

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ, ТИПУ ЗРАЗКІВ І НАПРЯМКУ ЇХ ВИРІЗАННЯ НА ХОЛДНОЛАМКІСТЬ СТАЛЕЙ 20 і 17Г1С

Ю. Д.Петрина, С.С.Вуйцік

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422),
e-mail: public@nung.edu.ua

Вивчено холодноламкість сталей 20 і 17Г1С, які випускаються для виготовлення труб магістральних газопроводів. Показано, що нормалізація та покращення підвищують холодноламкість сталей. При переході від зразків типу I до зразків типу IV температура переходу в крихкий стан підвищується. Холодноламкість поздовжньо та поперечно вирізаних зразків залежить від хімічного складу сталі.

Ключові слова: холодноламкість сталей, холодостійкість сталей, нормалізація, покращення, крихкий стан, ударна в'язкість.

Изучена хладноломкость сталей 20 и 17Г1С, используемых для изготовления труб магистральных газопроводов. Показано, что нормализация и улучшение повышают хладостойкость сталей. При переходе от образцов типа I к образцам типа IV температура перехода в хрупкое состояние повышается. Хладноломкость продольно и поперечно вырезанных образцов зависит от химического состава стали.

Ключевые слова: хладноломкость сталей, хладостойкость сталей, нормализация, улучшение, хрупкое состояние, ударная вязкость.

Studied is cold brittleness of steel 20 and 17Г1С which is used in manufacturing pipes for gas mains. It is shown that its normalization and improvement in hance steel cold brittleness in going fran the type I specimens to the type IV specimens with the transition temperature being increased in going info the state of cold brittleness being increased. Cold brittleness of lateral and longitudinal cuttings depend on chemical composition of steel.

Keywords: cold brittleness of steel, cold resistance, normalization, improvement, state of cold brittleness, impact resistance.

Згідно з нормативним документом [1] оцінка міцності та поточного технічного стану трубопроводу включає такі питання:

- вивчення технічної та експлуатаційної документації;

- визначення механічних характеристик металу;

- розрахунки на міцність з врахуванням експлуатаційних і пошкоджувальних чинників.

При визначенні механічних характеристик металу використовують значення границі міцності матеріалу (σ_B), границі плинності (σ_T), ударної в'язкості (KCV) і критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (K_{IC}). Поточні значення характеристик матеріалу визначаються шляхом експериментальних випробовувань матеріалу конкретного трубопроводу під час комплексного діагностичного обстеження. Обсяг випробовувань визначається обсягом необхідної вхідної інформації і обов'язково включає визначення ударної в'язкості за ГОСТ 9454-78.

Крім того, метод серійних випробовувань на ударну в'язкість за різних температур є основним, найбільш поширеним якісним методом порівняльної оцінки схильності матеріалів до крихкого руйнування. Накопичено величезний експериментальний матеріал, що дає змогу порівнювати різні сталі, зокрема, для сталі 17Г1С такий матеріал представлено в роботі [2]. Цей метод є найбільш простим і поки що єдиним, що може проводитись в умовах заводського контролю масової продукції. Тому можна вважати, що найближчим часом метод ударної в'язкості залишиться основним методом конт-

ролю холодостійкості сталей на металургійних підприємствах.

Поряд із зазначеними перевагами, оцінка схильності сталей до холодноламкості за результатами випробовувань на ударну в'язкість за однієї заданої низької температури або низки температур в інтервалі падіння ударної в'язкості має суттєві, неодноразово описані та проаналізовані недоліки [3]. Насамперед – це суб'єктивність побудови кривих температурної залежності ударної в'язкості за даними експерименту і, як наслідок, відповідне „свалія” при визначенні критичних температур холодноламкості.

