



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT
FOR CORROSION PROTECTION**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-2

**Повышение коррозионной стойкости низколегированных
конструкционных сталей импульсно-плазменной обработкой**

А.К. Кутуков, А.А. Сергеечев, В.В. Гапонова✉

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
РФ, 142092, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12

e-mail: gaponova@triniti.ru

Аннотация. В данной научной работе исследовано влияние импульсно-плазменной обработки на коррозионные свойства конструкционных сталей (Ст45, 40Х, 65Г, ШХ15). Облучение образцов гелиевой и азотной плазмой производилось на квазистационарном плазменном ускорителе при различных режимах, сопровождающихся оплавлением поверхности. Испытания на коррозионную стойкость проводились методом постоянного погружения в 5%-й раствор *NaCl* в течение 7 суток, контрольное взвешивание производилось раз в 24 часа. Известно, что на коррозионные свойства оказывает влияние состояние поверхности: шероховатость, микротвердость и структура поверхностного слоя. В ходе импульсной плазменной обработки возможно сильное изменение данных характеристик, в особенности шероховатости. Ввиду этого, дополнительно были получены микрофотографии рельефа обработанной поверхности. Установлено, что для всех марок характерно улучшение коррозионных свойств, но с разной степенью эффективности.

Ключевые слова: импульсно-плазменная обработка, конструкционные стали, коррозионная стойкость.

Для цитирования: Кутуков А.К., Сергеечев А.А., Гапонова В.В. Повышение коррозионной стойкости низколегированных конструкционных сталей импульсно-плазменной обработкой // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 17-21. doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-2

Статья получена 24.01.2023, опубликована 01.06.2023.

**Improving the corrosion resistance of low-alloy structural steels
by pulsed plasma treatment**

A.K. Kutukov, A.A. Sergeechev, V.V. Gaponova✉

JSC «SRC RF TRINITY»,
12, Pushkov str., Troitsk, Moscow, 142092, Russian Federation

e-mail: gaponova@triniti.ru

Abstract. In this scientific paper, the effect of pulsed plasma treatment on the corrosion properties of structural steels (St45, 40X, 65G, SHX15) is researched. Irradiation of samples with helium and nitrogen plasma was carried out on a quasi-stationary plasma accelerator under various modes accompanied by surface melting. Corrosion resistance tests were implemented by constant immersion in a 5% *NaCl* solution for 7 days, control weighing was performed once every 24 hours. It is known that the corrosion properties are influenced by the surface condition: roughness, microhardness and the structure of the surface layer. During pulsed plasma processing, a strong change in these characteristics, especially roughness, is possible. In view of this, micrographs of the relief of the treated surface were additionally obtained. It was found that all steel grades are characterized by an improvement in corrosion properties, but with varying degrees of efficiency.

Keywords: pulse plasma treatment, structural steels, corrosion resistance.

For citation: Kutukov, A. K., Sergeechev, A. A., & Gaponova, V. V. (2023). Improving the corrosion resistance of low-alloy structural steels by pulsed plasma treatment. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 28(2), 17-21. doi:10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-2

Received January 24, 2023. Published June 01, 2023.

Введение

Коррозия – это процесс разрушения структуры металлического материала в результате взаимодействия с окружающей средой [1]. Улучшение коррозионных

свойств экономически доступных конструкционных материалов позволит расширить область их применения за счет замещения более дорогих материалов, таких как специальные стали и сплавы. В результате

заметно снизятся затраты на производство деталей и конструкций, работающих в экстремальных условиях. В данной научной работе предложен метод модифицирования поверхности изделий импульсными плазменными потоками (ИПП), Суть ИПП состоит в эффекте фиксации фазовой и структурной составляющих, достигающегося в результате быстрого охлаждения поверхности после нагрева высокоэнергетическим плазменным потоком. Образовавшийся модифицированный слой обычно представлен мелкозернистой или аморфной структурой, также характерно присутствие неравновесных фаз. Перспективность ИПП обработки объясняется возможностью достижения лучших, по сравнению с классическими и хорошо изученными способами, показателей модифицирования конструкционных материалов.

