

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СПЛАВА ХН70ВМТЮ

Е.В. Шлякова

Омский автобронетанковый инженерный институт
Кафедра физико-математических дисциплин

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния лазерной термообработки на коррозионную стойкость жаропрочного никелевого сплава ХН70ВМТЮ. Установлено существенное снижение скорости коррозии в результате лазерного облучения сплава, не приводящего к оплавлению поверхности, за счет структурных изменений в сплаве. Описаны результаты исследования изменения микротвердости сплава ХН70ВМТЮ после лазерной термообработки, доказано повышение микротвердости поверхности сплава ХН70ВМТЮ в результате лазерной термообработки. Рассчитаны корреляционные зависимости между коррозионной стойкостью и микротвердостью поверхности сплава ХН70ВМТЮ после воздействия лазерного излучения в оптимальных режимах. Доказано наличие линейной зависимости между стойкостью к коррозии и микротвердостью сплава ХН70ВМТЮ, выведена математическая модель лазерной термообработки, позволяющая использовать импульсное лазерное излучение как способ защиты от коррозии и упрочнения никелевого сплава ХН70ВМТЮ.

Ключевые слова: коррозия, коррозионная стойкость, микротвердость, жаропрочные никелевые сплавы.

Никелевый сплав ХН70ВМТЮ как жаропрочный материал используется для изготовления рабочих и направляющих лопаток – деталей, определяющих ресурс газотурбинных двигателей. Одновременное воздействие агрессивной высокотемпературной среды, механических нагрузок влечет за собой их разрушение вследствие питтингообразования, возникновения и развития межкристаллитной и фреттинг-коррозии, образуются и накапливаются дефекты, трещины, поверхностные эрозии [1]. Легирующие элементы окисляются и выгорают. До 70 % неисправностей транспортных средств специального назначения, оснащенных газотурбинными двигателями, обусловлены коррозионными процессами, которые протекают по химическому и электрохимическому механизму под воздействием разнообразных коррозионных агентов и сопровождающимися коррозионными разрушениями различных видов [2].

На рис.1 показан фрагмент лопаточного аппарата двигателя ГТД-1250, которым оснащены некоторые модели современных танков.



Р и с . 1. Фрагмент лопаточного аппарата газотурбинного двигателя ГТД-1250

Использование для изготовления лопаток газовых турбин жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов, в которых легирующими элементами являются Cr, W, Mo, Al, Ti, продиктовано высокими рабочими температурами и циклическими напряжениями, возникающими в процессе функционирования газотурбинного двигателя.

Ассортимент никелевых сплавов, используемых в производстве газотурбинных двигателей, достаточно широк, но все они подвергаются сульфидно-оксидной коррозии [2, 3]. В ряде источников описаны признаки и стадии развития сульфидно-оксидной коррозии: образование мелких бугорков, сколы бугорков, возникновение язв и корок из продуктов коррозии [4]. Первоначально возникающая на металлической поверхности оксидная пленка разрушается вследствие колебаний температуры и ударного воздействия твердых частиц, которые присутствуют в топливно-воздушной смеси. Наблюдается коррозионная кавитация [5]. На поврежденных участках облегчается доступ агрессивных компонентов, коррозия резко ускоряется.

Для газотурбинных танковых двигателей типа ГТД-1000Т и ГТД-1250 используется топливо РТ (дублирующие топлива ТС-1, Т-1), являющееся продуктом прямой перегонки из малосернистых и сернистых нефтей, содержащее сернистые соединения и соли щелочных металлов – главные коррозионные агенты. Быстрому течению коррозионных процессов способствуют соединения ванадия, хлора, свинца и углерода.

На поверхности лопаток образуются отложения, состоящие из веществ минеральной части топлив и пыли, усиливающие

коррозионные процессы. Скорость коррозии определяется температурой газового потока и его скоростью, химическим составом золовых отложений, материалом лопаток и другими факторами [6-8]. Толщина слоя золовых отложений влияет на скорость сульфидно-оксидной коррозии, глубину коррозионных разрушений на поверхности никелевого сплава [2, 3].

Следовательно, сульфидно-оксидная коррозия представляет собой достаточно сложное явление, но исследованное не в полной мере.

Основным способом защиты материала лопаток газовых турбин от коррозионного разрушения является нанесение многослойных достаточно сложных по составу многокомпонентных покрытий [9-13]. Однако при этом не исключается образование пор в пространстве между зёрнами металла, расслоение покрытий, слабая адгезия с поверхностью. Процессы создания и нанесения таких покрытий зачастую очень трудоемки.

Перспективным является получение устойчивой к коррозии поверхности никелевых сплавов с помощью луча лазера [14-16]. Излучение лазера монохроматично, когерентно, концентрировано, имеет особую пространственно-временную структуру.

