



Высокопрочная термически упрочненная микролегированная конструкционная сталь для вагоностроения

Разработана новая термически упрочненная низкоуглеродистая сталь, микролегированная нитридо- и карбидообразующими элементами (титан, алюминий, азот) с высокими эксплуатационными характеристиками для вагоностроения. Ил. 2. Табл. 6. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: конструкционная сталь, высокопрочный прокат, микролегированные стали, термоупрочнение

A new heat-treated hardened low carbon steel, microalloyed with nitride and carbide-forming elements (titanium, aluminum, nitrogen) with high-performance characteristics for railway manufacturing is developed.

Keywords: constructional steel, high-resistance rolled products, microalloyed steels, thermal hardening

Украина, являющаяся крупным производителем широкого сортамента металлопродукции, к сожалению, имеет очень высокий показатель металлоемкости национального дохода – он более чем в два раза превышает показатели индустриально развитых стран. Так, удельная металлоемкость железнодорожного подвижного состава Украины выше зарубежного на 50 %, сельскохозяйственных машин и инвентаря к нему на 30 %, тракторов на 20 %, автомобильного транспорта на 30 %, строительно-дорожных машин в 2-3 раза. Вследствие этого расход топлива и энергии на единицу полезной работы в отечественной технике в 1,3-1,7 раза выше, чем в зарубежной.

Мировой опыт использования металлопродукции характеризуется устойчивой тенденцией роста доли применения высокопрочных сталей и, в частности, низколегированных с карбонитридным упрочнением чаще всего легированных азотом (0,015–0,030 %) и ванадием (0,07–0,15 %). При необходимости обеспечения высокого уровня прочности (как правило, $\sigma_T \geq 420$ МПа) в комплексе с достаточно высокой пластичностью ($d_5 \geq 21$ %) и ударной вязкостью $KCU^{-70} \geq 29$ Дж/см²) в их состав дополнительно вводят дорогостоящие и дефицитные элементы (Ni, Mo, Nb и т.д.).

С целью разработки экономичного высокопрочного проката предложены конструкционные стали комплексно микролегированные Ti, Al и N [1, 2], что принципиально меняет механизм формирования микроструктуры, т.к. карбонитриды титана образуются уже в процессе кристаллизации. Нитриды (карбонитриды) титана, являющиеся центрами кристаллизации, не растворяются при последующих нагревах

металла под прокатку и при термической обработке. Наличие этих термически устойчивых частиц при охлаждении от температур нагрева под нормализацию или закалку способствуют зарождению игольчатого феррита («интрагранулярного» бейнита) именно на их поверхности, т.е. в теле аустенитного зерна, а не на его границе. В результате обеспечивается очень мелкозернистая структура, и соответственно, сочетание высокой прочности и ударной вязкости.

Предложенная технология микролегирования низкоуглеродистой стали прошла успешное опробование на заводе «Днепроспецсталь» при производстве горячекатаного сортового проката.

Металлографический анализ показал, что горячекатаный прокат из стали СтЗсп с предложенным карбонитридным упрочнением имеет феррито-перлитную микроструктуру высокой степени дисперсности, соответствующую 10-11 баллу по ГОСТ 5636-87 для сечения проката 60x60 мм и 11-12 баллу - для сечения 40x40 и менее. Установлено, что комплекс механических свойств горячекатаного проката из стали СтЗсп с карбонитридным упрочнением в сечении до 40 мм (табл. 1) практически соответствует классу прочности 345 по ГОСТ 19281-89, который сегодня в производственных условиях обеспечивается только низколегированными сталями 09Г2С, 15ГФ, 15ХСНД. В части ударной вязкости горячекатаный прокат из рядовой углеродистой стали СтЗ с карбонитридным упрочнением значительно превосходит требования, предъявляемые к низколегированным сталям при температурах вплоть до 70 °С (табл. 1).

