

Г. Н. Трегубенко /д. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины

Улучшение свойств низколегированных конструкционных сталей микролегированных комплексом «азот – титан – алюминий»

Выполнен анализ литературных данных по производству низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением. Показаны преимущества применения комплексного микролегирования литых сталей азотом, титаном и алюминием и определены их оптимальные пределы содержания. Приведены примеры промышленного использования предлагаемой системы микролегирования для ряда литых низколегированных сталей. (Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.).

Ключевые слова: сталь, микролегирование, азот, титан, алюминий, карбонитридное упрочнение, структура, свойства.

The analysis of literary data is executed on a production low-alloy of steels with carbonitride hardening. Advantages of application of complex microalloying of cast steels nitrogen, titan and aluminium are shown and their optimum limits of maintenance are certain. The examples of the industrial use of the offered system of microalloying are resulted for the row of cast low-alloy of steels.

Key words: steel, microalloying, nitrogen, titan, aluminium, carbonitride hardening, structure, properties.

Литые низколегированные стали обычно выплавляют в электродуговых печах, и поэтому они содержат повышенное количество азота (0,008–0,012 %), что негативно сказывается на их качестве. Однако связывание свободного азота в специальные карбонитриды или нитриды улучшает структуру и свойства стали. По мнению авторов [1], наиболее эффективным является комплексное карбонитридное упрочнение, приводящее к формированию в относительно широком интервале температур нитридов различных элементов, обладающих достаточно высоким, но существенно различающимся сродством к азоту. В качестве таких элементов, помимо основного ванадия, обычно выбирают ниобий, реже алюминий, титан, цирконий и др.

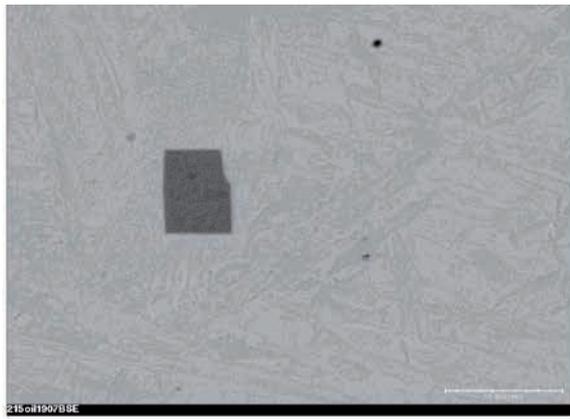
Однако основным недостатком использования ванадия и ниобия является очень высокая стоимость легирующих материалов. Поэтому исследования, направленные на разработку литых экономичных низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением за счет комплексного микролегирования относительно недорогими и достаточно доступными в Украине элементами (титаном и алюминием), являются актуальными.

В ряде работ отмечается благоприятное влияние комплексного микролегирования азотом, титаном и алюминием на качество литых сталей. Установлено [2], что совместные добавки азота (0,024–0,045 %), титана (0,16–0,18 %) и алю-

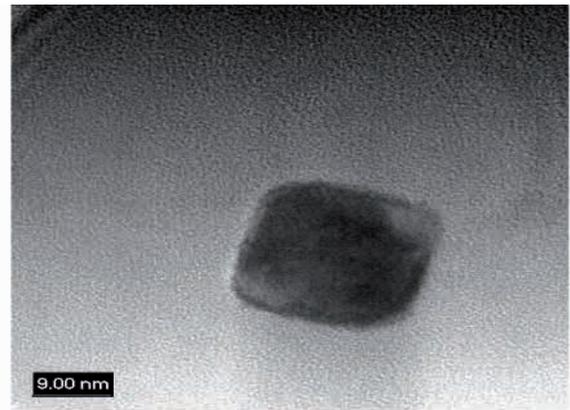
миния (0,06–0,12 %) лучше влияют на структуру и свойства стали 40Г2Л, чем использование микролегирующего комплекса N-V-Al. Однако подавляющее большинство исследователей [3] считают, что микролегирование азотом и титаном не может благоприятно воздействовать на свойства литых низколегированных сталей. Это связано с образованием крупных карбонитридов титана (до 35 мкм), располагающихся в объеме зерна и не растворяющихся при термической обработке.

