

УДК 544.537:653

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ СТАЛИ 38ХВФЮА

© 2019 г. *Е. В. Шлякова\**

*Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева, Омск, Россия*

*\*e-mail: Elena6500462@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.04.2018 г.

После доработки 08.10.2018 г.

Принята к публикации 05.11.2018 г.

В статье рассматривается проблема повышения стойкости к коррозионному разрушению стали 38ХВФЮА, используемой для производства ответственных деталей двигателей, путем лазерной термообработки. Описана методика проведения коррозионных испытаний весовым и электрохимическим методами и их результаты, установлено существенное снижение скорости коррозии исследуемой стали после лазерной термообработки, определены оптимальные значения плотности мощности лазерного излучения для достижения максимально эффективной противокоррозионной защиты.

*Ключевые слова:* коррозия, скорость коррозии, электрохимическое определение скорости коррозии, лазерная термообработка.

DOI: 10.1134/S0235010619050098

### ВВЕДЕНИЕ

Детали современной бронетанковой и автомобильной техники работают в исключительно тяжелых условиях, характеризующихся действием агрессивных сред, высоких температур, статических и динамических нагрузок. Экстремальные условия эксплуатации поршневых двигателей приводят к разрушению их деталей вследствие межкристаллитной и питтинговой коррозии, накопления дефектов и трещин, термоусталости, эрозийных повреждений, окисления и выгорания легирующих элементов, фреттинг-коррозии. Рядом авторов приводится статистика неисправностей деталей двигателей, вызванных коррозионными процессами различных типов [1, 2].

Гильзы цилиндров поршневых двигателей внутреннего сгорания работают в условиях резко переменных давлений в надпоршневой полости. В результате интенсивного износа гильзы в нижней части утончаются, а в верхней части, где температуры выше, идет активное разрушение за счет электрохимических процессов. На внутреннюю поверхность стенок гильз цилиндров действуют раскаленные газы, содержащие активные сернистые соединения, способные быстро разрушать азотированное покрытие поверхности. От сгорания одной тонны топлива, имеющего в своем составе около 15 различных сернистых соединений, в двигателе образуется около 20 кг SO<sub>2</sub> или более 25 кг H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, что приводит к усиленной коррозии [1].

Таким образом, проблема повышения стойкости к коррозии сталей, используемых в производстве наиболее ответственных деталей двигателей транспортных средств является актуальной в научном и прикладном аспектах.

Повышение срока службы деталей машин можно обеспечить путем создания на поверхности этих деталей слоев, обладающих высокой коррозионной стойкостью при высоких температурах, твердостью, износостойкостью [3]. Перспективным решением

Таблица 1

Химический состав стали 38ХВФЮА, мас. %

C	Cr	W	V	Al	Mn	Si	Mo	P	S	Cu	Ni
0.35–0.42	0.8–1.1	<1	<1	0.7–1.1	0.3–0.6	0.2–0.45	0.15–0.25	0.025	0.025	0.3	0.3

проблемы представляется использование энергии когерентного светового излучения – лазерного луча.

Преимущества лазерной обработки очевидны: локальность воздействия, минимальные деформации детали, высокая концентрация энергии, отсутствие контакта с обрабатываемым изделием, возможность обработки труднодоступных участков, высокая степень автоматизации, экологическая чистота, высокая производительность [4–6].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сталь 38ХВФЮА относится к классу конструкционных легированных сталей, специально азотируемая, используется для изготовления гильз цилиндров форсированных двигателей внутреннего сгорания большой мощности современных транспортных средств, деталей турбиномоторостроения, валиков, втулок, шпинделей, игл форсунок, пальцев, плунжеров и др. [7, 8]. Химический состав стали показан в табл. 1.

