

Характеристики руйнування комплекснолегованих сталей для цементації

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор

Ж. В. Пархомчук, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Досліджено закономірності впливу легування титаном і комплексами елементів Ti-V, Ti-V-Nb, Ti-V-Mo, Ti-V-W на механічні властивості і характеристики руйнування хромокремнієво-марганцевої сталі. Встановлено суттєве підвищення характеристик міцності сталі при легуванні потрійними комплексами і забезпечення високих показників ударної в'язкості та опору крихкому руйнуванню.

Більшість процесів, що визначають експлуатаційну стійкість цементованої сталі, як двошарової системи (дифузійний шар – серцевина) з перемінними властивостями по перерізу, відбувається у цементованому шарі. Це зародження крихких і втомних тріщин, утворення піттингів, зношування. Проте забезпечення потрібної довговічності і надійності виробів може бути досягнуто лише при оптимальному поєднанні властивостей дифузійного шару і серцевини.

За умов складнонапруженого стану у деталях малого перерізу загальне підвищення властивостей досягається за рахунок збільшення товщини зміцненого цементацією дифузійного шару, а в деталях порівняно великого перерізу – також за рахунок підвищення міцності серцевини [1, 2]. Виходячи з цього, в останні роки для цементованих виробів використовують спадково-дрібнозернисті сталі (номери 6 – 8) з підвищеним вмістом вуглецю (до 0,3 %), леговані одним або двома елементами. Але вони не можуть задовольнити вимог виробництва у зв'язку з підвищеною схильністю їх до крихкого руйнування, малою прогартованістю і низькою зносостійкістю. Для відповідальних деталей використовують також високолеговані сталі з хромом, нікелем, вольфрамом, молібденом, ванадієм, бором. Проте у зв'язку з дефіцитністю і високою вартістю більшості з цих елементів, використання таких сталей підвищеної міцності в останні роки скорочується. Це зумовило розроблення і розширення використання комплекснолегованих безнікелевих і малонікелевих сталей. Дослідженнями М. П. Брауна, Я. Е. Гольдштейна показано доцільність легування цементованої сталі кремнієм до 1,0 – 1,5 % і можливість економії дефіцитного нікелю [3, 4]. Прикладами успішної реалізації цих досліджень можуть бути сталі 25ХГСВТ і 25ХГСНТ для важконавантажених шестерень. Володіючи високими механічними властивостями такі хромокремнієво-марганцеві сталі не завжди задовольняють вимогам щодо опору різним видам крихкого руйнування.

Структура, зношування, руйнування

Вказані недоліки можуть бути усунені за допомогою багатокомпонентного (комплексного) легування.

В зв'язку з цим досліджено вплив легування Cr-Si-Mn – сталі титаном та комплексами елементів Ti-V, Ti-V-Nb, Ti-V-Mo, Ti-V-B. Деформівні сталі вказаних хімічних складів (табл. 1) піддавали термічній обробці за двома режимами. За першим режимом зразки піддавали гартуванню від 870 °С і відпуску при 200 °С. Другий режим імітує процес цементації (псевдоцементация) – нагрів протягом 10 годин при 930 °С, гартування з повторного нагріву від 870 °С, відпуску при 200 °С.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка сталі	Масова частка елементів, %								
	C	Cr	Si	Mn	Ti	V	Mo	Nb	B
25ХГСТ	0,25	1,5	0,7	1,2	0,09	-	-	-	-
25ХГСТФ	0,25	1,5	0,7	1,2	0,09	0,35	-	-	-
25ХГСТФБ	0,28	1,8	0,8	1,3	0,09	0,35	0,38	-	-
25ХГСТФМ	0,28	1,8	0,8	1,2	0,09	0,35	-	0,37	-
25ХГСТФР	0,26	1,55	0,72	1,2	0,09	0,35	-	-	0,002-0,003