Известно [1], что внутризеренное расположение карбонитридов титана положительно влияет на формирование первичной структуры и, соответственно, на размер зерна и свойства литого металла. При разработке сталей типа АТЮ авторы [4] исходили из предпосылки, что карбонитриды титана преимущественно регулируют литую структуру, а нитриды алюминия – зернообразование при термической обработке.

В работе [4] показано, что при производстве горячекатаной стали Ст20АТЮ возможно образование двух типов карбонитридов титана. Первый тип Ti(C,N) (рис. 1а) имеет достаточно крупные размеры (1–12 мкм) и образуется еще в жидкой стали. Второй тип карбонитридов титана (рис. 1б) имеет наноразмеры (10–200 нм) и вероятнее всего выделяется при затвердевании и охлаждении стали в твердом состоянии. Как следует из данных [4], для наиболее эффективного использования комплексного микролеги-



а) ×2500



б) ×800000

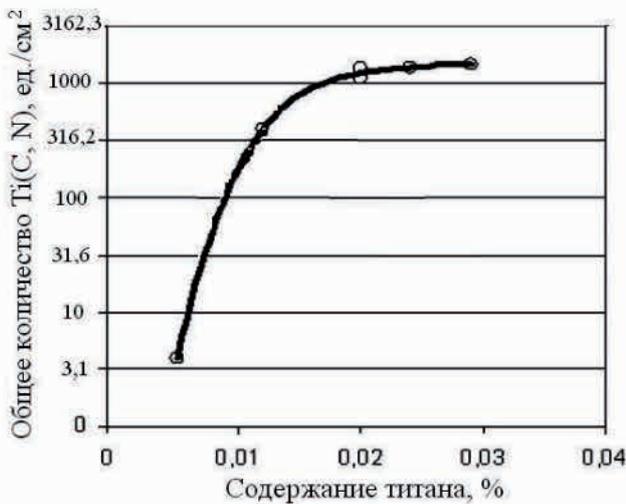
Рис. 1. Карбонитриды титана в стали Ст20АТЮ [4]

рования литых низколегированных сталей азотом, титаном и алюминием необходимо создать условия для получения как можно большего числа мелких карбонитридов титана и обеспечить термодинамические и кинетические возможности образования нитридов алюминия в достаточном объеме.

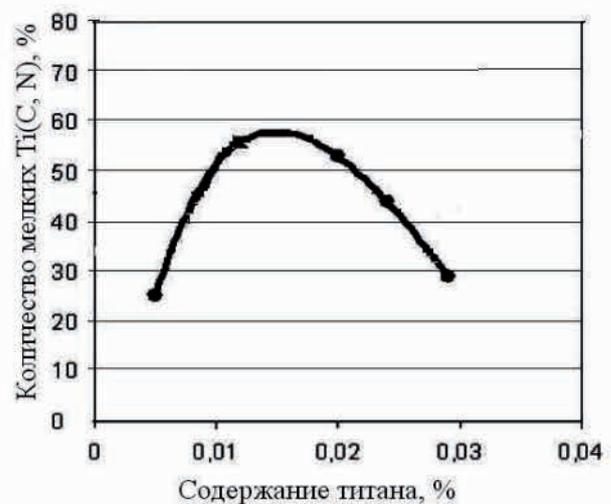
Металлографическим анализом образцов стали 20ГЛ, содержащей азота 0,014–0,015 %, определено влияние концентрации титана (0,003–0,11 %) на размер и количество карбонитридов. Установлено, что при повышении содержания в стали титана от 0,003 до 0,020 % происходит резкое увеличение количества карбонитридов (рис. 2а), размер которых находится в пределах 10–200 нм. Определено, что наибольшее количество мелких частиц $Ti(C,N)$ встречается при концентрации титана 0,012–0,018 %. С повышением содержания титана от 0,020 до 0,030 % прирост количества карбонитридов снижается, а размер их увеличивается до 1–10 мкм. Однако при этом число мелких карбонитридов титана (30–50 % от общего количества, как показано на рис. 2б) яв-

ляется достаточным для значительного уменьшения размера первичного зерна, дисперсионного и зернограничного упрочнения. Дальнейшее повышение концентрации титана с 0,031 до 0,110 % практически не влияет на количество его карбонитридов, но значительно увеличивает их размеры (до 15–35 мкм) и изменяет стехиометрический состав (в сторону большего содержания углерода).

