

УДК 538.91

**Модификация аустенитно-мартенситной стали ВНС-5 ионно-пучковыми и химическими методами. Анализ электрохимических свойств**Е.Д. Хабибова

Научный руководитель: к.ф.-м.н., В.О. Семин  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, 634050  
Email: [edh2@tpu.ru](mailto:edh2@tpu.ru)

**Modification of austenitic-martensitic steel VNS-5 by ion beam and chemical methods. Analysis of the electrochemical properties**E.D. Khabibova

Scientific Supervisor: Ph.D., V.O. Semin  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
Email: [edh2@tpu.ru](mailto:edh2@tpu.ru)

**Abstract.** The study describes experimental results on electrochemical behavior of the austenitic-martensitic steel VNS-5 modified through either chemical passivation or ion-beam treatment. By means of Tafel extrapolation method, the corrosion resistance in marine environment (3.5 wt. % NaCl) was examined. The highest polarization resistance was obtained for the sample treated by Cr<sup>+</sup>-ions, while the passivated (in the dichromate solution) sample exhibited practically the same corrosion current as initial (mechanically polished) sample.

**Key words:** steel VNS-5, corrosion, ion-beam treatment, passivation.

**Введение**

Для областей промышленности, таких как машиностроение, авиастроение, и станкостроение требуется внедрение высокопрочных коррозионноустойчивых материалов. В современных производственных технологиях наиболее перспективными представляются стали аустенитно-мартенситного класса ввиду их высоких механических свойств. В машиностроительной отрасли конструкционные стали специального назначения подразделяются на несколько категорий [1]: коррозионноустойчивые, жаропрочные и жаростойкие и др. В частности, одной из широко используемых сталей является сталь марки ВНС-5 (13X15H4AM3). Согласно результатам работы [2], данная сталь обладает хорошей ударной вязкостью и пластичностью, благодаря чему может быть использована для изготовления силовых конструкций (болтов, анкеров), производства деталей машин, высоконагруженных соединительных узлов, элементов жаропрочного крепежа для энергетического оборудования [3, 4].

Известно, что в результате воздействия факторов среды – изменение температуры, повышение влажности и пр. – повышается риск образования на поверхности материала коррозионных повреждений, способствующих снижению долговечности конструкций и их прочности. Существенно повысить коррозионные свойства оказывается возможным с помощью методов модификации тонких (до 1–2 мкм) поверхностных слоёв, а также за счёт формирования защитных покрытий и поверхностного легирования. Целью данной работы является определение коррозионных характеристик и преимущественного типа коррозии стали ВНС-5 после ионно-пучковой обработки (высокодозовой ионной имплантации, ВДИИ) и химической пассивации (ХП).

**Экспериментальная часть**

Исследования проводили на подложках из Fe-Cr-Ni стали марки ВНС-5 производства ФГУП «ВИАМ» (Москва, Россия). Подготовка поверхности включала несколько этапов: (i) механическая

шлифовка до зеркального блеска на SiC абразивах (P600, P1000, P1500, P2000, P2500), (ii) ВДИИ ионов аргона и хрома со средней энергией 30 кэВ и дозой облучения  $\sim 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> с использованием ионного источника на основе планарного магнетрона с инжекцией электронов, (iii) ХП в 10 %-растворе H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> с добавлением 0,05 М раствора K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> в течение 140 часов. Образцы ВНС-5 стали после химической пассивации – ВНС-5<sup>ХП</sup>, ионно-пучковой обработки обозначены как ВНС-5<sup>ВДИИ</sup>, а исходная (механически полированная) сталь – ВНС-5<sup>ИСХ</sup>. Электрохимические эксперименты выполняли на потенциостате-гальваностате PalmSens-4 в трехэлектродной ячейке. Скорость развертки потенциала в режиме линейной поляризации составляла 1 мВ/с. Импедансные спектры получали относительно потенциала разомкнутой цепи при амплитуде сигнала 10 мВ и частотах от 10<sup>5</sup> до 0,05 Гц. Все образцы исследуемой стали ВНС-5 имели форму цилиндров с площадью рабочей поверхности  $\sim 0,75$  см<sup>2</sup>. Фоновым электролитом служил 3,5 (масс. %) раствор NaCl. Морфологию поверхности образцов ВНС-5 исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Apreo 2 S (Thermo Fisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