Для выполнения эксперимента было изготовлено 30 образцов стали 38ХВФЮА площадью 4 см<sup>2</sup>. Перед коррозионными испытаниями образцы стали промыты дистиллированной водой, высушены фильтровальной бумагой, обезжирены спирто-эфирной смесью, выдержаны в эксикаторе с термически обработанным силикагелем в течение 24 ч.

25 образцов стали 38ХВФЮА подвергалось облучению на лазерной технологической установке ЛТУ-2М при нескольких значениях плотности мощности лазерного излучения:  $q_1 = 2 \cdot 10^4$ ;  $q_2 = 3 \cdot 10^4$ ;  $q_3 = 5 \cdot 10^4$ ;  $q_4 = 7 \cdot 10^4$ ;  $q_5 = 9 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Длительность импульса лазерного излучения  $\tau = 1.5 \cdot 10^{-3}$  с. Коэффициент перекрытия равен 50%. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

По результатам испытаний построен график зависимости скорости коррозии стали 38ХВФЮА в кислой среде от плотности мощности лазерного излучения (рис. 1).

Очевидно, что лазерная обработка повышает коррозионную стойкость стали 38ХВФЮА. При плотности мощности лазерного излучения  $5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> скорость коррозии снижается в 3.74 раза. Эффективность лазерной обработки как способа защиты поверхности стали 38ХВФЮА от коррозионного разрушения достаточно высока, наибольшая степень защиты достигается при плотности мощности излучения  $5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> – 73.25%.

С целью подтверждения результатов исследования скорости коррозии весовым методом образцы стали 38ХВФЮА были подвергнуты электрохимическим испытаниям. Определение коррозионной стойкости стали проводилось электрохимическим способом методом построения потенциостатических поляризационных кривых. Поляризационная кривая – графическая зависимость плотности тока от потенциала [9].

Потенциостатический метод основан на установлении с помощью потенциостата постоянного во времени значения потенциала исследуемого электрода по отношению

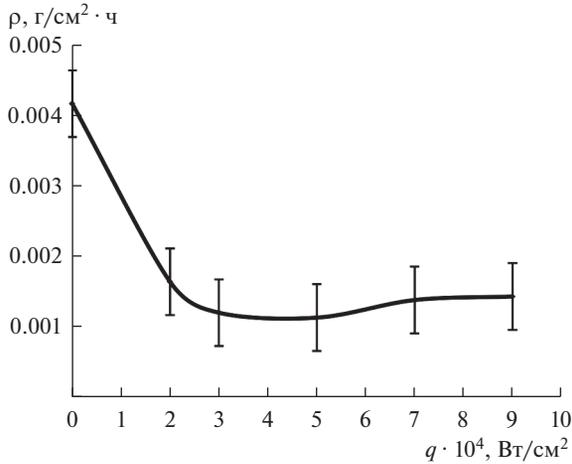


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии стали 38ХВФЮА от плотности мощности лазерного излучения.

к электроду сравнения и измерении тока в цепи исследуемый—вспомогательный электроды [9, 10].

Важным признаком электрохимических реакций является эквивалентность их скорости плотности тока  $i$ . Плотность анодного тока можно рассчитать по формуле [10]:

$$i_a = \frac{nF\Delta F}{SA_M\tau},$$

где  $A_M$  — атомная масса металла,  $\Delta m$  — потеря массы металла за время  $\tau$ ,  $S$  — площадь электрода,  $n$  — число электронов,  $F$  — число Фарадея.

