

**ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА СТРУКТУРУ ТА  
ВЛАСТИВОСТІ ГРАФІТИЗОВАНИХ СТАЛЕЙ**

**І. П. Волчок, д. т. н., проф., В. О. Савченко, к. т. н.**

*Запорізький національний технічний університет*

Термічне оброблення здійснює зміну будови і властивостей металів і сплавів та є одним з найбільш поширених в сучасній техніці способів надання заданих властивостей металам і сплавам. Воно застосовується як проміжна операція для поліпшення оброблення тиском, різанням та ін., або як остаточна операція для надання металу або сплаву заданого комплексу фізичних, механічних і службових властивостей.

Для підвищення конкурентоспроможності графітизованих сталей по відношенню до інших машинобудівних матеріалів, зокрема, чавунів, бронзи, низьколегованих сталей, є перспективним створення технологій, що в процесі кристалізації виливків із заевтектоїдних сталей забезпечують формування графітних включень компактної форми і запобігання утворення структурно вільного цементиту. При такому ході кристалізації знижуються об'ємна усадка і схильність до тріщиноутворення, що дозволяє виготовляти з графітизованих сталей виливки складної конфігурації, включаючи корпусні. Відповідно зникає необхідність проведення енергоємного відпалювання для розкладання цементиту, що підвищує рентабельність виробництва. Змінення процесу кристалізації можливе в результаті графітизуючого модифікування та оптимізації хімічного складу сталей.

В роботі А.Я. Майструка [1] показано, що різноманітні види термічного оброблення призводять до суттєвого змінення напруженого стану графітизованих сплавів та їх дислокаційної структури, що, в свою чергу, призводить до перерозподілу цих дефектів в процесі наступного нагрівання та до утворення тривимірних дефектів (мікропор, несущільностей та ін.), які сприяють гетерогенному утворенню зародків графіту. За даними [2], зародження включень графіту прискорюється в тому разі, коли в кременистих сталях мають місце загартовочні мікродефекти, які полегшують виділення вільного графіту.

Для графітизації кременистих сталей рекомендується ступінчастий відпал [3]. Так, наприклад, для сталі ЭИ293 відпал полягає у витримці при 870°C протягом 4 годин, охолодження з пічю до 730°C протягом 14 годин, витримка при цій температурі 5 годин, охолодження з пічю до 660°C протягом 10 годин. Як видно, загальна тривалість такого термічного оброблення становить 33 години. Структура після відпалу – ферит + перліт + графіт. Гартування з подальшим відпуском сталі забезпечує високу твердість і міцність.

В даній роботі досліджувався вплив термічного оброблення та швидкості кристалізації (товщини стінки виливка) на структуру та властивості модифікованої феросиліцієм марки ФС-65 (ГОСТ 1415-93) та алюмінієм марки А 99 (ГОСТ 11069-74) графітизованої сталі з вмістом вуглецю 0,6...1,2% і кремнію 1,2% та 1,6%. За результатами наших досліджень модифіковані сталі уже в литому стані мали досить високий рівень механічних властивостей

( $\sigma_B=470\dots980$  МПа,  $\delta=1,1\dots8,5\%$ , НВ 269...340) та включення вільного графіту[4]. Причому форма та розміри графітових включень в залежності від вмісту вуглецю, кремнію та товщини стінки вилівка змінювалися від ШГ2 до ШГ10 за ГОСТ 3443-87 [5]. У зв'язку з тим, що досліджувані сталі за хімічним складом відрізняються від уже відомих, досліджували вплив таких видів термічного оброблення: сфероїдируючого відпалювання та гартування з високо- та низькотемпературним відпусканням.

Сфероїдируюче відпалювання на зернистий перліт зазвичай використовують для евтектоїдних та заевтектоїдних сталей, до яких відносяться і графітовані сталі, що розглядаються в роботі, для змінення пластинчастої форми перліту на глобулярну та підвищення їх пластичності, в'язкості, та зменшення твердості. [6]. Для отримання зернистого перліту проводили ступінчасте відпалювання з нагріванням до  $760^\circ\text{C}$ , витримкою 2 години при цій температурі та охолодженням до  $680^\circ\text{C}$  з витримкою 6 годин до повної сфероїдизації перліту і подальшим охолодженням в печі. Результати металографічного аналізу показали достатньо повну трансформацію пластинчастого перліту в глобулярний.

