



The new high-temperature ferritic FeCrAl steel with the advanced cold ductility of -25°C is developed.

В. Г. МИЩЕНКО, И. Н. ЛАЗЕЧНЫЙ, Запорожский национальный технический университет

УДК 669.018

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 03Х22Ю5БФч ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Сплавы системы Fe–Cr–Al относятся к самым жаростойким сплавам для нагревателей печей сопротивления [1]. Этому способствует интенсивное образование оксидов Al_2O_3 и Cr_2O_3 в первые часы эксплуатации нагревателей, служащих эффективным барьером для диффузии атомов кислорода. Отсутствие в составе сплавов дефицитного никеля в совокупности с высокой долговечностью делает привлекательным применение этих сплавов с экономической точки зрения. Вместе с тем опыт применения фехралей позволил выявить ряд их недостатков, основными из которых являются [1, 2].

1. Пониженная в сравнении с нихромами технологическая пластичность при металлургическом переделе и изготовлении нагревателей.

2. Необратимая хрупкость, обусловленная образованием крупнозернистой структуры после нагрева до температур выше 1000°C .

3. Склонность к образованию поверхностных дефектов в виде плен при металлургическом переделе.

4. Необходимость предварительного подогрева проволоки диаметром более 5 мм перед навивкой (гибкой) нагревателей.

Для устранения указанных выше недостатков проведены работы по оптимизации химического состава, технологии металлургического передела и термической обработки фехралей.

На жаростойкой стали типа Х23Ю5 вместо титана опробован легирующий комплекс ниобий–ванадий–барий [3]. Использование в качестве карбидо- и нитридообразователей ванадия и

ниобия обеспечило в жаростойкой стали подавление механизма образования высокохромистых карбидов типа Cr_{23}C_6 по границам зерен. Это стало возможным за счет связывания этими элементами примесных атомов углерода и азота в мелкодисперсные карбиды и нитриды ниобия и ванадия в широком диапазоне температур начиная от 1327°C с благоприятной округлой формой и равномерным их распределением. Добавка бария рафинирует сталь от вредных примесей и газов путем связывания их в химические соединения и удаления со шлаком. Такое комплексное воздействие введенных легирующих элементов позволяет существенно повысить пластичность жаростойкой стали в холодном состоянии – основной ее технологической характеристики.

Кроме того, совместное легирование ванадием и ниобием улучшает сопротивление стали высокотемпературной коррозии особенно в условиях воздействия агрессивных газовых сред, повышая жаростойкость – основную ее эксплуатационную характеристику. Карбиды ниобия способствуют также повышению жаропрочности стали при температурах свыше 950°C и активно препятствуют росту зерен в процессе эксплуатации.

В результате исследований разработана новая марка жаростойкой стали 03Х22Ю5БФч. Для оценки ее технологических и эксплуатационных свойств проведены сравнительные испытания с известной жаростойкой сталью Х23Ю5Т.

Сопоставимые испытания механических свойств сталей Х23Ю5Т и 03Х22Ю5БФч проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 10994-74 (табл. 1).

Таблица 1. Результаты испытаний механических свойств

Марка стали	Диаметр проволоки, мм	Вид деформации	Термообработка проволоки	Механические свойства		
				σ_b , МПа	δ_{200} , МПа	ψ , %
Х23Ю5Т	7,0	Холодное волочение	850°C , вода	650–660	11–16	30–40
03Х22Ю5БФч	8,5	Холодное волочение	850°C , вода	630–640	19–21	60–65

Предел прочности и относительное удлинение сплавов Алюхром 0 (фирма VDM, Германия) и Кантал А (фирма «Кантал», Швеция) имеют следующие значения: $\sigma_b \geq 600$ МПа, $\delta_{200} \geq 12$ %, $\sigma_b > 635$ МПа и $\delta_{200} \geq 12$ % соответственно.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что использованная в стали 03Х22Ю5БФч схема легирования позволила снизить характеристики прочности и существенно повысить пластичность в холодном состоянии. Как выяснилось в процессе исследований, для этих материалов весьма важным и показательным является относительное сужение, характеризующее способность материала к местной пластической деформации, например гибке при изготовлении зигзагообразных нагревателей.