Количественная связь между скоростью электрохимического процесса и электродным потенциалом описывается уравнением Фольмера—Фрумкина [10]:

$$i_a = k \exp\left[\frac{\beta n F (E - E_p)}{RT}\right],$$

Таблица 2

Результаты весового анализа образцов из стали 38ХВФЮА

№ п/п	$q$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\Delta m_{\text{ср}}$ , г	$\rho$ , г/см <sup>2</sup> · ч	$Z$ , %
1	—	0.0249	0.00415	—
2	$2 \cdot 10^4$	0.00972	0.00162	60.96
3	$3 \cdot 10^4$	0.00708	0.00118	71.57
4	$5 \cdot 10^4$	0.00664	0.00111	73.25
5	$7 \cdot 10^4$	0.00816	0.00136	67.23
6	$9 \cdot 10^4$	0.00844	0.00141	66.02

где  $i_a$  – скорость анодной реакции, выраженная в единицах плотности тока,  $\beta$  – коэффициент переноса для анодной реакции,  $E$  – электродный потенциал металла в данных условиях,  $E_p$  – равновесный электродный потенциал реакции.

Прологарифмировав предыдущее уравнение, имеем:

$$\lg i_a = \frac{\ln k}{2.3} + \frac{\beta n F (E - E_p)}{2.3 RT}.$$

Если обозначить:

$$b = \frac{2.3 RT}{\beta n F},$$

то образуется уравнение:

$$E = a' + b \lg i_a,$$

где  $a'$  – постоянная, а  $b = \frac{d \lg i_a}{dE}$  – характеристика скорости растворения металла.

Зависимость  $i_a$  от электродного потенциала металла  $E$  выражается уравнением Тафеля, величина  $b$  – тафелевый наклон (наклон линейных кривых в координатах  $E - \lg i_a$ ) [10].

Перед электрохимическими испытаниями образцы покрывались слоем горячей смесью из канифоли и воска (1 : 1). На поверхности образца счищался рабочий участок размером 1 см<sup>2</sup>, чтобы устранить влияние торцов образца. Рабочий участок обезжиривался спиртоэфирным раствором. Хлорсеребряный электрод использовался в качестве электрода сравнения. Вспомогательный электрод размещался в отсеке, отделенном от испытуемого электрода стеклянным фильтром. Поляризация осуществлялась с помощью потенциостата П-5827М в стационарной ячейке ЯСЭ-2 при температуре 25°C. Электролитом служил 4н раствор серной кислоты. Поляризация начиналась через 10–15 мин после погружения образца в раствор электролита и установления стационарного потенциала. Катодная и анодная ветви устанавливались в прямом направлении от стационарного потенциала последовательно, не вынимая образца из раствора. Выдержка при каждом заданном потенциале составляла 3 мин, после чего фиксировался ток.

По вычисленным значениям плотности тока  $i = I/S$  (мА/см<sup>2</sup>) построен график зависимости  $E$  от  $\lg i$  (рис. 2). Из графика путем экстраполяции прямолинейных участков к значению стационарного потенциала определена величина  $\lg i$  как координата точки пересечения экстраполяционного продолжения катодного и анодного участков поляризационной кривой, затем вычислено значение тока коррозии. Поверхность необлученных образцов в значительной степени подвержена коррозии в агрессивной среде, содержащей 4н раствор серной кислоты. Плотность тока коррозии составляет  $\approx 0.75$  мА/см<sup>2</sup>. Плотность тока коррозии образцов стали 38ХВФЮА относительно хлорсеребряного электрода в кислой среде после лазерной термообработки с плотностью мощности  $q = 3 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> составляет  $\approx 0.318$  мА/см<sup>2</sup> (рис. 3). Плотность тока коррозии стали 38ХВФЮА относительно хлорсеребряного электрода в 4н серной кислоте после лазерной термообработки при  $q = 5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> равна  $\approx 0.22$  мА/см<sup>2</sup> (рис. 4). Плотность тока коррозии стали 38ХВФЮА в кислой среде после лазерной термообработки с плотностью мощности излучения  $q = 7 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> равна  $\approx 0.24$  мА/см<sup>2</sup> (рис. 5).

Сравнивая электрохимическое поведение необлученных образцов стали 38ХВФЮА и облученных при различных значениях плотности мощности лазерного излучения, можно утверждать, что токи коррозии облученных образцов ниже, чем необлученных.

