

УДК 620.172:620.178

## ОСОБЕННОСТИ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧНОГО И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Член-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И.,  
канд. техн. наук, доц. СНАРСКИЙ А. С., канд. техн. наук КРЫЛЕНКО А. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Вопросы надежной эксплуатации различного ответственного оборудования и конструкций были и остаются актуальными. Разработан ряд эффективных методик неразрушающего контроля, позволяющих оценить состояние металла указанных металлических объектов без вырезки образцов из конструкции. Собственными исследованиями установлена возможность и эффективность неразрушающей оценки механических свойств стальных конструкций косвенным методом: по эмпирическим формулам, связывающим параметры отпечатка пирамидального индентора с основными характеристиками механических свойств (пределом прочности, пределом текучести, относительными удлинением и сужением, а также ударной

вязкостью) [1]. Метод хорошо зарекомендовал себя для основных марок конструкционных сталей, используемых для изготовления различных ответственных металлоконструкций. При этом возможность применения переносных твердомеров, позволяющих определять твердость по Виккерсу и соответственно указанные выше механические свойства непосредственно на конструкции без вырезки образцов из нее, делает его действительно эффективным неразрушающим методом контроля. Наряду с указанным методом для неразрушающего определения фактического состояния металла широко используется и полевая металлография, методология которой состоит в оценке структуры материала и степени ее деградации непосред-

ственно на диагностируемой конструкции за счет применения специальных переносных микроскопов. Эффективность указанного метода подтверждена экспериментально, в том числе и собственными исследованиями [1, 2], и узаконена включением в нормативные документы по контролю различного ответственного оборудования и конструкций [3, 4]. Так, в ряде действующих в Республике Беларусь и России нормативных документах по теплоэнергетике [5, 6] деградация структуры теплоустойчивых сталей рассматривается в виде допустимых баллов по соответствующим шкалам деградации (по шкале графитизации стали или по шкале микроповрежденности (наличие микротрещин и пор ползучести).

Целью исследований являлось нахождение (дополнительно к имеющимся) эффективного структурного критерия оценки надежности и безопасности эксплуатации оборудования, изготовленного из теплоустойчивых сталей с использованием метода полевой металлографии. Причина указанного выбора материалов состоит в широком использовании данных сталей в качестве конструкционных для различного оборудования. Так, ряд ответственных элементов конструкций печного и теплоэнергетического оборудования эксплуатируется в жестких условиях при повышенных температурах, давлениях и нагрузках. Для указанных конструкций специально разработаны теплоустойчивые стали, способные длительное время эксплуатироваться при повышенных температурах под нагрузкой.

Деградация микроструктуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей (основными из которых по использованию являются стали 12ХМ, 12МХ, 15Х1МФ, 15Х5М) происходит в процессе длительной эксплуатации при высокой температуре (500–600 °С) или кратковременных перегревах (как правило, выше рекомендуемой температуры эксплуатации, установленной для каждой марки стали). Например, для стали 12ХМ рекомендуемая температура длительной эксплуатации не должна превышать 510 °С, а для стали 15Х5М – 600 °С. Перегрев сопровождается снижением прочност-

ных и пластических характеристик материала, а также деградацией структуры. Подобные изменения в материале крайне нежелательны и опасны, так как могут привести к разрушению элементов конструкций во время эксплуатации [7, с. 150; 8]. Снижение конструкционной прочности стали объясняется коагуляцией карбидной фазы и обеднением по хромом и молибдену твердого раствора из-за перехода их в карбиды [8].

Работоспособное состояние теплоустойчивых хромомолибденовых сталей зависит не только от количества коагулированных карбидов, но и от их размера. Поэтому актуальной задачей является разработка количественного критерия оценки безопасности эксплуатации объектов из теплоустойчивых сталей, структура которых претерпела деградацию из-за длительной эксплуатации. В качестве такого критерия был выбран размер коагулированных карбидов. Для оценки размера коагулированных карбидов, до которого возможна безопасная эксплуатация материала, были исследованы печные змеевики, выполненные из стали 15Х5М (как наиболее типичного представителя группы теплоустойчивых сталей и с учетом максимально возможной ее теплоустойчивости) после различного срока эксплуатации и степени перегрева. Работы выполняли на базе печного оборудования ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк). Наличие коагулированных карбидов в структуре стали 15Х5М и их размер выявляли на образцах, вырезанных из труб змеевиков, а также непосредственно на трубах путем проведения полевой металлографии с использованием переносного микроскопа. Типичные микроструктуры стали 15Х5М приведены на рис. 1.

