

**А.И.Бабаченко, А.В.Кныш, А.А.Кононенко, Н.В.Пушкаренко,  
Е.А.Шпак**

## **ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОД УПРОЧНЯЮЩУЮ ТЕРМООБРАБОТКУ МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины*

Выполнены аналитические исследования влияния химических элементов на механические и технологические свойства сталей для железнодорожных колес. Обоснована система легирования сталей для производства железнодорожных колес с высоким комплексом свойств. Установлено, что для стали, содержащей 0,9% Cr и 0,41% Ni, оптимальной температурой нагрева под упрочняющую термическую обработку является 850<sup>0</sup>C, для стали состава 0,21% Cr и 0,70% Ni – температура 900<sup>0</sup>C.

**Ключевые слова:** железнодорожные колеса, микролегированная сталь, легирующие элементы, упрочняющая термическая обработка

**Состояние вопроса.** Уровень физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик железнодорожных колёс во многом зависит от химического состава стали [1]. В мировой практике были проведены различные исследования сталей для железнодорожных колес. Организациями и предприятиями стран СНГ выполнен большой объем работ по созданию низколегированных и микролегированных сталей, который позволил определить влияние отдельных легирующих элементов (Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V и др.) на структурное состояние и комплекс эксплуатационных свойств колёс.

Для легирования колёсной стали необходимо применять элементы, которые обеспечивают соответствующий комплекс механических свойств, а также необходимую деформируемость, обрабатываемость на металлорежущих станках, низкую флокеночувствительность и др. Эффективность легирования стали во многих случаях зависит от распределения легирующих элементов между твердым раствором и карбидной фазой.

При выборе химического состава стали для колёс обычно руководствуются следующими соображениями. Углерод наиболее важный и наиболее дешевый элемент в стали. Регулируя его содержание в стали, можно добиться разных свойств в готовых изделиях. При повышении содержания углерода увеличивается прочность металла, его износостойкость, которая очень важна для железнодорожных колёс. Повышается и контактная прочность.

Углерод является главным упрочняющим элементом. Упрочняющий эффект углерода состоит из упрочнения твердым раствором и упрочнения за счет дисперсионного твердения в результате выделения карбидов. С увеличением содержания углерода в стали ее прочность увеличивается, но пластичность снижается. Углерод имеет умеренную тенденцию к макросе-

грегации в ходе кристаллизации. Макросегрегация углерода обычно проявляется более значительно, чем у всех других легирующих элементов. Углерод имеет сильную тенденцию сегрегировать на дефектах в сталях, таких как границы зерен и дислокации. Карбидообразующие элементы могут взаимодействовать с углеродом и образовывать легированные карбиды [2].

Марганец присутствует практически во всех сталях в количестве от 0,30 % и более. Он имеет меньшую тенденцию к сегрегации, чем любой другой легирующий элемент. Марганец благоприятно влияет на деформируемость сталей. Он не образует в сталях своего карбида, а только легирует цементит. Марганец является  $\gamma$ -стабилизатором и расширяет аустенитную область диаграммы состояния. Большое содержание марганца (более 2%) приводит к возрастанию тенденции к растрескиванию и короблению при закалке.

Кремний является одним из основных раскислителей, которые применяют при выплавке сталей. Кремний полностью растворяется в феррите при содержании кремния до 0,30%. Он увеличивает прочность феррита, почти не снижая его пластичности. При содержании кремния выше 0,40 % в углеродистой стали общего назначения происходит некоторое снижение пластичности.

В комбинации с марганцем или молибденом кремний обеспечивает более высокую закалываемость стали. В термически упрочняемых сталях кремний является важным легирующим элементом, повышает их способность к термическому упрочнению и износостойкость, увеличивает предел упругости и предел текучести. Кремний не образует карбидов. Он растворяется в мартенсите и замедляет распад легированного мартенсита в процессе отпуска при температуре до 300<sup>o</sup>C [3].

