

УДК 621.74.04:669.14

Рабинович А.В./д.т.н./, Трегубенко Г.Н./д.т.н./,
Поляков Г.А., Лелеко Д.В.
НМетАУ

Пучиков А.В.
ИЧМ НАНУ

Межебовский И.В., Челябин А.М.
ЧАО «Промарматура»

Усовершенствование технологии производства литых низколегированных кремниймарганцевых теплоустойчивых электросталей

Исследовано влияние мелкодисперстных карбонитридных фаз на механические и эксплуатационные свойства низколегированной кремниймарганцевой стали типа ГСЛ. Технология карбонитридного упрочнения кремниймарганцевых теплоустойчивых сталей прошла опытно-промышленное опробывание. Результаты механических испытаний свидетельствуют о благоприятном комплексном влиянии азота, титана и алюминия на свойства стали 20ГСЛ во всем диапазоне рабочих температур. Ил. 1. Табл. 5. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: технология, электросталь, теплоустойчивость, карбонитридное упрочнение, микролегирование, сталь 20гсл

The effect of melkodisperstnyh carbonitride phases on the mechanical and performance properties of low-alloy steels such siliconmanganese GSL. Technology siliconmanganese carbonitride hardening heat-resistant steels was testing the pilot plant. The results of the mechanical tests showed fine complex influence of nitrogen, titanium and aluminum were 20GSL properties throughout the range of operating temperatures.

Keywords: technology, elektrosteel, heat resistance, carbonitride hardening, micro-alloying, steel 20gsl

В настоящее время низколегированные кремниймарганцевые стали (15ГСЛ [1-4], 20ГСЛ [5-7], 25ГСЛ [8], 30ГСЛ [5]) применяются для изготовления отливок деталей ответственного назначения и повышенной прочности, работающих в диапазоне температур от -40 до +450 °С. Например, сталь 20ГСЛ используют для производства деталей гидро-, паро- и газовых турбин, деталей оборудования атомных электростанций, станций теплоснабжения, теплоэлектроцентрали, ядерных реакторов и установок, а также деталей сварно-литых конструкций с большим объемом сварки. Соответственно повышение прочности низколегированных кремниймарганцевых сталей обеспечивает:

- увеличение срока службы и снижение затрат и времени на ремонтные работы;
- повышение эксплуатационной надежности;
- снижение металлоемкости.

Для получения высоких прочностных свойств низколегированные кремниймарганцевые стали содержат достаточно большую концентрацию кремния, что ухудшает их ударно-пластические характеристики. Следует отметить, что в зарубежных аналогах сталей этого класса (например, по DIN EN 10269) содержание кремния ограничено уровнем $\leq 0,50$ %. Для уменьшения охрупчивающего влияния кремния и повышения механических и эксплуатационных свойств низколегированных кремниймарганцевых сталей нами предложено их комплексное микролегирование азотом (0,012-0,025 %), титаном (0,012-0,040 %) и алюминием (0,02-0,10 %). Комплексное микролегирование этими элементами обеспечивает

высокие механические свойства низколегированных кремниймарганцевых сталей при комнатной и низких температурах (до -60 °С) благодаря измельчению структуры металла, в то время как при повышенных температурах (250-450 °С) – за счет упрочнения объема зерен мелкодисперсными карбонитридами титана, а их границ – нитридами алюминия.

Исследование влияния комплексного микролегирования азотом, титаном и алюминием на структуру и комплекс механических и эксплуатационных свойств стали 20Г(С)Л проводили в условиях цеха металлургической оснастки ПАО «Кременчугский сталелитейный завод» («КСЗ») в индукционной печи ИСТ-0,06 с кислой футеровкой. Вес плавков составлял ~ 60 кг. С целью приближения к условиям промышленного производства в качестве шихты использовали материалы, применяемые на заводе: отходы стали 20ГЛ, ферросилиций ФС65, ферросиликомарганец МнС17, ферротитан ФТи35, алюмокальциевую проволоку. Для введения в сталь требуемых содержаний азота использовали азотсодержащую лигатуру, разработанную и изготовленную в НМетАУ на базе стандартного ферромарганца ФМн78.

