

УДК 539.43

**Канд. техн. наук В. О. Савченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук І. М. Андрейко<sup>2</sup>,  
В. В. Кулик<sup>2</sup>, д-р техн. наук О. П. Осташ<sup>2</sup>, д-р техн. наук І. П. Волчок<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

## ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ГРАФІТИЗОВАНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ

*Вивчено вплив вмісту вуглецю та кремнію у литих і термооброблених графітизованих сталях (ГС) на характеристики міцності, пластичності та циклічної тріщиностійкості. Показано залежність мікроструктури ГС від об'ємної частки структурних складових металевої основи. Встановлено, що із збільшенням міцності і зменшенням пластичності циклічна тріщиностійкість змінюється неоднорідно і є оптимальною при  $\sigma_B = 700$  МПа для ГС, що містить 0,81%С і 1,23% Si.*

**Ключові слова:** графітизовані сталі, графітові включення, міцність, втомне руйнування, циклічна тріщиностійкість.

### Вступ

Особливістю графітизованих сталей (ГС) є графітові включення в їх структурі, що надає їм, з одного боку, специфічні властивості чавуну: високу рідкотекучість і демпфуючу здатність, низьку чутливість до концентраторів напружень, хорошу оброблюваність різанням та ін., а з іншого, властивості, що притаманні вуглецевим і низьколегованим сталям: високі міцність, пластичність та ударну в'язкість.

Для більшості ГС, що використовуються у промисловості, вміст вуглецю є, доволі, високим 1,25...1,6%, що пов'язано зі зменшенням тривалості графітизаційного відпалу [1–6]. Відомо, що залежність між вмістом вуглецю і механічними властивостями є зворотно-пропорційна. Тому зниження вмісту вуглецю у ГС та виключення з технологічного процесу довготривалого графітизаційного відпалу підвищить конкурентоздатність їх серед конструкційних матеріалів. Останнє завдання для підвищеного вмісту вуглецю (1,6; 1,3...1,33 і 1,38...1,40%) вирішується шляхом легування ГС алюмінієм і міддю [1, 2] чи комплексно марганцем, хромом, нікелем і молібденом [3]. Для усунення довготривалого відпалу також застосовується модифікування розплаву у ковші феросиліцієм (ФС75) для ГС з вмістом вуглецю 1,6...1,8% і 1,45...1,65% [7–9], що формує включення графіту глобулярної і вермикулярної форм у перлітній і перлітно-феритній основах, відповідно і забезпечує таким ГС поєднання високої міцності (600 МПа) та циклічної в'язкості руйнування (58 МПа  $\sqrt{M}$ ).

Також показана можливість отримання ГС без проведення довготривалого графітизуючого відпалу для ГС з пониженим вмістом вуглецю (0,61,2 %) застосовуючи модифікування у ковші

феросиліцієм (ФС65) і алюмінієм (А99) [9]. Міцність таких ГС є на рівні 600860 МПа залежно від комбінації таких хімічних елементів як вуглець і кремній. Даних про циклічну в'язкість руйнування нелегованих ГС з низьким вмістом в них вуглецю і кремнію у літературі відсутні.

Мета роботи – пошук оптимального вмісту вуглецю (0,6...1,0%) за легування кремнієм (1,2 і 1,6%) для підвищення характеристик міцності та циклічної тріщиностійкості ГС.

