10	Гаряча прокатка	60
14	12		Гаряча прокатка	72	143
15	09Г2С	10	Гаряча прокатка	107	200
16		12	Гаряча прокатка	101	193

У результаті проведених випробувань показано, що вогнестійкі сталі мають достатньо високі характеристики міцності при 600°C. За цим показником вогнестійкі сталі суттєво перевершують звичайні.

Встановлено, що термічно поліпшені сталі мають більш високу вогнестійкість, ніж гарячекатані, навіть після відпуску. При 600°C в цих сталях спостерігається невелика різниця між σ_T і σ_B – 20-50 МПа внаслідок виділення дисперсної карбонітридної фази при нагріванні. При порівнянні сталей 06БФ і 06МБФ спостерігається вплив домішок молібдену на підвищення показників вогнестійкості.

Висновки.

1. На підставі вищезазначеного спостерігається перевага вогнестійких сталей марок 06БФ та 06 МБФ порівняно із стандартними під час оцінюванні характеристик міцності при

критичних температурах (600°C). Тимчасовий опір зростає приблизно у двічі, величина межі текучості ще більша;

2. Після порівняння даних таблиць 10 і 11 видно, що навіть при 700°C межа текучості сталі 06МБФ суттєво більша, ніж у стандартних сталей при 600°C;

3. За результатами досліджень встановлено, що сталь з молібденом 06МБФ має більш високу вогнестійкість, ніж сталь 06БФ.

4. Основу мікролегування вогнестійкої сталі складає сполучення Nb-Mo.

Перспективною подальших досліджень є проведення досліджень щодо створення нормативної та випробувальної бази з питань розробки та застосування таких сталей для будівельних конструкцій в Україні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Elevated temperature and highstrain rate properties of offshore technology. Report № 2001/020. Health&Safety Executive. UK. 2001. 158 p.

2. Mitsumasa Fushimi, Koichiro Keira, Hiroshi Chikaraishi. Development of fire- resistant steel frame building structure// Nippon steel technical report No 66 July,– 1995, p.29–36.

3. Masefpour-Dezfuly a.o. Fire Resistant Higt Strength Low Alloy Steels // Materials Science and Technology, December 1990, Vol. 6.

4. ДБН В.1.2-7-2008 «Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека».

5. Шабалов И.П., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2003. – 520 с.

6. Одесский П.Д., Ведяков И.И., Кулик Д.В., Соловьев Д.В. Использование эффектов ТМО при производстве проката массового назначения с высокими эксплуатационными свойствами // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов. – М: Издательство «Учеба», 2001. – С. 58.

7. Кулик Д.В., Одесский П.Д., Горпинченко В.М., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. и др. патент № 2183222 по заявке № 2001130954, 10.11.2001, приоритет от 16.11.2001, зарегистрирован в госреестре изобретений РФ 10.06.2002, г. Москва.

8. Одесский П.Д., Кулик Д.В., Соловьев Д.В. Предельные состояния стальных конструкций из проката с обычной и повышенной огнестойкостью// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2004. – №6. – С. 41 – 48.

9. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 1 Элементы стальных конструкций: Учеб. Пособие для строит, вузов/ В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др. / под ред. В.В. Горева - М.: Высш. шк., 1997. – 527 с.

10. Соловьев Д.В. Новая огнестойкая сталь. Исследование огнестойкости стальных балок, изготовленных с применением новой стали // Противопожарная защита зданий и сооружений, огнезащита строительных конструкций (новые технологии и разработки). Сб. научных тр. - ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, – М., 2003. – С. 40 – 50.

11. Одесский П.Д., Кулик Д.В. Сталь нового поколения в уникальных сооружениях. - М.: «Интернет Инжиниринг», 2005. – 176 е.: ил.

12. Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И., Чевская О.Н., Штычков Н.Н., Одесский П.Д., Соловьев Д.В., Москаленко В.А., Степашин А.М., Шабалов И.П., Кулик Д.В. Сталь с повышенной огнестойкостью для металлических конструкций // Сталь. – 2004. – №9. – С. 48 – 53.

13. Одесский П.Д., Кулик Д.В., Соловьев Д.В., Шабалов И.П. Новые стали для ответственных строительных металлических конструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2003. – №12. – С. 2–4.