З метою подолання цього недоліку були проведені дослідження, спрямовані на пошуки методів об'єктивного математичного описання температурної залежності ударної в'язкості сталей в інтервалі переходу від в'язкого до крихкого руйнування. В роботі [4] одним із винахідників цієї сталі запропоноване рівняння холодноламкості

$$P = \exp[-\nu \exp(-\frac{U}{kT})], \quad (1)$$

де: $P = 1 - \frac{KCV}{KCV_B}$, KCV – середнє значення

ударної в'язкості за температури T, KCV_B – значення ударної в'язкості в температурній області повністю в'язких зламів (максимальна ударна в'язкість); U – енергія активації пластичної плинності; k – константа Больцмана; ν – передекспоненціальний коефіцієнт, що зале-

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей 20 і 17Г1С

Марка сталі	Вміст елементів, %					
	C	Mn	Si	P	S	Ni
Сталь 20	0,18	0,54	0,28	0,027	0,025	0,12
Сталь 17Г1С	0,17	1,4	0,55	0,03	0,025	0,11

Таблиця 2 – Параметри переходу сталей в крихкий стан

Стан сталі, напрямок і тип зразка	<i>i</i>	<i>U, eB</i>	$\ln v$	KCV_{B_2} Дж/см ²	Температура крихкості, К за критеріями			
					$P = e^{-1}$	$P = 0,1$	$P = 0,9$	$KCV = 40$ Дж/см ²
Сталь 20								
ГК, вд, I	0,994	0,256	11,67	129	253	277	212	232
ГК, вд, IV	0,959	0,301	12,46	128	278	297	235	258
ГК, пп, I	0,976	0,138	3,07	30,7	253	302	182	203
ГК, пп, IV	0,993	0,249	9,56	95,8	302	331	244	283
Н, вд, I	0,988	0,165	8,41	84,1	226	251	179	192
Н, вд, IV	0,978	0,189	8,87	88,7	247	273	195	218
Н, пп, I	0,979	0,097	4,41	44,1	251	318	166	197
Н, пп, IV	0,997	0,167	7,08	70,6	273	310	207	244
П, вд, I	0,987	0,078	4,12	41,2	223	279	144	155
П, вд, IV	0,984	0,164	8,51	85,1	224	248	177	192
П, пп, I	0,991	0,071	3,34	33,4	250	331	147	182
П, пп, IV	0,976	0,091	3,68	36,8	287	371	178	221
Сталь 17Г1С								
ГК, вд, I	0,984	0,185	8,39	103	255	283	201	244
ГК, вд, IV	0,984	0,174	7,12	94	285	322	218	263
ГК, пп, I	0,994	0,173	8,69	68	231	254	183	226
ГК, пп, IV	0,967	0,180	6,59	158	319	364	237	267
Н, вд, I	0,942	0,078	2,70	158	250	358	136	172
Н, вд, IV	0,997	0,141	6,49	128	254	292	188	218
Н, пп, I	0,989	0,091	4,58	148	233	285	156	186
Н, пп, IV	0,998	0,172	7,78	125	251	281	197	225
П, вд, I	0,988	0,059	2,68	208	256	369	139	166
П, вд, IV	0,975	0,107	5,19	125	241	287	166	203
П, пп, I	0,990	0,106	5,37	154	230	270	161	186
П, пп, IV	0,936	0,125	5,98	129	244	283	177	209

жить від складу та структури металу та умов випробування.

У зв'язку з цим метою даної роботи є встановлення можливості об'єктивного опису впливу термічної обробки, типу зразків і напрямку їх вирізання на схильність сталей до крихкого руйнування при випробуваннях на ударну в'язкість рівнянням холодноламкості.

Для дослідження були вибрані сталі 20 і 17Г1С, що використовуються для виготовлення труб магістральних газопроводів, хімічний склад яких наведено в таблиці 1.

Сталі досліджувались в гарячекатаному стані, після нормалізації та покращення. Використовувались зразки, вирізані з нових труб вздовж і перпендикулярно до їхньої осі (тобто до напрямку прокатування). Термічна обробка проводилась на заготовках для ударних зразків. Ударна в'язкість визначалась в області крихко-в'язкого переходу через $T=20K$, а нижче та ви-

ще критичних температур холодноламкості – через $T=50K$. Інтервал температурних досліджень – у межах від 193K до 373K. Випробувались зразки типів I і IV за ГОСТ 9454-60. За кожної з температур випробовувалось по п'ять зразків, відтак обчислювались середні значення ударної в'язкості.