### Матеріал і методика випробувань

Виплавляли ГС у 60-кілограмовій індукційній печі з основним футеруванням. Легування марганцем здійснювали присадкою в піч феромарганцю марки ФМн-78 (ДСТУ 3547-97). Модифікування проводили присадкуванням у ківш подрібнених феросиліцію ФС-65 (ДСТУ 4127-2002) та алюмінію марки А99 (ГОСТ 11069-74) перед заливанням рідкого металу. Лиття металу проводили у сухі піщано-глинисті ливарні форми. Отримували виливки товщиною 10 мм, їх хімічний склад наступний (мас. %): 0,61...1,04С; 1,19...1,59%Si; 0,32...0,37%Mn; 0,12...0,17%Al; 0,008...0,014%S і 0,016...0,025%P. Термічне оброблення зразків проводили в електричних печах опору з ніхромовими нагрівачами і автоматичним регулюванням температури. Контроль вмісту вуглецю та інших елементів здійснювали на іскровому спектрометрі «SPECTROLAB» з точністю  $\pm 0,0001$  мас.%. Сфероїдизує відпалювання на зернистий перліт проводили ступінчасто: нагрівання до 760 °С, витримування 2 години, охолодження до 680 °С, витримування 6 годин до повної сфероїдизації перліту з подальшим охолодженням у пічці.

Короткочасну міцність і пластичність визначали на п'ятикратних циліндричних зразках з діаметром 5 мм, а циклічну тріщиностійкість – на дискових компактних зразках з крайовою тріщиною (базовий розмір  $W = 40$  мм, товщина  $t = 10$  мм) за частоти 10...15 Гц і коефіцієнта асиметрії  $R = 0,05$  циклу навантаження у повітрі при 20 °С. Довжину втомної тріщини виміряли катетометром КМ-6 з 25-кратним збільшенням у момент, коли її вершина була в матриці. Залежності швидкості росту втомної тріщини  $V = da/dN$  від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $DK$  будували за відомою методикою [10], характеристиками циклічної тріщиностійкості (ЦТ) матеріалів вибрано величини  $\Delta K_{th} = \Delta K_{10^{-10}}$  – в низько-,  $\Delta K_{fc} = \Delta K_{10^{-5}}$  – у високо- та  $\Delta K^*$  і у середньоамплітудній ділянках діаграми – розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень за швидкості поширення тріщини, рівної  $10^{-10}$ ,  $10^{-5}$  та  $10^{-7}$  м/цикл і  $n$  – показник ступеня рівняння Періса відповідно. Структуру металевої основи визначали на травлених у 3–5% розчині азотної кислоти шліфах. Кількісний фазовий аналіз (об'єм графітової фази  $V_r$ ) ГС проводили з використанням програми ZAF4/FLS на енергодисперсійному мікроаналізаторі «LINK-860/500» точковим методом. Металографічний аналіз проводили на мікроскопах МИМ07, МИМ-8 та ЕРҮТІР 2 за збільшень 100...500 раз. Мікрофрактографічні дослідження втомних зламів зразків здійснювали на сканівному електронному мікроскопі «Сатебах».

### Результати досліджень та їх обговорення

Мікроструктурним аналізом встановлено, що внаслідок графітизуючої дії кремнію і алюмінію після оброблення алюмінієм і феросиліцієм ГС у литому стані утворюється графітна фаза (1%) уже за вмісту вуглецю 0,61% (табл. 1).

Структурно вільний цементит для досліджуваних ГС у кількості до 4% формується тільки у заевтектоїдних сталях (варіант 4). Зі зростанням вмісту вуглецю зменшується кількість включень

графіту на одиницю площі при тому, що його об'ємна частка залишається сталою (1%) (табл. 1, рис. 1), що дещо сприяє укрупненню графітових включень. Металева основа ГС є виключно перлітною за варіантами 2, 3, 4 та перлітно-феритною за варіантом 1, з формуванням пластинчастого перліту (табл. 1).

