

УДК 621.7

СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ ТРЕХСЛОЙНОГО МАТЕРИАЛА СТАЛЬ – ВАНАДИЕВЫЙ СПЛАВ – СТАЛЬ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ*

*Нечайкина Т.А., к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики
прочности (nechaykinata@gmail.com)*

*Никулин С.А., д.т.н., заведующий кафедрой металловедения и физики
прочности (nikulin@misis.ru)*

Рогачев С.О., к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности (csaap@mail.ru)

*Турилина В.Ю., к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики
прочности (veronikat77@gmail.com)*

Баранова А.П., учебный мастер (sashulka.baranova2009@yandex.ru)

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)**

Аннотация. Создание нового конструкционного материала для оболочек ТВЭЛ атомных реакторов на быстрых нейтронах является актуальной задачей современной атомной энергетики. В последние годы был разработан трехслойный радиационноустойчивый и коррозионноустойчивый материал на основе ванадиевого сплава и коррозионной стали, потенциально удовлетворяющий требованиям работы оболочек ТВЭЛов быстрых реакторов в сверхжестких условиях эксплуатации (высоких температур, радиационного облучения и агрессивных сред). Важнейшим аспектом, определяющим работоспособность этого материала при эксплуатации, является качество соединения слоев различных материалов между собой, определяемое режимами деформационно-термической обработки. В настоящей работе изучено влияние отжига на химический состав, структуру и сопротивление разрушению зоны соединения ванадиевого сплава со сталью в трехслойной трубе сталь – ванадиевый сплав – сталь, полученной совместным горячим прессованием трехслойной трубной заготовки при 1100 °С. В качестве компонентов трубы использовали сталь 20Х13 для наружных слоев и ванадиевый сплав V–4Ti–4Cr для сердцевины. Структуру и химический состав в зоне соединения слоев исследовали методами оптической микроскопии и электронной микроскопии с микро-рентгеноспектральным анализом. Прочность зоны соединения сталь – ванадиевый сплав оценивали при испытании на сжатие кольцевого трехслойного образца с надрезом с измерением акустической эмиссии (АЭ). Показано, что при совместном прессовании между ванадиевым сплавом и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия переменного химического состава толщиной 10 – 15 мкм, которая представляет собой непрерывный ряд твердых растворов, без выделения хрупких фаз, что обеспечивает прочное соединение в трехслойном материале. На границе соединения сталь – ванадиевый сплав пор, расслоений и дефектов не обнаружено. Однако при испытании на сжатие полукольцевых трехслойных образцов с надрезом после совместного горячего прессования в стальном слое в вершине надреза образуется трещина. Отжиг при температуре 800 °С благоприятно влияет на формирование «переходной» зоны за счет увеличения толщины зоны диффузионного взаимодействия, вследствие чего при механических испытаниях трехслойный материал ведет себя как монолит без образования трещин и расслоений на границе между стальным и ванадиевым слоями.

Ключевые слова: трехслойные трубы, коррозионноустойчивые стали, ванадиевые сплавы, микроструктура, деформация, разрушение, трещина, акустическая эмиссия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-447-453

Создание новых конструкционных материалов, предназначенных для работы в условиях агрессивных сред, повышенных температур, радиационного облучения, механического воздействия, является актуальной задачей современного материаловедения [1 – 6]. Такие материалы применяются и для изготовления оболочек ТВЭЛов атомных реакторов нового поколения на быстрых нейтронах (БН), работающих в замкнутом ядерном

топливном цикле (ЗЯТЦ) [7, 8]. Существующие конструкционные материалы (стали аустенитного и феррито-мартенситного классов) не способны обеспечить полноценную работу оболочек ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах в режиме ЗЯТЦ (длительный срок эксплуатации, высокие повреждающие дозы) [9, 10].

Перспективными конструкционными материалами являются ванадиевые сплавы типа V – (5 ÷ 10) % Ti – (4 ÷ 6) % Cr. Такие сплавы обладают рядом преимуществ по сравнению со сталями аустенитного и феррито-мартенситного классов: прежде всего высокой кратковременной и длительной прочностью при температурах до 700 °С и высокой радиационной

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор № RFMEFI57815X0139).

стойкостью [11, 12]. Сдерживающим фактором использования жаропрочных и радиационноустойчивых сплавов системы V–Ti–Cr в качестве конструкционного материала в атомной энергетике является их охрупчивание при взаимодействии с кислородом и азотом при температурах выше 400 °С [13–17]. Из-за высокой химической активности ванадиевых сплавов и их способности интенсивно растворять кислород и азот их поверхности надо защищать коррозионноустойчивыми материалами, например, путем создания многослойных композиций.

