

## СПОСОБИ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРЕН І ПІДВИЩЕННЯ МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи.** Вивчення способів подрібнення зерна і підвищення міцності конструкційних сталей 09Г2, 09Г2С в результаті модифікування нанодисперсними композиціями, термообробки та інтенсивної пластичної деформації. Збільшення основних механічних властивостей Si-Mn сталей: міцності, а саме межі текучості ( $\sigma_{0,2}$ ).

**Методи дослідження.** Були проведені металографічні дослідження зерен сталей до і після модифікування, а також механічні випробування стандартних зразків. Застосовані методи досліджень: металографічний і спектральний аналіз, вимірювання мікротвердості, механічні випробування, статистична обробка отриманих результатів.

**Отримані результати.** Обґрунтовано вибір складу модифікатора на основі відповідності кристалічних решіток низьковуглецевих сталей з гранецентрованою решіткою TiCN. Фракція модифікатора відповідала розміру вихідного зерна аустеніту. Запропоновано зміцнююча термічна обробка заготовок: гарт з варіюванням швидкості охолодження. Після охолодження структура сталей 09Г2 і 09Г2С складалася з фериту і троостита із середнім розміром зерна 8...10 мкм. У початковому стані розмір зерна становив 30 мкм. Проведено відпуск зразків при 500 і 600 °С. В результаті досягнуто підвищення мікротвердості з 3000 МПа до 4000 МПа сталей.

**Наукова новизна.** Дано обґрунтування вибору типу і фракції нанодисперсного модифікатора. Способом плазмохімічного синтезу отримані нанопорошки карбонітрида титану Ti(CN) фракції 50 ... 100 нм.

**Практическа цінність.** Розроблено технологію введення модифікатора в сталевий розплав. Отримано якісні модифіковані виливки з однорідною структурою. Проведена інтенсивна пластична деформація і термозміцнююча обробка сталей. Ефект модифікування підтверджений подрібненням зерна Si-Mn-сталей в 3 рази з підвищенням міцності властивостей.

**Ключові слова:** нанодисперсна композиція, модифікування, плазмохімічний синтез, структурні складові сталі, механічні властивості, кристалографічні параметри.

### Вступ

Значної ролі у забезпеченні надійної і довговічної роботи деталей машин і агрегатів відіграє конструкційна міцність матеріалів. Виготовлення нових зразків техніки в машинобудуванні і будівництві відкриває більш жорсткі вимоги до працездатності конструкції. Це обумовлює необхідність застосування матеріалів з високим комплексом фізико-механічних і технологічних властивостей. Для металевих матеріалів проблема зміцнення пов'язана з впровадженням нових, екологічних, а також удосконаленням наявних технологій виробництва металопрокату для промислового і громадянського будівництва [1, 2].

Одною з найважливіших вимог, пред'явлених до сталі для відповідальних метало-конструкцій, є рівень міцності, а саме висока межа текучості  $\sigma_{0,2}$ . Цей показник визначається структурними показниками: розміром зерна і структурних складових; наявністю зміцнюючих фаз, їх розподілом; видом міжфазних границь.

Для високоміцних конструкційних сталей проблема подрібнення зерна і підвищення міцності вирішується застосуванням високоєфективних технологій, розроб-

кою нових складів сталей і розробкою раціональної термомеханічної обробки. Тому робота, спрямована на вивчення процесів подрібнення зерна низьколегованих конструкційних сталей і підвищення міцності властивостей, є актуальною і представляє научний і практичний інтерес.

### Огляд стану проблеми

Кремній-марганцеві (Si-Mn) сталі застосовуються для відповідальних зварних конструкцій, зокрема важко навантажених: опір багатопролітних залізничних мостів, резервуарів для нафтопродуктів, а також для нафтових і газопровідних труб [2]. Поряд зі статичним навантаженням вони відчувають і динамічні навантаження.

Основними легувальними елементами в низьколегованих сталях з вмістом до 0,2 % С є марганець (Mn) (до 1,8 %) і кремній (Si) (до 1,2 %). Сталі типу 09Г2 і 09Г2С належать до сталей підвищеної міцності і відповідають класу міцності С345 при товщині прокату від 10 до 20 мм [1, 3].