Таким образом, для получения в литых сталях типа АТЮ большого количества мелких карбонитридов титана, благоприятно влияющих на их структуру (рис. 3) и свойства (табл. 1), необходимо регламентировать содержание титана в пределах от 0,010 до 0,030 %. Механические свойства сталей, содержащих комплекс АТЮ (табл. 1), хорошо коррелируют с результатами металлографического анализа. Микролегирование титаном в оптимальных пределах значительно повышает прочность и ударную вязкость стали 20ГАТЮЛ. При этом максимальный прирост прочности (50–80 МПа) наблюдается при содержании титана 0,020–0,025 %, т. е.



а)



б)

Рис. 2. Влияние содержания титана на общее количество (а) и долю мелких (б) карбонитридов в стали 20ГАТЮЛ

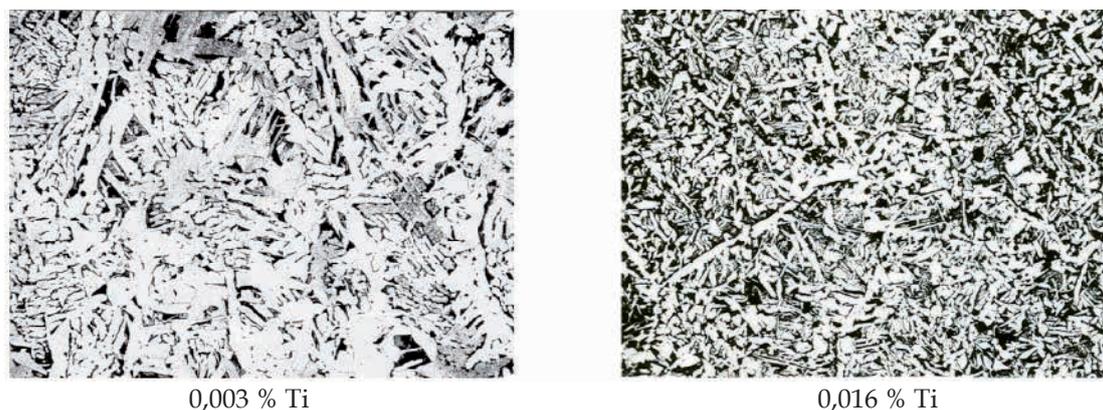


Рис. 3. Влияние титана на литую структуру стали 20Г(С)АТЮЛ (x100)

при наибольшем общем количестве карбонитридов титана, а также при высокой доле мелких частиц ($\geq 45\%$). В то же время на прирост ударной вязкости (в 1,5–2,0 раза) оказывает влияние только увеличение доли мелких частиц Ti(C,N) ($[Ti] = 0,012-0,018\%$). Следует отметить, что при содержании титана $\geq 0,031\%$ происходит резкое падение пластичности металла.

Таблица 1

Влияние содержания титана на свойства стали 20ГАТЮЛ в нормализованном состоянии

№ п/п	[Ti], %	Механические свойства			
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	КСУ ⁻⁶⁰ , Дж/см ²
1	0,003	390	580	25	35,5
2	0,008	405	590	26	39,0
3	0,010	420	600	28	42,5
4	0,012	445	640	23	54,5
5	0,013	430	630	25	57,0
6	0,016	420	600	26	61,5
7	0,018	430	610	28	70,5
8	0,020	460	660	26	52,5
9	0,022	450	640	28	48,0
10	0,023	450	630	26	52,0
11	0,025	470	660	23	39,0
12	0,028	420	610	25	50,0
13	0,031	415	640	17	49,0
14	0,046	410	610	16	46,0
15	0,060	410	610	16	42,0
16	0,110	440	640	14	24,5

Для получения большого количества карбонитридов титана и особенно нитридов алюминия концентрация азота в стали должна быть максимально возможной, но и не приводить к образованию газовых пузырей, являющихся причиной брака отливок. На основании термодинамических расчетов и данных работ [5; 6] рекомендуется содержание азота в литых феррито-перлитных сталях (15-20)Г(С)АТЮЛ иметь от 0,014 до 0,020 %.