В последние годы был разработан трехслойный радиационноустойчивый и коррозионноустойчивый материал на основе ванадиевого сплава и коррозионной стали, потенциально удовлетворяющий требованиям работы в сверхжестких условиях [18, 19]. Прочность трехслойного материала определяется структурой и качеством соединения «переходной» зоны на границе сталь – ванадиевый сплав [19], что, в свою очередь, определяется режимами деформационно-термической обработки.

Целью настоящей работы является исследование структуры, химического состава и процесса разрушения «переходной» зоны образцов трехслойной трубы сталь 20X13 – сплав V–4Ti–4Cr – сталь 20X13 непосредственно после совместного горячего прессования, а также после последующего отжига.

Трехслойная труба была получена из трубных заготовок ванадиевого сплава V–4Ti–4Cr как материала основы (сердцевины) и стали 20X13 как материала покрытия с внутренней и наружной стороны [18].

Изготовление трехслойной трубы включало следующие этапы: сборка составной трехслойной заготовки по схеме «труба в трубе» сталь 20X13 – сплав V–4Ti–4Cr – сталь 20X13; совместное горячее прессование, отжиг.

Прессование трехслойной трубы проводили при температуре 1100 °С на вертикальном гидравлическом прессе типа ПА 8340. Полученная труба была разрезана электроискровой резкой на кольцевые фрагменты, которые подвергли термической обработке (вакуумный отжиг в течение 2 ч при температуре 800 °С с медленным охлаждением в печи). Диаметр трехслойной трубы после прессования составил $65 \pm 0,2$ мм, толщина стенки $16,0 \pm 1,5$ мм, толщина стального покрытия внутри и снаружи $1,6 \pm 0,2$ мм.

Сравнительное исследование химического состава, структуры и прочности соединения переходной зоны проводили на кольцевых образцах непосредственно сразу после прессования и на образцах, подвергнутых отжигу после прессования.

Металлографические поперечные шлифы трехслойных образцов изготавливали на шлифовально-полировальной машине Buehler Vector Phoenix с использованием абразивной бумаги разной дисперсности (с постепенным уменьшением зернистости абразива) и абразивной суспензии для заключительной полировки (размер абразивных частиц 0,05 мкм).

Для исследования структуры на поперечных шлифах использовали травитель следующего состава: 30 % H₂O + 30 % HNO₃ + 30 % HCl + 10 % HF. Исследования структуры проводили на оптическом микроскопе AxioObserver D1m CarlZeiss в режиме отраженного света при увеличениях 200 – 1000.

Исследования фазового состава и распределения химических элементов в зоне соединения ванадиевого сплава и стального покрытия проводили методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе JSM-6610 LV (JEOL) с энергодисперсионным анализатором Advanced AZtec. Данные получали в виде концентрационных профилей распределения химических элементов. Этот же микроскоп использовали также для детального исследования микроструктуры границы соединения между ванадиевым сплавом и сталью в образцах трехслойного материала (в режиме отраженных электронов при увеличениях 1000 – 5000).

Одним из основных требований к трехслойному материалу является прочное соединение слоев, которое обеспечивает монолитность материала [19]. Для оценки прочности сцепления между ванадиевым сплавом и сталью проводили испытания на сжатие полукольцевых образцов прессованной трехслойной трубы (с боковым надрезом глубиной 1 мм со стороны внешнего стального слоя) в неотожженном и отожженном состояниях (рис. 1).

Испытания на сжатие проводили при комнатной температуре на машине Instron 150LX при скорости деформирования 1 мм/мин с максимальным смещением захватов испытательной машины 4 мм с записью диаграмм нагрузка – смещение и акустической эмиссии (АЭ). Регистрацию сигналов АЭ осуществляли пьезодатчиком GT300, который крепили через слой глицерина непосредственно на образец. Сигналы от датчика поступали в модульную измерительную платформу NI PXIe-1082 DC. Оцифрованные сигналы записывали высокоскоростным модулем HDD-8261. Средний уровень технологических шумов аппаратуры составил примерно 10 мВ, динамический диапазон 7 В. Обработку сигналов АЭ проводили в среде LabVIEW 2016 [20]. Диаграммы нагрузка – смещение и АЭ-диаграммы совмещали по меткам времени.

Микроструктура. Установлено, что слой стального покрытия равномерно распределен по всей внутренней и внешней поверхности трехслойной трубы; на границе соединения сталь – ванадиевый сплав не обнаружено пор, расслоений и каких-либо включений второй фазы.