Цель исследовательской работы заключается в определении наиболее эффективных, для повышения коррозионной стойкости, режимов обработки ИПП конструкционных сталей.

Методика эксперимента

В качестве исследуемых марок выбраны широко используемые и недорогие стали Ст45, 40Х, 65Г, ШХ15. Обработка производилась на квазистационарном плазменном ускорителе [2]. В качестве плазмообразующих газов использовались азот и гелий. Выбранные для обработки режимы сопровождались оплавлением поверхности образцов.

Испытания на коррозионную стойкость проводились методом постоянного погружения образцов в 5%-й раствор $NaCl$. Эксперимент длился 7 суток, каждые 24 часа производилось взвешивание образцов на аналитических весах (погрешность измерений составляет 0,1 мг). В качестве параметра оценки степени протекания процесса коррозии берется относительное изменение массы – Δm (%), рассчитываемое по формуле (1):

$$\Delta m_i = \frac{m_{i-1}}{m_i} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_i – масса образца в i -й день эксперимента, г;

m_{i-1} – масса образца в $(i-1)$ -й день эксперимента, г.

Также был рассчитан массовый показатель коррозии – величина, по которой можно судить о скорости процесса разрушения материала – K_m :

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \quad (2)$$

где Δm – изменение массы в процессе эксперимента, г;

S – площадь поверхности образца, m^2 ;

t – время эксперимента, сутки.

Кроме того, проводилось изучение рельефа после облучения с помощью оптического микроскопа.

Результаты и их обсуждение

Исследованы коррозионные свойства для трех типов образцов: без обработки, облученных азотной плазмой и облученных гелиевой плазмой. При обработке азотной плазмой происходит имплантация данного элемента в поверхностный слой материала, что влияет на протекание процесса коррозии.

Согласно полученным данным, обработка ИПП может оказывать различный эффект на коррозионную стойкость сталей. В общем, использование плазмообразующего газа гелий эффективнее способствует замедлению процессов разрушения образцов (рис. 1), что может быть связано со сглаживанием топографических неровностей и отсутствием влияния на фазовый состав, а также гомогенизацией распределения элементов и появлением аморфной структуры в поверхностном слое, что делает материал более устойчивым к коррозии. Внедрение азота способствует получению более дефектной структуры, которая обладает меньшей способностью сопротивления коррозии [3, 4]. Ввиду чего наблюдаемые относительные потери массы для образцов, облученных азотной плазмой, больше.

У нескольких образцов (Ст45 и ШХ15) наблюдается резкое снижение массы на 6 сутки после начала эксперимента. Активное коррозионное разрушение для стали 45 (рис. 1а) после облучения азотом происходило ввиду сильной шероховатости поверхности (рис. 2). Также сказалось влияние дефектной структуры. При этом