Микролегирование алюминием должно обеспечивать наиболее полную очистку твердого раствора от азота, максимально измельчать зерно и не ухудшать жидкотекучесть стали. Путем анализа термодинамического процесса образования нитридов алюминия в литых сталях (15-20)Г(С)АТЮЛ и данных работы [6] получено выражение для расчета оптимального содержания алюминия в металле:

$$\lg([Al] - [Al]_{окс.} - [Al]_{мв.р-р}) = -\frac{6770}{T} + 1,33 - 0,183[C] + 0,045[Mn] - 0,044[Si] - \lg([N] - [N]_{Ti(N,C)} - [N]_{мв.р-р}) \quad (1)$$

где [Al], [C], [Mn], [Si], [N] – содержание в стали алюминия, углерода, марганца, кремния и азота соответственно, %;

$[Al]_{окс.}$ – содержание алюминия, связанного в оксиды;

$[Al]_{мв.р-р}$ и $[N]_{мв.р-р}$ – содержание алюминия и азота в твердом растворе соответственно, %;

$[N]_{Ti(N,C)}$ – содержание азота, связанного в карбонитриды титана, %.

Термодинамическими расчетами с использованием методики, приведенной в работе [5], определено, что при оптимальном микролегировании сталей (15-20)Г(С)АТЮЛ азотом и титаном, образующиеся карбонитриды титана близки по составу к TiN. Тогда можно записать:

$$[N]_{Ti(N,C)} = 0,29 \cdot [Ti], \quad (2)$$

где 0,29 – стехиометрический коэффициент для чистого нитрида титана;

[Ti] – содержание титана в стали, %.

По данным работы [7], в литых низколегированных сталях содержание алюминия, связанного в оксиды, обычно постоянно и равно $\sim 0,006\%$. Авторами работы [8] установлено, что в феррито-перлитных сталях типа АТЮ содержание азота в твердом растворе составляет 0,0071–0,0113 %, а алюминия – 0,0046–0,0108 %. Используя данные работ [7] и [8], результаты расчетов по выражениям (1) и (2) для области

температур термообработки (табл. 2) установлено, что содержание в сталях (15-20)Г(С)АТЮЛ алюминия должно быть 0,020–0,060 %.

На основании анализа данных, приведенных в табл. 2, определено, что для сталей (15-20) Г(С)АТЮЛ полное завершение процессов рекристаллизации (равноосное зерно феррита 8 балла, отсутствие бейнита и мартенсита, тонкодифференцированный перлит) происходит при температуре 920 °С в течение 1,5 ч, а при 900 °С – 2,5 ч.

Следует отметить, что согласно ГОСТ 977-88 «Отливки стальные» температура термообработки для базовых сталей 20ГЛ и 20ГСЛ составляет 870–890 °С. Таким образом, микролегирование азотом, титаном и алюминием литых феррито-перлитных сталей повышает температуру термообработки на 30 °С.

Учитывая относительно высокие содержания алюминия и азота в твердом растворе сталей типа АТЮ, а также, то, что при фазовом переходе $\gamma \rightarrow \alpha$, растворимость последнего резко уменьшается и с понижением температуры продолжает снижаться, создаются термодинамические условия для дальнейшего выделения нитридов алюминия при $t < 900-920$ °С. Поэтому термооб-

работку сталей (15-20)Г(С)АТЮЛ следует проводить по двум режимам: нормализация или закалка при 900–920 °С с последующим отпуском при 650–690 °С. При такой термообработке используется существование двух температурных максимумов выделения нитридов алюминия в аустените и феррите.

Использование комплексного микролегирования азотом, титаном и алюминием сталей (15-20)Г(С)Л позволило достигнуть в промышленных условиях:

- измельчения зерна металла не менее чем в 2 раза;
- увеличения предела текучести в нормализованном состоянии на 30–80 МПа (9–23 %), а после закалки и высокого отпуска – на 60–130 МПа (13–29 %);
- повышение циклической долговечности стали более чем в 1,7 раза;
- увеличение предела текучести при 250–450 °С на 170–250 МПа (в 2,0–2,5 раза).