Микроструктура стального слоя по сечению трехслойных образцов во всех состояниях представлена на панорамных изображениях (рис. 2). Структура стального слоя трехслойной трубы после горячего прессования при 1100 °С неоднородная по сечению (рис. 2, а). Вблизи границы с ванадиевым сплавом зарождается мелкое зерно феррита размером до 10 мкм. Со стороны сталь-

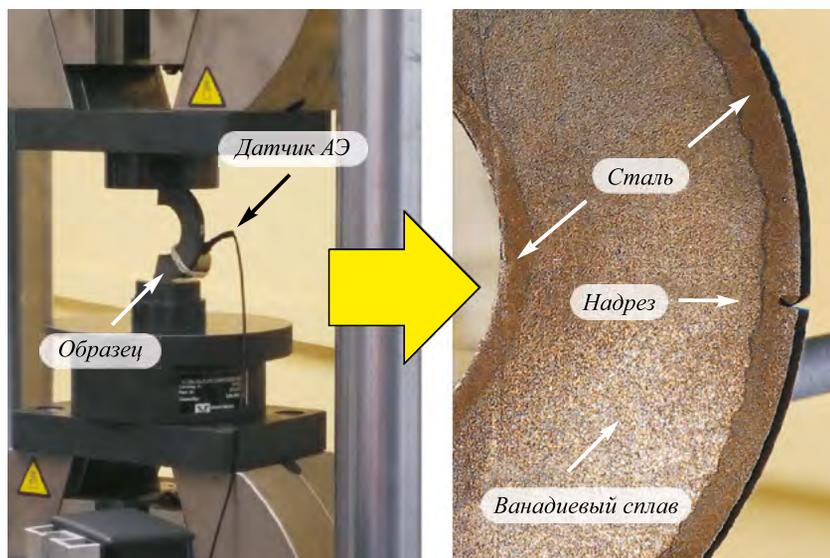


Рис. 1. Испытание на сжатие полукольцевого трехслойного образца с надрезом с регистрацией АЭ

Fig. 1. Compression test of a notched semi-ring three-layer sample with AE registration

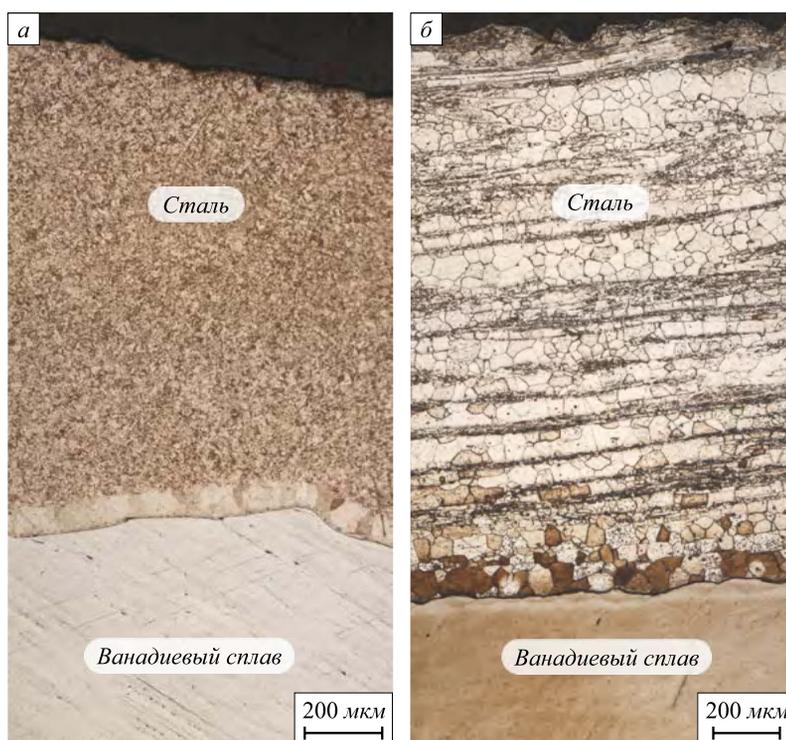


Рис. 2. Изменение структуры стального слоя по сечению трехслойной трубы сталь – ванадиевый сплав – сталь (оптическая микроскопия) после горячего прессования (а) и после горячего прессования и отжига при 800 °С в течение 2 ч (б)

Fig. 2. Change of the steel layer structure along the cross-section of steel/vanadium alloy/steel three-layer tube (optical microscopy) after co-extrusion (a); after co-extrusion and annealing at 800 °C, 2 hours (b)

ного слоя вблизи границы соединения был обнаружен слой с радиально ориентированными крупными зернами феррита размером до 65 мкм. В направлении внешней поверхности размер зерна феррита в стальном слое увеличивается до 60 мкм: формируется сорбит. После отжига при 800 °С в результате рекристаллизации на границах старых, деформированных зерен происходит

зарождение новых мелких зерен феррита. Также видны полосы деформации. В структуре центрального ванадиевого слоя трехслойной трубы после горячего прессования присутствуют вытянутые зерна с небольшим количеством рекристаллизованных зерен (менее 20 %). Отжиг при температуре 800 °С не приводит к изменению структуры ванадиевого сплава, поскольку темпе-

ратура рекристаллизации ванадиевого сплава несколько выше.

