

УДК 624.19.035.2

**НАВОДОРОЖИВАНИЕ КОНТАКТНО-СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 С ЗАЩИТНЫМ ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ**К.С. Гусев, Н. Курдюмов

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Е.Б. Кашкаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ksg11@tpu.ru](mailto:ksg11@tpu.ru)**HYDROGENATION BEHAVIOR OF CR-COATED RESISTANCE UPSET WELDS  
OF E110 ZIRCONIUM ALLOY**K.S. Gusev, N. Kurdyumov

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., Ph.D. E.B. Kashkarov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [ksg11@tpu.ru](mailto:ksg11@tpu.ru)

**Abstract.** *The hydrogenation behavior of Cr-coated resistance upset welds (RUW) of E110 zirconium alloy was investigated at 360, 450 and 900 °C and a hydrogen pressure of 2 bar. The deposition of Cr coating via magnetron sputtering can decrease the hydrogen absorption rate of the RUW. The Cr-coating can limit the formation of radially oriented hydrides and hardening of RUW specimens at 360 and 450 °C. No significant difference in the hydrogen absorption rate was found at 900 °C. The deposition of Cr coating can protect resistance-upset-welded Zr alloys in a hydrogen atmosphere.*

**Введение.** Циркониевые сплавы являются основными материалами для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) благодаря их уникальным свойствам, таким как низкое сечение захвата тепловых нейтронов, высокая коррозионная и радиационная стойкость, а также высокие механические свойства [1, 2]. Однако, как показала авария на АЭС Фукусима, взаимодействие циркониевых сплавов с водяным паром может привести к их быстрому окислению, выделению газообразного водорода и наводороживанию циркониевых сплавов [3]. Осаждение защитного покрытия на циркониевые сплавы предлагается в качестве возможного способа увеличения их стойкости и операционного времени для принятия решений в случае аварийной работы реактора. Среди многих материалов хром может быть выбран в качестве наиболее подходящего защитного покрытия из-за образования защитного оксидного слоя  $Cr_2O_3$  в условиях высокотемпературного окисления. Учитывая тот факт, что ТВЭЛы изготавливаются с применением контактно-стыковой сварки торцевых заглушек к трубке с обеих сторон, следует также рассмотреть влияние сварки и последующего нанесения покрытия на поведение циркониевых сплавов при гидрировании. Таким образом, целью данной работы является определение влияния контактно-стыковой сварки на поведение при наводороживании образцов из циркониевого сплава Э110 с защитным хромовым покрытием при нормальных условиях эксплуатации и повышенных температурах.

**Экспериментальная часть.** Перед нанесением покрытия поверхность образцов подвергалась травлению ионами  $Ag^+$  в течение 20 мин для удаления поверхностных загрязнений. Процедура осаждения хромового покрытия была такой же, как и в предыдущих исследованиях [4, 5]. Для проведения наводороживания образцов при температурах 360, 450 и 900 °С использовалась автоматизированная установка Gas Reaction Controller (GRC). Давление водорода поддерживалось постоянным (2 бар). Продолжительность наводороживания для образцов с Cr-покрытием и без покрытия составляла 240, 35 и 5 мин при 360, 450 и 900 °С, соответственно. Аналитические весы (Sartorius CP124 S с точностью  $10^{-4}$  г) использовались для измерения привеса образцов до и после испытаний. Микроструктуру поперечного сечения образцов исследовали с помощью оптической микроскопии на приборе AXIOVERT-200 MAT (Zeiss, Jena, Германия). Фазовый состав образцов анализировали в поперечном сечении с помощью рентгеновской дифракции на приборе XRD-7000S (Shimadzu, Киото, Япония). Твердость образцов исследовалась в зонах торцевой заглушки (ТЗ), сварного шва (СШ) и трубки (Т). Измерения твердости проводились на поперечных сечениях образцов с помощью прибора Nanohardness Tester 2 (CSM, Женева, Швейцария). Нагрузка и расстояние между индентациями были равны 100 мН и ~100 мкм, соответственно. В каждой зоне всех образцов было выполнено 30 индентаций.

**Результаты.** Кривые поглощения водорода для двух серий образцов (без покрытия и с Cr-покрытием) при различных температурах показаны на рис. 1. Для обоих типов образцов поглощение водорода увеличивалось с ростом температуры. Было показано, что поглощение водорода ниже в случае образцов с Cr-покрытием по сравнению с образцами без покрытия.