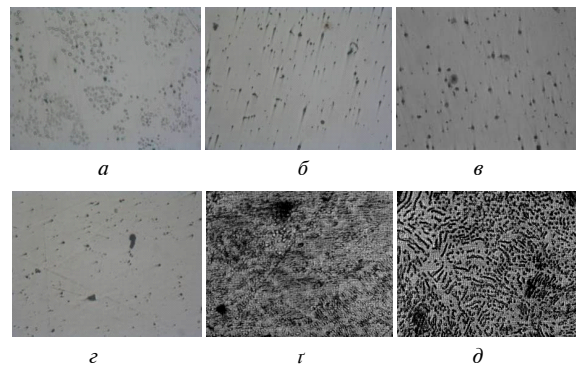


Рис. 1. Мікроструктура графітизованих сталей за варіантами 1 (а, r), 2 (б), 3 (в) і 4 (z, d) × 200: а, б, в і z – нетравлені шліфи

Після сфероїдизуючого відпалу отримуємо зернистий перліт (рис. 1 r, d). Результати металографічного аналізу показали достатньо повну трансформацію пластинчастого перліту. Такі мікроструктурні зміни відображаються на механічних характеристиках досліджуваних ГС (табл. 2).

Залежність між міцністю досліджуваних сталей і вмістом вуглецю є неоднозначною, має максимум у вершині за вмісту вуглецю 0,81% (рис. 2, a). Зростання вмісту кремнію з 1,23% до 1,59% за даного вмісту вуглецю незначно підвищує міцність ГС (3,6%).

Після сфероїдизуючого відпалу залежність між вмістом вуглецю і міцністю стає практично лінійною, але при цьому вона знижується на 14...16% за вмісту вуглецю 0,61 і 0,81% і практично не змінюється за вмісту вуглецю 1,04%. Пластичність досліджуваних ГС поводить себе обернено до міцності, зокрема у литому стані залежність між відносним видовженням і вмістом вуглецю є практично

Таблиця 1 – Вплив вмісту вуглецю і кремнію на структуру ГС

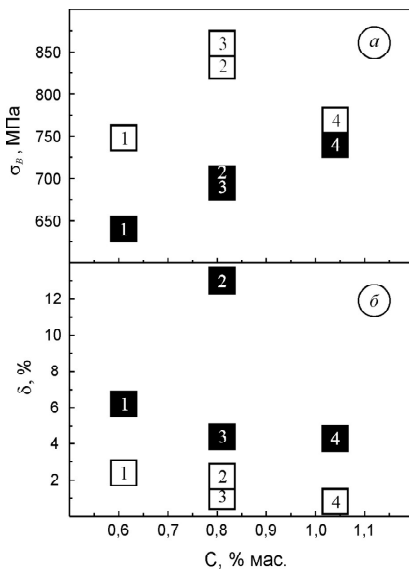
Варіант сталі	Вміст елементів, мас. %		Об'ємна частка структурних складових металевої основи, %				Параметри графітової фази	
	C	Si	ферит	перліт	цементит	графіт	$\lambda_r$	n, мм <sup>-1</sup>
1	0,61	1,19	14	85	н.в.	1	1,0	228
2	0,81	1,23	н.в.	99	н.в.	1	1,1	140
3		1,59	н.в.	99	н.в.	1	1,0	135
4	1,04	1,20	н.в.	95	4	1	1,1	110

Примітка: н.в. – не виявлено.

лінійна, тоді як після сфероїдизаційного відпалу має максимум за вмісту вуглецю 0,81% (варіант 2). При цьому суттєво, порівняно з литим станом зростає відносне видовження – у 5,9 рази (рис. 2, табл. 2). Підвищення вмісту кремнію до 1,59% (варіант 3), знижує відносне видовження практично утричі. Зростання відносного видовження після сфероїдизуючого відпалу проти литого стану за вмісту вуглецю 0,61 і 1,04% також значне – у 2,6 і 5,4 рази, відповідно. Такі суттєві зростання відносного видовження після проведення сфероїдизуючого відпалу пов'язані, у першу чергу, з низькими його значеннями у литому стані.