Графічні залежності впливу вуглецю та швидкості кристалізації на властивості графітованих сталей показують, що міцність підвищується зі збільшенням вмісту вуглецю до 0,8%, а потім починає поступово знижуватися. Ця залежність спостерігається для всіх значень товщини виливків дослідних сталей (рис. 1). Підвищення міцності зі зростанням вмісту вуглецю від 0,6 до 0,8% можна пояснити збільшеною кількістю перліту, а подальше зниження цього показника – збільшенням кількості графітових включень, які призводять до знеміцнення заевтектоїдних сталей.

Незалежно від вмісту вуглецю та кремнію мало місце підвищення міцності в середньому на 70 МПа зі зменшенням товщини стінки вилівка з 50 до 10 мм внаслідок збільшення швидкості кристалізації та подрібнення структурних складових. З підвищенням вмісту кремнію в сталях з 1,2 до 1,6% міцність зростала в середньому на 50 МПа (рис. 1).

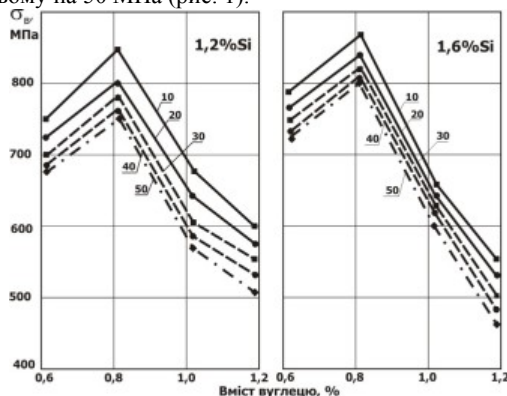
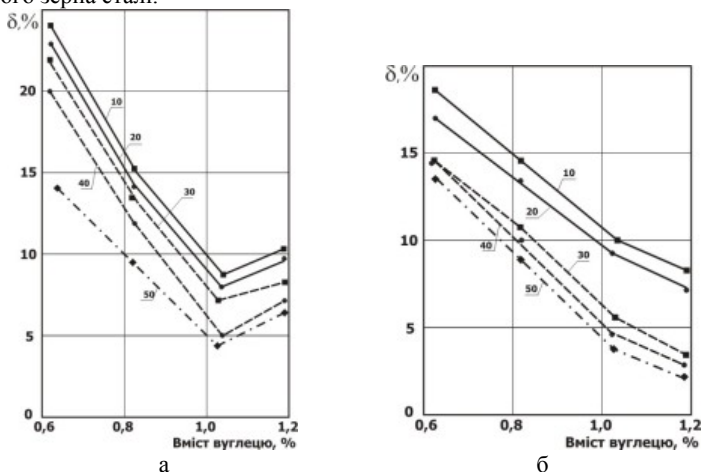


Рис. 1. Вплив вуглецю та товщини стінки вилівка на міцність сталі після сфероїдируючого відпалювання при вмісті кремнію 1,2% та 1,6%.

Пластичність графітованих сталей знижується з підвищенням як вмісту вуглецю, так і вмісту кремнію, що можна пояснити двома факторами: 1) зростанням кількості графітових включень, які є слабкою структурною складовою; 2) легуванням  $\alpha$ -твердого розчину кремнієм.

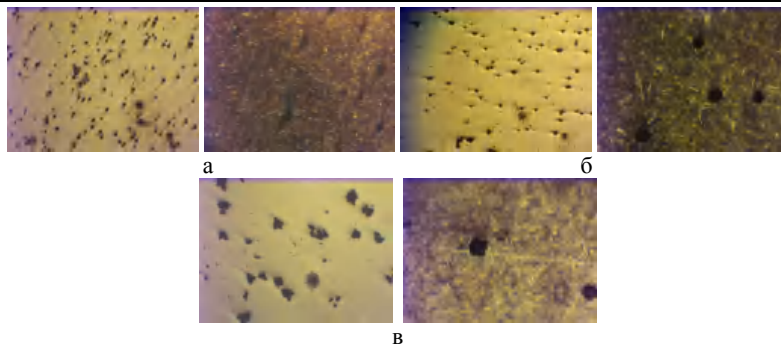
На рисунку 2а показано вплив вмісту вуглецю та товщини стінки виливка на відносне видовження графітованих сталей при вмісті кремнію близько 1,2%. Зниження пластичності зі зростанням вмісту вуглецю від 0,6 до 0,8% можна пояснити зростанням кількості перліту та зменшенням в структурі відсотку фериту; незначне підвищення зі зростанням вмісту вуглецю від 1,0 до 1,1% можна пояснити появою фериту у вигляді облямок навколо графітових включень внаслідок графітувальної дії вуглецю.