Анализ микроструктуры вблизи границы соединения между сталью 20Х13 и ванадиевым сплавом V–4Ti–4Cr показал, что после совместного прессования при 1100 °С и последующего отжига при температуре 800 °С наблюдается формирование «переходной» зоны, отличающейся по травимости от стали и ванадиевого сплава. Ширина этой зоны увеличивается с ростом температуры отжига.

Распределение химических элементов. Методом СЭМ с микрорентгеноспектральным анализом исследовано изменение химического состава вблизи границы соединения (75 мкм от границы сталь – ванадиевый сплав) путем построения концентрационных профилей химических элементов (рис. 3).

Видно, что после совместной деформации трехслойного материала сталь – ванадиевый сплав – сталь при 1100 °С глубина диффузии ванадия в сталь составляет около 7 – 10 мкм, между сплавом ванадия и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия шириной не менее 10 – 15 мкм, представляющая собой непрерывный ряд твердых растворов с переменным химическим составом. Отжиг при температуре 800 °С в течение 2 ч приводит к увеличению ширины «переходной» зоны до 22 мкм. При диффузионном перераспределении элементов в про-

цессе совместной деформации и последующего отжига в переходной зоне не образуются карбидные и другие хрупкие фазы.

Механические испытания. Диаграммы деформации при сжатии полукольцевых образцов трехслойных труб, совмещенные с АЭ-диаграммами, показаны на рис. 4. Метод АЭ использовали для анализа процесса разрушения трехслойного образца [21, 22].

При сжатии образцов трехслойной трубы после горячего прессования сигналы АЭ небольшой мощности сопровождают, как обычно, переход от упругой к пластической деформации. При дальнейшем нагружении образцов нет сигналов АЭ большой амплитуды, однако при величине абсолютной деформации 2 мм на диаграмме сжатия наблюдался резкий спад нагрузки, что сопровождалось импульсом АЭ большой амплитуды (свыше 6 В). Визуальный анализ полукольцевых образцов показал, что спад нагрузки на диаграмме и сопровождающий его импульс АЭ связан с образованием трещины в стальном слое в вершине надреза (рис. 4, а). Дальнейшая деформация образца сопровождалась многочисленными импульсами АЭ большой амплитуды, сопровождающими начало и развитие расслоения на границе между стальным и ванадиевым слоями.

Отжиг трехслойного образца при температуре 800 °С изменяет характер АЭ при сжатии. Сигналы АЭ, сопровождающие переход от упругой к пластической