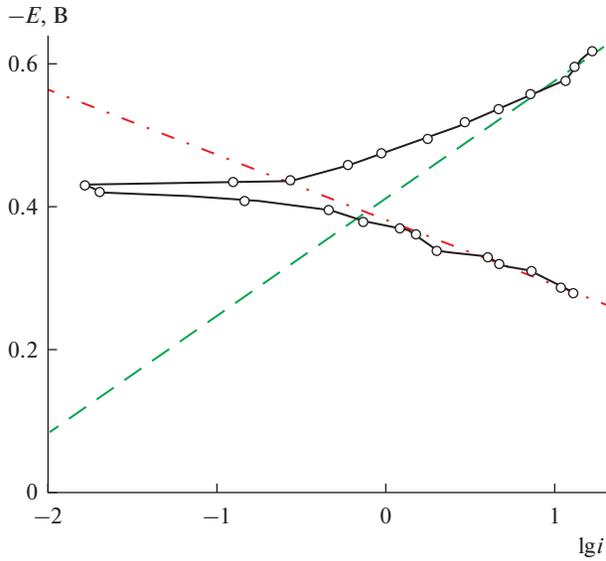


Рис. 2. Зависимость  $\lg i$  коррозии от заданного потенциала для необлученных образцов из стали 38ХВФЮА.

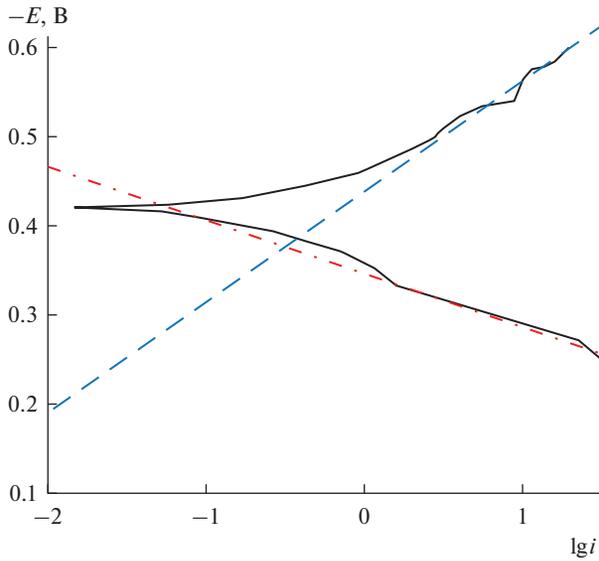
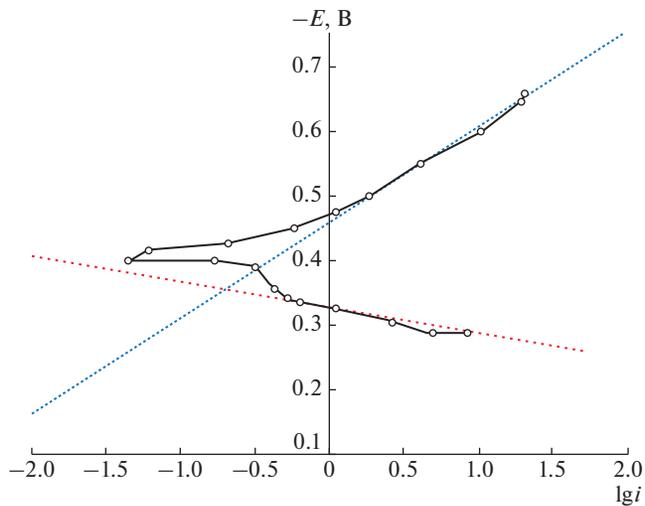
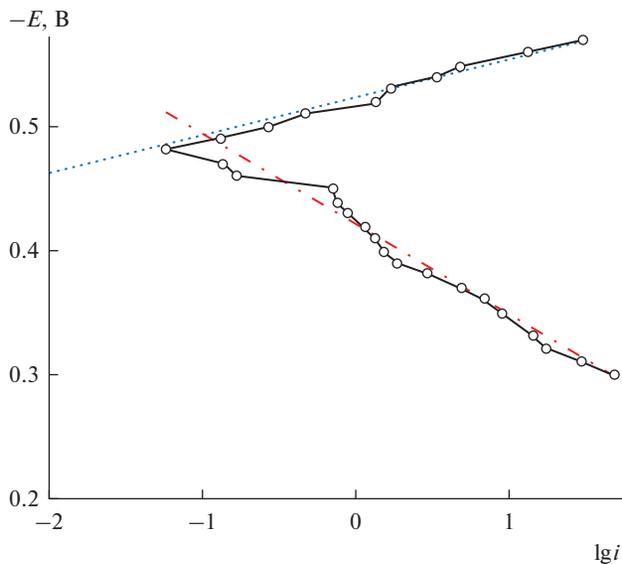