Більш високому рівню міцності С355 і С375 відповідають складнолеговані сталі з вмістом ванадію або ніо-

бію. Однак межа між марками сталей різних рівнів міцності розмита, що впливає з вітчизняних (ГОСТ 27772-88) і зарубіжних (DIN 17102, ASTM370, ISO19011) стандартів і автоматизованого банку даних «Winsteel».

Сталі цього класу застосовуються для газогінних труб в умовах низьких температур. Перевагою Si-Mn є підвищена ударна в'язкість [4, 6]. Відзначається також тенденція до зниження вуглецевого еквівалента для поліпшення зварюваності труб. Однак використання сталей зі структурою фериту-перліту утруднено через необхідність отримання, з одного боку, високої міцності (вище класу X70), а з іншого – низького вуглецевого еквівалента. Тому розробка нових високоефективних способів впливу на сталеві розплави у вигляді наномодифікування є одним із способів вирішення проблеми підвищення якості та міцності властивостей низьколегованих сталей. У вітчизняній і зарубіжній літературі є відомості про модифікування сталей або легкоплавкими солями, або дефіцитними рідкоземельними лігатурами [4, 5]. Роботи по модифікації Si-Mn сталей нанодисперсними добавками в промислових масштабах відсутні.

Феррито-перлітні сталі незначно зміцнюються термічною обробкою. Як і підвищення характеристик міцності термічно незміцнені сталі можуть досягатися за рахунок зменшення розміру зерен, зміцнення границь зерен і формування субмікрокристалічної або наноструктури.

#### Постановка задачі

Мета роботи – вивчення способів подрібнення зерна і підвищення міцності конструкційних сталей 09Г2, 09Г2С в результаті модифікування нанодисперсними композиціями, термозміцнюючої обробки та інтенсивної пластичної деформації.

Завдання роботи:

- вивчити структуру і властивості низьколегованих сталей в початковому стані;
- обґрунтувати вибір типу і складу нанодисперсного модифікатора;
- розробити процес введення модифікатора в розплав;
- отримати якісні виливки;
- провести пластичну деформацію заготовок і термозміцнюючу обробку;
- порівняти зеренну структуру і властивості модифікованих сталей з вихідними.

**Таблиця 1** – Хімічний склад низьковуглецевих сталей до і після модифікування

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % мас.									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	Ti	N
09Г2 вихідна	0,12	0,40	0,90	0,30	0,30	0,30	<0,040	<0,035	–	<0,004
09Г2 модифікована	0,14	0,44	0,95	0,25	0,25	0,15	0,028	0,030	0,035	0,008
09Г2С вихідна	0,12	0,42	1,02	0,30	0,30	0,30	<0,040	<0,035	–	<0,004
09Г2С модифікована	0,15	0,42	1,05	0,30	0,30	0,30	0,039	0,032	0,040	0,009

#### Матеріали і методика дослідження

Матеріалом дослідження служили конструкційні низьковуглецеві сталі 09Г2, 09Г2С. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці 1.

В модифікованих сталях виявлено підвищений вміст вуглецю, титану та азоту, це підтверджує ефект обробки нанопорошків. Порошок модифікатора – карбонітриду титану Ti (CN) – отримували методом плазмохімічного синтезу з використанням плазми високочастотного розряду [5–7]. Сировиною служили порошки титану розміром ~ 200 мкм промислового виробництва.

Процес модифікування сталевих розплавів проводили при виплавці сталей 09Г2 і 09Г2С в індукційній печі ємністю 100 кг. Модифікатор, що складається з нанопорошків Ti (CN) і сталевого порошку, пресували у вигляді таблеток діаметром 15 мм, які погрузали на дно розливної ковша при перемішуванні розплаву. Після короточасної витримки модифікований розплав розливали в металеві форми для виготовлення зразків. Модифіковані заготовки піддавали інтенсивній пластичній деформації і термозміцнюючій обробці по режиму: температура нагріву 1050 °С, витримка 5 хв.; охолоджувальні середовища: вода і розчин солі у воді. Потім проводили відпуск при температурах 500 °С; 600 °С, час витримки – 60 хв.

Проводили металографічні дослідження зерен структури сталей до і після модифікування, а також механічні випробування стандартних зразків на універсальній машині TIRAtest 2300.

#### Результати експерименту та їх обговорення

Відомі різні способи отримання нанопорошків [6–8]:

- газофазний синтез;
- плазмохімічний синтез;
- термічний розклад;
- механічна дія;
- високотемпературний синтез.