До эксплуатации сталь 15Х5М имеет структуру, содержащую феррит и равномерно распределенные в нем зернистые карбиды в виде отдельных включений размером до 1 мкм (рис. 1а). Такая структура обеспечивает необходимую теплоустойчивость стали, так как основная часть молибдена находится в феррите, а хром и углерод – в карбидах. Средние значения механических свойств составляют: предел прочности  $\sigma_b = 530$  МПа; относительное удлинение  $\delta_5 = 30$  %, относительное сужение  $\psi = 62$  %, ударная вязкость  $KCU = 3,1$  МДж/м<sup>2</sup>.

В течение длительной эксплуатации при высокой температуре сталь 15X5M сохраняет феррито-карбидную структуру, однако в ней происходят структурные изменения, характеризующиеся обеднением твердого раствора  $\alpha$ -железа (феррита) молибденом, изменением фазового состава карбидов с коагуляцией карбидных частиц [7].

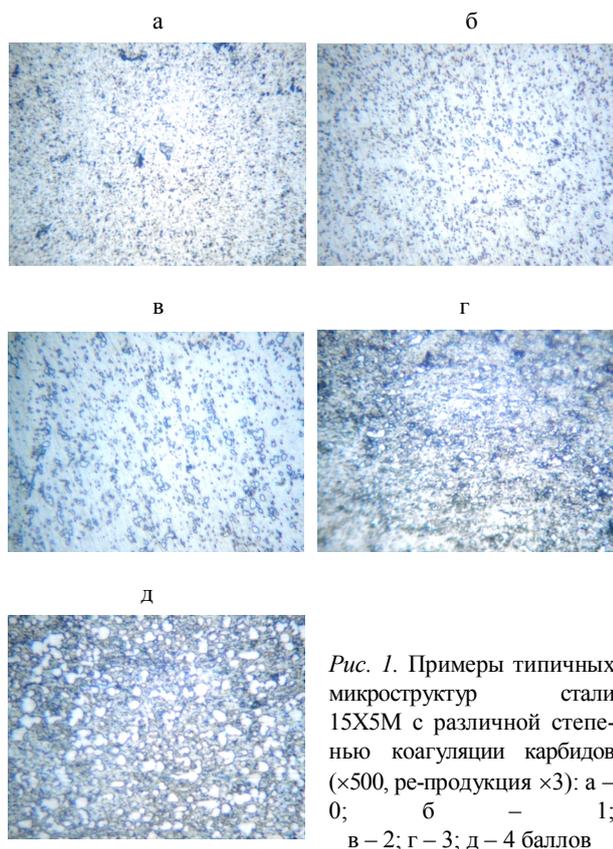


Рис. 1. Примеры типичных микроструктур стали 15X5M с различной степенью коагуляции карбидов ( $\times 500$ , ре-продукция  $\times 3$ ): а – 0; б – 1; в – 2; г – 3; д – 4 баллов

На рис. 1б показана микроструктура, имеющая начальную стадию деградации. Под воздействием высокой температуры происходит перераспределение молибдена в структуре стали: он выделяется из феррита с образованием карбидов. Размер карбидов уже увеличивается и составляет 1–2 мкм. Происходит снижение механических свойств:  $\sigma_b = 495$  МПа;  $\delta_5 = 26$  %,  $\psi = 55$  %,  $KCU = 2,3$  МДж/м<sup>2</sup>.

В дальнейшем происходит коагуляция карбидов и их скопление преимущественно по границам ферритных зерен. При этом по расположению карбидов можно судить о границах зерен. Размер коагулированных карбидов равен 2...4 мкм. Микроструктура стали показана на

рис. 1в. Средние значения механических характеристик:  $\sigma_b = 420$  МПа;  $\delta_5 = 23$  %;  $\psi = 49$  %;  $KCU = 1,8$  МДж/м<sup>2</sup>.