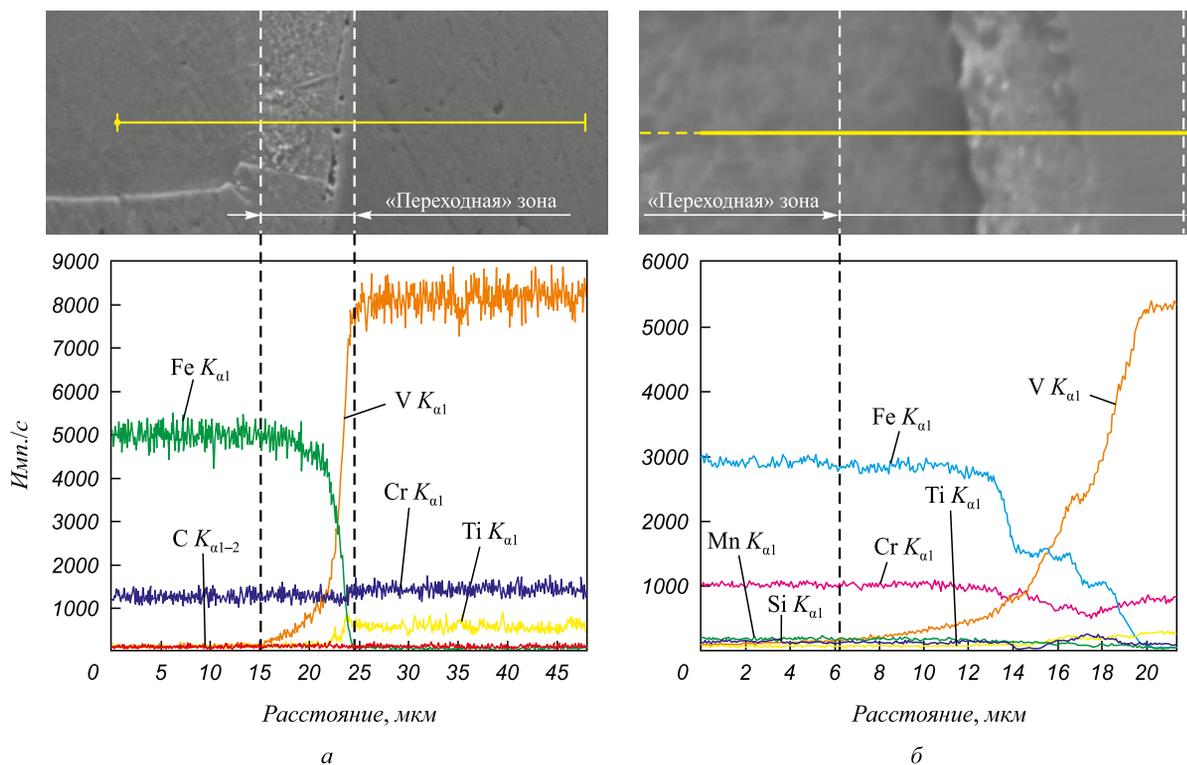


Рис. 3. Профили распределения химических элементов вблизи границы соединения в трехслойном материале после горячего прессования (а) и после горячего прессования и отжига при 800 °С в течение 2 ч (б)

Fig. 3. Distribution profiles of chemical elements near the “steel/vanadium alloy” interface in the three-layer material after co-extrusion (a); after co-extrusion and annealing at 800 °C, 2 hours (b)

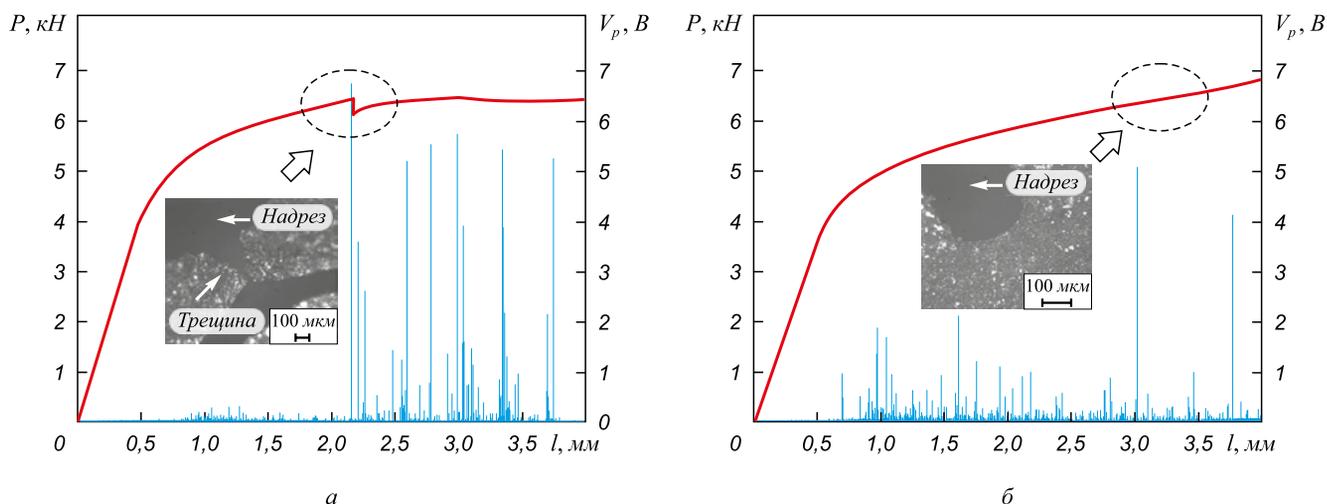


Рис. 4. Диаграммы нагрузка–смещение ($P-l$) и АЭ-диаграммы (V_p-l) при сжатии полукольцевых трехслойных образцов с надрезом после совместного горячего прессования (а) и после горячего совместного прессования и отжига при 800 °С в течение 2 ч (б)

Fig. 4. Load-displacement curves ($P-l$) and AE-diagrams (V_p-l) during compression of notched semi-ring three-layer samples in different conditions:

a – after co-extrusion; b – after co-extrusion and annealing at 800 °C, 2 hours

деформации, монотонно уменьшаются при дальнейшей деформации. Единичные сигналы АЭ (1–2) большой амплитуды (4–5 В) наблюдали только по достижении абсолютной деформации свыше 3 мм.

Таким образом, отжиг образцов трехслойного материала при 800 °С в течение 2 ч благоприятно влияет на свойства переходной зоны, в результате чего при деформации трехслойного образца в зоне соединения слоев расслоений не происходит и трехслойный материал при деформации ведет себя как монолитный.