В роботі проведено аналіз технології отримання нанопорошків газофазним і плазмо-хімічним синтезом, які засновані на подібних фізичних процесах. Інші способи мають менше поширення в техніці.

У цій роботі для отримання тугоплавких композицій карбонітрида титану обраний плазмохімічний синтез. Тільки у такий спосіб можна отримувати нанопорош-

ки такої ж форми і кристалографічних параметрів, відповідних заданому з'єднанню.

Дисперсність наночастинок визначає властивості нанодисперсної системи. Спосіб плазмохімічного синтезу заснований на високих швидкостях об'ємної конденсації газополум'яного потоку, що призводить до утворення нанодисперсних частинок карбонітрида титану фракції 50...100 нм [6].

Експеримент проведено з використанням частинок Ti (CN) з питомою поверхнею  $2,0 \cdot 10^5$  мІ/кг. При такій максимальній питомій поверхні частинки мають високу адсорбційну здатність, і зародження на їх поверхні кристалізуючої фази найімовірніше [8, 9].

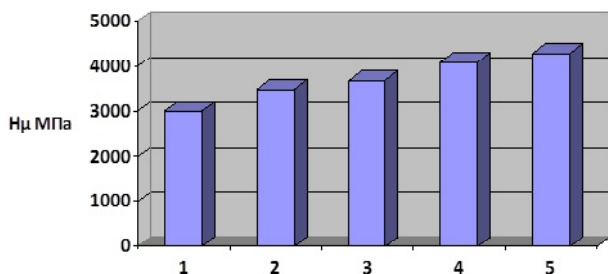
Роль нанодисперсних добавок зводиться до створення в розплаві додаткових штучних центрів кристалізації [8, 9]. Вони повинні бути відповідні з критичними радіусами зародків. За нашими розрахунками, для подібнення зерна первинного аустеніту в відливках розмір частинок які вводили повинен складати 40–50 нм.

Вихідні і модифіковані виливки сталей 09Г2 і 09Г2С піддавали пластичній деформації. У початковому стані литі сталі 09Г2 і 09Г2С мали ферритно-перлітну структуру з середнім розміром первинного зерна аустеніту 30 мкм, після модифікування і деформації розмір зерна склав 10 мкм.

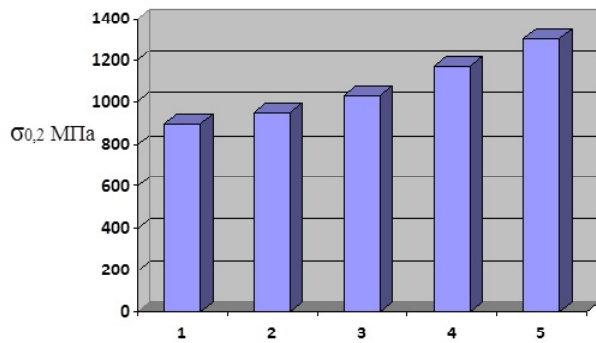
Після гартування та охолодження в воді структура змінилася незначно – ферритно-троостітна, із середнім розміром зерна  $\sim 8...10$  мкм.

Після охолодження загартованих зразків в розчині 20 % NaCl у воді отримана структура пакетного мартенситу. У початковому стані досліджувані сталі мають недостатньо високі значення властивостей: мікротвердість Нм до 3000 МПа, межа плинності  $\sigma_{0,2}$  до 850 МПа.

При загартуванні у воді зростає твердість, найбільш значне підвищення спостерігається при охолодженні зразків в розчині NaCl. Внаслідок значного зменшення мартенситних кристалів прискорене охолодження надає більший приріст твердості (рис. 1, 2).



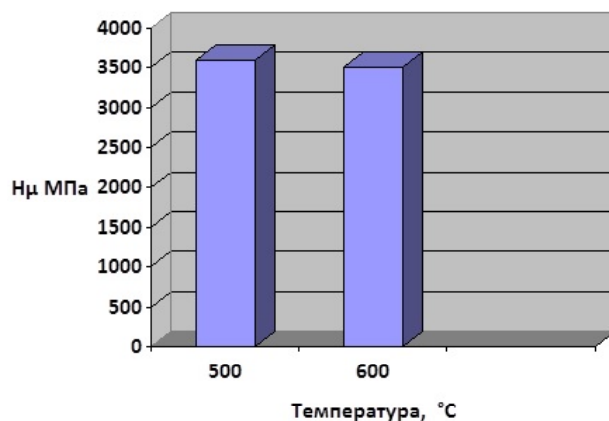
**Рис. 1.** Мікротвердість сталі 09Г2С після модифікування; пластичної деформації і охолодження з різними швидкостями: 1 – початковий стан, 2 – охолодження в воді; 3 – охолодження в розчині солі; 4 – модифіковані; 5 – пластична деформація