При дальнейшей деградации структуры происходит укрупнение карбидных частиц с образованием цепочек карбидов типа «ожерелья» по границам зерен при одновременном укрупнении карбидных частиц по телу зерен (рис. 1г). Средний размер карбидов равен 5–8 мкм. При этом уже наблюдается значительное снижение механических характеристик по сравнению со свойствами материала без эксплуатации или на начальных этапах эксплуатации:  $\sigma_b = 368$  МПа;  $\delta_5 = 21,5$  %;  $\psi = 43$  %;  $KCU = 1,1$  МДж/м<sup>2</sup>.

На завершающей стадии деградации структуры молибден практически полностью переходит из твердого раствора в карбиды. При этом средний размер карбидов составляет 9–14 мкм, они расположены по всему объему материала (рис. 1д). Как следствие происходит потеря пластичности и теплоустойчивости материала. Это наблюдается даже при механической обработке заготовки из такого материала (для изготовления образцов на растяжение), который хрупко разрушается уже при изготовлении еще без испытаний на растяжение (рис. 2).

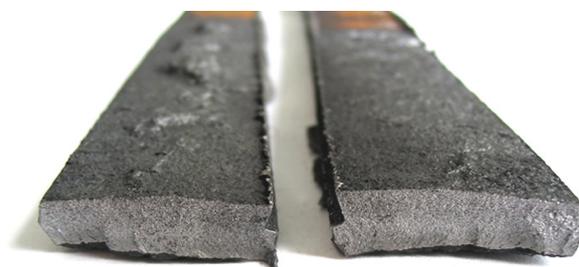


Рис. 2. Хрупкое разрушение образцов из стали 15X5M при механической обработке

Таким образом, очевидно, что чем больше размер коагулированных карбидов в структуре стали 15X5M, тем значительнее степень снижения ее механических и эксплуатационных свойств.

На основании обобщения полученных данных разработана шкала баллов коагуляции карбидов в структуре теплоустойчивых хромомолибденовых сталей (на примере стали 15X5M). Микроструктуры разделены на баллы по среднему размеру коагулированных карбидов. При помощи данной шкалы можно ориентировочно оценивать степень деградации структуры и как

следствие степень старения металла диагностируемой конструкции. В табл. 1 приведены баллы микроструктур, соответствующие им раз-

меры коагулированных карбидов, схемы структурных изменений и средние значения механических свойств материала.

Таблица 1

**Характеристика баллов микроструктур теплоустойчивых хромомолибденовых сталей после длительной эксплуатации (на примере труб печных змеевиков, сталь 15X5M)**

Балл микроструктуры	Характеристика структуры	Средние значения механических свойств			
		$\sigma_v$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
0	Структура – феррит с равномерно распределенными карбидами. Размер карбидов – менее 1 мкм	530	30	62	3,1
1	Структура – феррит и карбиды. Средний размер карбидов – 1–2 мкм	495	26	55	2,3
2	Структура – феррит и коагулированные карбиды, расположенные по границам зерен. Средний размер карбидов – 2–4 мкм	420	23	49	1,8
3	Структура – феррит и коагулированные карбиды, расположенные по границам зерен. Укрупнение карбидов в теле зерна. Средний размер карбидов – 5–8 мкм	368	21,5	43	1,1
4	Структура – феррит и коагулированные карбиды. Карбиды расположены по всему объему стали. Средний размер карбидов – 9–14 мкм	–	–	–	–
Минимально допустимые значения для стали 15X5M (трубы согласно ГОСТ 550)	Не регламентировано	392	22	50	1,18

Проведенный анализ свидетельствует о том, что указанные баллы можно связать с рекомендациями по эксплуатации конструкций из данных теплоустойчивых сталей. Так, при размере коагулированных карбидов в структуре стали 1–4 мкм (баллы 1 и 2) эксплуатация конструкции безопасна; 5–8 мкм (балл 3) – дальнейшая эксплуатация безопасна при условии удовлетворительных результатов механических испытаний и сокращения времени до проведения следующего диагностирования материала; более 9 мкм (балл 4) – диагностируемая конструкция из указанной теплоустойчивой стали подлежит замене (эксплуатация запрещена).

