

18. Трутаева В.В., Трутаев С.Ю., Погодин В.К. Разработка методов оптимального проектирования разъемных соединений высокого давления // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 9. С. 22-25.
19. API STD 607. Fire Test for Quarter - turn Valves and Valves Equipped with Nonmetallic Seats. Washington : American Petroleum Institute, 2004. 14 p.
20. СТ ЦКБА 001 - 2003. Арматура трубопроводная. Общие требования к проведению испытаний на огнестойкость. С-Пб : ЗАО НПФ ЦКБА, 2004. 24 с.
21. СТО Газпром 2 - 41 - 212 - 2008. Общие технические требования к трубопроводной арматуре, поставляемой на объекты ОАО «ГАЗПРОМ». М., 2008. 85 с.

УДК 539.612:620.1

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ЗАЩИТНЫХ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ**

Федорова Е.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

В таких областях техники, как энергетика и авиастроение, многие конструктивные элементы эксплуатируются в условиях высоких температур и агрессивных сред. В зависимости от условий эксплуатации и типа материала используются различные технологии защиты металлических поверхностей. С одной стороны – это разработка составов и методов подготовки поверхностей сплавов, способствующих росту защитных оксидных слоев при окислении, с другой – нанесение теплозащитных покрытий. При любом техническом решении из вышеперечисленных, ключевым фактором является прочность адгезии на поверхности раздела металл/оксид.

Современные жаростойкие стали и жаропрочные сплавы имеют сложный химический состав, содержат различные легирующие элементы, которые влияют на кинетику высокотемпературного окисления и прочность адгезии на поверхности раздела металл/оксид. Некоторые химические элементы, вводимые в процессе получения материалов (например, Si), а также примеси (S) могут послужить причиной формирования оксидного слоя с низкими защитными свойствами или приводить к катастрофическому окислению [1-3].

В данной работе представлены результаты комплексного исследования механического поведения структурно неоднородных защитных оксидных слоев, которые формируются при высокотемпературном окислении жаропрочных монокристаллических никелевых сплавов различного поколения отечественного и зарубежного производства и аустенитных сталей (см. рисунок).



Рис. Схематическое представление комплекса расчетно-экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования включают: изучение начальных этапов и кинетики высокотемпературного (700-1100°C) окисления при изотермическом и циклическом термическом воздействии, исследования микроструктуры, химического и фазового состава формирующихся защитных слоев, определение физико-механических свойств оксидных слоев и количественных показателей адгезии в системе металл/оксид с использованием нескольких независимых методов испытаний.

Расчетными методами с использованием конечно-элементного моделирования были определены остаточные напряжения при термоциклировании с учетом реальной микроструктуры и геометрии поверхности раздела металл/оксид [4].

Представленные результаты частично получены при поддержке международного проекта РФФИ 13-08-91053-НЦНИ\_a и Национального центра научных исследований Франции (CNRS) № 6095 при сотрудничестве с лабораториями CIRIMAT (г. Тулуза, Франция) и SIMaP (г. Гренобль, Франция).

### Литература

1. Fedorova E., Monceau D., Oquab D. Quantification of growth kinetics and adherence of oxide scales formed on Ni-based superalloys at high temperature // *Corrosion Science*. 2010. Т. 52. Pp. 3932-3942.
2. Comparison of damaging behavior of oxide scales grown on austenitic stainless steels using tensile test and cyclic thermogravimetry / E. Fedorova, M. Braccini, V. Parry, C. Pascal et al. // *Corrosion Science*. 2016. Т. 103. Pp. 145-156.
3. Relations between oxidation induced microstructure and mechanical durability of oxide scales / V. Parry, C. Pascal, M. Braccini, E. Fedorova et al. // *Oxidation of Metals*. 2017. Т. 88. Pp. 29-40.
4. Damaging behavior and numerical analysis of residual thermal stress in oxide scales grown on austenitic stainless steels / E. Fedorova, A. Burov, V. Parry, C. Pascalet al. // *Proceeding of International Conference JECH46, 2-3 Avril 2015. Grenoble, France, 2015*. P. 10.