

УДК 669.187-194.52:001.73:669.786

Д.В. Лелеко, аспірант

Г.Н. Трегубенко, професор, д.т.н.

Г.А. Поляков, зав. лабораторією

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА ЕЕ ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск*

Проаналізовано вплив хімічного складу низьколегованої сталі на механічні властивості за робочої температури до 450 °С. Вивчено основні причини знеміцнення сталі за підвищеної температури. Розглянуто основні механізми зміцнення. Показано, що комплексне мікролегування азотом, титаном та алюмінієм забезпечує високі механічні властивості низьколегованих сталей за підвищеної температури (250...450 °С) за рахунок зміцнення об'єму зерен високодисперсними карбонітридами титану, а їх меж – нітридом алюмінію.

Ключові слова: низьколегована сталь, мікролегування, азот, титан, алюміній, теплостійкість

Проанализировано влияние химического состава низколегированной стали на ее механические свойства при рабочих температурах до 450 °С. Изучены основные причины разупрочнения стали при повышенных температурах. Рассмотрены основные механизмы упрочнения. Показано, что комплексное микролегирование азотом, титаном и алюминием обеспечивает высокие механические свойства низколегированных сталей при повышенных температурах (250...450 °С) за счет упрочнения объема зерен высокодисперсными карбонитридами титана, а их границ – нитридами алюминия.

Ключевые слова: низколегированная сталь, микролегирование, азот, титан, алюминий, теплоустойчивость

Influence of chemical composition for low-alloyed steel at its mechanical properties at working temperatures to 450 °C is analyzed. Principal reasons for softening steel at heightened temperatures are studied. The basic devices of hardening at heightened temperatures are considered. It is shown that complex microalloying by nitrogen, titanium and aluminium provides the high mechanical properties of low-alloyed steel at heightened temperatures (250...450 °C) due to hardening of extent of grains by superfine carbonitrided titanium, and its borders – by nitrided of aluminium.

Keywords: low-alloyed steel, microalloying, nitrogen, titanium, aluminium, thermostableness

*Введение.* На протяжении последних лет весьма интенсивно осуществляется разработка сталей, обладающих высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при рабочих температурах до 500...550 °С (теплоустойчивых сталей), а также методик испытания их специальных свойств в связи с усовершенствованием оборудования ответственного назначения, предназначенного для работы в вышеуказанных условиях.

*Состояние вопроса.* Основными требованиями, которые в зависимости от условий работы, могут предъявляться к теплоустойчивым сталям, являются [1]:

- прочность, характеризуемая пределом текучести или прочностью, при кратковременном испытании растяжением при повышенной или высокой рабочей температуре;
- сопротивление ползучести;
- длительная прочность;
- малая чувствительность к надрезу при длительном разрыве;
- усталостная прочность при рабочей температуре;
- стабильность структуры и свойств при длительном воздействии температуры и нагрузки;
- стойкость к релаксации;
- стойкость к термической усталости;
- определенные физические свойства: малый коэффициент теплового расширения, большие теплопроводность и температуропроводность.

Многообразие требований, предъявляемых к сталям, работающим при повышенных температурах, и жаропрочным материалам, приводит к разработке сталей и сплавов различных типов, отвечающих конкретным условиям работы, главным образом, определенному диапазону рабочих температур, длительности действия нагрузки и ее величине.

Для работы при температуре 500...550 °С применяются перлитные и ферритно-перлитные стали. Указанные стали используются в энергетическом машиностроении (для изготовления котлов, сосудов, паронагревателей и паропроводов), а также в химическом и нефтяном машиностроении.

Требования по химическому составу и механическим свойствам сталей, работающих при повышенных температурах на территории СНГ, подробно описывает нормативно-техническая документация (НТД): ГОСТ 20072-74 «Сталь теплоустойчивая» и два отраслевых стандарта ОСТ 108.961.03 «Отливки из углеродистой и легированной стали для фасонных элементов паровых котлов и трубопроводов с гарантированными характеристиками прочности при высоких температурах» и ОСТ 108.961.02 «Отливки из углеродистых и легированных сталей для деталей паровых стационарных турбин с гарантированными характеристиками прочности при высоких температурах».