### ВЫВОДЫ

1. Выполненный качественный анализ изменения структуры и механических свойств исследованных сталей после длительной эксплуатации показал, что длительная эксплуатация теплоустойчивых сталей сопровождается, в первую очередь, деградацией структуры: коагуляцией карбидов, которая четко фиксируется металлографией, в том числе и методами полевой

металлографии непосредственно на объекте без вырезки образцов. При этом снижение механических свойств металла ниже минимально допустимых значений явно заметно лишь на последних стадиях коагуляции карбидов (табл. 1).

2. Предложена дополнительная шкала деградации микроструктуры хромомолибденовых сталей, основанная на оценке размера коагулированных карбидов и значений механических свойств металла диагностируемого элемента конструкции (балл от 0 – эксплуатация без ограничений по времени; до 4 – запрещение эксплуатации).

3. Обобщение полученных экспериментальных данных показывает, что анализ микроструктуры сталей непосредственно на элементах оборудования с помощью переносного микроскопа является эффективным экспресс-методом оценки состояния оборудования и конструкций за счет контроля степени деградации структуры материала диагностируемого объекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Пантелеенко, Ф. И.** Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций / Ф. И. Пантелеенко, А. С. Снарский. – Минск: БНТУ, 2010. – 196 с.

2. **Методология** оценки фактического состояния потенциально опасных объектов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Промышленная безопасность. – 2007. – № 10. – С. 16–20.

3. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Минск: ДИЭКОС, 2006. – 203 с.

4. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. – Минск: ДИЭКОС, 2006. – 193 с.

5. **Типовая** инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций / РД 10–577–03. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгорнадзора России», 2003. – 145 с.

6. **Сварка**, термообработка и контроль при ремонте сварных соединений трубных систем котлов и паропроводов в период эксплуатации / РД 34.17.310–96. – М.: НПО ОБТ, 1997. – 134 с.

7. **Ентус, Н. Р.** Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н. Р. Ентус, В. В. Шарихин. – М.: Химия, 1987. – 304 с.

8. **Hill, T.** Heater Tube Life Management / T. Hill // National Petroleum Refiners Association Plant Maintenance Conference 22–25 May, 2000 / ERA Technology. – Houston, 2000. – P. 30–49.

Поступила 31.05.2011

УДК 62.83

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ СИНТЕЗЕ АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ

*Докт. техн. наук, проф. ДУДЯК А. И.,  
канд. техн. наук, доц. ЮДЕНКОВ В. С., асп. ХВАСЬКО В. М.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Белорусский государственный технологический университет*

Процесс синтеза искусственных кристаллов алмаза из графита происходит в присутствии металлов растворителей при высоких давлениях и температурах в течение заданного интервала времени. Для создания таких условий применяются аппараты высокого давления различных конструкций [1]. Наиболее широко известны три типа аппаратов высокого давления: 1) наковальни с углублениями; 2) цилиндрические аппараты, известные как аппараты «белт»; 3) многопуансонные конструкции.

В настоящее время для синтеза алмазов используются наковальни с углублениями различной формы (сферической, конусоподобной и др.), рабочий ресурс которых составляет от нескольких десятков до тысяч рабочих циклов.

В реакционной ячейке аппарата высокого давления, подвергнутой всестороннему сжатию до высокого давления и нагреву, происходят

фазовые превращения, кристаллизация веществ и синтез новых соединений. Одним из основных параметров, определяющих качество и количество полученных кристаллов алмаза, является температурный режим в реакционной ячейке высокого давления. Температура в реакционной ячейке может быть определена непосредственным измерением при помощи термопар или по точкам плавления металлов, помещенных в ячейку [2].

Метод измерения температуры ячейки по точкам плавления металлов является достаточно трудоемким, так как требует проведения многочисленных экспериментов. Точность данного метода невысокая из-за того, что измерение температуры и проведение процесса синтеза осуществляются последовательно, а значит, нет гарантии, что условия останутся неизменными.