Промышленное освоение технологии выплавки стали 20ГАТЮЛ проведено в условиях ПАО «Кременчугский сталелитейный завод» при производстве литья для вагоностроения. На основании всего комплекса проведенных

Таблица 2

Влияние температурно-временного режима термической обработки на структуру сталей (15-20)Г(С)АТЮЛ

Температура, °С	Длительность выдержки, мин	Балл ферритного зерна	Общая характеристика микроструктуры	Характеристика фаз		
				Феррита	Перлита	
850	40	5, 6	Феррито-перлитная (Ф-П) с участками мартенсита (М) и бейнита (Б)	Неравноосный	Зернистый	
	90	5, 6, 8				
	120	5, 6, 7, 8				
	150	6, 5, 8				
870	40	7, 6, 8		Мелкие зерна равноосные, крупные -неправильной формы		
	90	7, 6				
	120	7, 8				
	150	7, 8, (9)				
900	40	8, 7, (9)		Мелкие зерна равноосные, крупные -неправильной формы		
	90	8, 9				
	120	8				
	150	8				
920	40	8	Ф-П	Равноосный	Пластинчатый тонкодифференцированный	
	90	8	Ф-П с участками М и Б			
	120	8				
	150	8				
950	40	8		Ф-П		Равноосный, по границам выделения карбидов
	90	8				
	120	8				
	150	8				
950	40	8	Ф-П с участками М и Б	Равноосный, по границам выделения карбидов		
	90	8				
	120	8				
	150	8				

исследований разработаны ТУ У 27.1-33686285-002:2007 «Отливки из стали марки 20ГЛ повышенной прочности для вагоностроения», которые совместно с распоряжением «Укрзалізниці» № 000180/ЦВ позволяют перейти к массовому производству литья из стали 20ГЛ, комплексно микролегированной азотом, титаном и алюминием.

Производство сталей (15-20)ГСАТЮЛ налажено в условиях ПАО «Армпром» (г. Миргород). Применение микролегированной стали 20ГСЛ в соответствии с ОСТ 108.961.02 и ОСТ 108.961.03 позволяет значительно повысить эксплуатационную надежность и долговечность литых изделий для энергетического машиностроения. Использование стали 15ГСАТЮЛ по ТУ У 27.1-21871578-001:2008 обеспечивает существенное уменьшение металлоемкости литой запорной арматуры, а также возможность ее применения даже в экстремальных условиях крайнего Севера ($KCV^{60} \geq 29,4$ Дж/см²). При этом низкий углеродный эквивалент стали 15ГСАТЮЛ позволяет проводить сварные работы (например, варку запорной литой арматуры в трубопровод) в «полевых» условиях, исключая подогрев с последующей термообработкой.

Выводы

Установлено, что использование в оптимальных пределах комплексного микролегирования азотом, титаном и алюминием литых низколегированных сталей благоприятно влияет на их структуру и свойства. Определены температурно-временные режимы термообработки феррито-перлитных сталей (15-20)Г(С) АТЮЛ, которые обеспечивают наилучшее качество металла.

Библиографический список

1. Гольдштейн М. И. Упрочнение конструкционных сталей нитридами / М. И. Голь-

дштейн, А. В. Гринь, Э. Э. Блюм [и др.]. – М.: Металлургия, 1970. – 222 с.

2. Волик В. В. Повышение физико-механических свойств средне-углеродистых сталей путем комплексного микролегирования / В. В. Волик, Л. К. Чеботарь, В. В. Лунев [и др.] // Зб. Матеріалів XI науково-техн. конф. «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах». – Запоріжжя: ЗНТУ, 2006. – С. 49–51.

3. Бабаскин Ю. З. Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой / Ю. З. Бабаскин, С. Я. Шипицын, И. Ф. Кирчу. – К.: Наукова думка, 2005. – 371 с.

4. Рабинович А. В. Теоретические основы и технология оптимального микролегирования электростали азотом, титаном и алюминием / А. В. Рабинович, Г. Н. Трегубенко, М. И. Тарасьев [и др.] // Зб. наукових праць «Сучасні проблеми металургії». Т. 7. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2004. – С. 97–107.

5. Григорян В. А. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов / В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, А. Г. Пономаренко [и др.]. – М.: Металлургия, 1989. – 288 с.

6. Аверин В. В. Азот в металлах / В. В. Аверин, А. В. Ревякин, В. И. Федорченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.

7. Шульте Ю. А. Производство отливок из стали / Ю. А. Шульте. – Киев; Донецк: Вища школа, 1983. – 184 с.

8. Isaeva L. Interfacial distribution of titanium, aluminium and nitrogen in steels with nitride hardening [Electronic resource] / L. Isaeva, Yu. Proydak, I. Lev [et. all] // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 6. – P. 563–567.

Поступила 16.11.2015

Metallurgical and Mining
Industry

www.metaljournal.com.ua