Примітка: вміст сірки та фосфору не перевищує 0,02 %

Визначення рівня механічних властивостей сталей після зміцнювальної термічної обробки (табл. 2) показало, що легування комплексом Ti-V зумовлює, порівняно з вихідною сталлю 25ХГСТ, підвищення значень σ_b , σ_T , НРС без помітного зниження ударної в'язкості (табл. 3). Введення третього елемента (Mo, B) суттєво підвищує характеристики міцності при деякому зниженні пластичності і ударної в'язкості. Комплекс Ti-V-Nb не викликає суттєвих змін механічних властивостей порівняно зі сталлю 25ХГСТФ. Найкращим поєднанням характеристик міцності, пластичності і ударної в'язкості володіє сталь 25ХГСТФМ. Структура досліджуваних сталей після гартування і низького відпуску представлена дрібногольчастим маловуглецевим мартенситом, дисперсність якого дещо знижується при ускладненні легування.

Таблиця 2

Механічні властивості сталей

Марка сталі	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	Твердість, НРС
25ХГСТ	1450	1270	8,800	42,000	39
25ХГСТФ	1500	1310	7,800	41,800	40
25ХГСТФБ	1410	1210	10,900	40,700	41
25ХГСТФМ	1630	1425	8,000	26,500	40
25ХГСТФР	1571	1430	8,800	40,500	39

Примітка: термічна обробка – гартування, низький відпуск

Структура, зношування, руйнування

Таблиця 3

Ударна в'язкість і статистична оцінка гетерогенності мікрозлому сталей

Марка сталі	КСУ, МДж/м ²	Складові мікрозлому, %		
		Я	КВ	КР
25ХГСТ	<u>0,78</u>	<u>79</u>	<u>19</u>	<u>2</u>
	0,72	61	36	3
25ХГСТФ	<u>0,84</u>	<u>80</u>	<u>20</u>	<u>0</u>
	0,64	64	34	2
25ХГСТФБ	<u>0,87</u>	<u>65</u>	<u>31</u>	<u>3</u>
	0,5	26	65	9
25ХГСТФМ	<u>0,63</u>	<u>56</u>	<u>43</u>	<u>1</u>
	0,61	43	55	2
25ХГСТФР	<u>0,5</u>	<u>52</u>	<u>45</u>	<u>3</u>
	0,44	30	63	7

Примітка: над рискою – гартування, низький відпуск; під рискою – псевдоцементация, гартування, низький відпуск.

Макрозлом сталей після гартування і відпуску (рис. 1) має скритокристалічну будову. Сірий матовий колір пов'язаний з вмістом в сталях марганцю. Злом сталей, легованих потрійними комплексами відрізняється незначно. Утяжина ударних зразків помітно не змінюється залежно від характеру легування і оцінюється як середня (2 – 3 мм).

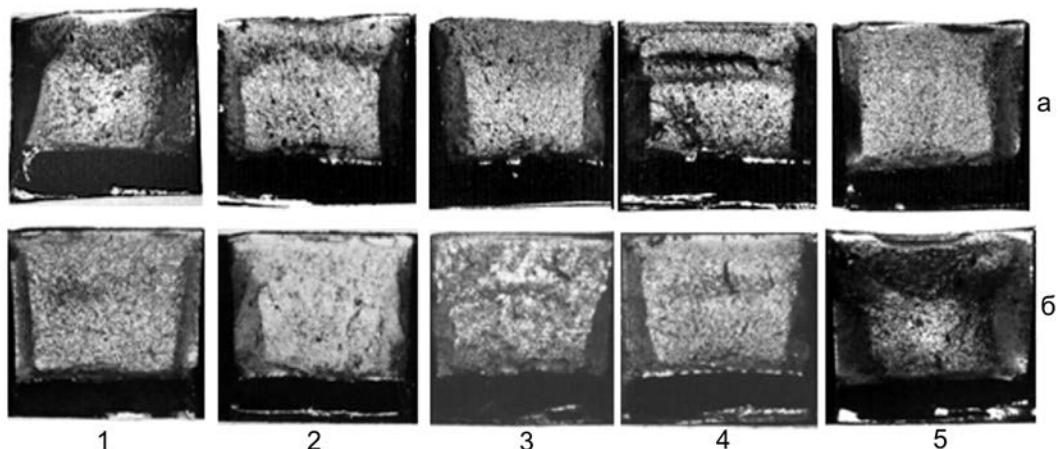


Рис. 1. Макрозломи сталей залежно від характеру легування і термічної обробки. 1 – 25ХГСТ, 2 – 25ХГСТФ, 3 – 25ХГСТФБ, 4 – 25ХГСТФМ, 5 – 25ХГСТФР; а – гартування, відпуск; б – псевдоцементация, гартування, відпуск.