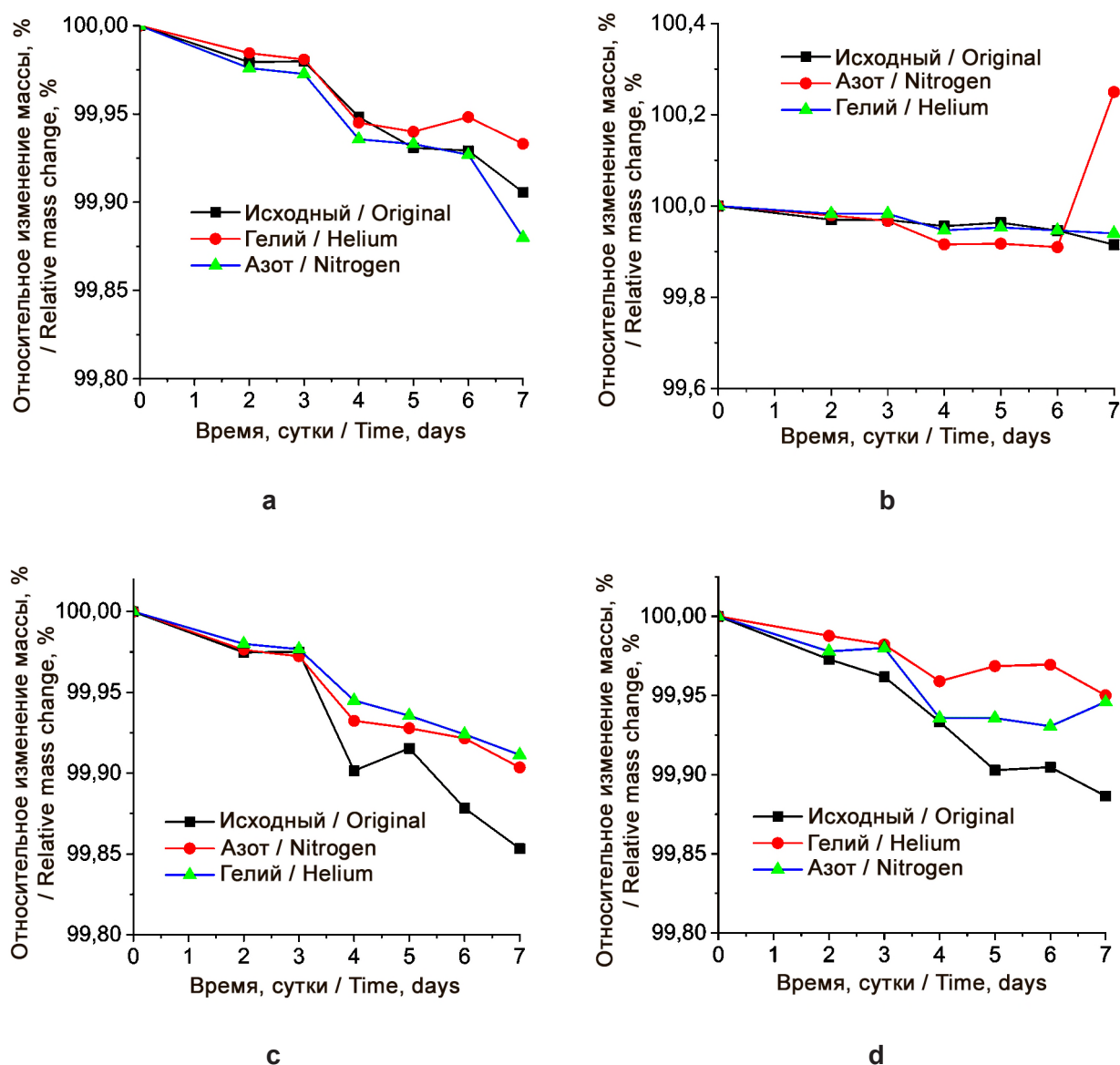


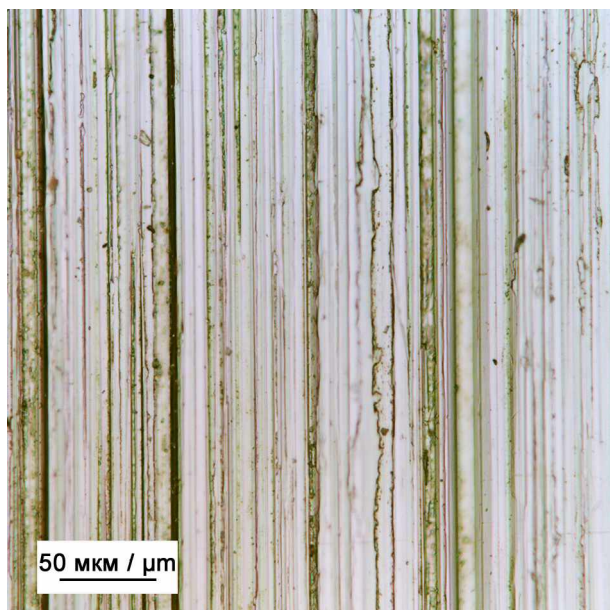
Рис. 1. Зависимости показателя коррозии от времени эксперимента для разных марок конструкционных сталей: а – Ст45; б – 40Х; с – 65Г; д – ШХ15

