

5. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Sabirov I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity // Scripta Materialia, 2014. – vol. 76. – pp. 13-16.
6. Sanders P.G., Withey A.B., Weertman J.R., Valiev R.Z., Siegel R.W. Residual stress, strain and faults in nanocrystalline palladium and copper // Materials Science and Engineering A, 1995. – vol. 204. – pp. 7-14.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С КАРБИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

**Пташник А.В., Святышева Е.В., Васильева Е.А., Петров С.Н., Кондратьев С.Ю.,
Михайлов М.С.**

*ФГУП «ЦНИИ КМ» Прометей», Санкт-Петербург,
alina_pv@mail.ru*

Для изготовления оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий широко применяют жаропрочные жаростойкие сплавы систем X25H35 (HP type) [1]. Рабочие температуры таких установок достигают 1100–1150°C. Известно, что эксплуатационные свойства этих сплавов определяются наличием упрочняющей сетки дисперсных выделений карбидного или интерметаллидного типа [2]. Исследования последних лет показали, что характер распределения и количественное соотношение упрочняющих фаз в сплавах рассматриваемой группы существенно изменяются при высокотемпературном воздействии [3–5]. Таким образом, для надежного прогнозирования работоспособности рассматриваемых сплавов на основе системы Fe–Cr–Ni необходимы достоверные исследования изменения структуры и морфологии дисперсных выделений в зависимости от длительности температурного воздействия.

На эксплуатационные свойства сплавов X25H35, влияют как количественные содержания карбидных фаз в структуре, так и морфология, элементный и фазовый состав дисперсных включений. Характерный размер включений в этих сплавах составляет 0.2–10 мкм, что позволяет проводить анализ их элементного и фазового состава, объемной доли методами на основе растровой электронной микроскопии рентгеноспектрального микроанализа, дифракции обратноотраженных электронов и количественной обработки изображений [6]. При этом получаемые результаты содержат ряд неопределенностей. Несмотря на достаточно высокую локальность рентгеноспектрального микроанализа, нельзя с абсолютной уверенностью утверждать, что полученный даже для наиболее крупных частиц рентгеновский спектр не содержит аналитического сигнала от окружающей анализируемую частицу металлической матрицы. Для частиц субмикронного размера удается лишь зафиксировать основной элемент. На корректное определение фазового состава сильное влияние оказывает качество приготовленного шлифа, далеко не всегда удается обеспечить отсутствие наклепанного слоя на поверхности дисперсной частицы и металлической матрицы в ее окрестностях.

Для повышения достоверности проводимого анализа дисперсных выделений предлагается приготавливать тонкое, прозрачное для электронов, сечение исследуемых частиц с помощью двулучевой электронно-ионной сканирующей микроскопии. При этом вырезанная сфокусированным ионным пучком тонкая пластинка материала размером 20x15x1 мкм, содержащая сечение исследуемой частицы, извлекается из исследуемого образца с помощью специального микроманипулятора и фиксируется на специальном держателе (рис. 1), который может быть установлен в просвечивающий электронный микроскоп. Затем проводится утонение исследуемого объекта до толщины порядка 100 нм.

Приготовленный указанным способом объект устанавливается в просвечивающий электронный микроскоп, где проводится элементный анализ приготовленных сечений дисперсных выделений с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра, либо спектрометра характеристических потерь энергии электронов. В этом случае локальность определения может быть оценена значением 20–30 нм. Анализ дифрактограмм, полученных от приготовленного сечения, позволяет с высокой достоверностью определить тип и параметры кристаллической решетки, т.е. идентифицировать фазовый состав исследуемого объекта. Электронно-микроскопические изображения высокого разрешения, получаемые в просвечивающем режиме позволяют, исследовать тонкую структуру дисперсных частиц.