Порівняння сталей загартованих і псевдоцементованих (з наступним гартуванням) показує збільшення зерна макрозломів останніх і зменшення утяжини до 1,0 – 1,5 мм.

Електроннофрактографічні дослідження дозволили виявити основні мікромеханізми руйнування і відповідні морфологічні елементи мікрорельєфу зломів – ямки (Я), квазівідкол (КВ), поверхні крихкого

Структура, зношування, руйнування

руйнування (КРХ) – сходинки відколу, річкового візерунку, міжзеренного руйнування (рис. 2).

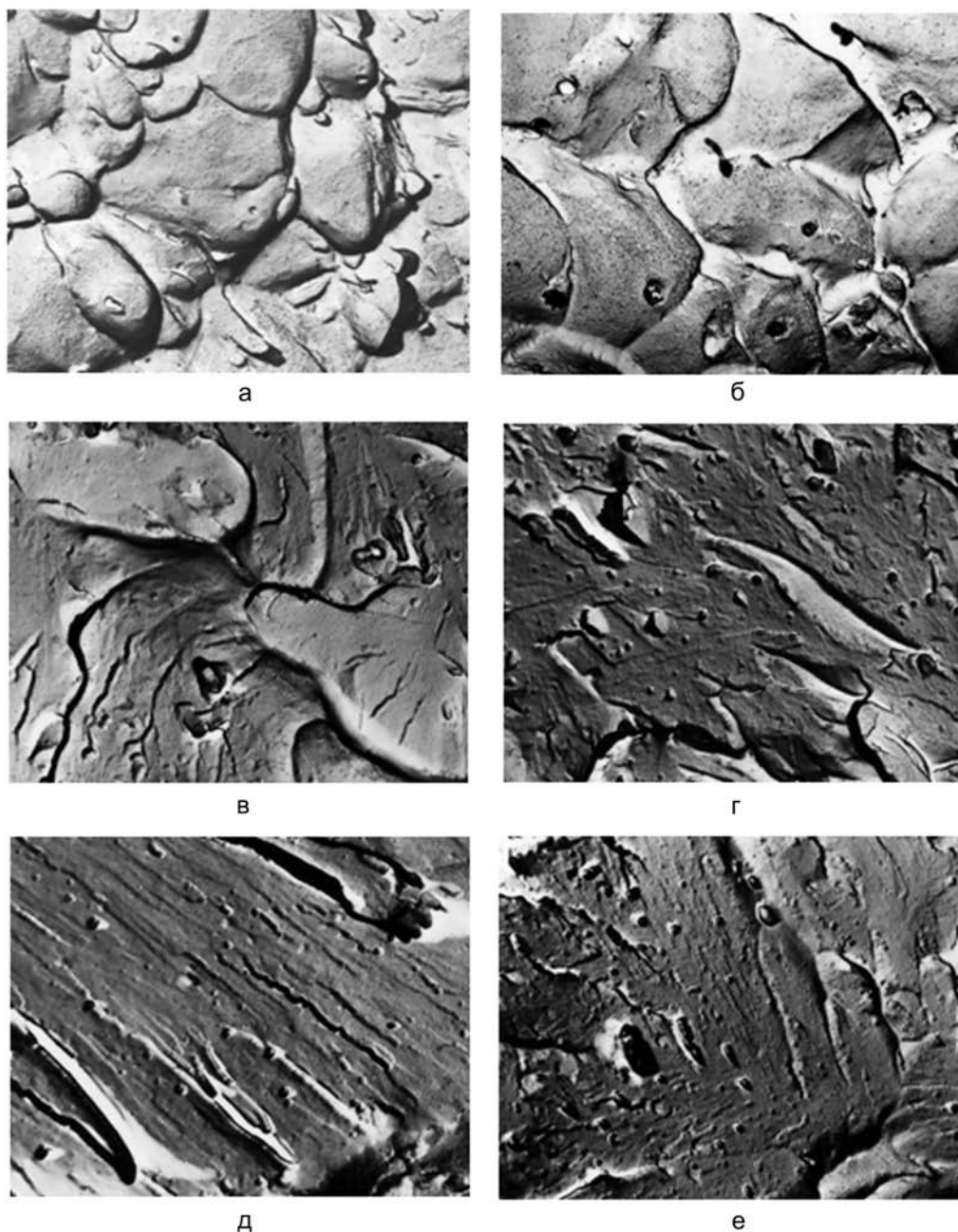


Рис. 2. Основні складові структури мікрорельєфу сталей. а, б – ямки; в, г – квазівідкол; д – річковий візерунок; е – міжзеренне руйнування. ПЕМ, х 6000.

Статистична оцінка гетерогенності мікрорельєфу зломів показала переважаючу кількість поверхонь руйнування ямкової будови, меншої кількості поверхонь квазівідколу і незначної частки поверхонь крихкого

руйнування для сталей після гартування і низького відпуску. В мікрорельєфі зломів псевдоцементованих сталей спостерігається зростання числа поверхонь квазівідколу за рахунок скорочення числа поверхонь ямкової будови (табл. 3). Збільшується також кількість поверхонь крихкого руйнування. Слід відзначити різке зменшення числа поверхонь ямкового руйнування при легуванні сталі компонентами Ti-V-Nb. Основною структурою зломів стає квазівідкол і елементи крихкого руйнування типу річкового рельєфу, терас, сходинок. Наявність в комплексі бору також сприяє зростанню поверхонь квазівідколу і крихкого мікрорельєфу. Неадитивність впливу легуючих елементів у розглянутих комплексах проявляється у зміні значень ударної в'язкості і в закономірному кількісному перерозподілі складових мікрозлому сталей.

Слід відзначити, що енергоємність процесу руйнування, яка визначається випробуваннями стандартних зразків на ударний згин (ГОСТ 9454-60, ГОСТ 9456-60), не завжди дозволяє запобігти крихкому руйнуванню виробів зі сталі при експлуатації їх у складнонапруженому стані, а також за наявності в них вихідних мікротріщин або таких, що утворюються внаслідок розвитку і накопичення явищ втоми металу, впливу мікронапружень, дефектів структури тощо.