Fig. 1. The dependence of the corrosion index on the time of the experiment for St45 (a); 40Kh (b); 65G (c); ShKh15 (d)

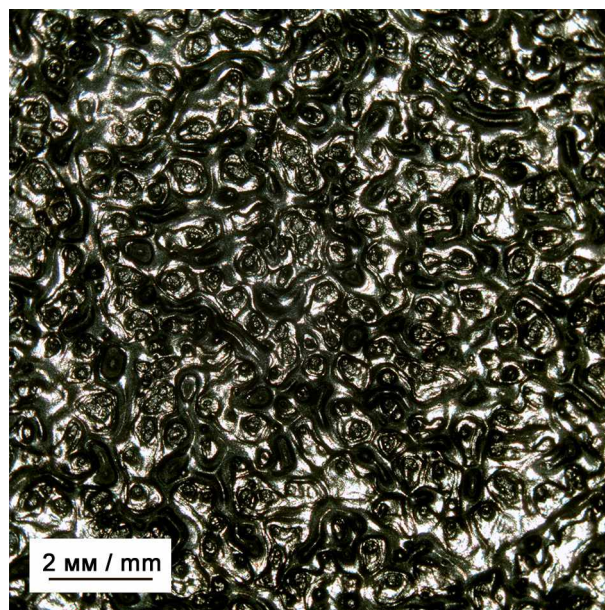
результаты коррозионных испытаний облученных и исходных образцов различаются не существенно: влияние факторов, ухудшающих сопротивляемость разрушению (повышенная шероховатость поверхности, фазовые изменения), превалировало над теми, которые ее повышают (поверхностный слой с аморфной структурой).

Для марки ШХ15 отмечена интенсификация разрушения после гелиевой обработки (рис. 1d). Предполагаемое объяснение – нарушение сплошности защитной оксидной

пленки под действием хлорид ионов, что характерно для сталей, легированных хромом [5]. Облучение азотной плазмой показало более стабильный результат коррозионной стойкости: возможная причина – более высокая температура закалки. Согласно литературным источникам [6], температура закалки влияет на концентрацию некоторых элементов на границах зерен, что напрямую определяет протекание анодных и катодных процессов. Однако в рамках данного исследования не производилось изучение



a



b

Рис. 2. Микрофотографии поверхности стали 45 до (a) и после (b) облучения азотной плазмой
Fig. 2. Micrographs of the surface of steel 45 before (a) nitrogen plasma irradiation and after (b)

распределения легирующих элементов в структуре, поэтому данная причина внесена в ряд возможных.

Процесс коррозии марки 40Х (рис. 1b) отличается от других образцов, облученных азотом – происходит образование соединений в процессе коррозии, из-за чего масса увеличивается. Для данной стали не наблюдается значительного различия коррозионных свойств для исходного и облученных образцов, ввиду того, что в её составе присутствует хром, который способствует повышению сопротивляемости коррозии. Поэтому эффект от импульсной плазменной обработки менее заметен.

Наименее коррозионностойкой оказалась сталь 65Г (рис. 1c) ввиду присутствия марганца в составе и низкого содержания легирующих элементов (Cr, Ni, Cu, например), повышающих степень сопротивляемости разрушению. Кроме того, интенсификации процесса коррозии способствовала и среда, в которой проводился эксперимент – NaCl. Согласно проведенным исследованиям [7], наличие Cl^- ионов способствует протеканию электрохимической реакции за счет образования слоя продуктов коррозии, состоящего из соединений железа ($b\text{-FeO(OH)}$) и марганца. В результате не

возникает защитного эффекта и процесс не замедляется. Обработка ИПП позволила получить большую сопротивляемость коррозии для данного материала. Наиболее значительное влияние оказывает облучение гелиевой плазмой. Немного хуже показатели после азотной обработки, что объясняется большей дефектностью полученной структуры. Таким образом, рекомендуется проводить облучение стали 65Г гелием.