Хром в сочетании с углеродом в стали имеет тенденцию к образованию карбидов. При низком отношении Cr/C образуется только цементит вида (Fe,Cr)<sub>3</sub>C. С увеличением отношения Cr/C в стали появляются сложные карбиды вида (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> или (Cr,Fe)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>. Хром повышает способность сталей к термическому упрочнению, их стойкость к коррозии и окислению, обеспечивает повышение прочности при повышенных температурах, а также повышает сопротивление абразивному износу высокоуглеродистых сталей. Карбиды хрома являются износостойкими. Сложные карбиды хрома растворяются и входят в твердый раствор аустенита очень медленно – поэтому при нагреве таких сталей под упрочняющую термообработку требуется более длительная выдержка при температуре нагрева. Добавление хрома в стали побуждает примеси, такие как фосфор, олово, сурьма и мышьяк сегрегировать к границам зерен, что может вызвать в сталях отпускную хрупкость.

Никель не образует в сталях карбидов. В сталях он является элементом, способствующим повышению устойчивости аустенита. Никель повышает упрочняемость сталей при термической обработке. В комбинации с хромом и молибденом никель еще больше повышает способность сталей

к термическому упрочнению, способствует повышению вязкости и усталостной прочности сталей. Растворяясь в феррите, никель повышает его вязкость.

Молибден может образовывать в сталях карбиды. Молибден способен обеспечивать упрочнение в ходе отпуска закаленных сталей за счет выделения дисперсных карбидов. Он повышает сопротивление низколегированных сталей ползучести при высоких температурах. Добавки молибдена способствуют измельчению зерна сталей, повышают упрочняемость сталей термической обработкой, увеличивают ее усталостную прочность.

Основные особенности влияния ванадия на свойства стали обусловлены процессами карбидообразования. Ванадий, являясь сильным карбидообразующим элементом, образует в стали карбид ванадия. Образование дисперсных карбидов ванадия вызывает дисперсионное твердение (упрочнение) сталей. Кроме того, легирование стали ванадием способствует получению мелкозернистой структуры, уменьшению склонности к перегреву и разупрочнению при отпуске, повышению износостойкости.

Ванадий является микролегирующим элементом. В стали с 0,4-0,7%С механические свойства после нормализации под влиянием ванадия зависят от температуры нагрева и, в общем случае, наблюдается тенденция к их росту, за исключением некоторого снижения пластических характеристик.

**Постановка задачи.** Сегодня цельнокатаные железнодорожные колёса во всех странах изготавливают из углеродистой стали обычного качества, химический состав которой приведен в табл. 1, однако, есть важные расхождения в требованиях к маркам в зависимости от назначения колёс и их термообработки.

В зависимости от условий эксплуатации подвижного состава за рубежом для изготовления колёс используется сталь с разным химическим составом. По американскому стандарту М-107/М-208 термически обработанные колёса изготавливаются из стали с разным содержанием углерода (от  $\leq 0,47\%$  до  $0,8\%$ ) и предназначены для работы при таких условиях:

класс А – высокие скорости, тяжелые условия торможения, незначительные нагрузки;

класс В – высокие скорости, тяжелые условия торможения и большие нагрузки;

класс С – легкие условия торможения и высокие нагрузки;

класс L – высокоскоростное движение с более тяжелыми условиями торможения, чем для других классов, и небольшой осевой нагрузкой;

класс D – легкие условия торможения и высокие нагрузки с повышенной стойкостью к износу.

На современном этапе развития железнодорожного транспорта актуально освоение производства железнодорожных колес, соответствующих требованиям М-107/М-208 к колесам класса D, которые превосходят по износостойкости, контактной усталости и ряду других требований колеса

класса С. Этой проблемой занимаются производители железнодорожных колес всего мира, в том числе США, СНГ, Бразилии и других стран.

