

Из графика на рис. 3 видно, что среднее значение теплопроводности металлополимера с наполнителем алюминий соответствует значению  $2,4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

Значение рассчитанного значения коэффициента теплопроводности металлополимера говорит о низкой теплопроводности металлополимера, это накладывает на конструктора задачу построения эффективной системы термостатирования.

В заключении следует отметить, что использование металлополимера как конструкционного материала ранее не применялось, а это значит, что материал является малоизученным. Для термостойких металлополимеров отсутствуют рекомендации по назначению режимов механической обработки, способы эффективного термостатирования полученных таким образом пресс-форм, методики улучшения структуры металлополимера. Другими словами, область использования металлополимеров как конструкционных материалов требует дальнейшего тщательного изучения. Комбинирование современных полимерно-композиционных материалов, аддитивных технологий и классической механообработки металлов по мнению авторов является одним из наиболее технологичных методов производства будущего.

#### **Список использованных источников**

1. Бихлер, М. Детали из пластмасс – отлить без дефектов [Текст]/ М. Бихлер. - Гейдельберг: Цехнер, Шпейер. - 1999. - 112 с.
2. Горшкова, Т.А. Возможности современной печати на 3D принтерах / Т.А. Горшкова, П.М. Куландин. // Социальные и технические сервисы: проблемы и пути развития. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – 2015. – 148-150 с.
3. Любимый, Н.С. Влияние времени размешивания металлополимерной композиции на качество поверхности отливки / Н.С. Любимый, М.С. Чепчуров, В.Е. Никольская // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика. – 2015. - С. 153-155.
4. Любимый, Н.С. Влияние применения вакуумирования при отверждении металлополимера на его теплопроводность / Н.С. Любимый, М.С. Чепчуров // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика. – 2015. - С. 159-162.
5. Любимый, Н.С. Влияние разделяющей смазки на качество поверхности отпечатка и сложность извлечения модели из металлополимерной формы / Н.С. Любимый, М.С. Чепчуров, И.А. Тетерина // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика. – 2015. - С. 156-158.
6. Першин, Н.С. Изготовление формообразующих деталей пресс-форм из композиционных материалов / Н.С. Першин, М.С. Чепчуров // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. - №6. – С. 76-81.
7. Першин, Н.С. Использование металлополимеров в пресс-формах для литья пластмасс / Н.С. Першин, М.С. Чепчуров // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. - №4. – С. 86-90.
8. Металлополимеры «ЛЕО». – М.: Издательство «ЗАО Металлополимерные материалы ЛЕО», 2013. – 33 с.
9. Мини-каталог химии WEICON. – М.: Издательство «Офис ЮМП», 2013. – 20 с.
10. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: Учебное пособие / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С. 97.

## **ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ УКРУПНЕНИЯ ЧАСТИЦ ВТОРИЧНЫХ ФАЗ В ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА**

**Никитин И. С., Федосеева А. Э.**

г. Белгород, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,

22.04.01 – «Материаловедение и технологии материалов»

**Аннотация.** В работе было исследовано влияние длительного старения при температурах  $600^\circ\text{C}$  и  $650^\circ\text{C}$  в течение 6876 ч и 9273 ч на фазовый состав и скорость укрупнения частиц вторичных фаз в жаропрочной стали мартенситного класса. Было обнаружено, что повышение температуры старения от  $600^\circ\text{C}$  до  $650^\circ\text{C}$  приводит к значительному увеличению скорости укрупнения частиц фазы Лавеса и карбидов  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ , примерно в 20 и 40 раз, соответственно. Быстрый рост частиц фазы Лавеса при  $650^\circ\text{C}$  сопровождается увеличением соотношения  $\text{Mo} : \text{W}$  в химическом составе частиц. Частицы карбонитридов  $\text{MX}$  устойчивы к росту при старении при обеих температурах.

Высокохромистые мартенситные стали являются материалом для производства элементов котлов, паропроводов и турбин паровых электростанций [1]. Иерархическая структура данных сталей состоит из исходных аустенитных зёрен (ИАЗ), которые подразделены на пакеты, которые, в свою очередь, разделены

на блоки, состоящие из реек, внутри которых наблюдается высокая плотность дислокаций  $\sim 10^{14} \text{ м}^{-2}$ . Границы ИАЗ, пакетов, блоков и реек декорированы частицами карбидов  $M_{23}C_6$ , выделяющихся при отпуске, и частицами фазы Лавеса ( $Fe_2W$ ), выделяющихся в процессе ползучести или длительного старения. Карбонитриды типа MX гомогенно распределены по объёму матрицы. Выделение и рост частиц фазы Лавеса сопровождается обеднением твердого раствора такими элементами, как W и Mo, в результате чего происходит снижение твердорастворного упрочнения и повышение скорости диффузии. Таким образом, образование фазы Лавеса оказывает неоднозначное влияние на механическое поведение стали в процессе ползучести. Некоторые исследователи считают, что выделение данного интерметаллида способствует дисперсионному упрочнению, остальные склоняются к тому, что упрочнение от данных частиц не перекрывает разупрочнение от обеднения твердого раствора [2].