**Рис. 2.** Зміна межі текучості сталі 09Г2С після модифікування; пластичної деформації і охолодження з різними швидкостями: 1 – початковий стан, 2 – охолодження в воді; 3 – охолодження в розчині солі; 4 – наномодифікування; 5 – пластична деформація

Досліджували структуру зразків сталей після пластичної деформації та відпуску. У процесі пластичної деформації мартенситу низьковуглецевих сталей з мартенситу при кімнатній температурі може виділятися вуглець. Така структура є структурою деформаційного старіння мартенситу [19].

Відомо, що для більшості легованих сталей в інтервалі 450–600 °С починає виділятися вуглець з мартенситу і відбувається утворення спеціальних карбідів [5, 8]. Спеціальні карбіди сталі 09Г2С – це карбіди марганцю. Утворення спеціальних карбідів марганцю може відбуватися шляхом трансформації кристалічної ґратки цементита в кристалічну ґратку карбіду марганцю. Велика кількість дислокацій після пластичної деформації супроводжує це утворення. Значний приріст міцностних властивостей можна пояснити ефектом створення мікроструктурною і дисперсійним твердженням. Найбільш високий рівень мікротвердості спостерігається після відпуску сталі 09Г2С при температурі 500 °С (рис. 3).



**Рис. 3.** Вплив температур відпуску (500 °С, 600 °С) на мікротвердість модифікованої сталі 09Г2С

### Висновки

Вивчення зерен структури сталей 09Г2 і 09Г2С в початковому стані показало відмінність великого зерна

до 30 мкм, знижену мікротвердість до 3000 МПа і межу текучості до 850 МПа.

Проведено обґрунтування вибору типу і фракції нанодисперсного модифікатора. Способом плазмохімічного синтезу отримані нанопорошки карбонітрида титану Ti (CN) фракції 50...100 нм.

Розроблено технологію введення модифікатора в сталевий розплав. Отримано якісні модифіковані виливки з однорідною структурою. Проведена інтенсивна пластична деформація і термозміцнююча обробка сталей. Модифікована Si-Mn сталь мала розмір зерна в три рази дрібніше вихідної, підвищену мікротвердість (до 4000 МПа) і межу плинності (1250 МПа) порівняно з вихідною. Отже, для подрібнення зерна і підвищення міцності властивостей сталей запропоновані такі способи: наномодифікування, пластична деформація в поєднанні з термозміцнюючою обробкою.

#### Список літератури

1. Большаков В. И. Структурная теория упрочнения конструкционных сталей и других материалов / В. И. Большаков, Л. И. Тушинский. – Дн-ск : Свидлер, 2010. – 471 с.
2. Воробьева Г. А. Конструкционные стали и сплавы / Воробьева Г. А., Складнова Е. Е., Ерофеев В. К. – М. : НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 440 с.
3. Ioelovich M. Cellulose as a nanostructured polymer: a short review / Ioelovich M. – Bioresources. – 2008, 3 (4), P. 1403–1418.
4. Formation of niobium oxide film with duplex layers by / [Kim H.K., Yoo J.E., Park J. et al.] // Bull. Korean Chem. Soc. – 2012. – Vol. 33. – № 8. – P. 2675–2678.
5. Formation of self-organized niobium porous oxide on niobium / [Sieber I., Hildebrand H., Friedrich A., Schmuki P.] // Electrochemistry Communications. – 2005. – Vol. 7, № 1. – P. 97–100.
6. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів / Н. Є. Калініна, Г. М. Никифорчин, О. В. Калінін та ін. // Львів : Простір-М, 2017. – 304 с.
7. Влияние нанопорошковых инокуляторов на структуру и свойства литого металла высокопрочных сталей / Г. М. Григоренко, В. А. Костин, В. В. Головки и др. // Современная электрометаллургия. – 2015. – № 2. – С. 32–41.
8. Preparation of self-organized porous anodic niobium oxide microcones and their surface wettability / [Oikawa Y., Minami T., Mayama H., Tsujii K.] // Acta Materialia. – 2009. – Vol. 57. – P. 3941–3946.
9. Ou J.Z. temperature anodized Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : a photoanode material with exceptionally large photoconversion efficiencies / Ou J.Z., Rani R.A., Ham M.H. Elevated // Acsnano. – 2012. – Vol. 6, № 5. – P. 4045–4053.