Выводы. При совместном прессовании при температуре 1100 °С в трехслойном материале сталь – ванадиевый сплав – сталь между сплавом ванадия и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия шириной не менее 10–15 мкм, представляющая собой непрерывный ряд твердых растворов переменного химического состава. Отжиг при 800 °С приводит к увеличению ширины этой зоны до 22 мкм. При диффузионном перераспределении элементов в процессе совместной деформации и последующего отжига в переходной зоне не происходит образования карбидных и других хрупких фаз. При испытаниях на сжатие полукольцевых трехслойных образцов с надрезом после совместного горячего прессования установлено, что спад нагрузки на диаграмме деформации и сопровождающий его импульс АЭ связан с образованием трещины в стальном слое в вершине надреза. При сжатии образцов трехслойных труб в отожженном после прессования состоянии трещин и расслоений на границе между стальным и ванадиевым слоями не наблюдали. Таким образом, отжиг при температуре 800 °С в течение 2 ч после прессования является обязательной операцией при получении трехслойных труб, поскольку приводит к увеличению ширины переходной зоны

соединения между ванадиевым сплавом и сталью и к увеличению прочности соединения между ними.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Smith D.L., Chung H.M., Loomis B.A., Witzenburg W. Van. Development of vanadium-base alloys for fusion first-wall – blanket applications // Journal of Fusion Engineering and Design. 1995. Vol. 29. P. 399 – 410.
- Nagasaka T., Muroga T., Fukumoto K., Watanabe H., Grossbeck M.L., Chen J. Development of fabrication technology for low activation vanadium alloys as fusion blanket structural materials // Nuclear Fusion. 2006. Vol. 46. P. 618 – 625.
- Bray T.S., Tsai H., Nowicki L.J., Billone M.C., Smith D.L., Johnson W.R., Trester P.W. Tensile and Impact Properties of V-4Cr-4Ti Alloy Heats 832665 and 832864 // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 283-287. P. 633 – 636.
- Votinov S.N., Kolotushkin V.P., Nikulin S.A., Turilina V.Y. Making vanadium-based radiation-resistant alloys for fast-neutron reactor pin sheaths // Metal Science and Heat Treatment. 2009. Vol. 51. P. 238 – 244.
- Rowcliffe A.F., Zinkle S.J., Hoelzer D.T. Effect of Strain Rate on the Tensile Properties of Unirradiated and Irradiated V-4Cr-4Ti // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 283-287. P. 508 – 512.
- Votinov S.N., Solonin M.I., Kazennov Yu.I., Kondratjev V.P. Prospects and problems using vanadium alloys as a structural material of the first wall and blanket of fusion reactors // Journal of Nuclear Materials. 1996. Vol. 233. P. 370 – 375.
- Fukumoto K., Narui M., Matsui H., Nagasaka T., Muroga T., Li M., Hoelzer D.T., Zinkle S.J. Environmental effects for irradiation creep behavior of highly purified V-4Cr-4Ti alloys (NIFS-Heats) irradiated by neutrons // Journal of Nuclear Materials. 2009. Vol. 386-388. P. 575 – 578.
- Kurtz R.J., Abe K., Chernov V.M., Hoelzer D.T., Matsui H., Muroga T., Odette G.R. Recent Progress on Development of Vanadium Alloys for Fusion // Journal of Nuclear Materials. 2004. Vol. 329-333. P. 47 – 55.
- Muroga T., Nagasaka T., Abe K., Chernov V.M., Matsui H., Smith D.L., Xu Z.-Y., Zinkle S.J. Vanadium Alloys – Overview and Recent Results // Journal of Nuclear Materials. 2002. Vol. 307-311. P. 547 – 554.