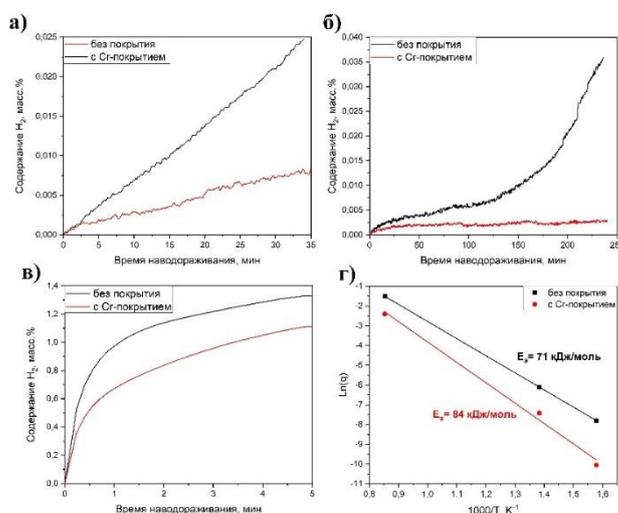


Рис. 1. Кривые поглощения водорода для образцов без покрытия и с Cr-покрытием при (а) 360, (б) 450 и (в) 900 °С; (г) графики Аррениуса для обоих образцов

Для сравнительного анализа энергии активации поглощения водорода образцами без покрытия и с Cr-покрытием были построены графики Аррениуса (рис. 1, г). Полученные значения также подтвердили барьерные свойства Cr-покрытия: энергия активации поглощения водорода была выше для образцов с Cr-покрытием (84 кДж/моль) по сравнению с образцами без покрытия (71 кДж/моль).

Фазовый состав образцов КСС представлен на рис. 2. Исходный образец был представлен только фазой  $\alpha$ -Zr. Анализ рентгенограмм показывает образование гидридной фазы  $\delta$ -ZrH<sub>1.66</sub> в образцах без покрытия, подвергнутых гидрированию при всех температурах. Интенсивность рефлексов  $\delta$ -фазы

увеличивалась с температурой, что указывало на более высокое содержание гидридной фазы и коррелировало с измеренными концентрациями водорода в образцах. Для образцов с Cr-покрытием образование двух типов гидридов ( $\delta$ -ZrH<sub>1.66</sub> и  $\gamma$ -ZrH) наблюдалось только после гидрирования при 900 °С. По данным оптической микроскопии у непокрытых образцов после наводороживания при температурах 360 и 450 °С наблюдается «гидридный обод», в то время как у образцах с хромовым покрытием «гидридный обод» обнаружен не был.

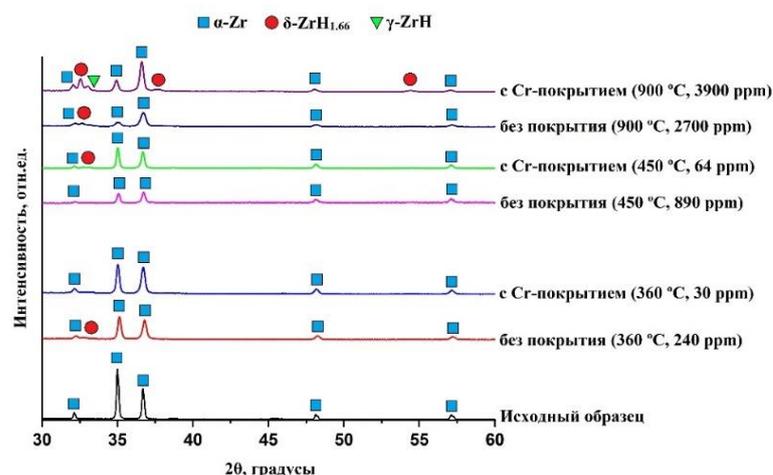


Рис. 2. Фазовый состав образцов до и после наводороживания

**Заключение.** Вследствие высокой скорости поглощения водорода образцами без покрытия, на их поверхности образуется «гидридный обод» при температурах 360 и 450 °С. Хромовое покрытие снижает скорость поглощения водорода на один порядок величины и предотвращает образование «гидридного обода» в течение рассматриваемого времени. Влияние Cr-покрытия на скорость поглощения водорода заметно снижается при температуре 900 °С. У непокрытых образцов было выявлено наличие гидридной фазы  $\delta$ -ZrH<sub>1.66</sub>, которая создаёт концентрации напряжений внутри кристаллической решётки, что приводит к негативному воздействию на механические свойства образцов.

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект 19-79-10116.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Charit I., Murty K.L. Creep behavior of niobium-modified zirconium alloys // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – V. 374. – P. 354–363.
- 2 Allen T.R., Konings R.J.M., Motta A.T. Corrosion of zirconium alloys // Journal of Nuclear Materials. – 2012. – V. 5. – P. 49–68.
- 3 Zinkle S.J., Terrani K.A., Gehin J.C., Ott L.J., Snead L.L. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V. 448. – P. 374–379.
- 4 Sidelev D., Ruchkin, S., Kashkarov E. High-Temperature Oxidation of Cr-Coated Resistance Upset Welds Made from E110 Alloy // Coatings. – 2021. – V. 11. – P. 577.
- 5 Sidelev D.V., Poltronieri C., Bestetti M., Krinitcyn M.G., Grudin V.A., Kashkarov E.B. A comparative study on high-temperature air oxidation of Cr-coated E110 zirconium alloy deposited by magnetron sputtering and electroplating // Surface and Coatings Technology. – 2022. – V. 433. – P. 128134.