Одержано 10.10.2018

#### Калинин А.В. Способы измельчения зерна и повышения прочностных свойств конструкционных сталей

**Цель работы.** Изучение способов измельчения зерна и повышения прочности конструкционных сталей 09Г2, 09Г2С в результате модифицирования нанодисперсными композициями, термообработки и интенсивной пластической деформации. Увеличение основных механических свойств Si-Mn сталей: прочностных характеристик, а именно предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ).

**Методы исследования.** Проводили металлографические исследования зерен сталей до и после модифицирования, а также механические испытания стандартных образцов. Применены методы исследований: металлографический и спектральный анализ, измерение микротвердости, механические испытания, статистическая обработка полученных результатов.

**Полученные результаты.** Обоснован выбор состава модификатора на основе соответствия кристаллических решеток низкоуглеродистых сталей с гранецентрированной решеткой TiCN. Фракция модификатора соответствовала размеру исходного зерна аустенита. Предложена упрочняющая термическая обработка заготовок: закалка с варьированием скорости охлаждения. После охлаждения структура сталей 09Г2 и 09Г2С состояла из феррита и троостита со средним размером зерна 8...10 мкм. В исходном состоянии размер зерна составлял 30 мкм. Проведен отпуск образцов при 500 и 600 °С. В результате достигнуто повышение микротвердости с 3000 МПа до 4000 МПа сталей.

**Научная новизна.** Проведено обоснование выбора типа и фракции нанодисперсного модификатора. Способом плазмохимического синтеза получены нанопорошки карбонитрида титана Ti (CN) фракции 50...100 нм.

**Практическая ценность.** Разработана технология введения модификатора в стальной расплав. Получены качественные модифицированные отливки с однородной структурой. Проведена интенсивная пластическая деформация и термоупрочняющая обработка сталей. Эффект модифицирования подтвержден измельчением зерна Si-Mn-сталей в 3 раза с повышением прочностных свойств.

**Ключевые слова:** нанодисперсная композиция, модифицирование, плазмохимический синтез, структурные составляющие стали, механические свойства, металлографические параметры.

#### Kalinin A. The methods of grain refinement and increasing of the mechanical properties of structural steels

**Purpose.** The study of methods for grinding grain and increasing the strength of structural steels 09Г2, 09Г2С as a result of modifying with nano-dispersed compositions, heat treatment and severe plastic deformation. The increase of the basic mechanical properties of Si-Mn steels: strength characteristics, namely the yield strength ( $\sigma_{0,2}$ ).

**Methodology.** Metallographic studies of steel grains before and after modification, as well as mechanical tests of standard samples were conducted. Research methods were applied: metallographic and spectral analysis, microhardness measurement, mechanical tests, statistical processing of the obtained results.

**Results.** The choice of the composition of the modifier is substantiated on the basis of the correspondence of the crystal lattices of low-carbon steels with a face-centered TiCN lattice. The modifier fraction corresponded to the size of the original austenite grain. Hardening heat treatment of blanks was proposed: quenching with varying cooling rates. After cooling, the structure of 09Г2 and 09Г2С steels consisted of ferrite and troostite with an average grain size of 8...10 microns. In the initial state, the grain size was 30 μm. Samples were dispensed at 500 and 600 °C. As a result, an increase in microhardness was achieved from 3000 MPa to 4000 MPa.

**Scientific novelty.** The substantiation of the choice of the type and fraction of the nano-dispersed modifier is carried out. Nanopowders of titanium carbonitride Ti(CN) of fraction 50...100 nm were obtained by the method of plasma-chemical synthesis.

**Practical value.** A technology has been developed to introduce a modifier into a steel melt. High-quality modified castings with a uniform structure were obtained. Intensive plastic deformation and heat treatment of steels was processed. The effect of modification is confirmed by grinding the grain of Si-Mn-steels 3 times with increasing strength properties.

**Key words:** nanodispersed composition, modification, plasma-chemical synthesis, structural components of steel, mechanical properties, crystallographic parameters.

---