

Ю. С. ПРОЙДАК, А. В. РАБИНОВИЧ, Г. Н. ТРЕГУБЕНКО, Ю. А. БУБЛИКОВ,  
Г. А. ПОЛЯКОВ, А. А. КАТРИЧ (НМетАУ, Днепропетровск), А. В. ПУЧИКОВ (ИЧМ  
НАНУ, Днепропетровск)

## РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТА И ЛИТЬЯ ИЗ СТАЛЕЙ С КАРБОНИТРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ДЛЯ ВАГОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Розроблено склад та технологію виробництва сталей для вагонного литва і прокату. Рівень властивостей металопродукції відповідає рекомендаціям Міжнародної конференції «Желдормашиностроение» (Щербинка, 29-30.06.2004), що досягнуто комплексним мікролегуванням базових сталей азотом, титаном й алюмінієм у співвідношеннях, які забезпечують формування рівномірно розподілених карбонітридних та нітридних нанофаз і стабільної дрібнозерної структури ( $\geq 8$  бал у литві та  $\geq 9$  бал у прокаті).

*Ключові слова:* сталь, литво, прокат, вагони

Разработаны состав и технология производства сталей для вагонного литья и проката. Уровень свойств металлопродукции отвечает рекомендациям международной конференции «Желдормашиностроение» (Щербинка, 29-30.06.2004). Это достигнуто комплексным микролегированием базовых сталей азотом, титаном и алюминием в соотношениях, обеспечивающих формирование равномерно распределенных карбонитридных и нитридных нанофаз и стабильной мелкозернистой структуры ( $\geq 8$  балла в литье и  $\geq 9$  балла в прокате).

*Ключевые слова:* сталь, литье, прокат, вагоны

The composition and manufacturing technology for steel rolling and casting products for the new generation wagons are developed. The level of properties of metal production meets the recommendations of the International Conference “Zheldormashinostroenie” (Shcherbinka, 29-30.06.2004). This is achieved by a complex microalloying the base steels with nitrogen, titanium and aluminum in the ratios ensuring the formation of uniformly distributed carbonitride and nitride nanophases and stable fine-grained structure ( $\geq 8$  points in the casting and  $\geq 9$  points in the rolling).

*Keywords:* steel, casting, rolling, wagons

Создание вагонов нового поколения требует применения сталей с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик. Это относится не только к прочности и пластичности металла при испытаниях на разрыв, но и к ударной вязкости, в том числе при отрицательных температурах, к усталостным характеристикам и, соответственно, к надежности и долговечности конструкций [1].

С этой целью разработан новый класс углеродистых и низколегированных ферритоперлитных сталей с карбонитридным упрочнением на основе комплексного микролегиования азотом, титаном и алюминием (типа АТЮ) [2].

Термодинамическими расчетами показано и экспериментально подтверждено, что при концентрации азота и титана  $\geq 0,01$  % мас. каждого в жидкой стали образуются нитриды титана, как показано на рис. 1, которые при кристаллизации выполняют роль инокуляторов и обеспечивают измельчение литого зерна [3].

Установлено экстремальное влияние титана на структуру, предел текучести и ударную вязкость литой стали, что определяется изменением количества и дисперсности образующихся

нитридов и карбонитридов, представленных на рис. 2.

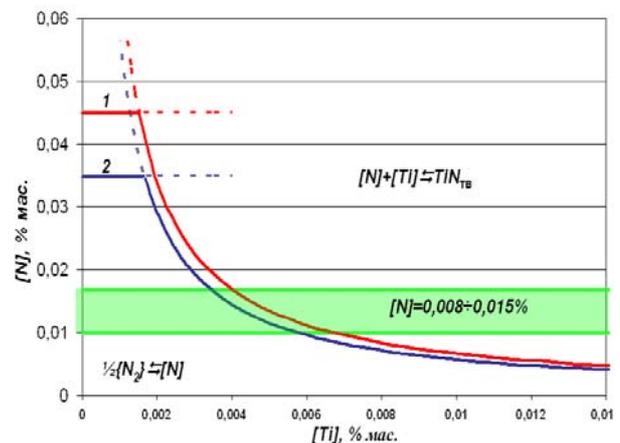


Рис. 1. Взаимодействие титана с азотом в жидкой стали при 1873 К:

- 1 – низколегированные стали с карбонитридным упрочнением;
- 2 – сталь 15ГСЛ;
- – реальные содержания азота в углеродистых и низколегированных электросталиях

При оптимальной концентрации титана (0,015...0,025 % мас.) более 50 % его нитридов имеет наноразмеры ( $\leq 1...2$  мкм). С ростом кон-

центрации выше 0,025 % увеличение количества выделений избыточной фазы достигается за счет более крупных карбонитридов, как правило,  $\geq 5 \dots 7$  мкм, влияние которых на свойства литого металла менее значимо. Введение титана в оптимальных пределах позволяет регламентировать величину зерна нормализованного литья 8...9 баллом и экстремальные значения предела текучести и ударной вязкости, как показано на рис. 3.

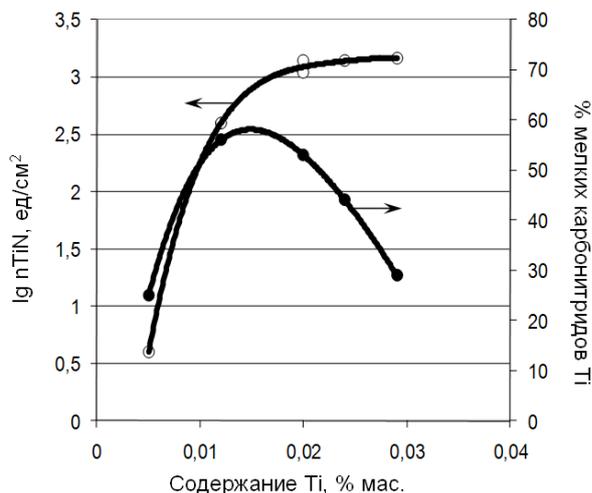


Рис. 2. Влияние концентрации титана на количество ( $n_{TiN}$ , ед/см<sup>2</sup>) и размер карбонитридов в стали 15ГСЛ

Благодаря ограничению верхнего предела концентрации титана в твердом растворе после кристаллизации сохраняется большее количество свободного азота, который при дальнейшем охлаждении взаимодействует с алюминием (0,02...0,06 % мас.) с образованием только нанонитридов размером 40...200 нм. При этом общее количество упрочняющих наночастиц возрастает до 2,5 раз.

Необходимый уровень концентрации азота определяется требованиями к свойствам литой и деформированной сталей и должен быть  $\geq 0,009 \dots 0,010$  % мас. При легировании деформируемых сталей его содержание может превышать растворимость при температуре ликвидус (0,016 %, мас.). В этом случае, подобно полуспокойным сталям, в слитке формируется рассредоточенная усадочная раковина, которая полностью закатывается при сквозном обжате более 7...10, что значительно меньше, чем реальное обжатие при производстве листа и фасонного проката для вагоностроения не только из слитка, но и из непрерывнолитой заготовки.

Таким образом, комплексное микролегирование азотом (0,010...0,025 %), титаном (0,015...0,030 %) и алюминием (0,02...0,06 %)

обеспечивает возможность влияния на размер зерна металла при кристаллизации и горячей прокатке ферритоперлитных сталей, их фазовую структуру и комплекс свойств литья и проката.