З урахуванням цього доцільно при аналізі процесів руйнування окрім показника ударної в'язкості використовувати також характеристики її складових – роботи зародження (a_z) і поширення (a_n) тріщини. Для розділення значень ударної в'язкості і визначення її складових запропоновано кілька методів [5 – 7]. Наші дослідження проведені з використанням метода створення на поверхні зразка для ударних випробувань окрихченого цементациєю шару, у якому тріщина, що утворилась на початку випробування, виконує роль гострого надрізу [8], а також метод Б. А. Дроздовського і Я. Б. Фрідмана [6] з використанням в'язкості надрізу втомної тріщини.

Визначення a_z і a_n тріщини за першим методом здійснювали на зразках (10x10x55 мм) з цементованим шаром (1,0 – 1,1 мм) і без нього після гартування від 870 °C і відпуску при 200 °C протягом 1,5 год. Ударні зразки без зміцненого цементациєю шару після псевдоцементациї піддавали термічній обробці за аналогічним режимом. Випробування за методом Б. А. Дроздовського, Я. Б. Фрідмана проводили на зразках з наведеною втомною тріщиною 1 мм після вказаної термічної обробки.

Порівняння значень ударної в'язкості сталей на зразках з цементованим шаром і без нього показало, що наявність шару цементациї знижує величину ударної в'язкості, виконуючи роль гострого надрізу. Робота зародження тріщини (a_z) у цьому випадку дорівнює нулю і ударна в'язкість при цьому характеризує лише роботу поширення тріщини (a_n). Експериментально показано, що загальна величина ударної в'язкості досліджуваних сталей зумовлена у більшій мірі роботою зародження тріщини і процесами у її вершині – пластичною деформацією і утворенням поверхні розділу [8]. В наших дослідженнях a_z визначалась як різниця значень ударної в'язкості зразків із зміцненим цементациєю шаром і без

Структура, зношування, руйнування

нього, зразків з наведеною тріщиною і без неї. Рівень значень a_z і a_n , одержаних за двома вказаними методиками, практично не відрізняється.