За знайденими значеннями KCV_B , $\ln v$ і U обчислювали умовні критичні температури переходу сталі до крихкого стану за критеріями $P = 0,1$ (верхня критична температура крихкості $T_{0,1}$), $P = 0,9$ (нижня критична температура крихкості $T_{0,9}$), $P = 0,99$ (температура повної крихкості $T_{0,99}$), а також температура, що відповідає імовірності крихкого руйнування $P = e^{-1} = 0,366(T_{e^{-1}})$, і температура, за якої ударна в'язкість була 40 Дж/см^2 ($T_{KCV=4}$). Для всіх серій вираховували індекси кореляції $i_{KCV,T}$. Результати підрахунків зведено до таблиці 2.

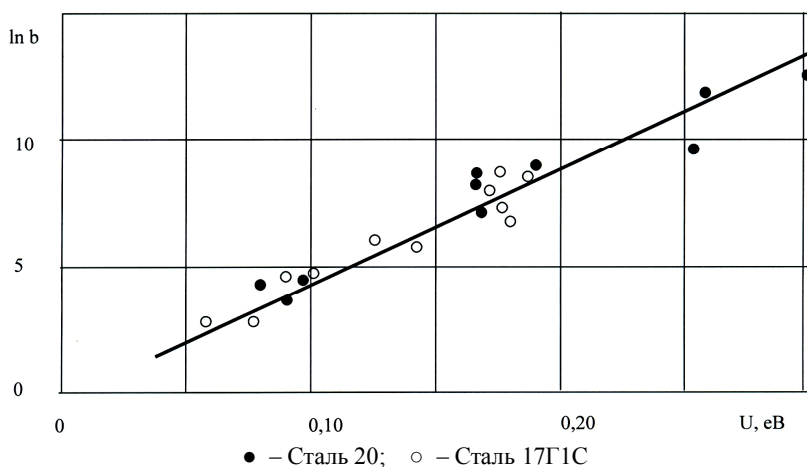


Рисунок 1 – Зв’язок між коефіцієнтами рівняння (1) для всієї сукупності спостережень

В цій таблиці використано такі умовні позначення: ГК, Н і П – гарячекатаний, нормалізований і покращений стани сталі, відповідно; вд і пп. – напрямки вирізання зразків вздовж і впоперек напрямку прокатування відповідно.

Як бачимо, у всіх випадках розрахункові криві залежності ударної в’язкості від температури були дуже близькими до експериментальних точок.

Індекс кореляції між температурою випробувань і ударною в’язкістю був не нижчим 0,908, а в половині всіх спостережень перевищував 0,971.

Енергія активації пластичної плинності при випробуваннях зразків типу I була, як правило, менша, ніж при випробуваннях зразків типу IV. Винятком були поздовжні зразки сталі 17Г1С в гарячекатаному стані. Термічна обробка суттєво зменшує енергію активації, що спостерігається при переході від гарячекатаного стану до нормалізованого та від нормалізованого до покращеного на сталі 20 у всіх без винятку випадках. Для сталі 17Г1С винятком є перехід від нормалізованого стану до покращеного на поперечних зразках типу I.