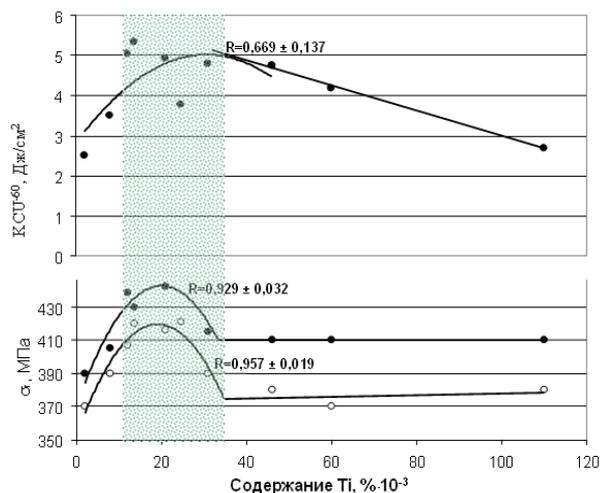


Рис. 3. Влияние содержания титана на предел текучести и ударную вязкость стали 15ГСЛ после нормализации (○ – цеховая т/о; ● – лабораторная т/о)

Что касается оптимальных концентраций марганца и кремния, отметим следующее. Измельчение зерна феррита при карбонитридном легировании позволяет существенно скомпенсировать охрупчивающее влияние кремния и соответственно снизить величину допустимого соотношения  $[Mn]:[Si]$  до  $\geq 0,5$ . С одной стороны, это позволяет значительно увеличить концентрацию кремния при относительно высокой концентрации марганца и, тем самым, обеспечить больший уровень твердорастворной составляющей упрочнения, а с другой стороны, снизить концентрацию марганца с целью его экономии, при сохранении достаточно высокого содержания кремния и, соответственно, сохранении относительно высокой прочности.

Технология комплексного микролегирования сталей типа АТЮ для вагоностроения разработана и освоена в промышленных масштабах при производстве листа и фасонного проката в условиях ОАО «Металлургический завод им. Г. И. Петровского», колес – в условиях ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» и литья (тележек и автосцепки) – в условиях ОАО «Кременчугский сталелитейный завод». Механические свойства этой металлопродукции приведены в табл. 1, где также представлены данные по общемашиностроительному сортаменту (позиция 4–7). Как видим, их выплавка может осуществляться в любом металлургическом агрегате, но предпочтительной является элек-

троплавка, в которой благодаря насыщению стали азотом в зоне дуги резко снижает расход азотсодержащих материалов, а в определенных случаях можно вообще исключить их применение.

Стали типа АТЮ в сравнении с базовыми 20ХГНФТЛ и 10ХСНД имеют более высокий уровень механических свойств и значительно меньшую стоимость благодаря исключению дорогостоящих хрома, никеля и ванадия. При разливке стали в слитки типа «ПС» экономический эффект возрастает за счет увеличения вы-

хода годного металла на 10...12 % отн., что близко к условиям непрерывной разливки на заготовку.

Анализ данных табл. 1 показывает, что механические свойства литых рам и балок тележки из стали 20ГАТЮЛ (поз. 1) и проката из стали 15Г2САТЮЛ (поз. 2) отвечают полностью не только требованиям отраслевых стандартов 32.183-2001 и 32.153-2000, соответственно, но и рекомендациям международной конференции «Желдормашиностроение» (Щербинка, 29-30.06.2004).

Таблица 1

**Основные показатели свойств сталей типа АТЮ**

№ поз.	Марка стали	Содержание азота	Метод выплавления	Тип слитка	Вид профиля	Механические свойства			Ударная вязкость	
						$\sigma_{p1}$ , МПа	$\sigma_s$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	КСУ <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
1	20ГАТЮЛ	0,011-0,015	EF	Сп	Литые изделия	370-420	560-660	>25	-	60-110
2	15Г2САТЮД	0,010-0,012	EF	Сп	Швел.№14 Швел.№24 Лист $\delta=10$	480-500 425-430 440-455	630-640 625-630 605-610	22-29 28-29 22-26	79-103 34-50 40-59	51-75 50-72 30-33
3	Колесная 1	0,009-0,012	М	Сп	Колеса цельнокат.	-	1000-1040	10-16,5	39-63**	-
4	15САТЮ	0,008-0,015	LD	Сп	Фасонный прокат $\delta=8-10$ мм	370-385	500-512	31-33	115-142	75-120*
5	15САТЮ	0,016-0,025	LD	ПС	Фасонный прокат $\delta=8-10$ мм	390-441	559-578	30-32	120-142	80-140*
6	20АТЮ	0,018-0,020	EF	ПС	$\square 40$ $\varnothing 8$	323-372 421-453	430-480 586-597	36-43 34-41	135-167 -	68-119* -
7	35ГСАТЮ	0,016-0,025	LD, М	ПС	Шахтная крепь	470-520	680-780	21-25	50-80**	-

Примечание: EF – электродуговая печь; LD – конвертор (с верхней продувкой); М – маргеновская печь.