Встановлено, що додаткове комплексне легування сталі 25ХГСТ дещо знижує роботу зародження тріщини, як і режим псевдоцементатії (табл. 4). Проте наведені значення ударної в'язкості, a_z і a_n при одержаних високих характеристиках механічних властивостей комплекснолегованих сталей забезпечують їх успішне використання при виготовленні важконавантажених цементованих виробів.

Таблиця 4

Робота зародження і поширення тріщини в сталях

Марка сталі	Гартування, відпуск		Псевдоцементатія, гартування, відпуск	
	a_z , МДж/м ²	a_n , МДж/м ²	a_z , МДж/м ²	a_n , МДж/м ²
25ХГСТ	0,62	0,27	0,56	0,19
25ХГСТФ	0,51	0,28	0,35	0,25
25ХГСТФБ	0,42	0,24	0,25	0,28
25ХГСТФМ	0,45	0,24	0,36	0,21
25ХГСТФР	0,3	0,26	0,22	0,26

Це підтверджується також проведеною оцінкою в'язкості руйнування сталей при статичному навантаженні за коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{1c} (рис. 3). Найбільш суттєве підвищення його значень спостерігається при легуванні сталі потрійними комплексами елементів Ti-V-Mo і Ti-V-W. Псевдоцементатія з наступним гартуванням і відпуском,

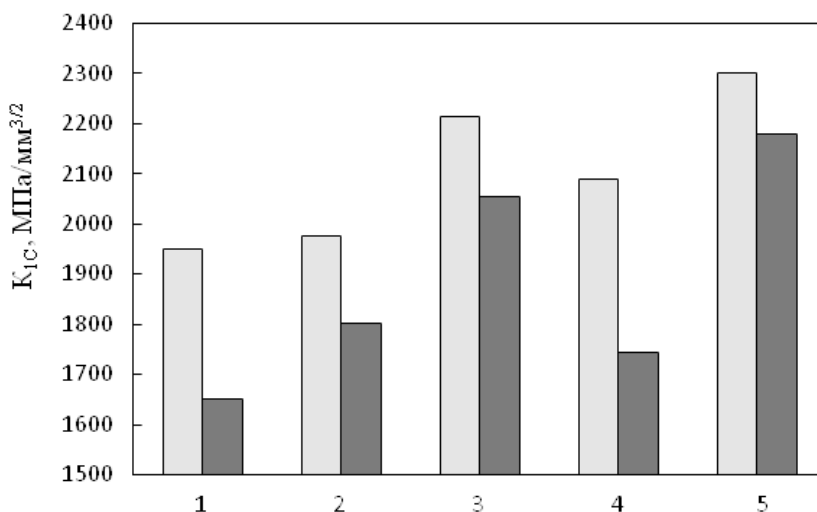


Рис. 3. Коефіцієнт інтенсивності напружень K_{1c} сталей залежно від режиму термічної обробки. □ – гартування, відпуск; ■ – псевдоцементатія, гартування, відпуск. 1 – 25ХГСТ, 2 – 25ХГСТФ, 3 – 25ХГСТФБ, 4 – 25ХГСТФМ, 5 – 25ХГСТФР.

Структура, зношування, руйнування

зумовлюючи збільшення розміру зерна і зниження показників міцності і пластичності, викликає відповідне зниження значень K_{1C} і зменшення в'язкої складової у мікрорельєфі поверхонь руйнування досліджуваних сталей.