Для досліджуваних сталей спостерігаються досить тісний зв’язок між енергією активації та перед експоненціальним членом рівняння (1). Цей зв’язок представлений на рис. 1. Для цього зв’язку з використанням відповідної програми методом найменших квадратів підібране таке лінійне рівняння.

$$U = k_0 + k_1 \cdot \ln b \quad (2)$$

Коефіцієнти цього рівняння для всієї сукупності спостережень і для кожної сталі зокрема наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів у рівнянні (2)

Вибірка-серія	k_0	k_1
Сталь 20	0,0150	0,021
Сталь 17Г1С	0,0087	0,023
Обидві сталі	0,0165	0,022

Критична температура крихкості для заданої імовірності крихкого руйнування Р визначається рівнянням [4].

$$T_p = \frac{U}{k[\ln b - \ln(-\ln P)]} \quad (3)$$

З цього рівняння випливає, що зв’язок між енергією активації та логарифмом передекспоненціального члена має стохастичний характер. Варіації температури переходу до крихкого стану в межах даної сукупності спостережень визначаються відхиленням від зв’язку, що описується рівнянням (2). Незважаючи на такий характер зв’язку між $\ln b$ і U його аналіз для оцінки впливу різних чинників на схильність сталі до холодноламкості викликає певний інтерес

На рис. 2 зображено вказані зв’язки для всіх експериментальних даних, згрупованих за ознакою термічної обробки. Рівняння, що описують ці зв’язки для різних станів, мають такий вигляд:

- гарячекатаний стан
 $U = 0,053 + 0,017 \ln b$;
- нормалізований стан
 $U = 0,037 + 0,016 \ln b$;
- покращений стан
 $U = 0,013 + 0,017 \ln b$.

Зіставлення цих зв’язків для різних станів виявляє, що незалежно від марки сталей, типу зразків і напрямку їх вирізування схильність сталі до холодноламкості повинна зменшуватися при переході від гарячекатаного стану до нормалізованого та покращеного, оскільки за даного значення енергії активації зростає величина передекспоненціального члена b .

При групуванні дослідних даних, отриманих при випробуваннях всіх сталей, за типами зразків або за напрямком вирізання зразків, різниця між групами менш помітна. Рівняння (2) в цих випадках набудуть вигляду:

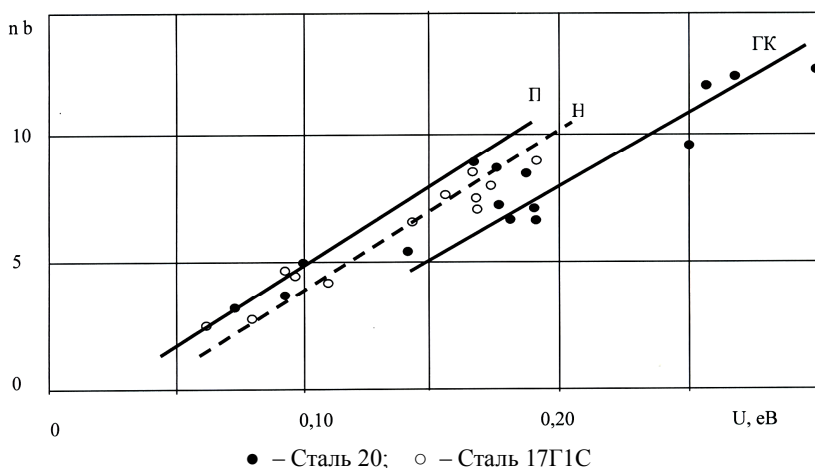


Рисунок 2 – Зв’язок між коефіцієнтами рівняння (1) для станів гарячекатаного (ГК), нормалізованого (Н) та покращеного (П)

