

УДК 669.018

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280519.29.432

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ДИСПЕРСНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

КАЛІНІН О. В., канд. техн. наук, докторант

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 357-95-35, e-mail: kalinin.duep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3597-158X

Анотація. Постановка проблеми. Вивчення впливу модифікування дисперсними порошками чистих металів на механічні властивості низьколегованих сталей в литому і деформованому стані. **Методика.** Дисперсні порошки титану гранулометричного розміру менше 100 нм отримували на високочастотній установці методом плазмохімічного синтезу з промислових відходів. Об'єкт дослідження - низьколеговані кремній-марганцевисті сталі 09Г2, 09Г2С, що застосовуються в будівельних конструкціях. **Результати.** Проведено дослідно-промислові плавки низьколегованих сталей. Розроблено технологію модифікування, включаючи спосіб введення, термочасову обробку в розплаві. Встановлено склад і межі витрати модифікатора на основі дисперсних порошоків титану і алюмінію. Виливки піддавали гарячій пластичній деформації. Товстолистовий прокат піддавали нормалізації. Проведено порівняльне дослідження сталей у вихідному і модифікованому стані після лиття та деформації. Встановлено, що за оптимальної витрати модифікатора 0,2 %...0,3 % від маси розплаву модифіковані сталі мали більш високий комплекс механічних властивостей, ніж немодифіковані, як у литому, так і в деформованому стані. В результаті модифікування досягнуто підвищення межі міцності на 10...21 %, межі плинності на 20...33 %, відносного подовження на 13...25 %, відносного звуження на 29...31%, ударної в'язкості на 26...67 %. **Наукова новизна.** Запропоновано основний механізм підвищення механічних властивостей модифікованих Si–Mn сталей: зернограничного і дисперсного зміцнення. **Практична значимість.** Розроблено технологічну інструкцію з модифікування сталевих розплавів дисперсними композиціями в умовах промислового виробництва.

Ключові слова: низьколегована сталь; дисперсна композиція; модифікування; механічні властивості

ВЛИЯНИЕМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

КАЛИНИН А. В., канд. техн. наук, докторант

Кафедра материаловедения обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (068) 357-95-35, e-mail: kalinin.duep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3597-158X

Аннотация. Постановка проблемы. Изучение влияния модифицирования дисперсными порошками чистых металлов на механические свойства низколегированных сталей в литом и деформированном состоянии. **Методика.** Дисперсные порошки титана и алюминия гранулометрического размера менее 100 нм получали на высокочастотной установке методом плазмохимического синтеза из промышленных отходов. Объектом исследования служили низколегированные кремний-марганцевистые стали 09Г2 и 09Г2С, применяемые в строительных конструкциях. **Результаты.** Проведены опытно-промышленные плавки низколегированных сталей. Разработана технология модифицирования, включая способ ввода, термовременную обработку в расплаве. Установлены состав и пределы расхода модификатора на основе дисперсных порошков титана и алюминия. Отливки подвергали горячей пластической деформации. Толстолистовой прокат подвергали нормализации. Проведено сравнительное исследование сталей в исходном и модифицированном состоянии после литья, деформации и нормализации. Установлено, что при оптимальном расходе модификатора 0,2 %...0,3 % от массы расплава модифицированные стали имели более высокий комплекс механических свойств, чем немодифицированные, как в литом, так и в деформированном состоянии. В результате модифицирования достигнуто повышение предела прочности на 10...21 %, предела текучести на 20...33 %, относительного удлинения на 13...25 %, относительного сужения на 29...31 %, ударной вязкости на 26...67 %. **Научная новизна.** Предложен основной механизм повышения механических свойств модифицированных Si–Mn сталей: зернограничное и дисперсионное упрочнение. **Практическая значимость.** Разработана технологическая инструкция по модифицированию стальных расплавов дисперсными композициями в условиях промышленного производства.