Сп – спокойный слиток; ПС – полуспокойный слиток.

\* Испытания при  $-70$  °С; \*\* Испытания при  $+20$  °С

Одним из важнейших требований к литым элементам вагонов нового поколения является повышение их ресурса. Так, коэффициент запаса сопротивления усталости надрессорных балок тележек вагонов должен составлять  $\geq 2,20$ , а рам боковых  $\geq 2,00$  против действующих нормативных требований к обоим элементам  $\geq 1,80$ . Независимо от возможных конструктивных решений этой задачи главным направлением, по нашему мнению, следует считать повышение усталостных характеристик стали, из которой изготавливается литые.

Сравнительные испытания на усталость гладких образцов стали 20ГЛ ( $\delta_T = 360$  МПа) и идентичной по содержанию базовых элементов стали 20ГАТЮЛ ( $\delta_T = 390$  МПа) при расчетной нагрузке  $0,7 \delta_{Tmin}$  (255 МПа) и базе испытаний  $10^7$  циклов показали, что среднее число циклов до разрушения образцов опытного металла в 2,3 раза выше серийного. При этом 40 % испытанных образцов стали с КНУ выдержали  $10^7$  циклов без разрушения против 10 % у базового металла.

Усталостные испытания реальных литых элементов тележки из стали 20ГАТЮЛ, выполненные в институте УкрНИИВ и в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, показали, что они отвечают приведенным выше требованиям к вагонам нового поколения.

При производстве колесной стали (табл. 1, поз. 3) установлено, что наиболее высокие значения прочности в сочетании с пластичностью и максимальной ударной вязкостью (до 63 Дж/см<sup>2</sup>) достигаются при наличии в структуре металла нитридов ванадия и алюминия.

Эксплуатационными годовыми испытаниями колесных пар из опытного металла в подвижном составе на замкнутом маршруте сложного профиля пути на участке Мурманск – Апатиты установлено, что износ одного из наиболее ответственных элементов колеса – гребня – уменьшился на 10 %, среднемесячный прокат опытных колес против серийных снизился на 40...50 %. Результаты эксплуатационных испытаний колес позволили сделать заключение о целесообразности выплавки стали с нитридным (карбонитридным) упрочнением и разработать нормативный документ ТУ 14-15-281-92 «Колеса повышенной прочности из стали с карбонитридным упрочнением».

В результате выполненных исследований показано, что микролегирование азотом, титаном и алюминием серийных низколегирован-

ных сталей, применяемых в настоящее время в вагоностроении (например, 09Г2Д, 20ГЛ), позволяет значительно улучшить их механические и эксплуатационные свойства и обеспечить выполнение требований, предъявляемых к перспективным материалам для вагонов нового поколения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации участников Межд. конф. «Развитие транспортного машиностроения в России» «Желдормашиностроение – 2004», экспериментальное кольцо ВНИИЖТ (г. Щербинка) 29-30 июня 2004 г. [Текст]. – М.: АНО «Центр содействия развитию транспортной науки», 2004. – 26 с.
2. Разработка состава и технологии производства экономичных конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением [Текст] / А. В. Рабинович [и др.] // «Сучасні проблеми металургії»: наук. пр. НМетАУ. – Т. 3. – Д.: Системні Технології, 2001. – С. 64-67.
3. Влияние микродобавок титана на структуру и свойства литых электросталей [Текст] / А. В. Рабинович [и др.] // Журнал НМетАУ «Теория и практика металлургии». – Д., 2010. – № 5-6. – С. 60-64.

Поступила в редколлегию 19.04.2011.

Принята к печати 26.04.2011.