Исследование тонкой структуры на просвечивающем электронном микроскопе Jeol-2010FEG показало, что при относительно постоянной концентрации

Таблица 1. Механические свойства горячекатаной стали СтЗсп с карбонитридным упрочнением

Сечение проката, мм	Временное сопротивление разрыву, σ_B , Н/мм ²	Предел текучести, σ_T , Н/мм ²	Относительное удлинение, δ_5 , %	Ударная вязкость КСУ при температуре - 70 °С, Дж/см ²
27x27	465	355	40,5	92

40x40	460	350	40,3	85
-------	-----	-----	------	----

Таблица 2. Свойства стального проката в горячекатаном (г.к.) и термоупрочненном (т.у.) состояниях

Марка стали	Состояние проката	Вид дополнительной обработки	Класс прочности	Механические свойства			
				Предел текучести, σ_T , Н/мм ²	Временное сопротивление разрыву, σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение, δ_5 , %	КСУ, Дж/см ² (-40 °С)
				не менее			
10Г2С1	Г.К.		295	295	430	21	29
14Г2	Г.К.	-	325	325	450	21	39
17Г1С1	Г.К.	-	325	325	450	21	39
10Г2С1	Г.К.	Т.У.	390	390	510	19	44
14Г2	Г.К.	Т.У.	390	390	510	19	44
17Г1С1	Г.К.	Т.У.	375	375	510	20	39

азота и алюминия (0,018-0,020 и 0,028-0,029 %) снижение концентрации титана с 0,016 до 0,003 %, приводит к резкому увеличению общего числа частиц нитридов и карбонитридов с 187 до 519 на одно ферритное зерно. Это определило возможность управления размерами и количеством карбидных и нитридных фаз и, соответственно, процессом структурообразования.

Рентгеноспектральным анализом методом EDX установлено, что избыточные азотсодержащие фазы представлены карбонитридом титана Ti(C,N), нитридом алюминия AlN и комплексными соединениями указанных фаз, иногда содержащие дополнительно сульфиды MeS. Нитриды алюминия образуются при охлаждении уже закристаллизовавшегося металла, а также при его горячей деформации и имеют размеры от 40 до 200 нм (реже до 500 нм) при максимальном количестве частиц размером 60-100 нм.

Исходя из дороговизны легирующих элементов, следует по новому рассматривать вопрос использования горячекатаных даже экономнолегированных марок стали в таких высокометаллоемких отраслях как машиностроение, строительство, транспорт, горнодобывающая промышленность. Как показывает опыт, наиболее эффективное применение легирующих элементов для изготовления проката массового назначения технически и экономически оправдано в большинстве случаев при использовании этого материала в термически упрочненном состоянии. При этом более полно используются потенциальные возможности легирующих элементов - повышаются на 30-40 % прочностные свойства, существенно понижается температура хрупкого разрушения. Подтверждением

этому могут служить данные работы [3] (табл. 2).

С учетом этих положений были выполнены работы по созданию высокопрочного термически упрочненного проката из низкоуглеродистой стали СтЗсп комплексно микролегированной Ti, Al и N (табл. 3).

Выполненными к настоящему времени работами показано, что получение бейнитной структуры в стали позволяет существенно повысить её прочность без значительного снижения пластических свойств, присущего мартенситной структуре [4]. В то же время, снижение значений динамических характеристик, прежде всего ударной вязкости при пониженных температурах в ряде случаев весьма ощутимо для сталей с различным структурным состоянием. Это, очевидно, связано с выделением карбидов по границам реек α -фазы в случае получения структуры верхнего бейнита, а также сонаправленностью реек α -фазы в пакете нижнего бейнита. В случае распространения магистральной трещины вдоль пакета бейнита, структура слабо сопротивляется развитию магистральной трещины. В термически упрочненной стали, микролегированной N, Ti и Al образуется структура «интрагранулярного» игольчатого феррита, характеризующаяся высокой степенью разориентировки бейнитных реек, в результате чего распространение в ней магистральной трещины в практически любом направлении будет затруднено. Этим и объясняется повышение ударной вязкости сталей со структурой «интрагранулярного» игольчатого феррита по сравнению с аналогичными сталями со структурой бейнита или отпущенного мартенсита.

С целью оптимизации процессов термического упрочнения разрабатываемой стали проведены ис-

следования влияния температуры отпуска на свойства закаленной стали (табл. 4).

Наиболее существенные изменения комплекса служебных характеристик начинаются при температурах отпуска выше 550 °С. При этом, с повышением температуры отпуска происходит закономерное снижение прочностных характеристик (предела текучести σ_T и временного сопротивления разрушению s_B) с одновременным повышением пластических характеристик (относительное удлинение δ_5) и ударной вязкости при отрицательных температурах (КСУ⁻⁶⁰).