Анализ марок сталей, работающих при повышенных температурах, свидетельствует о том, что наиболее часто используемыми легирующими элементами в сталях (табл. 1), являются хром, молибден и ванадий (стали 12ХМ, 15Х1М1ФЛ, 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 25Х1МФ, 18Х3МФ, 20Х3МФ), реже используется ниобий, вольфрам и титан (стали 20Х1М1Ф1ТР, 20Х1М1Ф1БР, 15Х5ВФ, 12Х8ВФ).

Устойчивая при комнатной температуре структура стали при высоких температурах, из-за интенсификации процессов диффузии, может испытывать значительные изменения, которые проявляются в сфероидизации перлита и коагуляции карбидной фазы, графитизации, перераспределении элементов между твердым раствором (ферритом) и карбидной фазой  $\alpha$ , также, в развитии процессов тепловой хрупкости. Все перечисленные явления ухудшают показатели прочности стали. Наиболее частой причиной нестабильности строения сталей, работающих при повышенных температурах, является процесс сфероидизации карбидов, то есть постепенное превращение карбидов пластинчатой формы (входящих в перлит), при высоких температурах в сфероиды. В дальнейшем наблюдается явление коагуляции, то есть укрупнения карбидов. С повышением температуры и увеличением длительности пребывания при ней

стали процессы сфероидизации и коагуляции получают большее развитие и оказывают отрицательное влияние на теплоустойчивость стали. Чем больше углерода в стали, тем более значительным является отрицательный эффект влияния сфероидизации и коагуляции карбидов на теплоустойчивость. М.В. Приданцев и К.А. Ланская [2] определили, что ванадий, хром, молибден и вольфрам тормозят вышеуказанные процессы.

**Таблица 1** - Влияние некоторых легирующих элементов на свойства сталей [3]

Элемент	Величина зерна	Твердость и прочность	Пластичность	Прокаливаемость	Прочность при высоких температурах
<i>Mn</i>	несколько увеличивает	повышает	не снижает (до 1,5 %)	сильно увеличивает	мало влияет
<i>Cr</i>	уменьшает	-	не снижает	увеличивает	несколько повышает
<i>W</i>	уменьшает	-	несколько снижает	увеличивает	-
<i>Mo</i>	-	незначительно повышает	повышает	увеличивает	значительно повышает
<i>V</i>	значительно уменьшает	повышает	-	-	несколько повышает
<i>Al</i>	уменьшает	незначительно повышает	при низких содержаниях повышает	мало влияет	мало влияет
<i>Si</i>	мало влияет	повышает	снижает	увеличивает	заметно повышает
<i>Ti</i>	сильно уменьшает	мало влияет	несколько повышает	уменьшает	слабо влияет

Графитизация представляет процесс разложения карбидов (цементита), в результате которого в стали обнаруживается свободный углерод в форме графита, и сопровождается резким ухудшением комплекса механических свойств. В практике известны случаи аварий паропроводов высокого давления в связи с графитизацией стали [2]. Установлено, что после введения 0,3...0,6 % хрома в теплоустойчивую сталь легированную молибденом, она становится несклонной к графитизации. Этим объясняется существующая в последние годы тенденция применять теплоустойчивую сталь, содержащую хром и молибден.

Перераспределение легирующих элементов между ферритом и карбидной фазой, наблюдаемое в котельной стали при длительном воздействии температур 400...450 °С и выше, приводит к тому, что феррит несколько обедняется карбидообразующими элементами (хром, молибден), а карбидная фаза, наоборот, обогащается ними, особенно молибденом. Теплоустойчивая сталь марки 12МХ после нормализации содержит в карбидах 4... 8 % молибдена, а в результате 2400-часовой выдержки при температуре 500 °С содержание молибдена в карбидной фазе возрастает до 60 % от его общего количества в стали. Между тем, именно количество молибдена в феррите, а не в карбидной фазе, определяет его положительное влияние на теплопрочность котельной стали. Обогащение карбидной фазы легирующими элементами в результате длительного воздействия высоких температур представляет крайне нежелательное явление. Вредное влияние данного процесса можно несколько ослабить путем снижения в котельной стали содержания углерода и дополнительного легирования ее наи-

более сильными карбидообразующими элементами (в частности, ванадием).

При легировании молибденом и ванадием данные элементы повышают температуру рекристаллизации феррита, затрудняют диффузионные процессы и способствуют термически стабильному упрочнению в результате образования высокодисперсных карбидов.

