

условиях эксплуатации (360 °С, 18,6 МПа). Однако в условиях аварии возможен нагрев активной зоны реактора, ввиду чего может происходить окисление и последующее разрушение ответственных элементов, выполненных из Zr сплавов. Особое внимание следует уделить сварным соединениям, т.к. процесс их окисления проходит с большей скоростью [1]. Цель настоящей работы состоит в изучении стойкости к окислению лазерных швов.

Для защиты сварных соединений от окисления было выполнено осаждение Cr покрытий с помощью магнетронного распыления. Далее образцы были окислены на воздухе при температуре 1100 °С в течение 2, 10, 30, 45, 60 и 90 минут. На основе измеренных значений массы до и после окисления был определён коррозионный привес образцов, получены оптические изображения микроструктуры образцов после их окисления (рис. 1). Показано, что Cr покрытие значительно повышает стойкость лазерных сварных соединений из циркониевых сплавов к высокотемпературному окислению в течение не менее 60 минут.

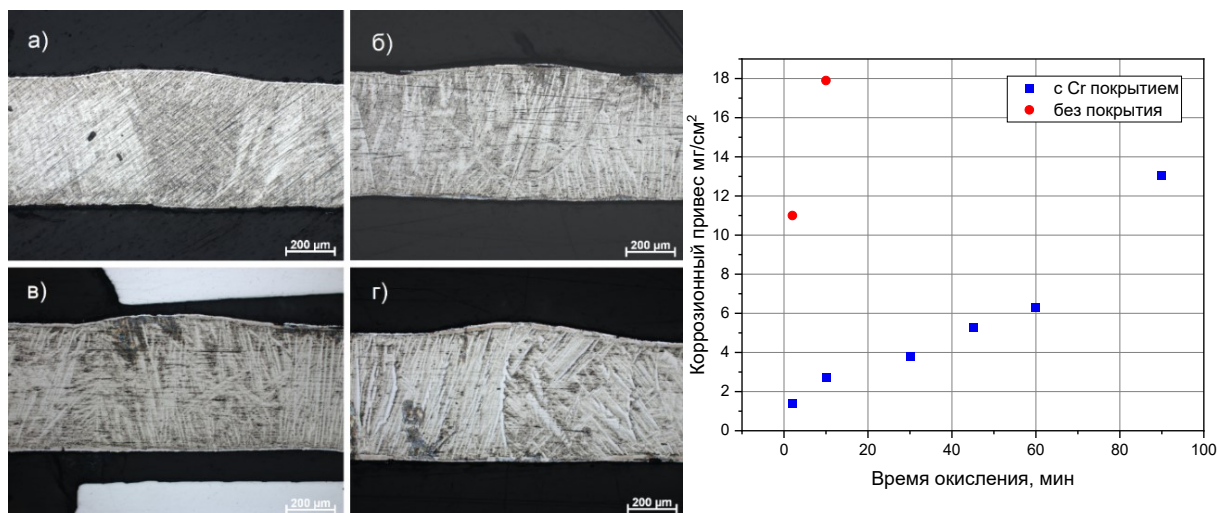


Рис. 1. (слева) Оптические изображения микроструктуры поперечного сечения лазерных швов с Cr покрытием после окисления в течение 30 (а), 45 (б), 60 (в) и 90 мин (г). (справа) Зависимость коррозионного привеса лазерных швов с Cr покрытием от времени их окисления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. V. Sidelev, E. B. Kashkarov, V. A. Grudinin, M. G. Krinitsyn. High-temperature oxidation of Cr-coated laser beam welds made from E110 zirconium alloy // Corrosion Science. — 2022. — Vol. 195. — [110018, 9 p.].