Відомо, що поширенню тріщин у більшості випадків передує певна пластична деформація, яка супроводжується зміцненням металу. Ступінь зміцнення в зоні проходження магістральної тріщини може характеризувати здатність сталі до крихкого руйнування. У зв'язку з цим методом вимірювання мікротвердості ділянок поздовжнього шліфа ударного зразка біля краю зламу визначали наявність зони зміцнення та її протяжність. Встановлене підвищення мікротвердості поблизу злому (рис. 4) свідчить про суттєве зміцнення металу псевдоцементованих (9 – 20 %) і загартованих (13 – 23 %) сталей. Ступінь зміцнення і ширина зони пластичної деформації з характерним подрібненням вихідних зерен (рис. 5) пропорційні a_z сталей і можуть слугувати додатковою характеристикою при оцінці опору сталей крихкому руйнуванню.

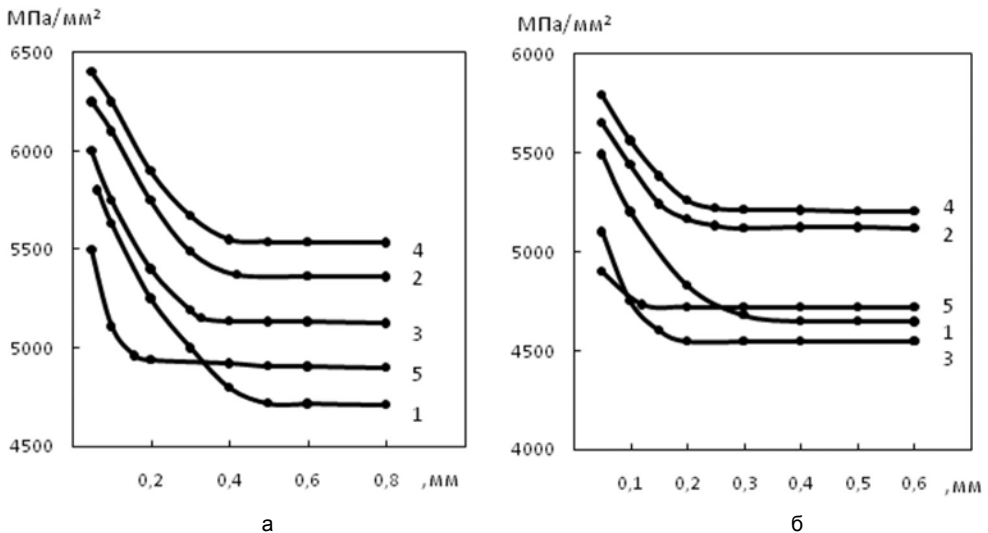


Рис. 4. Зміна мікротвердості ударних зразків сталей по мірі віддалення від поверхні руйнування. а – гартування, низький відпуск, б – псевдоцементация, гартування, низький відпуск; 1 – сталь 25ХГСТ, 2 – 25ХГСТФ, 3 – 25ХГСТФБ, 4 – 25ХГСТФМ, 5 – 25ХГСТФР.

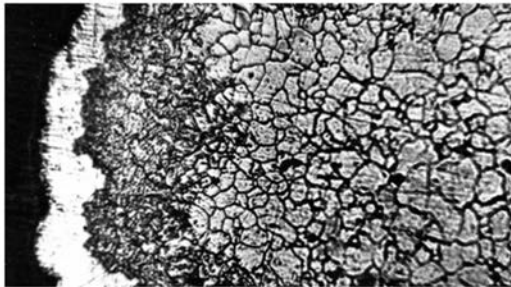


Рис. 5. Пластична деформація в зоні руйнування ударного зразка сталі 25ХГСТФ.

Важливою характеристикою конструкційних сталей є холодо-стійкість, що визначає здатність сталі опиратись крихкому руйнуванню за низьких температур. В наших дослідженнях аналіз кривих зміни значень ударної в'язкості при зниженні температури від +20 °С до -60 °С показав, що дискретність переходу сталей у крихий стан виражена не чітко. Тому за умовну температуру

Структура, зношування, руйнування

крихкості ($T_{крх}$) прийнято температуру, що відповідає зменшенню ударної в'язкості від вихідної (за температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) на 25%. Встановлено (рис. 6),