Очевидно, что дополнительное применение отдельной операции отпуска при различных температурах термически упрочненной модифицированной стали СтЗсп позволяет получать широкий спектр высокопрочных материалов с удовлетворительными показателями пластичности и ударной вязкости. На этой основе была определена оптимальная температура отпуска термически упрочненной микролегированной стали (600 °С), которая полностью обеспечивает комплекс свойств проката соответствующий перспективным требованиям РЖД и Укрзалізниц применительно к металлопродукции для железнодорожного транспорта.

Таблица 3. Свойства сталей для вагоностроения

Марки стали	Предел текучести, σ_T , Н/мм ²	Относительное удлинение, δ_5 , %	КСУ, Дж/см ²	
			-40 °С	-70 °С
	не менее			
09Г2Д	295	21,0	29,0	-
10ХСНД	390	18,0	34,0	29,0
Новая термически упрочненная сталь СтЗсп с карбонитридным упрочнением	550	21,0	-	35,0

Таблица 4. Механические свойства термически упрочненной микролегированной стали в отпущенном состоянии

Температура отпуска, °С	Предел текучести, σ_T , Н/мм ²	Временное сопротивление разрыву, s_B , Н/мм ²	Относительное удлинение, δ_5 , %	Ударная вязкость, КСУ, при температуре -60 °С, Дж/см ²
450	629	777	18,0	35
550	567	707	20,5	53
600	558	705	23,8	93
650	472	625	24,1	112

Исследования усталостной прочности – важнейшей характеристики для металлоконструкций, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, показали, что новая микролегированная сталь в термически упрочненном состоянии существенно превышает по этому показателю используемый в настоящее время металлопрокат для вагоностроения (рис. 1).

Таблица 5. Ударная вязкость термически упрочненного проката после механического старения

Номер образца	Состояние образцов	Ударная вязкость, Дж/см ²	Средняя ударная вязкость, Дж/см ²
1-1	исходное закаленное без отпуска	108,13	105,48
1-2		102,82	
2-1	отпуск 550 °С	108,71	114,04
2-2		119,37	
3-1	отпуск 600 °С	173,00	181,95
3-2		190,91	
4-1	отпуск 650 °С	199,08	213,16
4-2		227,25	

Исследования усталостной прочности – важнейшей характеристики для металлоконструкций, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, показали, что новая микролегированная сталь в термически упрочненном состоянии существенно превышает по этому показателю используемый в настоящее время металлопрокат для вагоностроения (рис. 1).

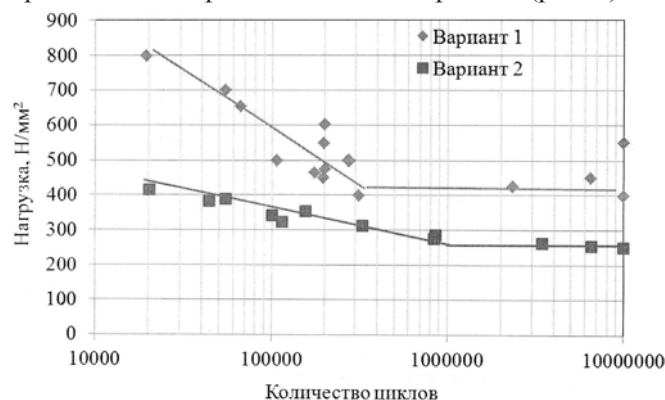


Рис. 1. Кривые усталости проката для вагоностроения: вариант 1 – новая микролегированная термически упрочненная сталь со структурой игольчатого феррита; вариант 2 – традиционно применяемая сталь с феррито-перлитной структурой

На основании вышеприведенных данных можно сделать вывод, что термическое упрочнение малоуглеродистой стали СтЗсп с комплексным карбонитридным упрочнением, формируя преимущественно бейнитные структуры с повышенной степенью разориентировки реек, обеспечивает возможность получения высокопрочного проката с пределом текучести 550-630 Н/мм², гарантией ударной вязкости при температуре минус 60 °С и высокими показателями сопротивления усталостному разрушению ($\sigma_{-1} = 400$ Н/мм²), а также необходимый уровень других эксплуатационных характеристик.

Испытания проката из стали СтЗсп, микролегированной азотом и нитридообразующими элементами с последующим термическим упрочнением, на склонность к механическому старению проводились в соответствии с ГОСТ 7268-82 «Сталь. Методы определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб». Исследованию подвергался прокат в четырех термически обработан-

ных состояниях: в закаленном без отпуска, в закаленном и отпущенном при температурах 550, 600, 650 °С. Результаты представлены в табл. 5 и они значительно выше требований ГОСТ 19281 (≥ 29 Дж/см²).

