

**А. Э. Федосеева**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород

*fedoseeva@bsu.edu.ru*

Руководитель – канд. физ.-мат. наук *Н. Р. Дудова*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИЙ ВОЛЬФРАМА В 9%CR СТАЛЯХ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА В ПРОЦЕССЕ ОТПУСКА**

### **АННОТАЦИЯ**

Высокохромистые стали мартенситного класса с различным содержанием вольфрама (2 и 3 вес.%) были изучены после нормализации с 1050 °С и отпуска при различных температурах (650 °С и 750 °С). Было обнаружено, что в стали с 3 % вольфрама после отпуска при 650 °С вдоль границ исходных аустенитных зерен и мартенситных реек происходит образование сегрегаций вольфрама, что приводит к выделению карбидов  $M_6C$ . Влияние сегрегаций вольфрама на ударную вязкость сталей будет обсуждено.

*Ключевые слова:* высокохромистая сталь мартенситного класса, нормализация, отпуск, ударная вязкость.

### **ABSTRACT**

High-chromium martensitic steels with different W content (2 or 3 wt.%) after normalization at 1050 °C and tempering at different temperatures (650 °C and 750 °C) were investigated. It was found that in steel with 3%W, W atoms did segregate along the boundaries of prior austenite grains and martensitic laths after tempering at  $T = 650$  °C that led to the precipitation of  $M_6C$  carbides. The effect of W segregation on impact toughness will be discussed in detail.

*Key words:* high-chromium martensitic steels, normalization, tempering, impact toughness.

В настоящее время мартенситные стали, содержащие 9–12 % Cr, рассматриваются как перспективные жаропрочные материалы для изготовления элементов котлов и паропроводов для тепловых угольных электростанций, работоспособных при суперсверхкритических параметрах пара (ССКП): 630 °С, 25–30 МПа [1]. Переход на ССКП позволяет повысить КПД сжигания угольного топлива до 45–47 %, а также снизить количество вредных выбросов  $CO_2$  в атмосферу [2; 3].

В качестве материала исследования были выбраны экспериментальные плавки сталей мартенситного класса, отличающиеся друг от друга содержанием вольфрама. Химический состав представлен в таблице.

Таблица

Химический состав изучаемых сталей

| Вес. %        | C    | Cr  | Co  | Mo   | W   | V   | Nb   | B     | N    | Si   | Mn  |
|---------------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-------|------|------|-----|
| Сталь с 2 % W | 0.12 | 9.3 | 3.1 | 0.44 | 2.0 | 0.2 | 0.06 | 0.005 | 0.05 | 0.08 | 0.2 |
| Сталь с 3 % W | 0.12 | 9.5 | 3.2 | 0.45 | 3.1 | 0.2 | 0.06 | 0.005 | 0.05 | 0.06 | 0.2 |

Образцы изучаемых сталей были подвергнуты термической обработке, состоящей из нормализации с охлаждением на воздухе с температуры 1050 °С и отпуска в интервале температур 300–800 °С в течение 3 часов с последующим охлаждением на воздухе. Микроструктурные исследования проводились с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг и углеродных реплик. Анализ фазового состава сталей и идентификация частиц вторых фаз проводились методами энергодисперсионной спектроскопии и идентификации кристаллической решетки. Испытания на определение ударной вязкости KCV проводили на стандартных образцах с V-образным вырезом 2 мм сечением 10×10 мм и длиной 55 мм с использованием маятникового копра «InstronIMP460» при комнатной температуре.

Установлено, что структура исследуемых сталей и их механические свойства обусловлены температурно-временными характеристиками термической обработки. При этом изменения в легировании сталей незамедлительно находят отклик как в структурных изменениях, так и в изменениях механических свойств. Так, увеличение содержания вольфрама с 2 до 3 % привело к существенному снижению величины ударной вязкости (на 180 Дж/см<sup>2</sup>) при температуре отпуска 650 °С (рис. 1). С другой стороны, при температуре 750 °С величины ударной вязкости для обеих сталей становятся практически одинаковыми.