Луч лазера может воздействовать на поверхность материала импульсно и непрерывно. Одним из наиболее важных параметров, определивших широкое технологическое применение лазерного излучения, является плотность мощности лазерного излучения q (Вт/см²). Для импульсного излучения плотность мощности определяется из выражения:

$$q = \frac{E}{S \cdot \tau} = \frac{E^4}{\tau \cdot \pi \cdot d_n^2},$$

где E – энергия импульса, Дж; S – площадь пятна фокусировки, мм²; τ – длительность импульса, мс; d_n – диаметр пятна фокусирования, мм².

Для непрерывного лазерного излучения:

$$q = \frac{P_{cp}}{S},$$

где P_{cp} – средняя мощность излучения, Вт.

Параметры лазерного излучения определяют разнообразные процессы, протекающие в поверхностных слоях обрабатываемого материала: лазерную закалку, оплавление и аморфизацию [17]. В обработанном материале образуется зона термического влияния, структура которой обуславливает поверхностные свойства. Высокая коррозионная стойкость достигается, если лазерное воздействие приводит к измельчению зёрен металла до субзерна, образованию

закалочных структур или аморфных слоев [17, 18].

Представляет научный и практический интерес исследование влияния лазерной термической обработки на коррозионную стойкость жаропрочных никелевых сплавов, из которых изготавливаются детали, функционирующие в агрессивной высокотемпературной среде.

Химический состав сплава ХН70ВМТЮ, который является объектом исследований, представлен в таблице 1.

Таблица 1
Химический состав сплава ХН70ВМТЮ, %

Ni	Al	B	C	Ce	Cr	Fe	Mn
основа	1,7-2,3	≤ 0,020	≤ 0,12	≤ 0,020	13,0-16,0	≤ 5,0	≤ 0,50
	Mo	P	S	Si	Ti	V	W
	2,0-4,0	≤ 0,015	≤ 0,010	≤ 0,60	1,8-2,3	0,1-0,5	5,0-7,0

Скорость коррозии определялась весовым (гравиметрическим) методом, позволяющий рассчитывать потерю массы металла в результате коррозионного процесса. Массовый показатель (ρ) характеризует изменение массы (Δm) образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла S и к единице времени τ [5]:

$$\rho = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau},$$

где ρ – скорость коррозии, $\text{г/см}^2 \cdot \text{час}$ ($\text{г/дм}^2 \cdot \text{час}$); Δm – изменение массы, г; S – площадь поверхности образца, см^2 (дм^2); τ – время испытания, час.

Коррозионные испытания проводились на 30 образцах сплава ХН70ВМТЮ площадью 4 см^2 в растворе H_2SO_4 с эквивалентной концентрацией 4 моль/л. Образцы сплава промыты дистиллированной водой, обработаны спиртом, высушены с применением термически обработанного силикагеля. 25 образцов впоследствии подверглись лазерной термической обработке. В качестве поглощающего вещества с целью уменьшения отражения лазерного луча от обрабатываемой поверхности образцов использован технический углерод.

В эксперименте использовалась лазерная технологическая установка ЛТУ-2М. Термообработка осуществлялась импульсами при значениях плотности мощности лазерного излучения: $1 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$; $3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$; $5 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$; $7 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$; $9 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ при длительности импульса лазерного излучения $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; коэффициент перекрытия составлял 50%.

Облученные и необлученные образцы подвергались коррозионным испытаниям в 4 н растворе H_2SO_4 в течение 6 часов,

впоследствии образцы промыты водой, обработаны горячим спиртом, продукты коррозии удалены механически. Образцы вновь промыты, высушены, обезжирены, взвешены.

Эффективность лазерной термообработки как способа повышения коррозионной стойкости рассчитана по формуле:

$$Z = \frac{\rho_n - \rho_o}{\rho_n} \cdot 100\%,$$

где Z – эффективность защиты от коррозии, %; ρ_n – скорость коррозии в необлученных образцах; ρ_o – скорость коррозии облученных образцов.

Результаты определения скорости коррозии весовым методом в таблице 2.

Таблица 2

Результаты коррозионных испытаний сплава ХН70ВМТЮ после лазерной термообработки

№ п/п	q , Вт/см ²	$\Delta m_{\text{ср}}$, г	ρ , г/см ² · час	Z , %
1	-	0,02234	0,00372	-
2	$1 \cdot 10^4$	0,00976	0,00163	56,18
3	$3 \cdot 10^4$	0,00776	0,00129	65,32
4	$5 \cdot 10^4$	0,00618	0,00103	72,33
5	$7 \cdot 10^4$	0,00732	0,00122	67,20
6	$9 \cdot 10^4$	0,00850	0,00142	61,83

Построен график зависимости скорости коррозии сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения (рис. 2).