Ключевые слова: низколегированная сталь; дисперсная композиция; модифицирование; механические свойства

EFFECT OF MODIFICATION WITH DISPERSE COMPOSITIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF LOW-ALLOY STRUCTURAL STEELS

KALININ O.V., *Cand. Sc. (Tech.)*

Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600 Ukraine, tel. +38 (068) 357-95-35, e-mail: kalinin.duep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3597-158X

Abstract. Problem statement. The study of the effect of modification pure metals with dispersed powders on the mechanical properties of low-alloy steels in cast and deformed state. **Methodology.** Dispersed powders of titanium and aluminum of granulometric size less than 200 nm were obtained at a high-frequency plant using plasma chemical synthesis from industrial waste. The object of the study was low-alloyed silicon – manganese steels 09G2 and 09G2S, used in building structures. **Results.** Pilot melting of low-alloy steels was carried out. Modification technology was developed, including the input method, temperature-time treatment in the melt. The composition and limits of the modifier consumption based on dispersed powders of titanium and aluminum were established. Castings were subjected to hot plastic deformation. Heavy plates were subjected to normalization. A comparative study of the steels in the original and modified state after casting, deformation and normalization was carried out. It was established that at the optimum modifier consumption of 0,2...0,3 % by weight of the melt, the modified steels had a higher complex of mechanical properties than the unmodified ones, both in the cast and in the deformed state. In forged bars, as a result of the modification, an increase in the ultimate strength by 10...21 %, a yield strength by 20...33 %, an elongation increase by 13...25 %, a relative narrowing by 29...31 %, and an impact strength by 26...67 % were achieved. **Scientific novelty.** A basic mechanism for improving the mechanical properties of modified Si–Mn steels: grain-boundary and dispersion hardening is proposed. **Practical relevance.** Technological instruction on the modification of steel melts with dispersed compositions in industrial production conditions was developed.

Keywords: low-alloy steel; dispersed composition; modification; mechanical properties

Вступ. Підвищення рівня механічних властивостей литих і деформованих низколегованих сталей з феритно-перлітною структурою може бути забезпечене методами легування та рафінування [1; 2]. Однак наразі ефективність такої обробки знизилася. З одного боку, вже відпрацьовано велику кількість раціональних варіантів хімічного складу кремніймарганцевистих сталей, а з іншого - в умовах масового виробництва техніко-економічно не завжди виправдане застосування методів рафінування і легування. Тому позапічна обробка сталі шляхом модифікування набуває актуальності завдяки економічності і технологічності процесу [3-6].

Si-Mn сталі, які застосовуються для металоконструкцій і трубопроводів відповідального призначення, відповідно до діючих стандартів (ГОСТ 19903-89) на товстий лист повинні мати такий рівень механічних властивостей: $\sigma_B = 510...650$ МПа; $\sigma_T = 365...490$ МПа; $\delta_5 = 21 ... 23$ %; $KCU = 64$ Дж / м². Ці вимоги відповідають підвищеному класу міцності

(СНіП 11-23-89) за межею текучості, тобто класам С345, С355, С375.

Мета - вивчення впливу модифікування дисперсними порошками чистих металів на механічні властивості низколегованих сталей в литому і деформованому стані.

Матеріали дослідження - низколеговані будівельні сталі 09Г2 та 09Г2. Зразки для вивчення механічних властивостей вирізані з виливків і заготовок із товстості прокату промислового виробництва.

Методика і результати. Запропоновано спосіб модифікування сталевих розплавів дисперсними композиціями. Розроблено склад дисперсного комплексного модифікатора: 20...30 % порошку титану + 70...80 % порошку алюмінію. Порошок розмірами до 200 нм отримували на установці плазмохімічного синтезу[3-4].

На підставі аналізу діаграм Fe–Ti і Fe–Al і встановлення малої розчинності титану (до 0,6 % ваг.) і алюмінію (до 0,8 % ваг.) в залізі, в роботі встановили межі витрати комплексного модифікатора: 0,20...0,35 % від маси розплаву (табл. 1).

Оптимальна витрата модифікатора становить 0,3 % від маси розплаву, тобто 2...3 кг на 1 т сталі. При цьому залишковий вміст титану в сталі становив у середньому 0,078 %, алюмінію - 0,063 %. Підвищення концентрації титану й алюмінію вище оптимальних спричинює утворення неоднорідної структури і появу окрихчувальних плівкових виділень нітридів титану по межах зерен, що викликає зниження ударної в'язкості.

Таблиця 1

Вміст титану й алюмінію в модифікованих сталях / The content of titanium and aluminum in modified steels

Склад модифікатора	Витрата модифікатора, % мас.	Титан, %		Алюміній, %	
		Введений	Залишковий	Введений	Залишковий
20...30 % Ti + 70...80 % Al	0,20	0,12	0,056	0,08	0,036
	0,30	0,18	0,078	0,12	0,063
	0,40	0,24	0,123	0,16	0,086
	0,55	0,30	0,156	0,20	0,108

Модифіковані сталі в литому стані порівняно з немодифікованими мали високий комплекс міцнісних властивостей без втрати пластичності. Досягнуто підвищення σ_B на 10...23 %; σ_T - на 20...35 %; δ - на 12...22 %; ψ - на 29...31 %; КСЧ збільшується найбільш різко - на 26...47 %.