Таблица 1. Требования к химическому составу стали и термической обработке колёс по стандарту М-107/М-208

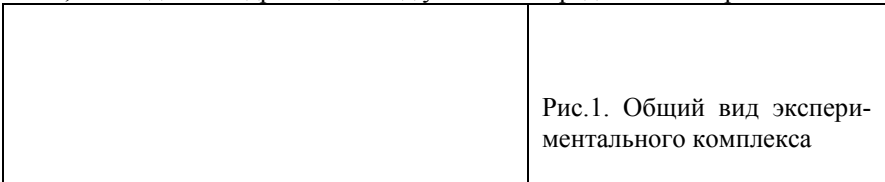
Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
				не более					
Класс L	<0,47	0,6-0,9	0,15-1,0	0,03	0,04	0,25	0,25	0,10	0,04
Класс А	0,47-0,57	0,6-0,9	0,15-1,0	0,03	0,04	0,25	0,25	0,10	0,04
Класс В	0,57-0,67	0,6-0,9	0,15-1,0	0,03	0,04	0,25	0,25	0,10	0,04
Класс С	0,67-0,77	0,6-0,9	0,15-1,0	0,03	0,04	0,25	0,25	0,10	0,04

При этом в соответствии с требованиями к химическому составу колеса класса D из легированной стали должны соответствовать всем требованиям по химическому составу для колес класса С по требованиям стандарта М-107/М-208 «Колеса из углеродистой стали». При этом допускается отклонение по содержанию никеля, хрома, молибдена и ванадия в случае выполнения следующего условия:

$$930 - [570 \times \%C] - [80 \times \%Mn] - [20 \times \%Si] - [50 \times \%Cr] - [30 \times \%Ni] - [20 \times \%Mo + \%V] > 390$$

Поэтому в качестве опытного варианта по химическому составу для колес класса D были разработаны три химических состава стали.

**Изложение материалов исследований.** Выплавку производили с помощью комплексной установки, которая состоит из плавильного агрегата ИТПЕ-0,01 закрытого типа и высокочастотного источника тока ВТГ-20-22, который имеет встроенную станцию автономного охлаждения. Эта установка позволяет выплавлять в лабораторных условиях опытные марки стали, в том числе специально легированные марганцем, кремнием, хромом, молибденом и др. Общий вид установки представлен на рис. 1.



По результатам аналитических исследований влияния химических элементов на механические свойства конструкционных сталей были разработаны три варианта опытных сталей – вариант 2, 3 и 4 (см.табл.2). Сталь варианта 1 являлась сравнительной (базовой), которая по химическому составу соответствует марке «С» по требованиям стандарта М-107/М-208.

Для оценки влияния температуры нагрева на конечную структуру стали опытных составов была проведена термическая обработка по режимам, представляющим собой охлаждение в воде от различных температур нагрева: 800, 850, 900, 950°C после выдержки в течение 10 мин. Данный

метод основан на том, что, начиная с некоторой температуры, происходит изменение морфологии структурных составляющих при нагреве и наблюдаются изменения в микроструктуре образцов после закалки от этой температуры. Это косвенно указывает на то, что при таких температурах нагрева и выше происходит рост аустенитных зерен и усиливается проявление неоднородности по химическому составу, что в свою очередь повышает устойчивость аустенита к распаду, а из-за ликвационных явлений проявляется структурная неоднородность по всему объему стали (см. рис.2-5).

Таблица 2. Химический состав опытных плавков, % масс

№ слитка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
1	0,69	0,36	0,82	0,28	0,14	0,21	0,055
2	0,70	0,57	0,80	0,90	0,15	0,41	0,110
3	0,68	0,52	0,72	0,21	0,10	0,70	0,110
4	0,71	0,55	0,83	0,89	0,09	0,11	0,100

В результате микроструктурного анализа было установлено, что для образцов из стали № 1 (сравнительная) и № 2 (0,9% Cr и 0,41% Ni) при температуре нагрева под закалку 900<sup>0</sup>C уже наблюдаются некоторые изменения в морфологии микроструктуры. Для образцов из стали №4, содержащей 0,89 % Cr и 0,11% Ni, при нагреве до 900<sup>0</sup>C и последующей закалке структурная неоднородность сильно выражена. Для образцов из стали №3, содержащей 0,21% Cr и 0,70% Ni, наблюдали формирование однородной дисперсной структуры и при закалке от 900<sup>0</sup>C.