10. Fukumoto K., Matsui H., Narui M., Yamazaki M. Irradiation creep behavior of V-4Cr-4Ti alloys irradiated in a liquid sodium environment at the JOYO fast reactor // *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 437. P. 341 – 349.
11. Li X., Zhang C., Zhao J., Johansson B. Mechanical properties and defective effects of bcc V-4Cr-4Ti and V-5Cr-5Ti alloys by first-principles simulations // *Computational Materials Science*. 2011. Vol. 50. P. 2727 – 2731.
12. Loomis B.A., Kestel B.J., Smith D.L. Microstructural evolution and yield stress increase for ion-irradiated V-15Cr-5Ti alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 1988. Vol. 155-157. P. 1305 – 1309.
13. Aoyagi K., Torres E.P., Suda T., Ohnuki S. Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure of V-Cr-Ti alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 2000. Vol. 283-287. P. 876 – 879.
14. Chen J., Qiu S., Yang L., Xu Z., Deng Y., Xu Y. Effects of oxygen, hydrogen and neutron irradiation on the mechanical properties of several vanadium alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 302. P. 135 – 142.
15. Natesan K., Soppet W.K., Uz M. Effects of Oxygen and Oxidation on Tensile Behavior of V-4Cr-4Ti // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 258-263. P. 1476 – 1481.
16. Matsushima T., Satou M., Hasegawa A., Abe K., Kayano H. Tensile properties of a series of V-4Ti-4Cr alloys containing small amounts of Si, Al and Y, and the influence of helium implantation // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 258-263. P. 1497 – 1501.
17. Heo N.J., Nagasaka T., Muroga T., Matsui H. Effect of Impurity Levels on Precipitation Behavior in the Low-activation V-4Cr-4Ti Alloys // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 307-311. P. 620 – 624.
18. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Zavodchikov S.Yu., Khatkevich V.M. Structure and mechanical properties of the three-layer material based on a vanadium alloy and corrosion-resistant steel // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. Vol. 2014. P. 793 – 799.
19. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Votinov S.N., Zavodchikov S.Yu. Combined Technique for Estimating the Quality of Joining the Layers in Three-Layer Pipes // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. Vol. 2014. P. 347 – 350.
20. Khanzhin V.G. Designing computer systems for acoustic emission materials testing // *Metal Science and Heat Treatment*. 2009. Vol. 51. P. 245 – 249.
21. Khanzhin V.G., Nikulin S.A., Belov V.A., Turilina V.Yu., Rozhnov A.B. Hydrogen embrittlement of steels: I. Analysis of the process kinetics using acoustic emission measurements // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013. Vol. 2013. P. 308 – 312.
22. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Rogachev S.O., Nechaikina T.A., Anikeenko V.I., Turilina V.Yu. Improvement of mechanical properties of large-scale low-carbon steel cast products using spray quenching // *Materials Letters*. 2016. Vol. 185. P. 499 – 502.

Поступила 15 января 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 6, pp. 447–453.

FRACTURE RESISTANCE OF “TRANSITION” AREA IN THREE-LAYER STEEL/VANADIUM ALLOY/STEEL COMPOSITE AFTER THERMOMECHANICAL TREATMENT

T.A. Nechaikina, S.A. Nikulin, S.O. Rogachev, V.Yu. Turilina, A.P. Baranova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. The creation of new structural materials for cladding tubes of fast neutron reactors is an urgent task of modern nuclear power engineering. A three-layer radiation-resistant and corrosion-resistant material based on vanadium alloy and stainless steel, intended for work under extreme conditions (high temperatures, radiation and aggressive environment) of operation of fast neutron reactor cladding tubes has been developed in recent years. The most important aspect determining the operability of this material during operation is the quality of the joining of different materials layers among themselves, determined by the modes of thermomechanical treatment. The effect of the annealing on the chemical composition, structure, and fracture resistance of the “steel/vanadium alloy” interface in the steel/vanadium alloy/steel three-layer tube, obtained by hot co-extrusion of three-layer tube billet at 1100 °C was studied. The 20Kh13 (AISI 420 type) steel for the outer layers and V-4Ti-4Cr vanadium alloy for the core were used as the components of the tube. The structure and chemical composition in the layer joining zone were studied using the optical microscopy and electron microscopy with X-ray microspectral analysis. The fracture resistance of the “steel/vanadium alloy” interface was evaluated by a compression test of a three-layer ring sample with notch using an acoustic emission (AE) measurement. It is shown that after co-extrusion a “transition” area of diffusion interaction having a variable chemical composition with a width of 10–15 μm is formed between vanadium alloy and steel, which represents the continuous series of solid solutions, without precipitation of brittle phases, providing a strong bonding between vanadium alloy and steel in the three-layer material. No voids, delaminations or defects

were detected at the “steel/vanadium alloy” interface. However, a crack is formed in the steel layer during the compression tests of the notched semi-ring three-layer samples after hot co-extrusion. Annealing favorably influences the formation of the “transition” area due to the increase in the width of the diffusion interaction area. No cracks or delaminations at the boundary between steel and vanadium layers were observed in the three-layer tube samples after annealing, and the three-layer material behaves like a monolith material during testing.

Keywords: three-layer tubes, corrosion-resistant steels, vanadium alloys, microstructure, deformation, fracture, crack, acoustic emission.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-447-453

REFERENCES

1. Smith D.L., Chung H.M., Loomis B.A., Witzenburg W. Van. Development of vanadium-base alloys for fusion first-wall – blanket applications. *Journal of Fusion Engineering and Design*. 1995, vol. 29, pp. 399–410.
2. Nagasaka T., Muroga T., Fukumoto K., Watanabe H., Grossbeck M.L., Chen J. Development of fabrication technology for low activation vanadium alloys as fusion blanket structural materials. *Nuclear Fusion*. 2006, vol. 46, pp. 618–625.
3. Bray T.S., Tsai H., Nowicki L.J., Billone M.C., Smith D.L., Johnson W.R., Trester P.W. Tensile and impact properties of V-4Cr-4Ti alloy heats 832665 and 832864. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283-287, pp. 633–636.
4. Votinov S.N., Kolotushkin V.P., Nikulin S.A., Turilina V.Y. Making vanadium-based radiation-resistant alloys for fast-neutron reactor pin sheaths. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, pp. 238–244.
5. Rowcliffe A.F., Zinkle S.J., Hoelzer D.T. Effect of strain rate on the tensile properties of unirradiated and irradiated V-4Cr-4Ti. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283-287, pp. 508–512.