Відомі основні напрямки зміни мікроструктури, що підвищують міцність сталі [5; 6].

У процесі модифікування низьколегованих сталей 09Г2, 09Г2С і 10Г2С1 і подальшої гарячої деформації мають місце такі види зміцнення: твердорозчинне зміцнення ($\Delta\sigma_{тв.р}$); зерен зміцнення ($\Delta\sigma_z$) в результаті подрібнення первинного зерна і зерна аустеніту за рахунок утворення нових центрів кристалізації на основі дисперсних частинок; зміцнення за рахунок збільшення кількості перліту ($\Delta\sigma_{п}$) внаслідок модифікувальних добавок; дисперсійне зміцнення ($\Delta\sigma_{д.з}$) структурних складових; деформаційне зміцнення ($\Delta\sigma_{д}$) в результаті підвищення щільності дислокацій.

Отож, спільну дію декількох механізмів зміцнення можна визначити, використовуючи принцип Е. Орована за такою формулою:

$$\sigma_m = \Delta\sigma_{тв.р} + \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_{п} + \Delta\sigma_{д.з} + \Delta\sigma_{д}$$

Таким чином, із зазначених механізмів зміцнення, що впливають на досліджувані сталі з різною мікроструктурою, можна виділити домінуючий механізм, зумовлений їх феритно-перлітною структурою, - це механізм зеренного і дисперсійного зміцнення, які проявляються значною мірою в сталях після модифікувальної обробки.

Результати механічних випробувань зразків досліджуваних сталей з вихідного і модифікованого товстолистового прокату наведені в таблиці 2.

Розглядом масиву даних механічних випробувань товстолистового прокату встановлено, що модифіковані сталі порівняно з немодифікованими після деформації мають більш високий комплекс міцнісних і пластичних властивостей: σ_B підвищена на 10...21 %; σ_T - на 20...33 %; δ - на 13...25 %; ψ - на 29...31 %; КСЧ - на 26...67 %.

Таблиця 2

Механічні властивості сталей 09Г2, 09Г2С і 10Г2С1 після модифікування і деформації / Mechanical properties of steels 09G2, 09G2C and 10G2C1 after modification and deformation

Марка сталі	Стан сталі	Механічні властивості				
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	КСЧ, Дж/см ²
09Г2	Вихідний	534	422	17,8	42,6	45
		515	429	17,3	43,8	43
		523	413	16,9	43,1	50
	середнє	524	421	17,3	43,2	46
	Модифікований	577	515	19,7	56,5	59
		584	507	19,3	57,3	60
		568	502	20,1	56,3	55
середнє	576	508	19,7	56,7	58	
09Г2С	Вихідний	618	436	16,6	30,0	32
		626	442	15,0	28,3	38
		602	425	16,8	30,8	26
	середнє	615	434	16,1	29,7	32
	Модифікований	640	546	17,8	30,2	46
		646	536	17,0	34,6	52
		632	541	18,2	36,7	52
середнє	639	541	17,6	33,8	51	
10Г2С1	Вихідний	645	468	15,0	31,8	37
		627	465	15,4	32,4	37
		633	476	14,8	32,9	43

Марка сталі	Стан сталі	Механічні властивості				
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ ₂ , Дж/см ²
	середнє	635	469	15,1	32,4	39
	Модифікований	675	550	18,7	41,7	66
		671	549	19,3	42,2	61
		661	558	19,1	42,5	68
	середнє	669	552	19,0	42,1	65

Висновки

1. Вивчено вплив комплексного модифікування титаном і алюмінієм на структуру і механічні властивості Si-Mn сталей в литому стані. Встановлено, що за оптимальної витрати модифікатора

0,2...0,3 % від маси розплаву модифікована сталь має високий комплекс механічних властивостей без втрати пластичності.

