

УДК 620.181.5

DOI: 10.17223/00213411/68/12/22

## Стойкость к окислению поверхностных слоев на стали 12X18H9T, легированных бором и цирконием\*

Е.А. Пухова<sup>1</sup>, Е.А. Дробяз<sup>1</sup>, В.А. Батаев<sup>1</sup><sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрен метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей циркония и бора на заготовки из стали 12X18H9T с целью повышения стойкости поверхностных слоев к высокотемпературному окислению. Показано, что при введении 20% Zr и 30% B формируются бориды  $(Fe, Cr)_2B$  и интерметаллиды  $ZrFe_2$ , а также твердые растворы  $\alpha$ -(Cr, Fe) и  $\gamma$ -(Fe, Ni), что обеспечивает толщину наплавленного слоя около 2.5 мм. Исследования окислительной стойкости при 950 °С в течение 100 ч продемонстрировали снижение прироста массы модифицированных образцов до 1.3467 г/м<sup>2</sup> против 13.5223 г/м<sup>2</sup> для необработанной стали, т.е. более чем десятикратное улучшение окислительной стойкости. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности данного метода в улучшении жаростойкости аустенитных хромоникелевых сталей.

**Ключевые слова:** аустенитные стали, вневакуумная электронно-лучевая наплавка, бориды хрома, окислительная стойкость.

Одна из актуальных задач, характерных для современного материаловедения, связана с разработкой металлических сплавов, предназначенных для эксплуатации в особых условиях внешнего воздействия. Широкое распространение в производстве деталей машин и элементов конструкций получили хромоникелевые аустенитные стали, характеризующиеся высоким уровнем пластичности, трещиностойкости, коррозионной стойкости. Уникальный комплекс механохимических свойств объясняет востребованность этих сталей в химическом машиностроении, нефтегазовом секторе экономики, энергетике, при производстве медицинских инструментов. Во многих случаях возникает необходимость эксплуатации сплавов при нагреве до 600 °С и выше [1, 2]. Повышение жаростойкости хромоникелевых аустенитных сталей, в частности стали 12X18H9T, относится к числу важных технических задач, поскольку эксплуатация этих материалов в высокотемпературном состоянии сопровождается постепенной деградацией структуры, снижением функциональных свойств материалов, а следовательно, долговечности изготовленных из них изделий. Результатом интенсивной диффузии кислорода и химических элементов, входящих в состав сплавов, является формирование оксидных пленок, содержащих железо, хром, никель ( $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и NiO), и более сложных соединений [3]. К числу перспективных методов повышения жаростойкости металлических материалов следует отнести вневакуумную электронно-лучевую наплавку порошковых смесей, позволяющую создавать поверхностные слои с контролируемым химическим составом за счет введения легирующих элементов, обеспечивающих рост окислительной стойкости [4].

Цель работы – изучение влияния легирования бором и цирконием на структуру и жаростойкость поверхностных слоев на заготовках из стали 12X18H9T, полученных методом наплавки материалов пучками электронов, выведенными в воздушную атмосферу. Выбор в качестве модифицирующих добавок бора и циркония обусловлен возможностью образования соединений, обеспечивающих термическую стабильность поверхностных слоев, улучшения адгезионных свойств оксидных пленок и замедления диффузии кислорода в сталь за счет формирования плотного оксида циркония [5].

Для модифицирования поверхностного слоя стали 12X18H9T использовали смесь порошков циркония и бора в соотношении 20/30 мас.%. Защиту расплава от окисления обеспечивал флюсующий компонент, функцию которого выполнял фторид магния ( $MgF_2$ ). Наплавку порошка выполняли при токе пучка электронов  $I = 25$  мА. Скорость продольного перемещения образца составляла 10 мм/с, частота сканирования пучка в поперечном направлении – 50 Гц, размеры образцов – 100×50×10 мм.

В результате наплавки модифицирующей смеси формируется поверхностно легированный слой толщиной ~ 2.5 мм (рис. 1, а), характерными структурными составляющими которого являются бориды типа  $(Fe, Cr)_2B$  (рис. 1, б). Толщина переходной зоны между поверхностным слоем с выделившимися в нем кристаллами боридов и основным металлом, не переходившим в расплавленное состояние, составляет ~ 0.3–0.5 мм (рис. 1, а). Размеры кристаллов боридов в данной зоне меньше, чем вблизи поверхности (рис. 1, в). Кроме боридов методом рентгеновской дифракции в наплавленном слое зафиксировано присут-

\* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-00066, <https://rscf.ru/project/23-79-00066/>.