При испытании механических свойств первых партий проволоки как из стали Х23Ю5Т, так и стали 03Х22Ю5БФч получали нестабильные результаты. Например, после горячей прокатки

и термической обработки проволока из стали 03Х22Ю5БФч диаметром 10 мм имела свойства: $\sigma_b = 630-690$ МПа, $\delta_{200} = 5,0-9,3$ %, $\psi = 5,0-15,0$ %. После холодного волочения (диаметр 10 мм на диаметр 8,5 мм), закалки от 850 °С в воде относительное удлинение практически не изменилось и составило $\delta_{200} = 6,0-7,0$ %. Основными причинами, снижающими пластичность исследуемых сталей, как выяснилось, являются неполная рекристаллизация как после горячей, так и холодной деформации и, вероятно, фазовые превращения, протекающие при проведении разупрочняющей термической обработки.

Фазовые превращения, происходящие при термообработке, исследовали с помощью дилатометрического метода (дилатометр Шевенара).

Охлаждение образцов, нагретых до 1000 °С, проводили по двум режимам: медленно с печью и ускоренно на воздухе. Дилатограммы стали Х23Ю5Т представлены на рис. 1.

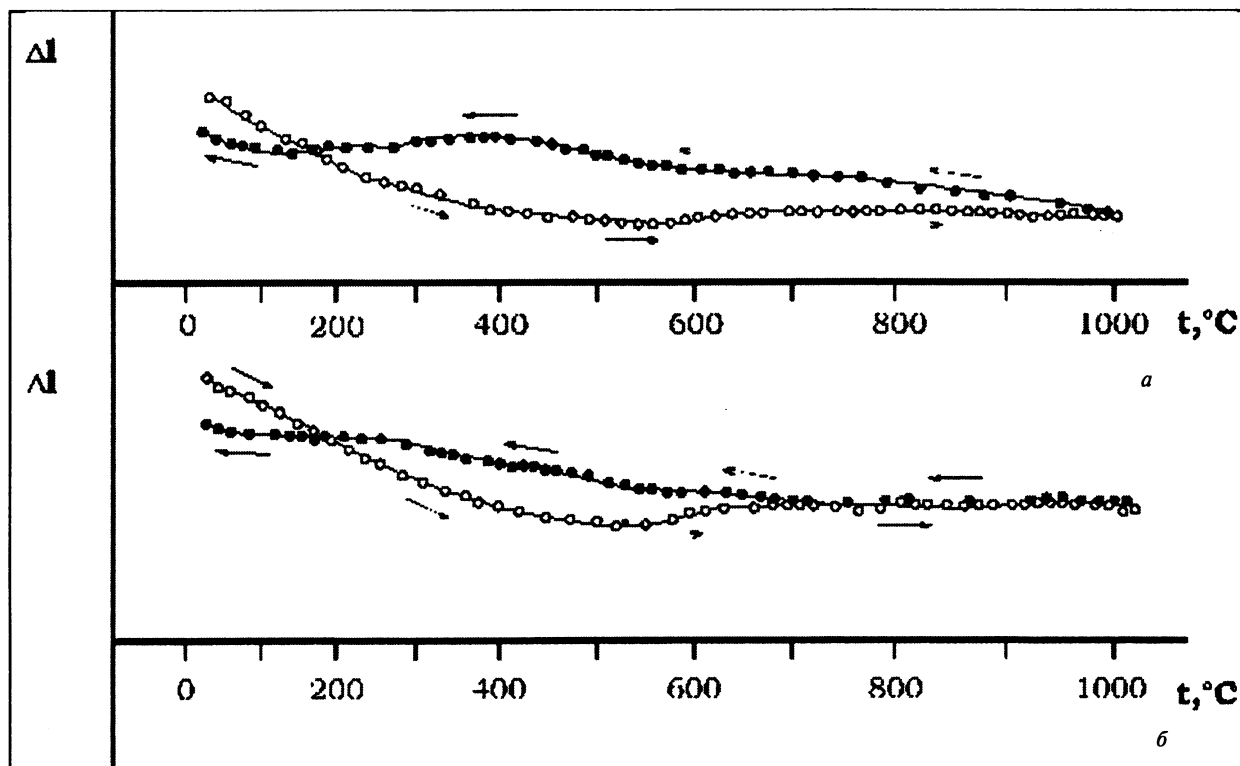


Рис. 1. Дилатограммы стали Х23Ю5Т: а – охлаждение на воздухе; б – охлаждение с печью

При анализе дилатограмм и изучении фазовых превращений в исследуемых сталях использована диаграмма состояния Fe–Cr [1, 4], в соответствии с которой при содержании в сплаве 22–23 % Cr в равновесном состоянии при разных температурах находятся фазы:

- α -фаза – твердый раствор, содержащий 22–23 % хрома (при температуре выше 720 °С);
- α -фаза – твердый раствор, обедненный хромом (при 440 °С около 8 % Cr);
