

УДК 538.971

**Влияние режимов гибридной модификации сталей на их коррозионные свойства**Э.О. Квасович

Научный руководитель: к.т.н. В.А. Грудинин  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [eok15@tpu.ru](mailto:eok15@tpu.ru)

**The effect of the modes of hybrid modification of steels on their corrosion properties**E.O. Kvasovich

Scientific Supervisor: Ph.D V.A. Grudinin  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: [eok15@tpu.ru](mailto:eok15@tpu.ru)

**Abstract.** *In this study, the corrosion resistance of 20X13 and 38X2MYA steel samples subjected to hybrid modification, which included plasma nitriding performed at 480 °C for 180 minutes and thermal chemical and electrochemical oxidation, were evaluated. As a result of corrosion tests, calculations of the corrosion rate for all studied samples and polarization curve were obtained. It was found that the sample after chemical oxidation for 90 minutes ( $4,07 \cdot 10^{-3}$  mm/year,  $4,01 \cdot 10^{-3}$  mm/year) has the lowest corrosion rate, and the sample of electrochemical oxidation has the highest ( $7,76 \cdot 10^{-1}$  mm/year,  $4,67 \cdot 10^{-1}$  mm/year).*

**Key words:** *corrosion resistance, plasma nitriding, chemical oxidation, electrochemical oxidation.*

**Введение**

Для увеличения твердости и износостойкости деталей обычно применяют высоколегированные стали и другие дорогостоящие материалы, что увеличивает итоговую стоимость изделий. Чтобы снизить стоимость этих деталей, можно использовать менее дорогие стали, которые прошли термообработку, такую как плазменное азотирование [1]. Азотирование сталей, несмотря на значительное увеличение поверхностной твердости (в 5–10 раз) и увеличение износостойкости (на 2–3 порядка), зачастую приводит к значительному ухудшению коррозионной стойкости и возникновению межкристаллитной коррозии [2]. В связи с этим возникает необходимость такой модификации поверхности, которая позволит компенсировать снижение коррозионной стойкости без ухудшения механических свойств поверхности. Среди таких технологий востребованными являются диффузионное и плазменное азотирование, иммерсионная ионная имплантация и др. [3, 4].

В данной работе рассмотрена гибридная технология модификации поверхности, которая включает в себя плазменное азотирование (ПА) и окисление, направленное на защиту сталей от коррозии за счет образования оксидной пленки на поверхности. Целью работы является выявление закономерностей формирования коррозионных свойств сталей марок 20X13 и 38X2MYA при их обработке методами азотирования и различными методами окисления (химического, электрохимического).

**Экспериментальная часть**

Плазменное азотирование с использованием высокочастотного (ВЧ) источника проводилось на всех исследуемых образцах при температуре 480 °C в течение 180 минут. Основные этапы проведения процесса и схема описаны в работе [5]. Часть образцов была подвержена электрохимическому окислению, которое проводилось в растворе NaOH в течение 30 минут, а другие образцы химическому окислению в водном растворе на основе смеси KOH и KNO<sub>3</sub> в течение 90 минут и 45 минут.

Сравнительный анализ всех образцов проводился на основе коррозионных испытаний в растворе 3,5 масс. % NaCl при 25 °С методом потенциодинамической поляризации [6]. Электрохимическая система состояла из потенциостата-гальваностата Р-45Х (ОАО "Electrochemical Instruments", Россия) и трехэлектродной ячейки. Эксперименты проводились с использованием насыщенного Ag/AgCl электрода в качестве эталонного и графитового противоэлектрода.

### Результаты

Исследования коррозионных свойств показали, что наиболее эффективной гибридной обработкой является комбинация плазменного азотирования и химического окисления в течение 90 минут. После анализа данных, были получены поляризационные кривые сталей 20х13 и 38Х2МЮА, а также рассчитана скорость коррозии для каждого образца с помощью метода Тафеля [5].

Всего было получено 10 образцов с применением плазменного азотированием с четырьмя различными вариациями последующей обработки: «ПА» – образцы, подвергавшиеся только плазменному азотированию; «ПА+45ХО» – образцы, подвергавшиеся плазменной обработке и термическому окислению в течение 45 минут; «ПА+90ХО» – образцы, подвергавшиеся плазменной обработке и термическому окислению в течение 90 минут, «ПА+ЭХО» – образцы, подвергавшиеся плазменной обработке и электрохимическому окислению в течение 45 минут. На рисунке 1 представлены полученные поляризационные кривые для всех исследуемых образцов.