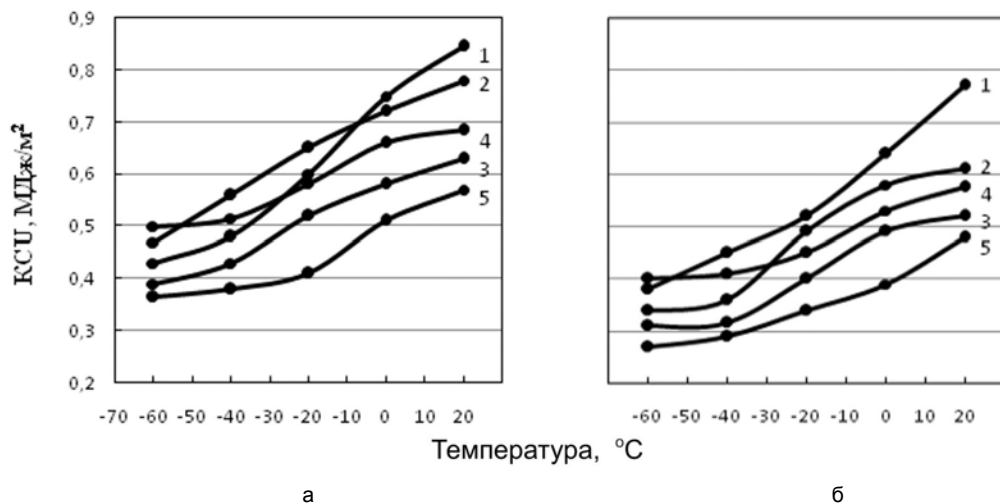


Рис. 6. Холодостійкість хромокремнієвомарганцевих сталей. а – гартування, низький відпуск; б – псевдоцементация, гартування, низький відпуск. 1 – сталь 25ХГСТ, 2 – 25ХГСТФ, 3 – 25ХГСТФБ, 4 – 25ХГСТФМ, 5 – 25ХГСТФР.

що досліджувані сталі при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ зберігають достатньо високий рівень значень ударної в'язкості $0,35 - 0,47\text{ МДж/м}^2$ (гартування, відпуск) і $0,27 - 0,40\text{ МДж/м}^2$ (псевдоцементация, гартування, відпуск). При легуванні комплексом Ti-V для обох режимів термічної обробки спостерігається зниження температури крихкості у середньому на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ порівняно зі сталлю 25ХГСТ. Легування комплексом Ti-V-Mo зумовлює зміщення цієї

Таблиця 5

Гетерогенність мікрозлому сталей при випробуванні за температури $T_{крх}$.

Сталь	Складові мікрозлому, %		
	Я	КВ	КР
25ХГСТ	<u>48</u>	<u>40</u>	<u>12</u>
	35	45	20
25ХГСТФ	<u>43</u>	<u>47</u>	<u>10</u>
	32	53	15
25ХГСТФБ	<u>36</u>	<u>54</u>	<u>10</u>
	21	61	18
25ХГСТФМ	<u>45</u>	<u>50</u>	<u>5</u>
	30	60	10
25ХГСТФР	<u>34</u>	<u>46</u>	<u>20</u>
	22	50	28

Примітка: над рискою – гартування, відпуск; під рискою – псевдоцементация, гартування, відпуск.

характеристики на 20 °С, комплексом Ti-V-Nb – на 10 і 15 °С, для псевдоцементованого і загартованого стану відповідно. Для сталі 25ХГСТФР зниження $T_{крх}$ менш помітне. Вірогідно, що вплив бору, як елемента, що знижує ударну в'язкість, у цьому випадку нівелює позитивний вплив на холодостійкість сталі титану і ванадію.

Статистична оцінка гетерогенності мікробудови зломів сталей в області температури крихкості показала, що мікрорельєф поверхонь руйнування характеризується суттєвим зменшенням числа поверхонь ямкової будови (порівняно з випробуванням при +20 °С) за рахунок розвитку поверхонь квазівідколу і крихкого руйнування (табл. 5), що свідчить про реалізацію менш енергомістких механізмів руйнування.