Рис. 3. Зависимость  $\lg i$  коррозии от заданного потенциала для облученных образцов из стали 38ХВФЮА ( $q = 3 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>).



**Рис. 4.** Зависимость  $\lg i$  коррозии от заданного потенциала для облученных образцов из стали 38ХВФЮА ( $q = 5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>).



**Рис. 5.** Зависимость  $\lg i$  коррозии от заданного потенциала для облученных образцов из стали 38ХВФЮА ( $q = 7 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>).

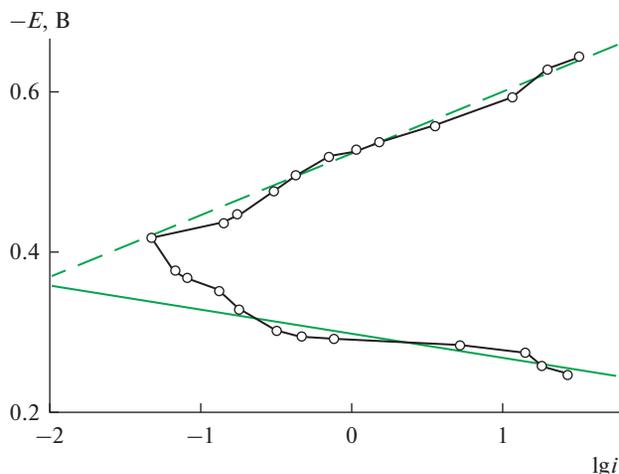


Рис. 6. Зависимость  $\lg i$  коррозии от заданного потенциала для образцов стали 38ХВФЮА после термообработки непрерывным лазерным излучением.

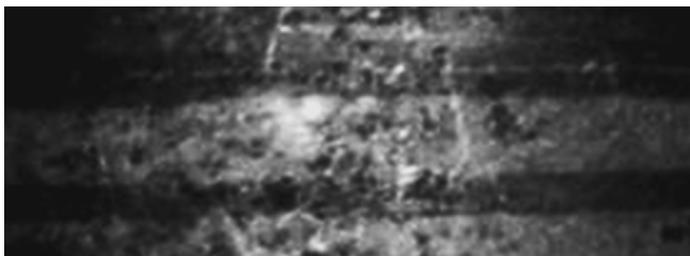


Рис. 7. Поверхность образца стали 38ХВФЮА после облучения лазером непрерывного действия.

Следовательно, скорость коррозии облученных образцов в 4 н растворе серной кислоты значительно ниже.

Рассматривалась возможность обработки образцов стали 38ХВФЮА излучением лазера непрерывного действия (560 об./мин). Обработка велась на лазерной установке ЛТН-2. Для образцов стали 38ХВФЮА после обработки лазером непрерывного действия плотность тока коррозии составила  $0.008 \text{ mA/cm}^2$  (рис. 6).

На рис. 7 представлена фотография поверхности стали 38ХВФЮА после облучения лазером непрерывного действия, на которой четко просматривается зона лазерного воздействия в виде продольных дорожек.