**Таблиця 2** – Механічні характеристики графітізованих сталей

Варіант сталі	Механічні властивості			
	у литому стані		після сфероїдизуючого відпалу	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	748	2,4	640	6,2
2	830	2,2	700	13
3	860	1,1	690	4,4
4	760	0,8	740	4,3

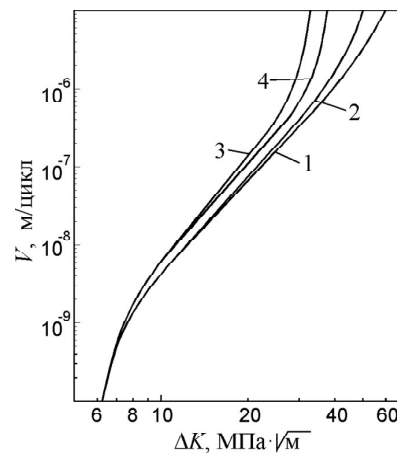


**Рис. 2.** Зміна границі міцності  $\sigma_B$  (а) та відносного видовження  $\delta$  (б) від вмісту вуглецю в досліджуваних графітізованих сталях (номери квадратів відповідають варіантам сталей у табл. 1–3) в литому стані (□) та після сфероїдизуючого відпалу (■)

Досліджувані ГС не є структурно чутливі за пороговою циклічною тріщиностійкістю ( $\Delta K_{th}$ ), що характерно для чавунів та графітізованих сталей [1–3, 11]. Значна структурна чутливість спостерігається у високоамплітудній ділянці (табл. 3 та рис. 3) свідченням чого є доволі широкий діапа-

зон значень критичної тріщиностійкості  $\Delta K_{fc}$  (32...60 МПа· $\sqrt{м}$ ).

Вищі значення циклічної в'язкості руйнування 58 і 60 МПа відповідають ГС з вмістом вуглецю 0,61 і 0,81% (варіанти 1, 2), відповідно. Легування 1,59% кремнієм ГС (варіант 3) негативно позначається на циклічній в'язкості руйнування, вона є найнижчою (32 МПа) серед досліджуваних ГС (рис. 3, табл. 3). Практично аналогічний результат отримуємо, коли за вмісту кремнію 1,20% підвищити вміст вуглецю до 1,04% (варіант 4), циклічна в'язкість руйнування таких ГС тоді становить 35 МПа. Проте цей рівень є доволі високим, зокрема сумірним зі значеннями  $\Delta K_{fc}$  для широкоживаних алюмінієвих сплавів [12].



**Рис. 3.** Діаграми швидкостей росту втомної макротріщини у відпалених графітізованих сталях (номери кривих відповідають варіантам сталей у табл. 1–3)

**Таблиця 3** – Характеристики циклічної тріщиностійкості відпалених графітізованих сталей

Варіант сталі	$\Delta K_{th}$ , МПа· $\sqrt{м}$	$\Delta K_{fc}$ , МПа· $\sqrt{м}$	$\Delta K^*$ , МПа· $\sqrt{м}$	$n$
1	6,2	60	21,8	3,91
2	6,2	50	21,0	4,06
3	6,2	32	18,6	4,61
4	6,2	35	19,8	4,14

Залежність циклічної в'язкості руйнування від міцності (діаграма конструкційної міцності) для досліджених сталей показує, що вони не поступаються ГС з підвищеним вмістом вуглецю після різного легування [1–3], а за варіантом 2 випереджає їх і є оптимальною – наближається до правого верхнього кута діаграми конструкційної міцності. Таким чином, створення ГС з низьким вмістом вуглецю (0,6...0,8%) окреслюють перспективи їх подальшої оптимізації (рис. 4).

Механізм втомного руйнування досліджуваних ГС доволі енергоємний, про що свідчать окремі області з втомними борозенками і значна кількість ділянок з деформаційними гребенями у зламах для низько- і на початку середньоамплітудних ділянок ( $\nu$ - $\Delta K$ ) кривих (рис. 5 а, б), що характерно для руйнування пластичних матеріалів [9].