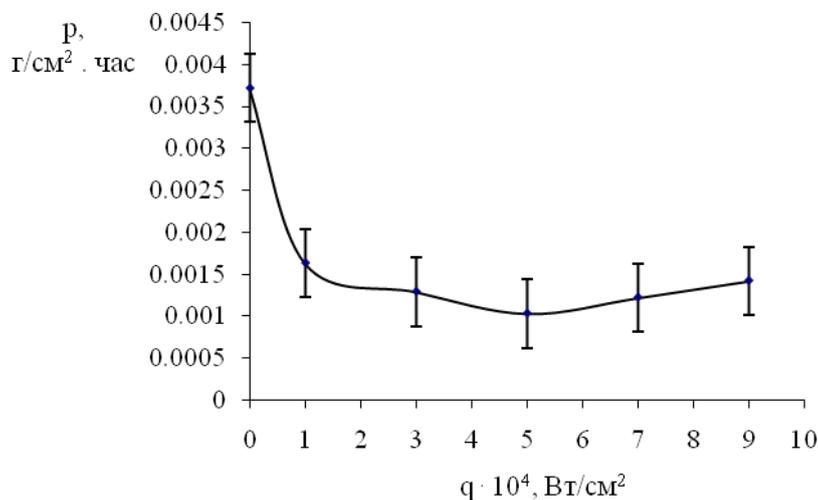
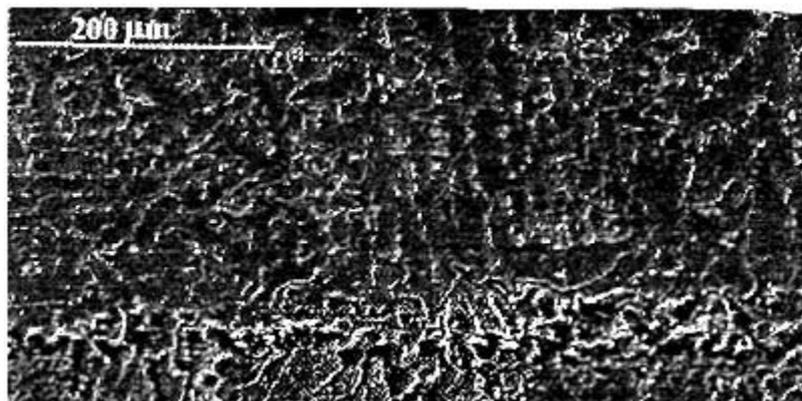


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения

Наименьшая скорость коррозии достигается при воздействии лазерного излучения с плотностью мощности $5 \cdot 10^4$ Вт/см².

Коррозионная стойкость сплавов возрастает при повышении однородности структуры. Сплавы на никелевой основе, в отличие от железоуглеродистых сплавов, не претерпевают фазовых изменений при лазерной термообработке, т.к. для никеля невозможны аллотропические превращения. Повышение коррозионной стойкости объясняется тем, что в результате лазерного воздействия в сплаве ХН70ВМТЮ происходит измельчение зерен с образованием субзерна, структура сплава становится более гомогенной (рис. 3).



Р и с . 3. Микрофотография поверхностного слоя сплава ХН70ВМТЮ после лазерной обработки

Таким образом, исследования доказали, что коррозионная стойкость жаропрочного сплава ХН70ВМТЮ после лазерной обработки при плотности мощности излучения $5 \cdot 10^4$ Вт/см² возрастает в 3,6 раз.

Исследовано влияние лазерной термической обработки на микротвердость поверхности сплава ХН70ВМТЮ. Перед испытаниями образцы сплава ХН70ВМТЮ площадью 4 см² шлифовались, их поверхность подвергалась электролитическому полированию с применением никелевого катода ($t = 18$ °С, $\tau = 1$ мин, $i = 20$ А/дм², $U = 30$ В) в растворе, содержащем 390 мл Н₂SO₄, 290 мл Н₂O, 20 мл НСlO₄, 40 мл СН₃COOH [7].

