

Нетрадиционные подходы к созданию радиационно-стойких реакторных сталей

Сагарадзе В.В., Шабашов В.А., Литвинов А.В., Козлов К.А., Лапин С.С., Алябьев В.М.



Реализованы нетрадиционные подходы к повышению функциональных свойств реакторных нержавеющей сталей (жаропрочность, сопротивление порообразованию) и улучшению технологической схемы их производства. Повышение стойкости против радиационного распухания обеспечивается формированием прямых и косвенных стоков точечных дефектов в сплавах в виде межфазных границ аустенит / мартенсит, γ' -фаза / матрица, оксид / матрица.

Для работающих и строящихся реакторов на быстрых нейтронах (БН-600, БН-800) требуется создание новых радиационных сталей со специальными свойствами (в частности, для оболочек тепловыделяющих элементов - ТВЭЛов), способных обеспечить большее выгорание ядерного топлива.

В работе показана возможность резкого снижения вакансионного порообразования в процессе облучения нержавеющей сталей высокоэнергетическими частицами при введении в сталь большого количества прямых или косвенных стоков точечных дефектов. Этими стоками могут быть, в частности, межфазные аустенитно-мартенситные границы α/γ (стали типа X16H9M2) или границы дисперсных интерметаллидов, образующихся под облучением (γ' -Ni₃Ti и α' -Fe-Cr фаз в сталях с ГЦК и ОЦК решетками, соответственно). Предложены стойкие против нейтронного облучения и тритиевого охрупчивания стали с интерметаллидным старением (например, сталь X16H15M3T1 (ЭИ-163). При дозе нейтронного облучения 60сна и рабочей температуре 500⁰С эта сталь распухает почти на порядок меньше, чем малотитановые или беститановые реакторные стали (рис.1).

В настоящее время получает распространение механическое легирование сплавов, целью которого, является создание дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) (oxide dispersion strengthened - ODS) реакторных сталей с повышенными характеристиками прочности и жаропрочности.

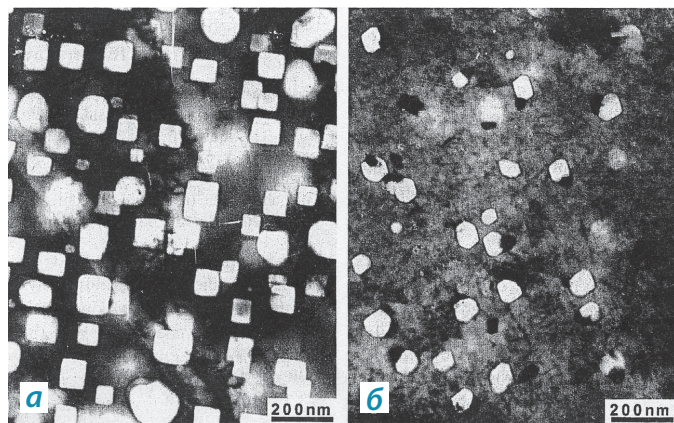


Рис.1

Поры в стали без титана (а - распухание более 4%) и в стали X16H15M3T1 с 1% титана (б - распухание ~0,6%) после нейтронного облучения в реакторе БН-600 (доза 60сна, 500⁰С).

Известно, что при создании высокопрочных ODS-сталей требуется получение нанооксидов иттрия диаметром 2-4 нм в процессе отжига. Для этого необходимо предварительное растворение достаточно крупных (диаметром 30-40нм и более) труднорастворимых исходных оксидов Y₂O₃ в стальной порошковой матрице в процессе длительной холодной деформации (десятки часов в шаровой мельнице). В ходе деформации формируется большое количество точечных дефектов, и в сплавах железа становится возможным низкотемпературный (~300К) деформационно-индуцированный транспорт атомов на расстояния, значительно превышающие межатомные. Последующий нагрев (например, при спекании) механически легированного кислородом и иттрием порошка стали

приводит к выделению нанооксидов Y_2O_3 или Y_2TiO_5 диаметром 2-4 нм, которые резко увеличивают жаропрочность стали, так как эти оксиды термически стабильны и не растворяются в матрице при нагреве до 1100-1200°C.