Испытания новой стали на стойкость к атмосферной коррозии в сравнении со сталью, массово применяемой в настоящее время в вагоностроении, проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 9.908-85 «Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости». Образцы для испытания были изготовлены из горячекатаного проката из стали 09Г2Д и из термически обработанного опытного проката. Оценка коррозионной стойкости образцов определяли по потере массы на единицу площади поверхности.

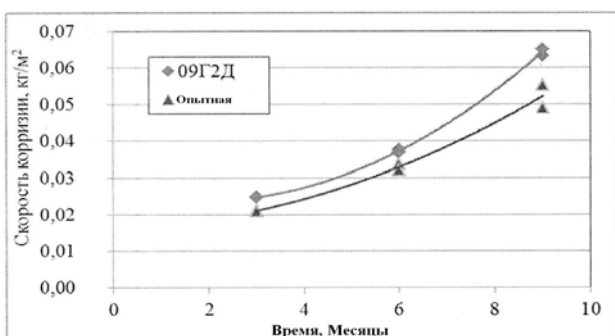


Рис. 2. Коррозионная стойкость опытной стали и стали 09Г2Д

Таблица 6. Механические свойства металлопроката основных несущих ограждающих элементов кузовов грузовых вагонов нового поколения по Техническому заданию Укрзалізниці 2010 г.

Предел текучести σ_r , Н/мм ² , не менее	500
Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ² , не менее	600
Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	18,0
Ударная вязкость, КСУ при температуре минус 60 °С, Дж/см ² , не менее	29,0
Ударная вязкость, КСУ после механического старения при температуре плюс 20 °С, Дж/см ² , не менее	29,0
Предел выносливости при знакопеременном изгибе σ_{-1} , Н/мм ² , не менее	240
Угол загиба на 180° на оправке диаметром (d) и толщине (h), d/h	1,5

Результаты испытания (рис. 2) показали повышенную коррозионную стойкость опытного проката в сравнении с прокатам из стали 09Г2Д. При этом,

с увеличением времени повышается эффективность использования новой стали в сравнении с применяемой сегодня сталью 09Г2Д, что является особенно актуальным учитывая, что срок службы грузовых вагонов нового поколения составляет 32 года.

Предварительные исследования свариваемости термоупрочненной стали, выполненной Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, показали, что она не склонна к изменению свойств под воздействием ожога, хорошо сопротивляется образованию холодных трещин при ограниченном содержании диффузионного водорода в наплавленном металле, способна обеспечить требуемую ударную вязкость в диапазоне скоростей охлаждения $5 \leq W_{6/5} \leq 15$ °С/с и может быть принята в качестве базовой при разработке высокопрочного проката для грузовых вагонов нового поколения.

На основании всего комплекса, проведенных исследований установлено, что механические и эксплуатационные свойства термоупрочненного проката из стали СтЗсп с карбонитридным упрочнением значительно превышает требования ОСТ 32.153 [5] и технического задания Укрзалізниці (табл. 6) к основным несущим и ограждающим элементам грузовых вагонов нового поколения. Полученные данные позволяют рекомендовать применение разработанного проката в вагоностроении и являются основой для включения его в Программу по созданию высокопрочной металлопродукции для железнодорожного транспорта Украины, в т.ч. и для грузовых вагонов нового поколения.

Библиографический список

1. Микролегирование спокойных конструкционных сталей азотом с целью повышения эксплуатационных свойств и выхода годного / А.В. Рабинович, Г.Н. Трегубенко, М.И. Тарасьев, А.В. Пучиков // Тр. VI конгресса сталеплавыльщиков. - М.: Черметинформация. - 2001. - С. 172-175.
2. Пат. 38010 Україна, МКП С22 С38/04 С21 С5/04. Сталь і спосіб її виробництва / Трегубенко Г.М., Рабінович О.В., Тарасьев М.І., Пучиков О.В. - № 200052782; заявл. 16.05.2000; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6.
3. Узлов И.Г. Научные положения и технологические решения производства и использования эффективной металлопродукции // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 2010. - № 2. - С. 126-130.
4. Большаков В.И., Стародубов К.Ф., Тылкин М.А. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности. - М.: Металлургия, 1977. - С. 93-98.
5. ОСТ 32.153 – 2000. «Металлопрокат для кузовов грузовых вагонов нового поколения». – М., 2000. – 15 с.

Поступила 29.01.2013