Материалом исследования является сталь 10X9B2MФБР с химическим составом (вес.%):  $Fe_{очн}-0,1C-0,17Si-0,54Mn-8,75Cr-0,51Mo-1,6W-0,23V-0,07Nb-0,04N-0,003B$ . Термическая обработка заключалась в нормализации с  $1050^\circ\text{C}$  с выдержкой в течение 0,5 часа, охлаждение на воздухе, с последующим отпуском при  $780^\circ\text{C}$  в течение 3 часов, охлаждение на воздухе. Образцы были подвержены длительному старению при температурах  $600^\circ\text{C}$  и  $650^\circ\text{C}$  в течение 6876 ч и 9273 ч, соответственно. Исследование тонкой структуры проводилось на просвечивающем электронном микроскопе ПЭМ JEM-2100 с приставкой INCA для энергодисперсионного анализа. Частицы были идентифицированы по химическому составу и посредством дифракционных электронограмм. Равновесные объёмные доли фаз рассчитывались с помощью программного обеспечения Thermo-Calc с использованием базы данных TCFE7.

После отпуска при  $780^\circ\text{C}$  структура представляет собой смешанную структуру троостита отпуска с субзеренной структурой. Средний поперечный размер реек и средний диаметр субзерен составляет около 400 нм. После отпуска при  $780^\circ\text{C}$  были обнаружены частицы карбида  $M_{23}C_6$  и карбонитрида MX со средними размерами 106 нм и 56 нм, соответственно.

В процессе длительного старения при  $600^\circ\text{C}$  и  $650^\circ\text{C}$  происходит образование и рост фазы Лавеса. После старения при  $600^\circ\text{C}$  и  $650^\circ\text{C}$  средний размер частиц составляет 213 нм и 671 нм, соответственно. В то время как частицы карбида  $M_{23}C_6$  укрупняются до 116 нм при  $600^\circ\text{C}$  и до 273 нм при  $650^\circ\text{C}$ . Размер частиц карбонитридов MX не увеличился и составляет 55-60 нм при обеих температурах. Химический состав частиц вторичных фаз после отпуска при  $780^\circ\text{C}$  и длительного старения при  $600^\circ\text{C}$  в течение 6876 ч и при  $650^\circ\text{C}$  в течение 9273 ч представлен на рис. 1.

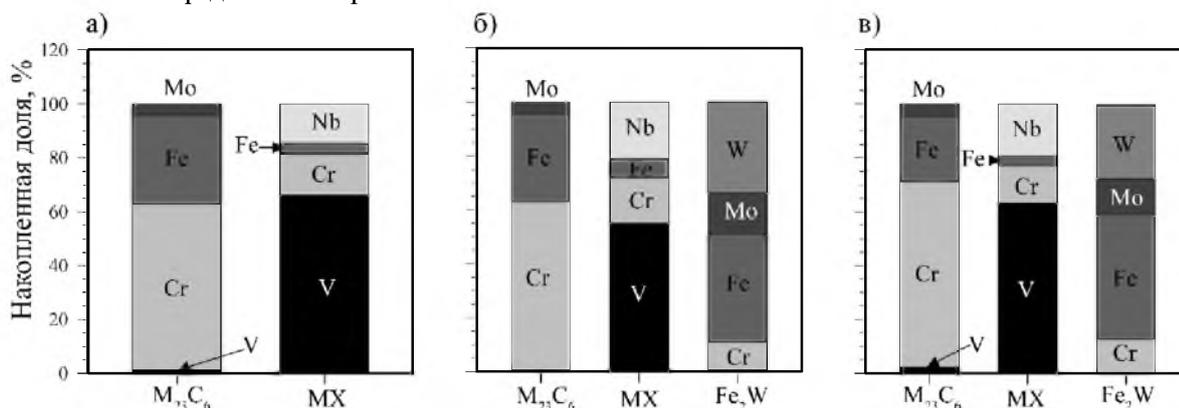


Рисунок 1. Химический состав (в вес.%) частиц вторичных фаз при различных температуре отпуска при  $780^\circ\text{C}$  в течение 3 ч (а) и после длительного старения при  $600^\circ\text{C}$  в течение 6876 ч (б) и  $650^\circ\text{C}$  в течение 9273 ч (в)

Из рис. 1 видно, что химический состав частиц  $M_{23}C_6$  состоит из 65-70 %Cr, 25-30 %Fe, 3-4 %Mo и менее 2 %V. Карбонитриды MX обогащены ванадием (58-64 %) и также содержат 15-20 %Cr, 3-5 %Fe и 20 %Nb. Фаза Лавеса содержит 40-48 %  $\Sigma(W+Mo)$  и 52-58%  $\Sigma(Fe+Cr)$ , при этом соотношение Mo:W возрастает с 0,44 до 0,49 при повышении температуры старения с  $600^\circ\text{C}$  до  $650^\circ\text{C}$ .