После полного расплавления завалки и выдержки для прогрева расплава отбирали «скрапину», пробу для анализа металла и последовательно присаживали в печь требуемые количества ферросиликомарганца и ферросилиция. После небольшой выдержки для полного усвоения легирующих осуществляли замер температуры термопарой погружения. Температуру выпуска, которая составляла ~ 1650 °С, регулирова-

Таблица 1. Химический состав стали 20 ГСЛ комплексно микролегированной азотом, титаном и алюминием и выплавленной в ИСТ-0,06

Химсостав % масс.	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr	N	Ti	Al
Плавка № 422	0,19	0,78	1,35	0,035	0,030	0,14	0,13	0,09	0,015	0,012	0,043
Плавка № 423	0,17	0,65	1,37	0,030	0,024	0,10	0,10	0,07	0,017	0,013	0,049

Таблица 2. Механические свойства микролегированной стали 20ГСЛ, выплавленной в ИСТ-0,06

Режим термообработки	σ_{B^*} Н/мм ²	σ_{T^*} Н/мм ²	δ_5^* %	ψ , %	KCU ⁻⁶⁰ Дж/см ²
№ 1 ¹⁾	630-660	430-460	20-22	37	50-61
№ 2 ²⁾	620-640	420-425	18-25	35-42	40-63
№ 3 ³⁾	690-710	555-580	21	47-49	33-61
№ 4 ⁴⁾	630-680	530-570	18-19	39-47	31-45

Примечание: ¹⁾- нормализация в лабораторных условиях; ²⁾- нормализация в цеховых условиях; ³⁾- закалка и высокий отпуск в лабораторных условиях; ⁴⁾- закалка и высокий отпуск в цеховых условиях

Таблица 3. Химический состав стандартной и комплексно микролегированной азотом, титаном и алюминием стали 20ГСЛ, выплавленной в ДСП-3

Номер плавки	Содержание элементов, % масс.										
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr	N	Ti	Al
1-33	0,18	0,76	1,25	0,008	0,011	-	-	-	0,018	0,037	0,06
1-64	0,16	0,62	1,32	0,003	0,025	-	-	-	0,012	0,030	0,03
1-159	0,17	0,58	1,50	0,004	0,019	-	-	-	0,012	0,035	0,10
3-382	0,21	0,75	1,00	0,006	0,030	0,040	0,16	0,29	0,017	0,020	0,05
Требования ОСТ 977-88	0,16-0,22	0,60-0,80	1,00-1,30	≤0,03	≤0,030	≤0,3	≤0,3	≤0,3	н.р.*	н.р.*	н.р.*
Допускаемые отклонения	-0,02 +0,01	-0,05 +0,10	-0,12 +0,25	-	-	+0,15	+0,1	+0,1	-	-	-

Примечание: *н.р. – не регламентируется

ли путем выдержки металла при включенной печи из расчета скорости его нагрева ~ 10 °С/мин. Выпуск плавки осуществляли в предварительно прогретый ковш с кислой футеровкой.

С целью улучшения усвоения титана и азота конечное раскисление металла осуществляли в два приема. Непосредственно перед выпуском на дно ковша давали половину требуемого количества алюмокальциевой проволоки. Затем после заполнения ~1/3 ковша под струю присаживали остальной алюминий, ферротитан и азотсодержащую лигатуру.

Разливку металла осуществляли в 3 пробных бруска типа «трефа» (по чертежу № 1 ГОСТ 977-88 [5]) по принятой технологии. В процессе разливки отбирали маркировочную пробу, которую после окончания плавки вместе с предварительной отправляли для проведения анализа. На основании полученных результатов при необходимости осуществляли корректировку количества легирующих добавок в последующих плавках.