- α' -фаза – твердый раствор, обогащенный хромом (при 440 °С около 87 % Cr);

• σ -фаза (интерметаллид FeCr) – фаза переменного состава, выделяющаяся в сталях рассматриваемого химического состава при охлаждении ниже 710–680 °С.

При дальнейшем охлаждении при температуре 440 °С происходит эвтектоидное превращение: $\sigma_{49\%Cr} D\alpha_{8\%Cr} + \alpha'_{87\%Cr}$. Наличие алюминия и титана в стали Х23Ю5Т, алюминия, ниобия и ванадия в стали 03Х22Ю5БФч оказывает влияние на температуры превращений и концентрацию хрома в фазах, но принципиально не изменяет сущность превращений.

На кривых нагрева образцов из стали X23Ю5Т (рис. 1, а, б) при температуре около 475 °С имеется перегиб, свидетельствующий об увеличении размеров образцов, обусловленный протеканием эвтектоидного превращения ($\alpha + \alpha'S\sigma$) и образованием σ -фазы. При температурах свыше 700 °С наблюдается снижение темпов увеличения длины образцов, связанное с растворением σ -фазы. При более высоких температурах в сталях имеются α -фаза и карбиды хрома и титана.

При охлаждении на воздухе (рис. 1, а) до температуры 670 °С не фиксируется образование

новых фаз. В интервале температур 600–420 °С происходит увеличение длины образцов, обусловленное выделением частиц σ -фазы, а при температурах ниже 400 °С — уменьшение длины образцов, как следствие, эвтектоидного превращения и распада σ -фазы.

Дилатогаммы образцов стали 03Х22Ю5БФч (рис. 2) принципиально не отличаются от дилатогамм стали X23Ю5Т, а это значит, что в ней происходят те же фазовые превращения. Различие в легировании вызывает лишь незначительные изменения в температурах начала и завершения фазовых превращений.