Эти области характеризуются повышенной коррозионной стойкостью за счет измельчения размеров зерен, которое влечет за собой увеличение однородности поверхностного слоя стали. Результаты исследования влияния лазерного облучения на скорость коррозии образцов стали 38ХВФЮА представлены в табл. 3, на рис. 8.

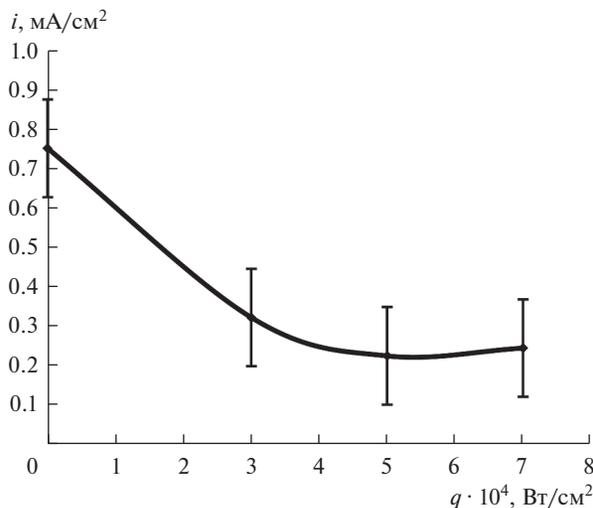


Рис. 8. Зависимость плотности тока коррозии от плотности мощности лазерного излучения.

После лазерной обработки на поверхности стали 38ХВФЮА образуется “белый слой” (рис. 9, 10), который обладает низкой травимостью в растворах кислот. По мнению ряда авторов [11–16] основной структурной составляющей “белого слоя” является скрытокристаллический мартенсит. Поэтому “белый слой” характеризуется высокой стойкостью к коррозии.

Таблица 3

Электрохимические характеристики коррозии образцов стали 38ХВФЮА

Режимы лазерной обработки	$\lg i$	$i, \text{mA}/\text{cm}^2$
Необлученные образцы	-0.125	0.750
$q = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{cm}^2$	-0.497	0.318
$q = 5 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{cm}^2$	-0.656	0.220
$q = 7 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{cm}^2$	-0.61	0.240
Непрерывное облучение	-2.12	0.008



Рис. 9. Микрофотография поверхности стали марки 38ХВФЮА после лазерной обработки: “белый слой”.

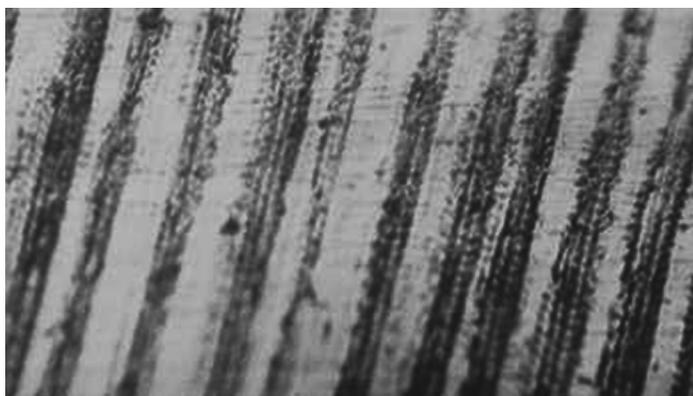


Рис. 10. Фотография поверхностного слоя стали 38ХВФЮА после обработки непрерывным лазерным излучением.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Электрохимическое определение скорости коррозии стали 38ХВФЮА подтверждает результаты весовых испытаний. После лазерной обработки в импульсном режиме при плотности мощности лазерного излучения до  $7 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> токи коррозии образцов стали 38ХВФЮА уменьшаются, что указывает на снижение скорости коррозии исследуемых образцов в 4н растворе серной кислоты.