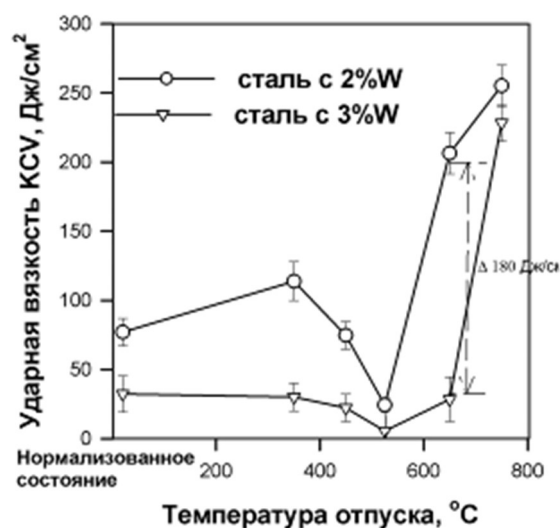


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска

Структурные исследования выявили, что причиной отпускной хрупкости при 500–550 °С в обеих сталях является распад остаточного аустенита вдоль границ исходных аустенитных зерен (ИАЗ) и мартенситных реек с образованием карбидной пленки  $M_{23}C_6$ . В стали с 2 % вольфрама в процессе отпуска при 650 °С происходит распад карбидной пленки на отдельные частицы карбидов  $M_{23}C_6$ , что приводит к значительному повышению ударной вязкости свыше 200 Дж/см<sup>2</sup>. Однако, в стали с 3 %

вольфрама при той же температуре отпуска карбидная пленка сохраняется с частичным образованием отдельных круглых частиц карбидов  $M_{23}C_6$ .

Для объяснения такого поведения карбидной пленки в стали с 3 % вольфрама после отпуска при 650 °С было проведено элементное картирование с использованием ПЭМ. Элементное картирование выявило сегрегации вольфрама в окрестностях частиц  $M_{23}C_6$  и карбидной пленки вдоль границ ИАЗ и рек. Предполагается, что именно сегрегации атомов вольфрама препятствуют распаду карбидной пленки, что ведет к низкой ударной вязкости. С другой стороны, сегрегации атомов вольфрама вдоль границ ИАЗ и рек могут сами по себе быть причиной охрупчивания стали.

При отпуске стали с 3 % вольфрама при 750 °С сегрегаций вольфрама обнаружено не было. Вместо них были выявлены вольфрам-обогащенные частицы двух типов: крупные карбиды  $M_6C$ , являющиеся метастабильными при этой температуре, и мелкие частицы стабильной фазы Лавеса. Карбидная пленка распалась на отдельные частицы карбидов  $M_{23}C_6$ , что привело к существенному повышению ударной вязкости.

В стали с 2 % вольфрама после отпуска при 750 °С также были обнаружены сегрегации вольфрама в окрестностях границ ИАЗ и рек. В тоже время, величина ударной вязкости остается на достаточно высоком уровне, что свидетельствует о том, что сегрегации вольфрама по границам не выступают в качестве главного охрупчивающего фактора.

Таким образом, было обнаружено, что сегрегации вольфрама по границам ИАЗ и рек оказывают косвенное влияние на охрупчивание стали с повышенным содержанием вольфрама путем «торможения» процесса распада карбидной пленки  $M_{23}C_6$  на отдельные частицы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00173).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Abe F. Creep resistant steels / F. Abe, T. U. Kern, R. Viswanathan // Woodhead Publishing in Materials. – 2008– 678 p.
2. Kaybyshev R. O. New Martensitic Steels for Fossil Power Plant: Creep Resistance / R. O. Kaybyshev, V. N. Skorobogatykh, I. A. Shchenkova // Phys. Met. Metall. – 2010. – V. 109. – P. 186–200.
3. Структурные изменения при отпуске в стали 10X9K3B1M1ФБР и их влияние на механические свойства / А. Ю. Кипелова, А. Н. Беляков, В. Н. Скоробогатых, И. А. Щенкова, Р. О. Кайбышев // МиТОМ. – 2010. – № 3. – С. 14–25.