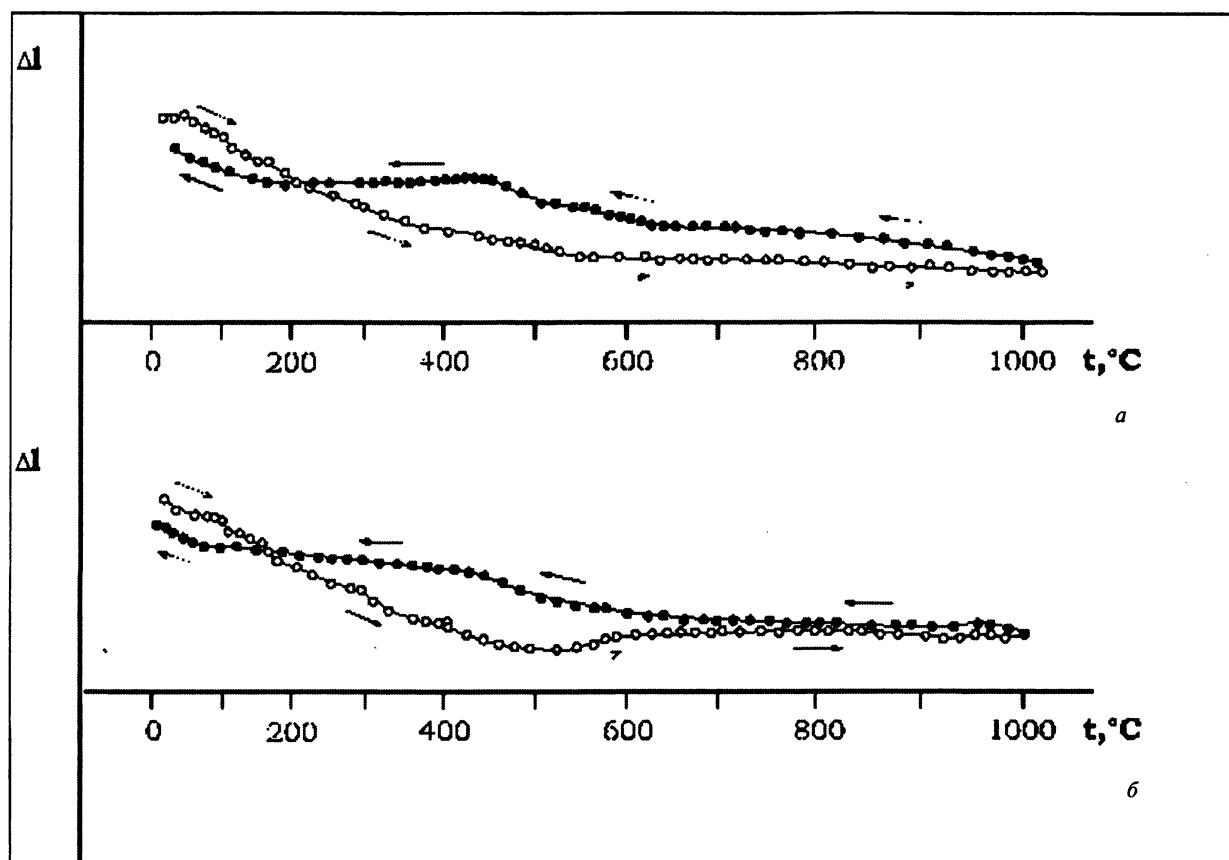


Рис. 2. Дилатогаммы стали 03Х22Ю5БФч: а — охлаждение на воздухе; б — охлаждение с печью

Таким образом, замедленное охлаждение проволоки после рекристаллизационного отжига при 850 °С приводит к образованию σ -фазы, ее распаду по эвтектоидной реакции, охрупчиванию фехралей и снижению их пластичности. Поэтому используемое для этой термической обработки оборудование должно обеспечивать фиксацию состава α -твердого раствора, характерного для температуры 850 °С.

Выводы

Сталь 03Х22Ю5БФч в сопоставлении со сталью X23Ю5Т имеет ряд существенных преимуществ: пониженную прочность; более высокие значения относительных удлинения и сужения; при обеспечении качественной поверхности и оптимальной микроструктуры стали 03Х22Ю5БФч

возможно изготовление нагревателей из проволоки диаметром 7,0–8,5 мм без промежуточного подогрева, что совершенно невозможно для известных фехралей производства стран СНГ и иностранных фирм.

Литература

1. Сплавы для нагревателей / Л. Л. Жуков, И. М. Племянникова, М. Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985.
2. Электротермическое оборудование: Справ. / Под ред. А.П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980.
3. Мищенко В. Г., Бялик Г. А., Омельченко О. С. Высокоэффективные легирующие комплексы для хромистых коррозионностойких сталей // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Сб. науч. тр. Запорожье: ЗГТУ, 1998. С. 187–190.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справ.: В 3 т. Т2 / Под ред. Н. П. Лакишева. М.: Машиностроение, 1997.