6. Votinov S.N., Solonin M.I., Kazennov Yu.I., Kondratjev V.P. Prospects and problems using vanadium alloys as a structural material of the first wall and blanket of fusion reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 1996, vol. 233, pp. 370–375.
7. Fukumoto K., Narui M., Matsui H., Nagasaka T., Muroga T., Li M., Hoelzer D.T., Zinkle S.J. Environmental effects for irradiation creep behavior of highly purified V–4Cr–4Ti alloys (NIFS-Heats) irradiated by neutrons. *Journal of Nuclear Materials*. 2009, vol. 386–388, pp. 575–578.
8. Kurtz R.J., Abe K., Chernov V.M., Hoelzer D.T., Matsui H., Muroga T., Odette G.R.. Recent progress on development of vanadium alloys for fusion. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, vol. 329–333, pp. 47–55.
9. Muroga T., Nagasaka T., Abe K., Chernov V.M., Matsui H., Smith D.L., Xu Z.-Y., Zinkle S.J. Vanadium alloys – overview and recent results. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 307–311, pp. 547–554.
10. Fukumoto K., Matsui H., Narui M., Yamazaki M. Irradiation creep behavior of V–4Cr–4Ti alloys irradiated in a liquid sodium environment at the JOYO fast reactor. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 437, pp. 341–349.
11. Li X., Zhang C., Zhao J., Johansson B. Mechanical properties and defective effects of bcc V–4Cr–4Ti and V–5Cr–5Ti alloys by first-principles simulations. *Computational Materials Science*. 2011, vol. 50, pp. 2727–2731.
12. Loomis B.A., Kestel B.J., Smith D.L. Microstructural evolution and yield stress increase for ion-irradiated V–15Cr–5Ti alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 1988, vol. 155–157, pp. 1305–1309.
13. Aoyagi K., Torres E.P., Suda T., Ohnuki S. Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure of V–Cr–Ti alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283–287, pp. 876–879.
14. Chen J., Qiu S., Yang L., Xu Z., Deng Y., Xu Y. Effects of oxygen, hydrogen and neutron irradiation on the mechanical properties of several vanadium alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 302, pp. 135–142.
15. Natesan K., Soppet W.K., Uz M. Effects of oxygen and oxidation on tensile behavior of V–4Cr–4Ti. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, vol. 258–263, pp. 1476–1481.
16. Matsushima T., Satou M., Hasegawa A., Abe K., Kayano H. Tensile properties of a series of V–4Ti–4Cr alloys containing small amounts of Si, Al and Y, and the influence of helium implantation. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, vol. 258–263, pp. 1497–1501.
17. Heo N.J., Nagasaka T., Muroga T., Matsui H. Effect of impurity levels on precipitation behavior in the low-activation V–4Cr–4Ti Alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 307–311, pp. 620–624.
18. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Zavodchikov S.Yu., Khatkevich V.M. Structure and mechanical properties of the three-layer material based on a vanadium alloy and corrosion-resistant steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, pp. 793–799.
19. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Nechaikina T.A., Rogachev S.O., Votinov S.N., Zavodchikov S.Yu. Combined Technique for Estimating the Quality of Joining the Layers in Three-Layer Pipes. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, pp. 347–350.
20. Khanzhin V.G. Designing computer systems for acoustic emission materials testing. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, pp. 245–249.
21. Khanzhin V.G., Nikulin S.A., Belov V.A., Turilina V.Yu., Rozhnov A.B. Hydrogen embrittlement of steels: I. Analysis of the process kinetics using acoustic emission measurements. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, vol. 2013, pp. 308–312.
22. Nikulin S.A., Rozhnov A.B., Rogachev S.O., Nechaykina T.A., Anikeenko V.I., Turilina V.Yu. Improvement of mechanical properties of large-scale low-carbon steel cast products using spray quenching. *Materials Letters*. 2016, vol. 185, pp. 499–502.

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education of Russia in the framework of the implementation of the FTP “Research and development in priority areas for the development of Russian scientific and technological complex for 2014–2020” (unique identifier No. RFMEFI57815X0139).

Information about the authors:

T.A. Nechaikina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (nechaykinata@gmail.com)

S.A. Nikulin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (nikulin@misis.ru)

S.O. Rogachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (csaap@mail.ru)

V.Yu. Turilina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (veronikat77@gmail.com)

A.P. Baranova, Training Master
(sashulka.baranova2009@yandex.ru)

Received January 15, 2018