### Результаты

На рисунке 1а представлены диаграммы Бode в координатах «модуль импеданса – логарифм частоты». Отметим, что: модуль полного импеданса монотонно возрастает при уменьшении частоты входного сигнала. Наибольшее значение модуля импеданса фиксируется у образца ВНС-5<sup>ВДИИ</sup>, наименьшее – у ВНС-5<sup>ХП</sup>. Данные результаты коррелируют с диаграммами Найквиста (рис. 1б), которые хорошо описываются эквивалентной электрической схемой, состоящей из сопротивления раствора ( $R_s$ ), сопротивления переноса ( $R_{ct}$ ) и элемента постоянной фазы (CPE).

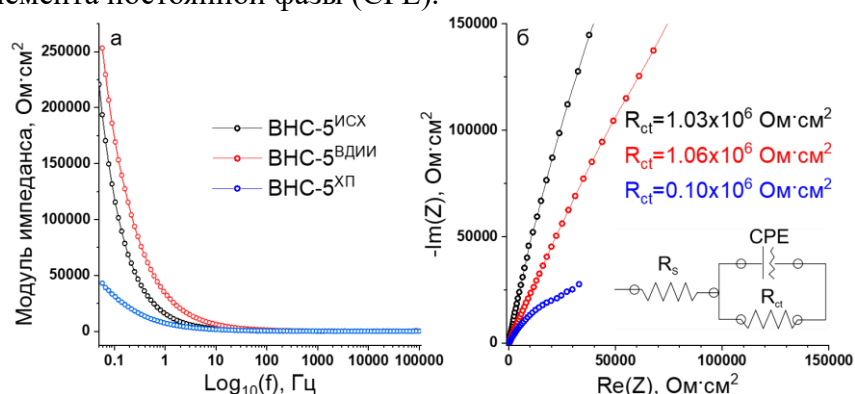


Рис. 1. Диаграммы Бode (а) и Найквиста (б) исходного и модифицированных образцов стали ВНС-5, полученные в 3,5 (масс. %) растворе NaCl. На вставке к (б) приведена эквивалентная электрохимическая схема

Обнаружено, что сопротивление переноса заряда  $R_{ct}$  для образца ВНС-5<sup>ХП</sup> в 10 раз меньше, чем у ВНС-5<sup>ИСХ</sup>. При этом ионно-пучковая обработка сохраняет высокие значения  $R_{ct} \sim 1$  МОм·см<sup>2</sup>. Сделано предположение, что оксидная плёнка, сформировавшаяся на поверхности, стали после химической пассивации, обладает высокой удельной проводимостью, поэтому процессы переноса заряда вблизи поверхности оказываются облегченными. Как следствие, диаграмма Найквиста образца ВНС-5<sup>ХП</sup> демонстрирует наименьший радиус полуокружности (рис. 1б).

Потенциодинамические поляризационные кривые приведены на рисунке 2а. В таблице 1 отражены коррозионные характеристики сталей ВНС-5, полученные с помощью экстраполяции данных кривых Тафелевскими зависимостями. Так, коррозионный потенциал ( $E_{кор}$ ) для модифицированных образцов увеличивается, а плотности коррозионных токов (табл. 1), напротив, уменьшаются. Наибольшей коррозионной стойкостью, по сравнению с ВНС-5<sup>ИСХ</sup>, обладает образец ВНС-5<sup>ВДИИ</sup>, о чем свидетельствуют более низкие значения анодных токов (в  $\sim 7,6$  раз). В то же время химическая пассивация не способствует снижению