Предполагается, что частицы укрупняются механизму Оствальда, когда рост крупных частиц осуществляется за счет растворения мелких частиц [2]. Данный механизм описывается уравнением типа:

$$d^3 - d_0^3 = K_d(t - t_0)$$

где  $d$  и  $d_0$  [м] средние размеры частиц во времени  $t_0$  [с], и  $K_d$  [ $\text{м}^3/\text{с}$ ] – скорость укрупнения. Время  $t_0$  было взято за 0, а размеры частиц после отпуска были взяты за  $d_0$  [3].

Скорости укрупнения частиц в процессе длительного старения при  $600^\circ\text{C}$  и  $650^\circ\text{C}$  представлены в таблице.

Таблица – Влияние температуры длительного старения на скорость укрупнения частиц

Температура старения, °С	$K_d \cdot 10^{-28} \text{ м}^3/\text{с}$		
	$M_{23}C_6$	$Fe_2W$	$MX$
600	0,149	3,903	0,014
650	5,738	90,499	0,008

Из таблицы видно, что повышение температуры старения с 600°С до 650°С вызывает увеличение скорости укрупнения частиц фазы Лавеса и карбидов  $M_{23}C_6$  в 23 и 39 раз, соответственно. Такое значительное влияние температуры старения на скорость укрупнения частиц  $M_{23}C_6$  и фазы Лавеса, вероятнее всего, связано с повышением скорости диффузии W, Mo, Cr и Fe по границам зерен и дислокациям. Для частиц фазы Лавеса влияние температуры старения на скорость укрупнения также, может быть, связано с понижением объёмной доли этих частиц с повышением температуры. Равновесные объёмные доли фазы Лавеса, рассчитанные с помощью программного обеспечения Thermo-Calc, составляют 1,09 и 0,69% для температур старения 600°С и 650°С, соответственно. При этом, снижение объёмной доли частиц приводит к образованию малого количества зародышей фазы Лавеса, что сопровождается увеличением среднего расстояния между частицами. При этом повышение температуры старения на 50°С не приводит к изменению скорости укрупнения карбонитридов MX. Карбонитриды являются устойчивыми к укрупнению в температурном интервале 600–650°С.

Таким образом, длительное старение при 600°С и 650°С в течение 6876 ч и 9273 ч не оказывает влияния на химический состав карбидов  $M_{23}C_6$  и карбонитридов MX. Однако, повышение температуры старения приводит к увеличению соотношения Mo:W в составе фазы Лавеса от 0,44 до 0,49, что, вероятно, связано со снижением объёмной доли частиц при 650°С по сравнению с 600°С. В тоже время повышение температуры старения с 600°С до 650°С приводит к увеличению скорости укрупнения частиц фазы Лавеса в 23 раза и карбидов  $M_{23}C_6$  в 39 раз, в то время как карбонитриды MX стабильны в данном температурном интервале.

#### Список использованных источников

1. Klueh, R. L. (2004) Elevated-Temperature Ferritic and Martensitic Steels and Their Application to Future Nuclear Reactors: report ORNL/TM-2004/176 /– Oak Ridge, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory. – 56 p.
2. Prat O., Garcia J., Rojas D., Carrasco C., Inden G. (2010) Investigation on the growth kinetic of Laves phase precipitates in 12% Cr creep-resistant steel: Experimental and DICTRA calculations – Acta Materialia No. 58– Pp. 6142–6153.
3. Hua Yao J., Eider K. R., GuoHong, Grant M. (1992) Theory and simulation of Ostwald ripening – Physical review b, V. 47. No. 21 – Pp. 14110–14125.

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ВАКУУМНО- ДУГОВЫМ МЕТОДОМ

**Сарбай С.А.**

г. Белгород, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет»,  
22.04.01 – «Материаловедение и технологии материалов»

**Аннотация.** Углеродные алмазоподобные покрытия, в том числе легированные азотом, толщиной порядка 1,0 мкм получены импульсным вакуумно-дуговым методом на подложках из твердого сплава. Исследовали три типа покрытия: углеродное алмазоподобное покрытие, углеродное покрытие, легированное азотом и комбинированное покрытие на основе слоев. Покрытия подвергали отжигу в атмосфере воздуха при температуре 400 °С. Исследовали трибологические характеристики (износостойкость и динамику изменения коэффициента трения), адгезионную прочность и микротвердость покрытий в исходном состоянии и после отжига. Для исследования структурных изменений, вызванных температурным воздействием, применяли спектроскопию комбинационного рассеяния. Установлены особенности изменения этих характеристик в результате отжига.

#### Введение.

Тонкие твердые покрытия на основе нитридов, карбидов, окислов металлов, а также углерода применяются для модифицирования поверхности различных инструментов и деталей точного машиностроения с целью повышения их характеристик: твердости, снижения коэффициента трения, устойчивости к высокотемпературному окислению и т. д. Методы физического осаждения этих покрытий (PVD) имеют много преимуществ, в частности более низкую температуру деталей в процессе осаждения покрытия, а также экологическую безопасность, так процесс реализуется в вакуумной камере без выброса в атмосферу вредных