2. Термообработка непрерывным лазерным излучением образцов стали 38ХВФЮА приводит к существенному снижению токов коррозии.

3. Снижение скорости коррозии в исследуемых образцах происходит за счет торможения анодного процесса растворения железа, что вызвано растворением карбидов и равномерным их распределением в поверхностном слое.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б а т и щ е в А. Н. Состояние и перспективы развития восстановления изношенных деталей машин // Научно-технический сборник МВВДИУ. 1997. 1. С. 4–12.

2. Шлякова Е. В., Соловьев А. А. Исследование влияния лазерной термообработки на стойкость к коррозии деталей двигателя внутреннего сгорания // Вестник академии военных наук. 2010. 1. № 30. С. 259–264.
3. Шлякова Е. В., Соловьев А. А. Повышение стойкости к износу деталей машин методом лазерной обработки // Вестник академии военных наук. 2010. 3. № 32. С. 244–247.
4. Ковш И. Б. Состояние и перспективы развития лазерных технологий в России // Конверсия в машиностроении. 2000. № 2. С. 51–58.
5. Латыпов Р. Р., Терегулов Н. Г., Смыслов А. М. Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении. М.: Машиностроение, 2007.
6. Шлякова Е. В., Соловьев А. А., Князев И. М. Упрочнение и повышение стойкости к коррозии деталей двигателя внутреннего сгорания методом лазерной термообработки // Вестник академии военных наук. 2013. 4. № 45. С. 196–202.
7. Фетисов Г. П., Карпман М. Г., Матюнин В. М. Материаловедение и технология материалов. М.: Высшая школа, 2002.
8. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003.
9. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. Электрохимия. М.: Химия, 2001.
10. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002.
11. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Тарасенко В. М. Упрочнение поверхности сплавов лазерным излучением // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 9. С. 124–131.
12. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Методы поверхностной лазерной обработки. М.: Высшая школа, 1987.
13. Мозговой И. В., Соловьев А. А., Шлякова Е. В. Анतिकоррозионная поверхностная обработка металлов. Омск: ОмГТУ, 2006.
14. Смирнова Н. А., Мисюров А. И. Особенности образования структуры при лазерной обработке // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2012. С. 115–129.
15. Решетников С. М. Коррозионно-электрохимическое поведение стали У-10, подвергнутой лазерной обработке // Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. 2012. № 2. С. 37–42.
16. Решетников С. М. Коррозионно-электрохимическое поведение стали 40Х, подвергнутой лазерной обработке // Химическая физика и мезоскопия. 2011. 13. С. 255–261.

### **A Study of the Influence of Laser Heat Treatment on the Corrosion Rate of Steel 38KhVfYuA**

*E. V. Shlyakova*

*Omsk tank-automotive engineering Institute (branch) of the Military Academy  
of logistics behalf of the army General A. V. Khruleva, Omsk, Russia*

The article deals with the problem of increasing resistance to corrosion of steel 38KhVfYuA used for the production of critical engine parts by laser heat treatment. The technique of carrying out corrosion tests by weight and electrochemical methods and their results are described, a significant reduction in the corrosion rate of the steel under study after laser heat treatment is established, optimal values of the power density of laser radiation are determined to achieve the most effective anticorrosive protection.

*Keywords:* corrosion, corrosion rate, electrochemical determination of corrosion rate, laser heat treatment