скорости коррозии и лишь незначительно повышает сопротивление поляризации ( $R_p$ ). В условиях анодной поляризации основным механизмом коррозионного разрушения является окисление железа до  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  и растворение матричной (аустенитной) фазы по границам зерен. Для ВНС-5<sup>ИСХ</sup> наблюдается резкое возрастание плотности токов при  $E = 340$  мВ, сопровождающееся разрушением оксидной плёнки, полученной окислением на воздухе. На РЭМ снимках (рис. 2б, в) образцов, подвергшихся местной коррозии в 3,5 масс. % NaCl, обнаружены многочисленные питтинговые разрушения размерами до ~200 мкм.

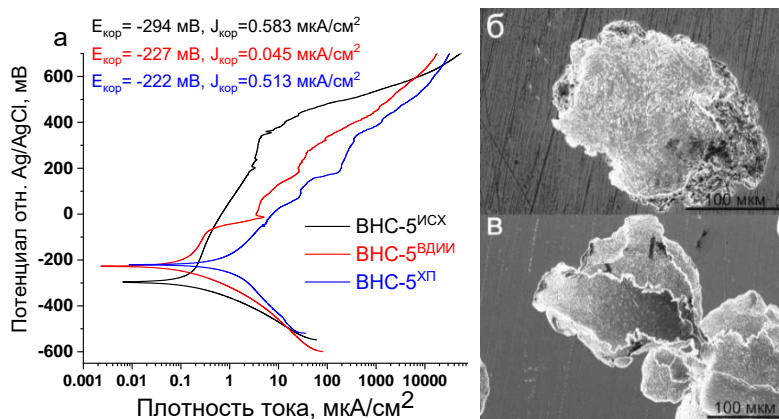


Рис. 2. Потенциодинамические поляризационные кривые (а) образцов стали ВНС-5 в 3,5 (масс. %) растворе NaCl. На (б, в) показаны характерные РЭМ изображения коррозионных повреждений на поверхности ВНС-5<sup>ХП</sup> и ВНС-5<sup>ВДИИ</sup>, соответственно

Таблица 1

Коррозионные характеристики сталей ВНС-5, различающихся способом поверхностной обработки

Наименование образца	$E_{кор}$ , мВ	$J_{кор}$ , мкА/см <sup>2</sup>	$R_p$ , 10 <sup>6</sup> Ом см <sup>2</sup>
ВНС-5 <sup>ИСХ</sup>	-294	0,583	0,0382
ВНС-5 <sup>ХП</sup>	-222	0,513	0,0548
ВНС-5 <sup>ВДИИ</sup>	-227	0,045	0,2963

### Заключение

В работе была оценена коррозионная стойкость стали ВНС-5 после ионно-пучковой и химической обработок. Показано, что высокодозовая ионная имплантация снижает скорость коррозии в 7,6 раз, предположительно, за счет формирования сплошных оксидных пленок на основе  $Cr_2O_3$  с выраженными диэлектрическими свойствами. При этом основными типами коррозионных повреждений у модифицированных образцов являются очаги язвенной (питтинговой) коррозии.

Работы выполнены по теме государственного задания (проект № FSWW-2023-0008) и при поддержке программы развития НИ ТПУ.

### Список литературы

1. Сидорин И.И. и др. *Материаловедение* – Москва: Машиностроение, 1986 – 384 с.
2. Вознесенская В.Н., Каблов Е.Н., Петраков А.Ф. Высокопрочные коррозионностойкие стали аустенитно-мартенситного класса // *«Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2002. – № 7. – С. 34–37.
3. Николаева Е.П. Применение метода шумов Баркгаузена для контроля упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2013. – Т. 15, № 6 (2). – С. 428–431.
4. Потак Я.М. *Высокопрочные стали.* – Москва: Металлургия, 1972. – 208 с.