Разделка «треф», термическая обработка заготовок, изготовление и испытание образцов осуществляли на «КСЗ» по действующим инструкциям. С целью исключения влияния случайных неучтенных факторов термическую обработку (нормализацию и закалку с отпуском) образцов проводили по двум вариантам – в цеховых и лабораторных условиях. Химический состав и результаты испытаний опытного металла приведены в табл. 1 и 2.

На основании полученных результатов были разработаны рекомендации по промышленному производству в условиях «КСЗ» стали 20ГЛ, содержащей в пределах марки повышенную концентрацию кремния и комплексно микролегированную азотом, титаном и алюминием.

Выплавку опытно – промышленных плавов низколегированных теплоустойчивых кремниймарганцевых сталей комплексно модифицированных нитридами титана и алюминия осуществляли в условиях ОАО «Армапром» в печи ДСП-3 по действующей технологической инструкции с изменениями, касающимися в основном присадки микролегирующих элементов (N, Ti и Al). В качестве азотоносителя использовали специальные азотсодержащие модификаторы на базе ферроси-

ликомарганца или феррохрома, которые вводились в печь перед выпуском металла. Алюминий марки АВ-87 задавали на штанге на дно ковша в начале выпуска плавки в количестве 3,5-5,6 кг/плавку, а ферротитан марки ФТи-70 (1,3-3,0 кг/плавку) присаживали в ковш при его наполнении на ~ 1/5 объема. Фактический химический состав опытно – промышленных плавов микролегированной стали 20ГСЛ приведен в табл. 3.

Для получения необходимого для испытаний количества образцов отливались пробные бруски типа «клин» (по чертежу № 3 ГОСТ 977-88 [5]), которые подвергали термической обработке по трем режимам:
- нормализация при температуре 900-950 °С, охлаждение на воздухе (режим № 1);
- закалка от температуры 900-950 °С, охлаждение в воде и последующий отпуск при температуре 690 °С (режим № 2) и 650 °С (режим № 3).

После термической обработки из клинов вырезали заготовки образцов для испытаний на растяжение по схеме, приведенной на рисунке. Соответственно из каждого полуклина получали по 2 заготовки (донная часть клина не использовалась).

В соответствии с существующей нормативно-технической документацией (например, [6, 7] для стали 20ГСЛ) качество литых низколегированных кремниймарганцевых теплоустойчивых сталей определяют по механическим свойствам при комнатной температуре (табл. 4) и по величине предела текучести при рабо-

чих температурах (табл. 5).

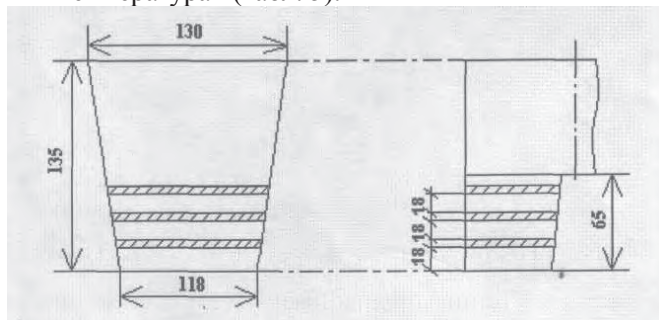


Рисунок. Схема вырезки заготовок

Исследование теплоустойчивости опытной стали (плавка № 3-382) в интервале температур, предусмотренных [6, 7] для стали 20ГСЛ (250-450 °С с интервалом 50 °С), выполняли в сертифицированной лаборатории ГП «Научно-исследовательский трубный институт» на разрывной машине Р-5 в соответствии с ГОСТ 9551-84 и ГОСТ 9651-84. Результаты этих испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 4. Механические свойства микролегированной стали 20ГСЛ и требования НТД к качеству низколегированных сталей при комнатной температуре

Марка стали	σ_B , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	KCU ⁺²⁰ , Дж/см ²	KCV ⁻⁶⁰ , Дж/см ²
20 ГСЛ (микролегированная)	638-646	400-480	18-31	40-65	55-320	н.опр.
Режим № 1	660-690	515-545	21-28	50-82	н.опр.	25-79
Режим № 2	670-715	535-590	20-25	51-80	н.опр.	25-51
Режим № 3	≥500	≥280	≥18	≥30	≥29,4	-
20ГСЛ	≥500	≥280	≥18	≥30	≥29,4	-
20ХМФЛ	≥500	320-550	≥15	≥30	≥29,4	-
15Х1М1ФЛ	≥500	320-550	≥15	≥30	≥29,4	-