При равномерном распределении упрочняющих частиц в объеме металла, когда движущаяся дислокация встречается с частицей карбида возможно или перерезание частицы или обход ее дислокацией (механизм Орована) [4]. При этом реализуется процесс, для протекания которого необходимо наименьшее напряжение. Модельное представление о перерезании частиц (рис. 1) предусматривает предположения, что дислокации являются негибкими, а частицы – сферическими. Дополнительные напряжения, необходимые для перерезания частицы рассчитывают по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{\pi \cdot E \cdot d}{b \cdot D}, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия вновь образующейся поверхности, возникающей в результате перерезания;  $d$  – диаметр круга, возникающего в результате среза частицы;  $b$  – вектор Бюргера;  $D$  – расстояние между двумя частицами.

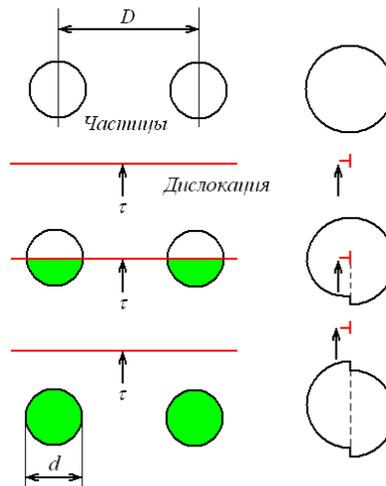


Рисунок 1 – Перерезание частиц дислокацией [4]

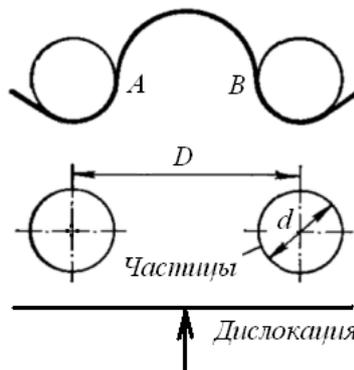


Рисунок 2 – Огибание частиц дислокацией по Оровану [4]

Если частицы представляют собой непреодолимое препятствие, то в процессе пластической деформации линия дислокации изгибается (рис. 2) и реализуется механизм Орована. Обычно он проявляется, когда частицы имеют размеры порядка 0,05 мкм. Отсюда следует, что чем плотнее расположены частицы, тем больше они противодействуют движению дислокаций [5]. Дополнительное напряжение, необходимое для осуществления этого процесса, рассчитывают по формуле:

$$\Delta\tau_{\text{Oro}} = \frac{G \cdot b}{D - d}, \quad D \gg d. \quad (2)$$

*Постановка задачи.* В работе поставлена задача обоснования правомерности использования карбонитридного механизма упрочнения низколегированных сталей, работающих при температуре до 450 °С с применением титана и алюминия, в качестве карбидо- и нитридообразующих элементов.

*Основная часть исследований.* Практическое применение молибдена и ванадия для упрочнения стали их карбидами резко ограничивается высокой стоимостью данных легирующих элементов, что нельзя не учитывать при промышленном производстве крупногабаритных отливок, вес которых достигает 200 т (корпуса газовых и паровых турбин). Альтернативным способом повышения прочностных свойств низколегированных сталей, работающих при высоких температурах, может быть их комплексное микролегирование азотом, титаном и алюминием, которое обеспечивает высокие механические свойства данных сталей при повышенных температурах (250...450 °С) за счет упрочнения объема зерен высокодисперсными карбонитридами титана, а их границ – нитридами алюминия.

Для проверки вышеизложенных положений была выбрана кремниймарганцевая сталь 20ГСЛ, применяемая для отливок ответственного назначения, работающих в диапазоне температур от 250 до 450 °С по ОСТ 108.961.03-79 [6]. Химический состав базовой и легированной стали 20ГСЛ приведен в табл. 2. Опытно-промышленное опробование технологии комплексного микролегирования стали 20ГСЛ выполняли в условиях АО «Армапром» на печи ДСП-3 по действующей технологической инструкции с изменениями, касающимися, в основном, присадки микролегирующих элементов (азота, титана и алюминия).