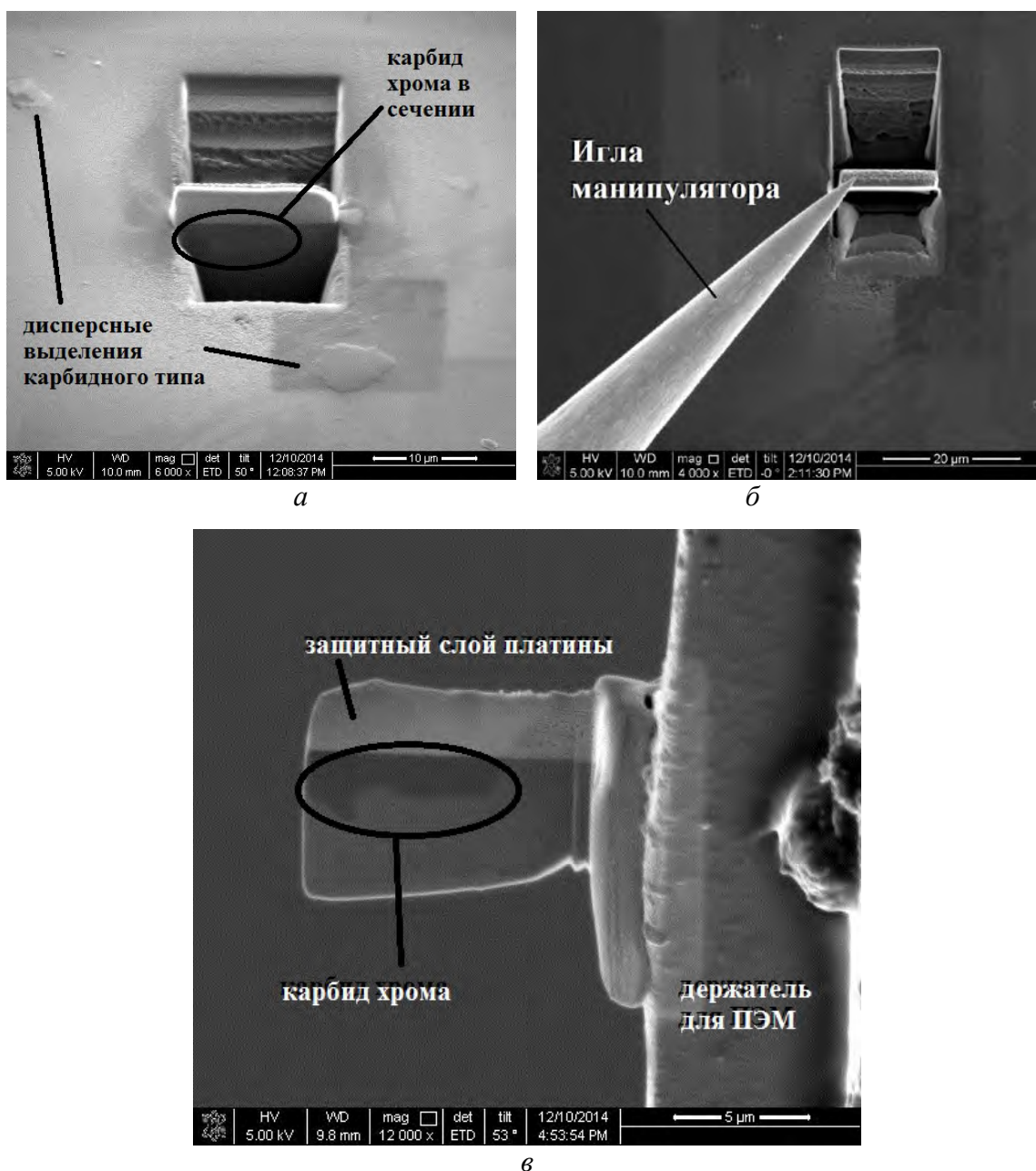


Рис. 1. Схема анализа дисперсных выделений в просвечивающем электронном микроскопе: *а* – тонкая пластинка, содержащая сечение исследуемой частицы, приготовленная для извлечения; *б* – игла микроманипулятора, с помощью которой извлекается тонкая пластинка; *в* – пластинка, зафиксированная на специальном держателе и утоненная до толщины ≈ 100 нм

Предложенным методом выполнены определения элементного и фазового состава карбидных частиц в сплаве 0.45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb в исходном литом состоянии и после высокотемпературной выдержки при 1150 °С в течение 2 часов. Установлено, что в результате высокотемпературной выдержки происходит структурное превращение карбидов хрома $Cr_7C_3 \rightarrow Cr_{23}C_6$. Освободившийся в результате реакции углерод формирует мелкодисперсные вторичные карбиды хрома, в результате чего общий объем карбидных включений в структуре сплава при температурах эксплуатации увеличивается. Получены достоверные результаты элементного анализа дисперсных частиц за счет значительного повышения локальности определения. Установлена поликристаллическая природа частиц карбидов хрома и ниобия, как в исходном литом состоянии, так и после высокотемпературной выдержки.

Применение методов растровой двулучевой электронно-ионной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии дает наиболее полную и достоверную аттестацию структурного состояния дисперсных фаз в жаропрочных сплавах.

Список литературы

1. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution // Archives Of Foundry Engineering. – 2011. – V. 11. – Special Issue 2. – P. 47-52.
2. Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структуры и длительная прочность литого жаропрочного сплава 45X26H33C2B2 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 4 (694). – С. 42-47.
3. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1: Литое состояние // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование»*. – 2012. – № 1 (142). – С. 155-163.
4. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование»*. – 2012. – № 2-1 (147). – С. 217-228.
5. Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 3: Механизм и кинетика фазовых превращений // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование»*. – 2012. – № 3-2 (154). – С. 143-150.
6. Кондратьев С.Ю., Пташник А.В., Анастасиади Г.П., Петров С.Н. Количественная оценка содержания фаз в жаропрочных сплавах X25H35 // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2014. – № 2 (195). – С. 121-127.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Красневский Л.Г.

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
krasnevski_l@tut.by

Как известно, коэффициент полезного действия современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при преобразовании химической энергии топлива в механическую энергию не превышает 30%. И далее ее существенная часть теряется в процессе преобразования в тяговое усилие с помощью различных механизмов трансмиссии. Это значит, что в области глобальной технологии транспорта – одного из главных потребителей энергоресурсов – имеются значительные резервы повышения энергоэффективности.