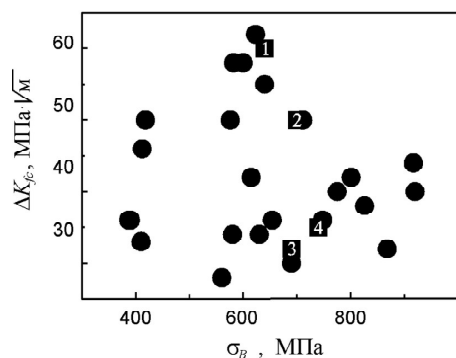


Рис. 4. Залежність циклічної в'язкості руйнування  $\Delta K_{fc}$  від міцності  $\sigma_B$  графітизованих сталей: ■ – досліджені ГС (номери сплавів відповідають варіантам сталей за табл. 3); ● – літературні дані [1–3]

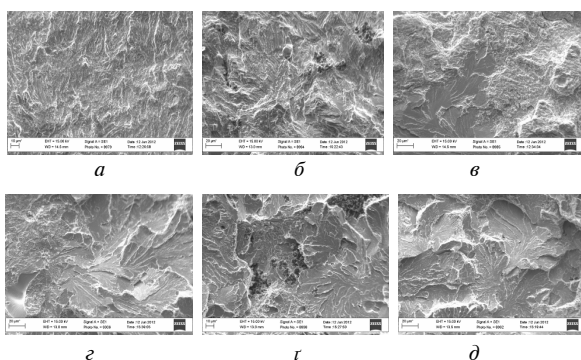


Рис. 5. Мікрофрактограми зразків графітизованих сталей за варіантами 1 (а, в), 2 (з), 3 (б, г), 4 (д): а, б –  $V = 10^{-8}$  м/цикл; в, з, г, д –  $V = 5 \cdot 10^{-7}$  м/цикл

У високоамплітудних ділянках ( $\nu$ - $\Delta K$ ) кривих досліджуваних ГС характер руйнування змінюється, з'являються ділянки відкольного череззеренного механізму росту втомної тріщини, проте для ГС з низьким вмістом вуглецю і кремнію (варіанти 1, 2) відкольні ділянки чергуються з ділянками з в'язким механізмом руйнування (рис. 5 в, з). За високого вмісту вуглецю і кремнію (варіанти 3, 4) на діаграмі конструкційної міцності появляється ділянка, де рівень критичної тріщиностійкості різко знижується (рис. 4). Мікрофрактографічний аналіз показує, що руйнування таких ГС супроводжується появою відкольного череззеренного механізму росту втомної тріщини по всій поверхні зламу (рис. 5 г, д). Проте, наявність деформаційних гребенів, які оконтурюють скольні фасетки, пояснює ще достатньо високу цикліч-

ну тріщиностійкість цих ГС. Цьому сприяє також вже відзначений раніше [13] енергоємний механізм руйнування графітової фаз, що проявляється для досліджуваних ГС з високим вмістом вуглецю і кремнію (варіанти 3, 4) (рис. 5 б, г). Видно, що деформаційні гребені часто локалізуються на границі між фазами металевої основи і графітових включень. За низького вмісту вуглецю графітові включення у зламах відсутні.

**Висновок**

Підсумовуючи, можна стверджувати, що за характеристиками міцності та циклічної в'язкості руйнування оптимальною є ГС з вмістом вуглецю 0,81% і кремнію 1,23% за варіантом 2. Потреба надійного використання ГС з високими показниками міцності (більше 700 МПа) вимагає подальших досліджень, спрямованих на підвищення їх циклічної тріщиностійкості.