Новый принцип получения ODS-сталей заключается в том, что в качестве носителя кислорода при механическом легировании используются не труднорастворимые оксиды иттрия с высокой энергией межатомной связи, а малоустойчивые оксиды железа. В результате сильной холодной деформации (например, сдвигом под давлением) в порошковых смесях оксидов Fe_2O_3 (Fe_3O_4) и специально легированных иттрием и титаном реакторных сталей наблюдается растворение оксидов железа с формированием пересыщенного кислородом твердого раствора Fe-O при существенно меньших временных затратах. Избыточный кислород в матрицах легированных сталей образует упрочняющие дисперсные нанооксиды Y_2TiO_5 при последующем отжиге (рис.2).

Таким образом, в работе предложена улучшенная технологическая схема производства новых ODS-сталей. Из дисперсионно-твердеющей стали X16H15M3T1 с интерметаллидным старением изготовлены особотонкие оболочки ТВЭЛов для дальнейших высокодозных испытаний на промышленном реакторе БН-600. Совместно с ВНИИНМ предложен вариант модернизации единственной работающей в быстрых реакторах аустенитной стали ЧС-68 путем увеличения концентрации Ti и Si с целью радиационно-индуцированного выделения интерметаллидов $Ni_3Ti(Si)$, сдерживающих радиационное распухание.

Более подробно с представленными результатами и выводами можно ознакомиться в публикациях^[1-3]

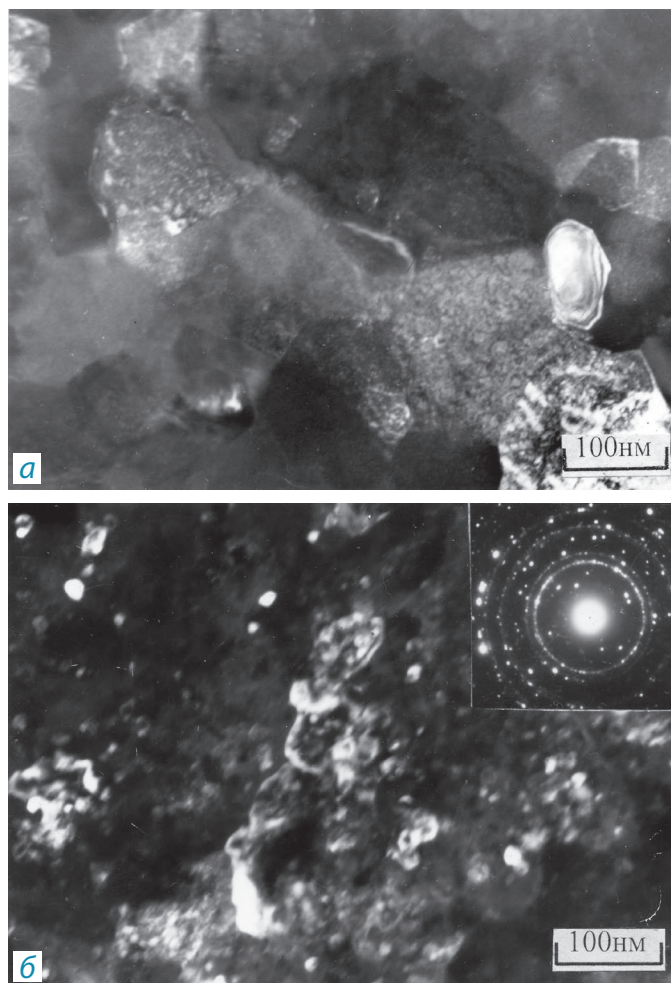


Рис.2

Структура ODS-стали, полученной из смеси порошков оксидов Fe и сплава Fe-Y-Ti : в результате сильной холодной деформации ($\epsilon \sim 8$) сдвигом под давлением 8 ГПа и последующего отжига (970K) - а, б – темное поле в составном рефлексе от вторичных оксидов и железной матрицы.

¹ Сагарадзе В.В., Лапин С.С. ФММ, 1997, т. 83, №4, с. 129-144.

² Сагарадзе В.В., Гощицкий Б.Н., Арбузов В.Л., Зуев Ю.Н. Металловедение и термическая обработка металлов, 2003, №8, с. 13-20.

³ Сагарадзе В.В., Литвинов А.В., Шабашов В.А., Вильданова Н.Ф., Мукошеев А.Г., Козлов К.А. ФММ, 2006, т.101, № 6, с. 618-629.