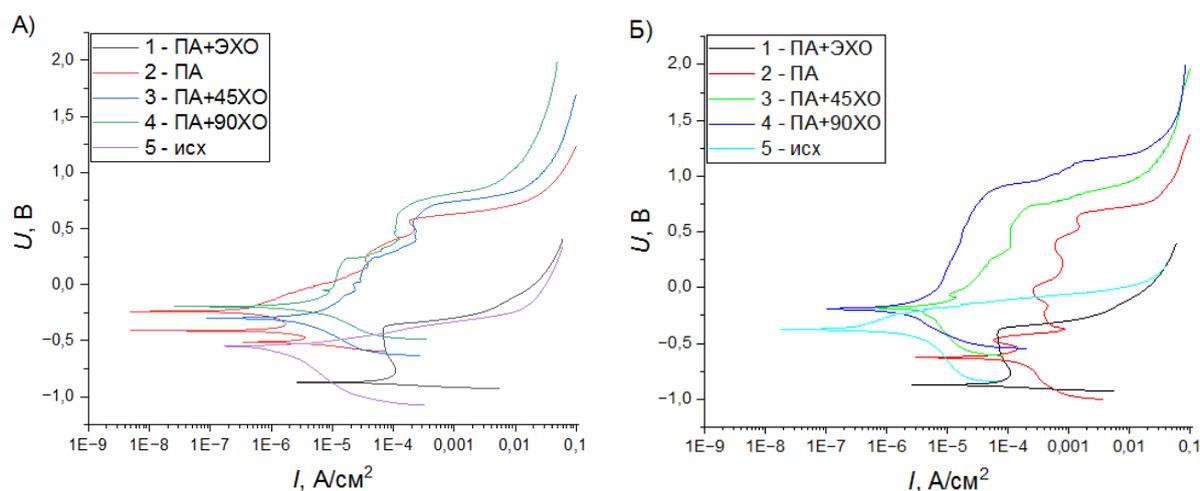


Рис. 1. Поляризационные кривые для образцов из стали а) 20х13 и б) 38Х2МЮА

Анализируя полученные поляризационные кривые видно, что химическое окисление в течение 90 минут приводит к наименьшему значению плотности тока ( $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>), что означает менее интенсивное протекание коррозии в растворе 3,5 % NaCl по сравнению с остальными образцами. Также наблюдается высокая разность между потенциалом точечной коррозии и равновесным потенциалом у образцов после «ПА+90ХО», которая в 5 раз больше, чем у образцов без обработки, что означает увеличение стойкости к точечной коррозии за счет образования на поверхности оксидной защитной пленки. На рисунке 2 представлены скорости коррозии для всех исследуемых образцов в зависимости от режима обработки.

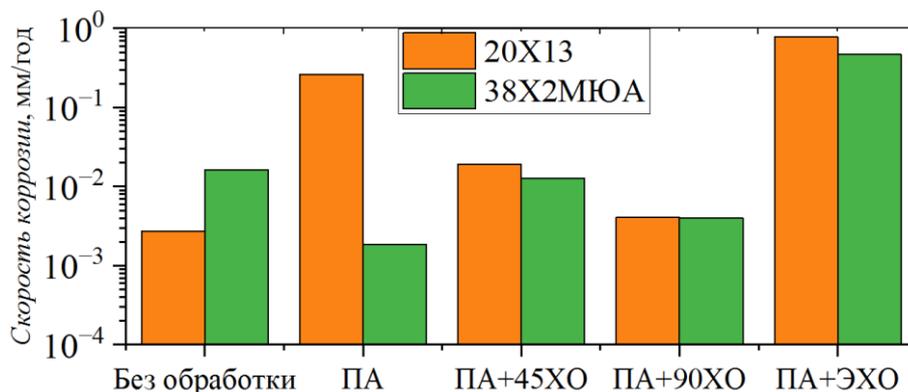


Рис.2. Экспериментальные данные о скорости коррозии полученных образцов

Наименьшая скорость коррозии для стали 20X13 характерна при режиме обработки «ПА+90ХО», для стали 38X2MЮА же скорость коррозии незначительно выше, но значительно увеличивается стойкость к точечной коррозии. Коррозионная стойкость образцов, подвергавшихся плазменному азотированию и электрохимическому окислению, оказалась ниже на 2 порядка, чем у сталей без обработки.

### Заключение

Исследованы закономерностей формирования коррозионных свойств сталей марок 20X13 и 38X2MЮА при гибридной модификации их поверхности. Показано, что при обработке химическим окислением в течение 90 минут коррозионные свойства становится возможным компенсировать ухудшение коррозионных свойств после азотирования, а при электрохимическом окислении эти свойства ухудшаются, скорость коррозии возрастает на 2 порядка. С помощью гибридной модификации не представляется возможным полностью избавиться от точечной коррозии, однако значительно возрастает стойкость к такому типу коррозии.

### Список литературы

1. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей – Москва : Техносфера, 2012. – 462 с.
2. Shujun Hu, Ay Ching Hee, Yue Zhao, Shibo Li. Surface modification of a Ti<sub>2</sub>AlC soft ceramic by plasma nitriding treatment // Surface and Coatings Technology. – 2015 – P. 165–167.
3. Kostov K.G., Ueda M., Lepiensky M., Soares P.C.Jr. Surface modification of metal alloys by plasma immersion ion implantation and subsequent plasma nitriding // Surface and Coatings Technology. – 2004 – P. 204–208.
4. Fu Y. et al. Characterization and tribological evaluation of duplex treatment by depositing carbon nitride films on plasma nitrided Ti-6Al-4V // Journal of materials science. – 2000. – Т. 35, № 9. – P. 2215–2200.
5. Сиделев Д.В., Воронина Е.Д., Кожина О.И. [и др.]. Азотирование стали 40x13 в индуктивно-связанной плазме: влияние потенциала смещения образца // Прикладная физика. – 2022. – № 2. – С. 16–23.
6. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику: Учеб. Пособие для студентов хим. спец. ун-тов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1983. – 400 с.