**Список літератури**

1. Підвищення циклічної тріщиностійкості графітизованих сталей / [О. П. Осташ, І. М. Андрейко, І. П. Волчок та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 6. – С. 7–12.
2. Вплив міді на циклічну тріщиностійкість і термостійкість графітизованих сталей / [І. М. Андрейко, І. П. Волчок, О. П. Осташ та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 3. – С. 109–112.
3. Андрейко І. М. Вплив легування на міцність та циклічну тріщиностійкість графітизованих сталей / І. М. Андрейко, В. В. Кулик, О. П. Осташ // Машинознавство. – 2007. – № 9. – С. 44–47.
4. Коровина Г. В. Литая графитизированная сталь./ Коровина Г. В. – Свердловськ : Машгиз, 1959. – 39 с.
5. Акимов И. В. Повышение физико-механических свойств графитизированных сталей: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение». – Запорожье, 2004. – 26 с.
6. Яковлев А. Ю. Повышение термостойкости графитизированной стали для изложниц центробежного литья : автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение» / Яковлев А. Ю. – Запорожье, 2008. – 25 с.
7. Кимстач Г. М. О модифицировании низкокремнистых графитизируемых Fe-C-сплавов / Кимстач Г. М. // Литейное производство. – 1992. – № 8. – 5 с.
8. Влияние модифицирования ферросилицием, силикобарием и силикокальцием на структурообразование литой графитизированной стали / [В. Б. Бубликов, Д. С. Козак, Л. А. Зеленая и др.] // Процессы литья. – №4. – 2003. – С. 29–35.

9. Савченко В. О. Оптимізація хімічного складу та технології модифікування графітованих сталей з метою підвищення механічних та службових властивостей: автореф. дисер. на здобуття учен. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.16.01 «Металознавство та термічна обробка». – Запоріжжя, 2011. – 22 с.
10. Механика разрушения и прочность материалов : Справ. пос. : в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К. : Наук. думка, 1988–1990. – Т. 4 : Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / [О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др.] – 1990. – 680 с.
11. Структура та опір руйнуванню залізвуглецевих сплавів / [О. П. Осташ, І. П. Волчок, О. Б. Колотілкін та ін.] – Львів : Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2001. – 272 с.
12. Низкотемпературная циклическая трещиностойкость высокопрочных алюминиевых сплавов на стадиях зарождения и роста трещины / [О. П. Осташ, Е. М. Костык, В. Г. Кудряшов и др.] // Физ.- хим. механика материалов. – 1990. – № 3. – С. 40–49.
13. Андрейко І. М. Про механізм втомного руйнування чавунів і графітованих сталей / Андрейко І. М. // Физ.- хим. механика материалов. – 2003. – №1. – С. 111–112.

Поступила в редакцию 18.05.2015

**Савченко В.А., Андрейко И.М., Кулик В.В., Осташ О.П., Волчок И.П. Оптимизация химического состава графитизированных сталей для повышения свойств**

*Изучено влияние содержания углерода и кремния в литых и термообработанных графитизированных сталях (ГС) на характеристики прочности, пластичности и циклической трещиностойкости. Показано зависимость микроструктуры ГС от объемной части структурных составляющих металлической основы. Установлено, что с увеличением прочности и увеличением пластичности циклическая трещиностойкость изменяется неоднородно и имеет оптимум при  $s_B = 700$  МПа для ГС с содержанием 0,81%С и 1,23% Si.*

**Ключевые слова:** графитизированные стали, графитовые включения, прочность, усталостное разрушение, циклическая трещиностойкость.

**Savchenko V., Andreiko I., Kulyk V., Ostash O., Volchok I. Optimization of graphitized steels chemical composition for increasing of properties**

*The influence of carbon and silicon in cast and heat-treated graphitized steels (GS) on characteristics of strength, plasticity and fatigue crack growth resistance is studied. The dependence of GS microstructure on the volume part of structural compounds of metal matrix is estimated. It is established that with the increase of ultimate strength and the decrease of plasticity the fatigue crack growth resistance of GS changes heterogeneously and is optimum at  $s_{UTS} = 700$  MPa for GS containing 0.81 %C and 1.23%Si.*

**Key words:** graphitized steel, graphite inclusions, strength, fatigue, cyclic crack resistance.