#### ЗАЩИТНЫЕ ХРОМОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Д.В. Сиделёв<sup>1</sup>, И.А. Шелепов<sup>2</sup>, Н.С. Сабуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

<sup>2</sup> АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика

А.А. Бочвара»,

Россия, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а, 123098

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

Настоящая работа направлена на изучение защитного поведения циркониевых сплавов с хромовыми покрытиями в условиях, имитирующих нормальный и аварийный режимы эксплуатации ядерных реакторов. Рассмотрены две технологии осаждения Cr покрытий: высокоскоростная (скорость осаждения – 40...50 нм/с, плотность ионного тока на изделие – 3...5 мА/см²); мультикатодная (скорость осаждения – 3...5 нм/с, плотность ионного тока на изделие – 5...8 мА/см²).

С помощью аналитических методов анализа были получены данные о влиянии параметров технологии магнетронного осаждения Cr покрытий на окисление циркониевых сплавов с покрытиями в потоке водяного пара при температуре до 1400 °С. Защита циркониевых сплавов от высокотемпературного окисления обеспечивается формированием плотного поверхностного слоя оксида хрома. На длительность защитного поведения циркониевого сплава с Cr покрытием существенное влияние оказывает диффузия и растворение Cr в Zr сплаве, претерпевающим  $\alpha \rightarrow \beta$  переход. Продемонстрирована роль микроструктуры и толщины Cr покрытий на скорость окисления и кинетику диффузии хрома и циркония в диапазоне температур 900...1200 °С (рис. 1). Показана возможность защиты сплава Э110 от окисления в течение 5000 с в потоке водяного пара при температуре 1200 °С.

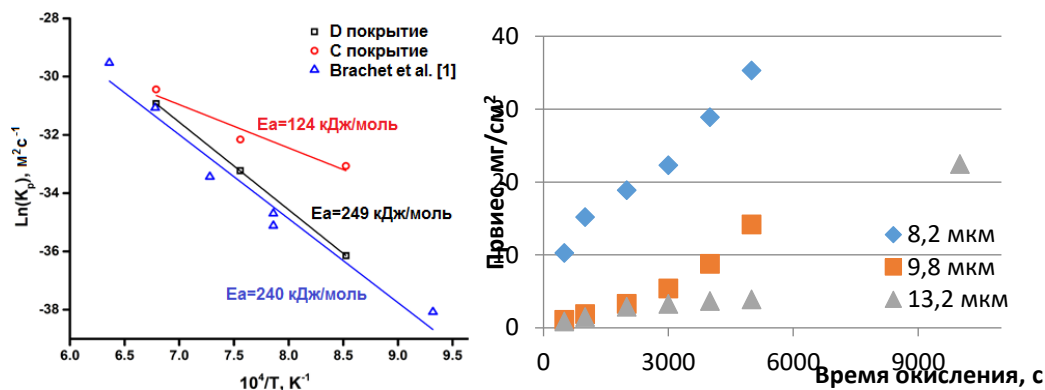


Рис. 1 Кривые Аррениуса для константы скорости окисления Cr покрытий в зависимости от технологии их получения (слева). Кинетика окисления в потоке водяного пара Zr сплава с Cr покрытиями, толщиной 8,2, 9,8 и 13,2 мкм (справа)

Исследование выполнено в рамках выполнения гранта РФФИ 19-79-10116.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brachet J.-C., Rouesne E., Ribis J., Guilbert T., Urvoy S., Nony G., Toffolon-Masclat C., Le Saux M., Chaabane N., Palancher H., David A., Bischoff J., Augereau J., Pouillier E., High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: Kinetics and process // Corros. Sci. – 2020. – 167. - 108537.

### ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНОГО БЛОКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА: CFD-ИССЛЕДОВАНИЯ

А.С. Дёмин, С.В. Беденко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

e-mail: asd47@tpu.ru

Использование высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов позволит расширить сферу применения ядерной энергетики. Наиболее перспективной областью их применения является водородная промышленность, в которой ВТГР могут использоваться в качестве источника высокотемпературного тепла, что позволит значительно снизить вредные выбросы от этого процесса. Сейчас для производства водорода используется паровая конверсия метана, которая не является экономически выгодной.

В работе был получено температурное распределение для активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, а также был определен оптимальный режим прокачки теплоносителя через ее графитовые блоки, который позволит использовать эту установку в качестве источника тепла для производства водорода.