Таким чином встановлено позитивний вплив комплексного легування на механічні характеристики та здатність хромокремнієвомарганцевої сталі опиратись крихкому руйнуванню при динамічних та статичних навантаженнях, зокрема, при низьких температурах випробування. Встановлений закономірний зв'язок значень ударної в'язкості, легування, термічної обробки і співвідношення структурних складових мікрозлому відкриває перспективу використання безнікелевих сталей для великих важконавантажених цементованих виробів.

Література

1. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей. – М.: Машиностроение, 1975. – 216.
2. Козловский И.С. Химико-термическая обработка шестерен. – М.: Машиностроение, 1970. – 230.
3. Браун М.П. Комплексолегированные конструкционные стали. – Киев: Наукова думка, 1965. – 290 с.
4. Гольдштейн Я.Е. Низколегированные стали в машиностроении. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
5. Гуляев А.П. Разложение ударной вязкости на ее составляющие по данным испытания образцов с разным надрезом // Зав. лаб. – 1967. – № 4. – С. 473 – 476.
6. Дроздовский Б.А., Фридман Я.Б. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей. – М.: Металургиздат, 1960. – 260 с.
7. Раузин Я.Р., Великанов А.А. Современные методы оценки вязкости разрушения // МиТОМ. – 1970. – № 6. – С. 28 – 37.
8. Зеленова В.Д. Сопrotивление хрупкому разрушению сталей с поверхностно-упрочненным слоем // МиТОМ. – 1970. – № 6. – С. 49 – 51.

References

1. Sagaradze V.S. (1975) *Povyshenie nadezhnosti cementuemykh detalej* [Improving the reliability of carburized details]. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
2. Kozlovskij I.S. (1970) *Himiko-termicheskaja obrabotka shesteren* [Chemical heat treatment of gears]. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].

3. Braun M.P. (1965) *Kompleksnolegированные конструкционные стали* [Complex alloyed structural steels]. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
4. Goldshtejn Ja.E. (1963) *Nizkolegированные стали в машиностроении* [Low alloyed steel in mechanical engineering]. – Moskva: Mashgiz [in Russian].
5. Guljaev A.P. (1967) *Razložhenie udarnoj vjazkosti na ee sostavlajushhie po dannym ispytaniya obrazcov s raznym nadrezom* [Decomposition toughness into its components according to test samples with different notch]. *Zav. lab. – Head of laboratory*, 4, 473 – 476 [in Russian].
6. Drozdovskij B.A., Fridman Ja.B. (1960) *Vlijanie treshhin na mehanicheskie svojstva konstrukcionnyh stalej* [Effect of cracks on the mechanical properties of structural steels]. Moskva: Metalurgizdat [in Russian].
7. Rauzin Ja.R., Velikanov A.A. (1970) *Sovremennye metody ocenki vjazkosti razrushenija* [Modern methods of evaluation of fracture toughness]. *MiTOM*, 6, 28 – 37 [in Russian].
8. Zelenova V.D. (1970) *Soprotivlenie hrupkomu razrusheniju stalej s poverhnostno-uprochnennym sloem* [The resistance to brittle fracture of steels with surface-hardened layer]. *MiTOM*, 6, 49 – 51[in Russian].

Одержано 08.12.16

С. Е. Кондратюк, Ж. В. Пархомчук

Характеристики разрушения комплекснолегированных сталей для цементации

Резюме

Исследованы закономерности влияния легирования титаном и комплексами элементов Ti-V, Ti-V-Nb, Ti-V-Mo, Ti-V-B на механические свойства и характеристики разрушения хромокремниевомарганцевой стали. Установлено существенное повышение характеристик прочности стали при легировании тройными комплексами и обеспечения высоких показателей ударной вязкости и сопротивления хрупкому разрушению.

S. Ye. Kondratyuk, Z. V. Parkhomchuk

Characteristics of destruction of complex alloyed steels for cementation

Summary

The regularities of the influence of alloying with titanium and complex of elements Ti-V, Ti-V-Nb, Ti-V-Mo, Ti-V-B on the mechanical properties and fracture characteristics of Cr-Si-Mn steel. The significant increase of steel strength by alloying with ternary complexes and ensure high performance toughness and resistance to brittle fracture is established.