**Таблица 2** – 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 ГОСТ 977-88	0,16-0,22	0,60-0,80	1,00-1,30	≤ 0,03	≤ 0,030	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	н.р.*	н.р.*	н.р.*
Допускаемые отклонения	-0,02 +0,01	-0,05 +0,10	-0,12 +0,25	-	-	+0,15	+0,10	+0,10	-	-	-

Примечание: \*н.р. – не регламентируется

Исследование механических свойств опытного металла (плавка № 3-382) в интервале температур 250...450 °С с шагом 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 испытаний представлены в табл. 3 и 4.

**Таблица 3** – Механические свойства микролегированной стали 20ГСЛ и требования НТД к качеству низколегированных сталей при комнатной температуре

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	КСV <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
20ГСЛ (микролегированная)						
Режим № 1*	638...646	400...480	18-31	40...65	55...320	н.опр.
Режим № 2	660...690	515...545	21-28	50...82	н.опр.	25...79
Режим № 3	670...715	535...590	20-25	51...80	н.опр.	25...51
20ГСЛ	≥ 500	≥ 280	≥ 18	≥ 30	≥ 29,4	-
20ХМФЛ	≥ 500	320...550	≥ 15	≥ 30	≥ 29,4	-
15Х1М1ФЛ						

Примечание: \* - 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 температуре 650 °С (режим № 3)

**Таблица 4** – Результаты испытаний образцов из микролегированной стали 20ГСЛ при повышенных температурах (плавка № 3-382)

№ п/п	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	Температура испытаний, °С
Режим № 1					
1	553	335	20,0	58,5	250
2	-	340	24,5	45,0	300
3	-	332	20,0	45,0	350
4	553	358	27,0	68,5	400
5	487	341	29,5	71,5	450
Режим № 2					
6	589	411	19,5	49,5	250
7	617	369	-	44,0	300
8	637	413	22,0	29,0	350
9	610	398	21,5	41,0	400
10	493	359	22,0	54,0	450
Режим № 3					
11	620	459	-	56,0	250
12	636	436	-	51,0	300
13	658	433	17,5	45,0	350
14	640	487	27,9	59,5	400
15	525	420	29,5	68,0	450

Приведенные данные свидетельствуют о том, что даже при максимально допускаемой температуре эксплуатации (450 °С) микролегированная сталь 20ГСЛ имеет уровень предела текучести, который на 170...200 МПа превышает требуемое для базовой стали значение при температуре 400 °С. Можно отметить, что регламентируемое снижение данного показателя для стандартной стали 20ГСЛ от комнатной темпе-

ратуры до 400 °С составляет почти 40 % отн., в то время как у микролегированной стали фактически это снижение в исследованном интервале температур не превышает 20...25 % отн., что свидетельствует о стабильности ее свойств в условиях тепловых воздействий.

*Выводы.*

1. В результате анализа влияния химического состава низколегированных сталей на их механические свойства при повышенных температурах выявлено положительное влияние микролегирующей системы на базе азота, титана и алюминия.

2. Установлено, что при максимально допускаемой температуре эксплуатации (450 °С) микролегированная сталь 20ГСЛ имеет уровень предела текучести, превышающий на 170...200 МПа требуемое значение для базовой стали при температуре 400 °С, что свидетельствует о стабильности ее свойств в условиях тепловых воздействий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меськин, В. С. Основы легирования стали [Текст] / В. С. Меськин. – М. : Metallurgia, 1959. – 395 с. – Библиогр. : с. 653-677.
2. Приданцев, М. В. Стали для котлостроения [Текст] / М. В. Приданцев, К. А. Ланская. – М. : Metallurgia, 1959. – 304 с. – Библиогр. : с. 300-303.
3. Берштейн, М. Л. Механические свойства металлов [Текст] : учеб. пособие / М. Л. Берштейн, В. А. Займовский. – М. : Metallurgia, 1979. – 495 с. – Библиография в конце каждого раздела.
4. Гольдштейн, М. И. Дисперсионное упрочнение стали [Текст] / М. И. Гольдштейн, В. М. Фарбер. – М. : Metallurgia, 1979. – 207 с. – Библиогр. : с. 198-206.
5. Гаев, И. С. Дефекты строения стали [Текст] / И. С. Гаев. – Л. : Лениздат, 1947. – 232 с. – Библиогр. : с. 224-231.
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.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2013 р.  
Рецензент, проф. В.С. Ігнат'єв

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>