При вмісті кремнію близько 1,6% зі зростанням вмісту вуглецю мало місце поступове зниження пластичності (рис. 2 б), що пояснюється зростанням кількості перліту та формуванням графітових включень несприятливої, майже пластівчастої форми. Незалежно від вмісту кремнію при зміні товщини стінки виливка з 10 до 50 мм пластичність знижувалася внаслідок збільшення розміру дійсного зерна сталі.



**Рис. 2.** Вплив вуглецю та товщини стінки виливка на пластичність сталі після сфероїдируючого відпалювання при вмісті кремнію 1,2%(а) та 1,6% (б).

Для покращення структури та властивостей графітованих сталей використовували термічне оброблення, яке називається термічним поліпшенням, за режимом: нагрівання до температури 850°C, витримка при цій температурі 2,5 години – охолодження в масло, далі нагрівання до температури 670°C, витримка при цій температурі 2 години і охолодження в масло. Дослідження проводили на сталях з вмістом вуглецю 0,8%, 1,04%, 1,2%, вміст кремнію в яких змінювався від 1,2% до 1,6%. Дослідні зразки вирізалися з виливка товщиною 30 мм. На рис. 3 представлено структури сталей після термічного поліпшення, не травлені структури (x150), травлені 4% розчином азотної кислоти (x400).

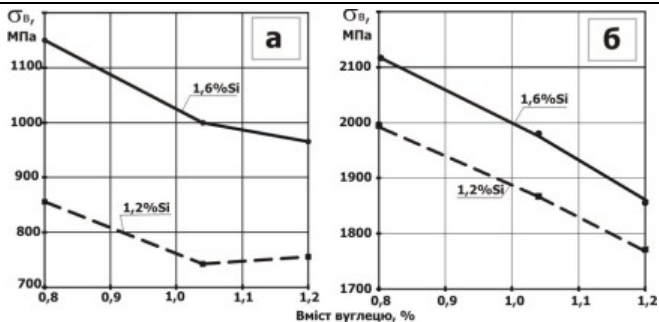


**Рис. 3.** Структура сталей після поліпшення: а - 0,81%С; 1,23%Si; б - 0,81%С; 1,59%Si; в - 1,04%С; 1,62%Si

Із наведених структур видно, що з підвищенням вмісту вуглецю збільшується кількість графітових включень. Кремній також сприяв графітизації та збільшенню розмірів графітових включень. Отже, було підтверджено літературні дані про те, що попереднє гартування прискорює процеси графітизації в сталях, за рахунок того, що після гартування в структурах графітизованих сталей утворюються мікротріщини та відбувається спотворення кристалічної ґратки. Після відпускання загартованої сталі мікротріщини швидко наповнюються вуглецем і таким чином утворюються численні включення вуглецю. Також стійкість цементиту змінюється під дією гартувальних напружень, які утворюються через різницю між коефіцієнтами термічного розширення фериту та цементиту, що також призводить до прискорення графітизації. Причому графітизація загартованої сталі прискорюється з підвищенням в ній вмісту кремнію, що видно зі структур (див. рис. 3), вплив кремнію на графітизацію пояснюється, головним чином, прискоренням росту графітових включень.

Аналіз впливу хімічного складу на міцність графітизованих сталей після такого режиму термічного оброблення (гартування + високотемпературне відпускання) показав, що зі збільшенням вмісту вуглецю міцність сталей зменшувалася як при вмісті кремнію 1,2% так і при 1,6%. При цьому максимальне значення міцності сягало 1150МПа при вмісті вуглецю 0,8% та вмісті кремнію близько 1,6%. При підвищенні вмісту вуглецю до 1,2% при постійному вмісті кремнію міцність знижувалася до 970МПа. Зі зменшенням вмісту кремнію з 1,6% до 1,2% міцність сталей зменшувалася приблизно на 25%. Найбільші значення міцності (1770...2110 МПа) мали сталі після гартування з низькотемпературним відпусканням (рис. 4).