2. У процесі деформаційної обробки модифікованих сталей основними видами зміцнення постають зернограничне (на 30...40 %) і дисперсійне (на 20...25 %). Експериментальним шляхом визначено, що після деформації модифіковані сталі 09Г2 та 09Г2С мають більш високий комплекс механічних властивостей порівняно з вихідною сталлю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков В. И. Повышение долговечности ответственных деталей строительных машин : монография : / В. И. Большаков. – Харьков : Цифропринт, 2015. – 236 с.
2. Жербин М. М. Высопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование) : монография / М. М. Жербин. – Киев : Будівельник, 1974. – 170 с.
3. Большаков В. И. Особенности структурообразования модифицированных Si-Mn-сталей / В. И. Большаков, А. В. Калинин // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2016. – Вып. 89. – С. 24–29.
4. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов : монография / [В. П. Сабуров, А. Н. Черепанов и др.]. – Новосибирск : Наука, 1995. – 344с.
5. Григоренко Г. М. Влияние нанопорошковых инокуляторов на структуру и свойства литого металла высокопрочных низколегированных сталей / Г. М. Григоренко, В. А. Костин, В. В. Головкин, В. В. Жуков, Т. А. Зубер // Современная электрометаллургия. – 2015. – № 2. – С. 32–41.
6. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами : монография / [В. П. Сабуров, Е. Н. Еремин, А. Н. Черпанов, Г. Н. Мишеханов]. – Омск : ОмГТУ, 2002. – 257 с.
7. Наноматериалы и нанотехнология : получение, строение, применение : монография / [Н. Е. Калинина, В. Т. Калинин, З. В. Вилищук, А. В. Калинин]. – Днепр : Маковецкий Ю. В., 2012. – 190 с.
8. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов : монография / [Под. ред. акад. В. И. Трефилова]. – Киев : Наукова думка, 1987. – С. 246.
9. Barannikova S.. Plastic Deformation Lokalization of low Carbon Steel : Hydrogen Effekt / S. Barannikova, V. Ivanov, D. Kosinov et al. // Advanced Material Research. – 2014. – Vol. 1013. – Pp. 77–83.

REFERENCES

1. Glushakova D.B. and Bolshakov V.I. *Povyshenie dolgovechnosti otvetstvennykh detalej stroitelnykh mashin* [Increasing the durability of critical parts of construction machines]. Kharkiv : Cifroprint Publ., 2015, 236 p. (in Russian).
2. Zherbin M.M. *Vysoprochnye stroitelnye stali (kharakteristiki, oblast primeneniya, raschet i proektirovanie)* [High-strength building steels (characteristics, scope, calculation and design)]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1974, 170 p. (in Russian).
3. Bolshakov V.I. and Kalinin A.V. *Osobennosti strukturoobrazovaniya modifitsirovannykh si-mn- staley* [Features of the structure formation of modified Si-Mn-steels Construction]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Materials Science, Mechanical Engineering]. 2016, vol. 89, pp. 24–29. (in Russian).
4. Saburov V.P., Cherepanov A.N. and others. *Plazmoximicheskij sintez ultradispersnykh poroshkov i ix primenenie dlya modifitsirovaniya metallov i splavov* [Plasmochemical synthesis of ultrafine powders and their use for the modification of metals and alloys]. Novosibirsk : Nauka Publ., 1995, 344 p. (in Russian).
5. Grigorenko G.M., Kostin V.A., Golovko V.V., Zhukov V.V. and Zuber T.A. *Vliyanie nanoporoshkovykh inokulyatorov na strukturu i svoystva litogo metalla vysokoprochnykh nizkolegirvannykh staley* [Influence of nanopowder inoculators on the structure and properties of cast metal of high-strength low-alloy steels] *Sovremennaya elektrometallurgiya* [Modern Electrometallurgy]. 2015, no. 2, pp. 32–41. (in Russian).
6. Saburov V.P. Eremin E.N., Cherpanov A.N. and Mishexanov G.N. *Modifitsirovanie staley i splavov dispersnymi inokulyatorami* [Modification of steels and alloys with dispersed inoculators]. Omsk : OMGU, 2002, 257 p. (in Russian).

7. Kalinina N.E., Kalinin V.T., Vilishhuk Z.V. and Kalinin A.V. *Nanomaterialy i nanotexnologiya: poluchenie, stroenie, primeneniye* [Nanomaterials and nanotechnology: production, structure, application]. Dnipro : Makoveckij Yu.V., 2012, 190 p. (in Russian).
8. *Deformacionnoye uprochneniye i razrusheniye polikristallicheskix materialov* [Strain hardening and destruction of polycrystalline materials]. Edited by akad. Trefylova V.I., Kyiv : Naukova Dumka, 1987, 246 p. (in Russian).
9. Barannikova S., Ivanov V., Kosinov D. et al. Plastic Deformation Localization of low Carbon Steel : Hydrogen Effekt. *Advanced Material Research*, 2014, vol. 1013, pp. 77–83.

Надійшла до редакції: 01.03.2019 р.