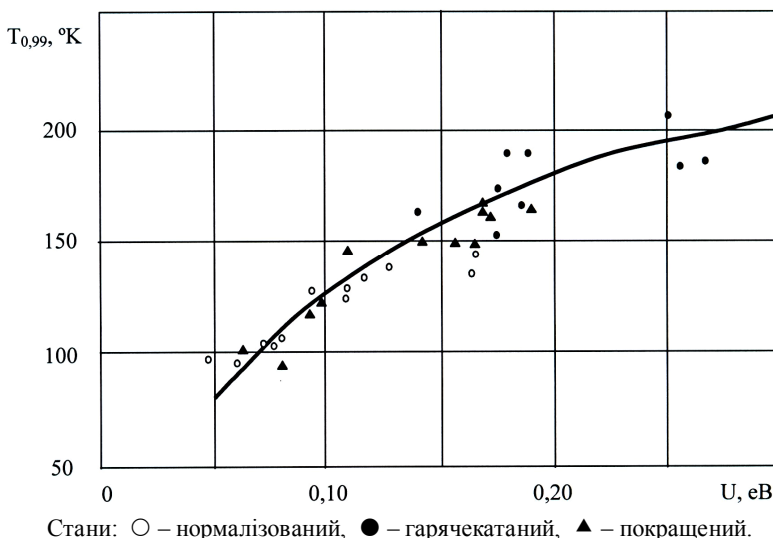


Рисунок 3 – Залежність критичної температури крихкості ($T_{0,99}$) за критерієм $P=0,99$ від енергії активації U для сталей 20, 17Г1С

- зразки типу I
 $U = 0,011 + 0,020 \ln b$;
- зразки типу IV
 $U = 0,043 + 0,021 \ln b$;
- зразки поздовжні
 $U = -0,0031 + 0,022 \ln b$;
- зразки поперечні
 $U = 0,0098 + 0,022 \ln b$.

З рівняння (3) випливає також, що роль $\ln b$ у визначенні критичної температури крихкості залежить від критерію, вибраного для цього визначення. Ця роль зменшується з ростом заданої імовірності крихкого руйнування P . Тому чим вища імовірність, для якої обчислюється умовна критична температура крихкості,

тим чіткіше виступає зв’язок між цією температурою та енергією активації пластичної плинності.

На рис. 3 зображено такий зв’язок для критичної температури, що відповідає імовірності крихкого руйнування 0,99. З цього рисунка видно, що найбільш суттєво підвищується критична температура крихкості з підвищенням енергії активації до 0,20 eV.

Наявність у наших дослідженнях даних про вплив вуглецю, марганцю та фосфору на параметри переходу сталі до крихкого стану дають можливість орієнтовно оцінити вклад цих елементів у зміну енергії активації пластичної плинності сталі 17Г1С порівняно зі сталлю 20. Результати цієї оцінки для нормалізованого стану представлено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Оцінка можливої зміни енергії активації під впливом зміни хімічного складу

Хімічний елемент	Зміна складу (%) сталі 17Г1С порівняно зі сталлю 20	Очікувана зміна енергії активації (eВ) сталі 17Г1С порівняно зі сталлю 20
C	-0,01	+0,032
Mn	+0,86	-0,043
P	+0,003	-0,007

Для сталі 17Г1С оціночний розрахунок дає значення енергії активації пластичної плинності 0,085 eВ проти 0,078 eВ, знайдених експериментально.

Висновки

1. Підтверджена можливість об'єктивного опису впливу термічної обробки, типу зразків і напрямку їхнього вирізання на схильність сталей до холодноламкості при випробуваннях на ударну в'язкість за допомогою рівняння переходу сталі до крихкого стану.

2. Встановлено, що термічна обробка сталі за режимами нормалізації та покращення підвищує холодостійкість сталі внаслідок зниження енергії активації пластичної плинності.

3. Підвищення температури переходу до крихкого стану, особливо нижнього порогу холодноламкості, при переході від зразків типу I до зразків типу IV пов'язане з підвищенням енергії активації пластичної плинності.

4. Зміна енергії активації при переході від поздовжніх зразків до поперечних залежить від хімічного складу сталі. Для вуглецевої сталі 20 енергія активації при випробуванні поперечних зразків завжди нижча, а для сталі 17Г1С – завжди вища, ніж при випробуванні поздовжніх зразків.

Література

1 ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.

2 Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень / Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онищук, Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1(6). – С. 6-11.

3 Сухарев И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности / И.П.Сухарев. – М.: Машиностроение, 1987. – 212 с.

4 Петрина Д.Ю. Статистична модель залежності ударної в'язкості трубної сталі 17Г1С від температури випробувань / Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4(17). – С. 73-77.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
11.02.10*

*Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.*