Порівнюючи структури графітизованих сталей після гартування з високо- та низькотемпературним відпусканням можна зробити висновки, що ступінь графітизації збільшувалася після високотемпературного відпускання, у зв'язку з тим, що при нагріванні до температури 670°C відбуваються структурні перетворення, які призводять до виділення вільного графіту, а при низькотемпературному відпусканні змінюється лише вміст вуглецю в  $\alpha$ -розчині.



**Рис. 4.** Вплив вуглецю та кремнію на міцність сталі після гартування з високотемпературним (а) та низькотемпературним (б) відпусканням.

В цілому результати досліджень послужили основою для розробки та патентування економнолегованої графітізованої сталі марки 100СЛ, яка має хімічний склад: 0,8...1,2%С; 1,0...1,5%Si; 0,3...0,6% Mn; 0,10...0,15%Al [7].

Результати досліджень показали, що модифікована феросиліцієм і алюмінієм запропонована сталь 100СЛ має високий рівень механічних властивостей як в литому, так і в термообробленому стані, при чому значення цих показників перевищують рівень властивостей економнолегованих сталей (табл. 1).

*Таблиця 1*

*Вплив термічного оброблення на властивості графітізованих сталей*

Матеріал	Режим термічного оброблення	Механічні властивості		
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_2$ , %
150СДЛ	Графітізуюче відпалювання	308	545	8,6
150СД2Л	Графітізуюче відпалювання + сфероїдизуюче відпалювання	533	605	6,0
150СД2Л	Графітізуюче відпалювання + нормалізація + відпускання	525	723	4,0
150ХСНЛ	Графітізуюче відпалювання + сфероїдизуюче відпалювання	348	697	7,5
150ХСНЛ	Графітізуюче відпалювання + нормалізація + відпускання	607	881	2,8
130СДТЛ	Графітізуюче відпалювання	558	645	4,0
100СЛ	Сфероїдизуюче відпалювання	615	870	12
100СЛ	Гартування + високотемпературне відпускання	890	1150	5,2
100СЛ	Гартування + низькотемпературне відпускання	1750	2100	2,6

Як свідчать наведені в таблиці дані, запропонована сталь 100СЛ за рівнем механічних властивостей значно перевершує економнолеговані сталі 150СДЛ, 150СД2Л, 150ХСНЛ та 130СДТЛ, це пояснюється, в першу чергу, меншим

вмістом в ній вуглецю, а також сприятливою формою графітових включень завдяки комплексному модифікуванню феросилієм та алюмінієм.

### Використані джерела

1. Майструк А.Я. Исследование структурных превращений и свойств фаз графитизируемых сплавов: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение» / А.Я. Майструк. - Донецк. - 1969.- 17с.
2. Подвалюк М.А. Исследование кинетики структурообразования в литых и обработанных кремнистых сталях: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка» / М.А. Подвалюк. - Дн-ск. - 1971.- 20с.
3. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: [Справочник] / Под ред. Акад. Н.Т. Гудцова. - М.: Metallurgizdat, 1957. – 1204с.
4. Савченко В.А. Влияние углерода и кремния на свойства графитизированных сталей / В.А.Савченко, Беликов С.Б. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып.42, ч.1.– Дн-вск.: ПГАСА, 2007. – С.113-119.
5. Савченко В.О. Вплив модифікування на властивості графітізованих сталей / В.О.Савченко // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып.55. – Дн-ск, ПГАСА, 2010. – С. 118-122.
6. В.И. Большаков Металловедение и термическая обработка металлов / В.И. Большаков, С.И. Губенко. – Днепропетровск: ПГАСА, 2004. – 145 с.
7. Пат. №59302, Україна, МПК С22С 38/02. Графітізована сталь. /І.П.Волчок, О.А. Мітяєв, В.О.Савченко; заявник і патентовласник Запорізьк. нац.техн. ун-т. - № у 2010 12572; заявл. 25.10.2010; опубл. 10.05.2011. Бюл.№ 9. – 4 с.