#### Выводы:

1. По результатам аналитических исследований обоснована система легирования сталей для производства железнодорожных колес с высоким комплексом свойств, соответствующих требованиям к классу D по стандарту М-107/М -208.

2. Разработаны рекомендации по химическому составу опытных сталей, произведена выплавка слитков массой до 10 кг в лабораторных условиях.

**а** **б**  
**в** **г**

Рис.2. Микроструктура опытного слитка №1 после закалки от: а – 800 °C; б – 850 °C; в – 900 °C; г – 950 °C. ×100

**а** **б**  
**в** **г**

Рис.3. Микроструктура опытного слитка №2 после закалки от: а – 800<sup>0</sup>C; б – 850<sup>0</sup>C; в – 900<sup>0</sup>C; г – 950<sup>0</sup>C. ×100

**а** **б**

**В**
**Г**

Рис. 4. Микроструктура опытного слитка №3 после закалки от: а – 800<sup>0</sup>С; б – 850<sup>0</sup>С; в – 900<sup>0</sup>С; г – 950<sup>0</sup>С. ×100

**а**
**б**

**В**
**Г**

Рис.5. Микроструктура опытного слитка №4 после закалки от: а – 800<sup>0</sup>С; б – 850<sup>0</sup>С; в – 900<sup>0</sup>С; г – 950<sup>0</sup>С. ×100

3. Установлено, что оптимальной температурой нагрева под упрочняющую термическую обработку для стали состава №1, 2 и 4 является 850<sup>0</sup>С, для стали состава №3 температура нагрева составляет 900<sup>0</sup>С.

1. *Козловский А. И., Узлов И.Г.* Производство и качество железнодорожных колес // Металлургическая и горная промышленность. – 2001. – № 7. – С. 66-69.
2. *Металловедение и термическая обработка стали: Справ.изд.-3-е изд., перераб. и доп. в 3-х т.* Под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г. –М.: Металлургия, 1983. – 368 с.
3. *Гольдштейн М.И. Грачев С.В., Векслер Ю.Г.* Специальные стали. – Москва: Металлургия, 1985. – 408 с.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук, проф. Г.В. Левченко*

***О.І.Бабаченко, А.В.Книш, Г.А.Кононенко, М.В.Пушкаренко, О.А.Шпак***  
**Вибір температури нагріву під зміцнюючу термообробку мікролегованої сталі для залізничних коліс**

Виконано аналітичні дослідження впливу хімічних елементів на механічні та технологічні властивості сталей для залізничних коліс. В лабораторних умовах проведено виплавку злитків сталей дослідного складу. Виконано експеримент з визначення температури нагріву під зміцнюючу термообробку залізничних коліс із дослідних сталей методом гартування від різних температур. Встановлено оптимальні температури нагріву для дослідних сталей.

**Ключові слова:** залізничні колеса, мікролегована сталь, легуючі елементи, термічна обробка

***O.I.Babachenko, A.V.Knysh, G.A.Kononenko, M.V.Pushkarenko, O.A.Shpak***  
**Selecting the heating temperature during heat treatment strengthens micro alloyed steel railway wheels**

Analytical studies of chemical elements in the mechanical and technological properties of steel for railway wheels. In the laboratory conducted research smelting steel bars of experimental structure. Done experiment to determine the heating temperature during heat treatment strengthens railway wheels of experimental steels by quenching from different temperatures. Installed optimal heating temperature for steel research.

**Keywords:** railway wheels, microalloyed steel, alloying elements, strengthening heat treatment