Выводы

В ходе работы произведено исследование влияния облучения ИПП на коррозионную стойкость конструкционных сталей. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

- в результате плазменной обработки происходит повышение сопротивляемости коррозии у всех рассмотренных марок, но с различной степенью эффективности;
- наименее эффективной плазменная обработка оказалась для сталей Ст45 и 40Х, так как получено незначительное улучшение показаний коррозионных свойств;
- существенного увеличения коррозионной стойкости удалось достичь для 65Г за счет торможения процесса диффузии и сегрегации марганца ввиду образования закалоч-

ной структуры;
– для обработки ШХ15 рекомендуется применение азота в качестве плазмообразующего газа.

Литература

1. Заворин А.С. и др. Проблемы коррозии и физико-механические модели разрушения конструкционных материалов для энергомашиностроения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 11. – С. 163-171.
2. Kutukov A.K. et al. Effect of Pulsed Plasma Flow Treatment Parameters on the Thickness, Microhardness, and Elemental and Phase Compositions of Modified Surface Layers of Structural Steel // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – № 10. – P. 1-6.
3. Белый А.В. и др. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. – Минск: Белорусская наука, 2017. – 458 с.
4. Белый А.В. Ионно-лучевое азотирование металлов, сплавов и керамических материалов. – Минск: Белорусская наука, 2014. – 411 с.
5. Звягинцева А.В., Тенькаева А.С., Мозговой Н.В. Воздействие состава природной воды на коррозионную стойкость стали 40Х магистральных трубопроводов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – V. 17, № 5-1. – P. 276-282.
6. Маклецов В.Г. и др. Влияние температуры закалки на электрохимическое поведение стали ШХ 15 в кислых сульфатных средах // Электрохимия. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 378-381.
7. Su G., Gao, X., Huo, M., Xie, H., Du, L., Xu, J., Jiang, Z et al. New insights into the corrosion behaviour of medium manganese steel exposed to a NaCl solution spray //

Construction and Building Materials. – 2020. – V. 261. – P. 1-29.

References

1. Zavorin, A. S., Lyubimova, L. L., Buvakov, K. V., Shmitov, D. M., & Artamontsev, A. I. (2019). Problems of corrosion and physical and mechanical models of destruction of structural materials for power engineering. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 330(11), 163-171.
2. Kutukov, A. K. et al. (2022). Effect of pulsed plasma flow treatment parameters on the thickness, microhardness, and elemental and phase compositions of modified surface layers of structural steel. *Physics of Atomic Nuclei*, (10), 1-6. <https://doi.org/10.1134/s1063778822100325>
3. Bely, A. V., et al. (2017). *Engineering of surfaces of structural materials using plasma and beam technologies*. Minsk: Belarusian Science. ISBN 978-985-08-2140-9.
4. Bely, A. V. (2014). *Ion-beam nitriding of metals, alloys and ceramic materials*. Minsk: Belarusian Science. ISBN 978-985-08-1711-2
5. Zvyagintseva, A. V., Ten'kaeva, A. S., & Mozgovoy, N. V. (2015). The effect of the composition of natural water on the corrosion resistance of steel 40Kh main pipelines. *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 17(5-1), 276-282.
6. Makletsov, V. G., et al. (2001). The influence of the quenching temperature on the electrochemical behavior of steel ShKh15 in acidic sulfate environment. *Electrochemistry*, 37(3), 378-381.
7. Su, G., Gao, X., Huo, M., Xie, H., Du, L., Xu, J., & Jiang, Z. (2020). New insights into the corrosion behaviour of medium manganese steel exposed to a NaCl solution spray. *Construction and Building Materials*, 261, 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119908>

Информация об авторах

Кутуков Антон Константинович, м.н.с., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Российская Федерация
Сергеечев Антон Александрович, инженер, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Российская Федерация
Гапонова Вероника Валерьевна, стажер, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, г. Троицк, Российская Федерация

Information about authors

Anton K. Kutukov, junior scientist, JSC «SSC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russian Federation
Anton A. Sergeechev, engineer, JSC «SRC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russian Federation
Veronika V. Gaponova, intern, JSC «SRC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russian Federation