Таблица 5. Результаты испытания образцов из микролегированной стали 20ГСЛ при повышенных температурах (плавка № 3-382)

№ п/п	σ_B , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	Температура испытаний, °С
Режим № 1					
1	553	335	20	58,5	250
2	-	340	24,5	45	300
3	-	332	20	45	350
4	553	358	27	68,5	400
5	487	341	29,5	71,5	450
Режим № 2					
6	589	411	19,5	49,5	250
7	617	369	-	44	300
8	637	413	22	29	350
9	610	398	21,5	41	400
10	493	359	22	54	450
Режим № 3					
11	620	459	-	56	250
12	636	436	-	51	300
13	658	433	17,5	45	350
14	640	487	27	59,5	400
15	525	420	29,5	68	450

Из табл. 5 видно, что даже при максимально допускаемой температуре эксплуатации (450 °С) микролегированная сталь 20ГСЛ имеет уровень предела текучести на 170–250 МПа выше требуемого к базовой стали [6, 7] для температуры 400 °С. Отметим, что регламентируемое падение этого показателя для

стандартной стали 20ГСЛ от комнатной температуры до 400 °С составляет почти 40 % отн. [6, 7], в то время как у микролегированной стали фактически это падение не превышает в интервале исследованных температур 20-25 % отн., что свидетельствует о стабильности ее свойств в условиях тепловых воздействий.

Анализ данных приведенных в таблице 5 подтверждает предпочтительность микролегирования азотом, титаном и алюминием стали 20ГСЛ и по не регламентированному ОСТ 108.961.03 и ОСТ 108.961.02 показателям. Так временное сопротивление разрыву при 450 °С для всех режимов термообработки составляет 487-525 МПа, относительное удлинение ≥ 22 % и относительное сужение ≥ 54 %, что превышает уровень этих свойств, требуемых ОСТ 108.961.03 и ОСТ 108.961.02 у стали 20ГСЛ даже при комнатной температуре (табл. 5).

Вывод

Комплексное микролегирование азотом, титаном и алюминием низколегированных кремниймарганцевых теплоустойчивых электросталей значительно повышает их предел текучести при 250-450 °С и обеспечивает его значение в 2,0-2,5 раза больше требуемого уровня. Пределы текучести и прочности микролегированной стали 20 ГСЛ при рабочих температурах остаются практически одинаковыми, что свидетельствует о их стабильности в условиях тепловых воздействий. Применение технологии карбонитридного упрочнения кремниймарганцевых теплоустойчивых электросталей обеспечивает повышение эксплуатационной надежности, увеличение срока службы и снижение металлоемкости оборудования энергетического машиностроения.

Библиографический список

1. ТУ У 27.1-218715-78-002:2008 «Отливки из стали 15ГСЛ для трубопроводной арматуры».
2. Стандарт ЦКБА 005.2 «Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении».
3. Стандарт ЦКБА 014 «Арматура трубопроводная. Отливки стальные. Общие технические условия».
4. Стандарт ЦКБА 025 «Арматура трубопроводная. Сварка и контроль качества сварных соединений. Технические требования».
5. ГОСТ 977-88 «Отливки стальные». – М.: Издво стандартов, 1989. – 57 с.
6. ОСТ 108.961.03-79 «Отливки из углеродистой и легированной стали для фасонных элементов паровых котлов и трубопроводов с гарантированными характеристиками прочности при высоких температурах». – М., 1979. – 20 с.
7. ОСТ 108.961.02-79 «Отливки из углеродистых и легированных сталей для деталей паровых стационарных турбин». – М., 1979. – 48 с.
8. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение 1989. – 640 с.

Поступила 07.11.2013