## REFERENCES

1. Batishchev A.N. Sostojanie i perspektivy razvitiya vosstanovleniya iznoshennyh detalej mashin [Status and prospects of restoration of worn machine parts] // Nauchno-tehnicheskij sbornik MVVDIU [Scientific and technical collection]. 1997. 1. P. 4–12. (In Russian).
2. Shlyakova E.V., Solov'ev A.A. Issledovanie vliyaniya lazernoj termoobrabotki na stojkost' k korrozii detalej dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Study of the influence of laser heat treatment on the corrosion resistance of parts of an internal combustion engine] // Vestnik akademii voennyh nauk. 2010. 1. № 30. P. 259–264. (In Russian).
3. Shlyakova E.V., Solov'ev A.A. Povyshenie stojkosti k iznosu detalej mashin metodom lazernoj obrabotki [Increase of wear resistance of machine parts by laser processing method] // Vestnik akademii voennyh nauk. 2010. 3. № 32. P. 244–247. (In Russian).
4. Kovsh I.B. Sostojanie i perspektivy razvitiya lazernyh tehnologij v Rossii [State and prospects of development of laser technologies in Russia] // Konferentsiya v mashinostroenii. 2000. № 2. P. 51–58. (In Russian).
5. Latypov R.R., Teregulov N.G., Smyslov A.M. Tehnologija lazernoj obrabotki konstrukcionnyh i instrumental'nyh materialov v aviadvigatelsestroenii [The technology of laser processing of structural and tool materials in the aircraft engine industry] Moscow, Mashinostroenie, 2007. (In Russian).
6. Shlyakova E.V., Solov'ev A.A., Knyazev I.M. Uprochnenie i povyshenie stojkosti k korrozii detalej dvigatelya vnutrennego sgoraniya metodom lazernoj termoobrabotki [Hardening and improving the corrosion resistance of parts of an internal combustion engine by laser heat treatment] // Vestnik akademii voennyh nauk. 2013. 4. № 45. P. 196–202. (In Russian).
7. Fetisov G.P., Karpman M.G., Matjunin V.M. Materialovedenie i tehnologija materialov [Materials Science and materials technology]. Moscow. Vysshaja shkola. 2002. (In Russian).
8. Zubchenko A.S. Marochnik stalej i splavov [The marochnik of steels and alloys]. Moscow. Mashinostroenie. 2003. (In Russian).
9. Damaskin B.B., Petrij O.A., Cirlina G.A. Jelektrohimija [Electrochemistry]. Moscow. Himija. 2001. (In Russian).
10. Semenova I.V., Florianovich G.M., Horoshilov A.V. Korrozija i zashhita ot korrozii [Corrosion and corrosion protection]. Moscow. Fizmatlit. 2002. (In Russian).
11. Grigor'janc A.G., Safonov A.N., Tarasenko V.M. Uprochnenie poverhnosti splavov lazernym izlucheniem [Surface Hardening of alloys by laser radiation] // Poverhnost'. Fizika, himija, mehanika. 1983. № 9. P. 124–131. (In Russian).
12. Grigor'janc A.G., Safonov A.N. Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki [Methods of surface laser processing]. Moscow. Vysshajashkola. 1987. (In Russian).
13. Mozgovej I.V., Solov'ev A.A., Shlyakova E.V. Antikorrozionnaya poverhnostnaya obrabotka metallov [Anti-corrosion surface treatment of metals]. Omsk. OmGTU. 2006. (In Russian).
14. Smirnova N.A., Misyurov A.I. Osobennosti obrazovaniya struktury pri lazernoj obrabotke [Features of structure formation in laser processing] // Vestnik MGTU im. N.EH. Baumana. Mashinostroenie. 2012. P. 115–129. (In Russian).
15. Reshetnikov S.M. Korrozionno-ehlektrohimicheskoe povedenie stali U-10, podvergnutoj lazernoj obrabotke [Corrosion-electrochemical behavior of steel U-10, subjected to laser processing] // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Fizika. Himiya. 2012. № 2. P. 37–42. (In Russian).
16. Reshetnikov S.M. Korrozionno-ehlektrohimicheskoe povedenie stali 40H, podvergnutoj lazernoj obrabotke [Corrosion-electrochemical behavior of steel 40X, subjected to laser processing] // Himicheskaya fizika i mezoskopija. 2011. 13. P. 255–261. (In Russian).