Часть образцов подвергалась лазерному облучению импульсами длительностью $1,5 \cdot 10^{-3}$ с с 50 %-ным перекрытием пятен излучения в различных значениях плотности мощности, для уменьшения отражения луча лазера на поверхность образцов предварительно наносился технический углерод. Измерение микротвердости поверхности на приборе ПМТ-3 с применением алмазных наконечников с четырехгранной пирамидой и квадратным основанием по существующей методике с нагрузкой 100 кгс. Микротвердость

рассчитывалась по формуле:

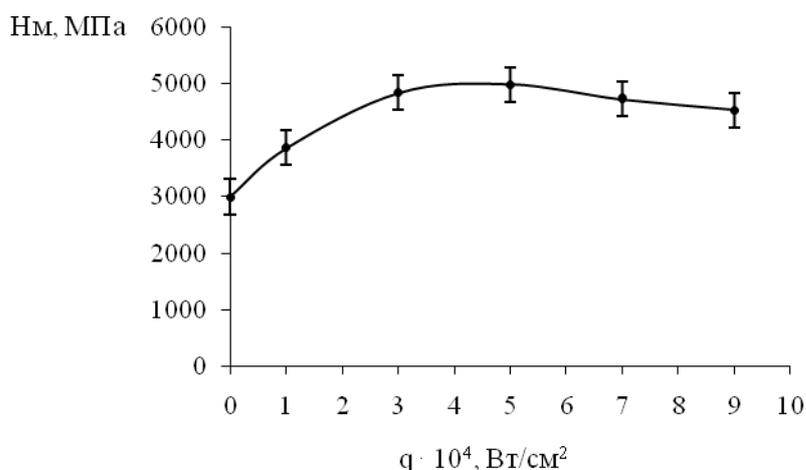
$$H = \frac{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \approx \frac{1,854P}{d^2},$$

где d – диагональ отпечатка, мм, α – пространственный угол в вершине, P – нормальная нагрузка (кгс).

Исходная микротвердость образцов сплава ХН70ВМТЮ равна 3000 ± 10 МПа. Лазерное облучение приводит к упрочнению поверхности сплава ХН70ВМТЮ, микротвердость возрастает. Наибольшее значение микротвердости исследуемых образцов достигается при плотности мощности лазерного излучения равной $5 \cdot 10^4$ Вт/см², что превосходит начальное значение в 1,66 раза (рис. 4).

При более высоких значениях плотности мощности лазерного излучения возможно разупрочнение поверхностных слоев.

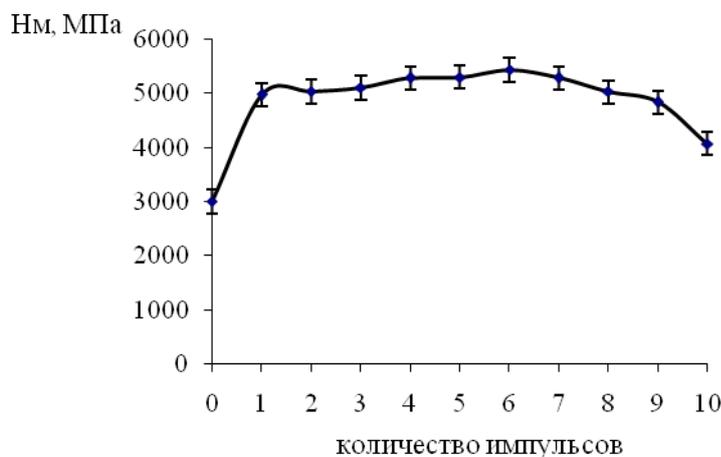
Лазерное воздействие на металлические материалы заключается в высокоскоростном нагреве поверхности с последующим охлаждением. В облученном материале происходят структурные превращения, сопровождающиеся образованием специфической ультрадисперсной однородной структуры с уникальными свойствами [1;18].



Р и с . 4. Зависимость микротвердости сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения

Для установления максимально возможного значения микротвердости при заданной плотности мощности было проведено многоимпульсное облучение образцов сплава ХН70ВМТЮ при плотности мощности излучения $5 \cdot 10^4$ Вт/см². С увеличением количества импульсов наблюдается рост микротвердости поверхности, при

воздействии шести импульсов достигается ее максимальное значение, затем происходит ее снижение (рис. 5).



Р и с . 5. Микротвердость образцов сплава ХН70ВМТЮ после многоимпульсной лазерной термообработки без оплавления поверхности

Каждый последующий импульс вызывает повторный нагрев уже упрочненной зоны, ввиду высокой частоты следования импульсов на поверхности температура приближалась к критической, поэтому происходит разупрочнение ранее упрочненных слоев, возможно оплавление, образование кратеров на обрабатываемой поверхности. Поэтому облучение поверхности большим количеством импульсов нецелесообразно, кроме того многоимпульсная обработка ведет к снижению производительности процесса.

Определены корреляционные зависимости коррозионной стойкости и микротвердости сплава ХН70ВМТЮ после лазерной термообработки. Коррозионная стойкость – величина, обратная скорости коррозии исследуемого материала в испытываемой среде. Зависимости микротвердости и коррозионной стойкости сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения представляют собой кривые с максимумом, соответствующим значению плотности мощности $5 \cdot 10^4$ Вт/см² (рис. 6).

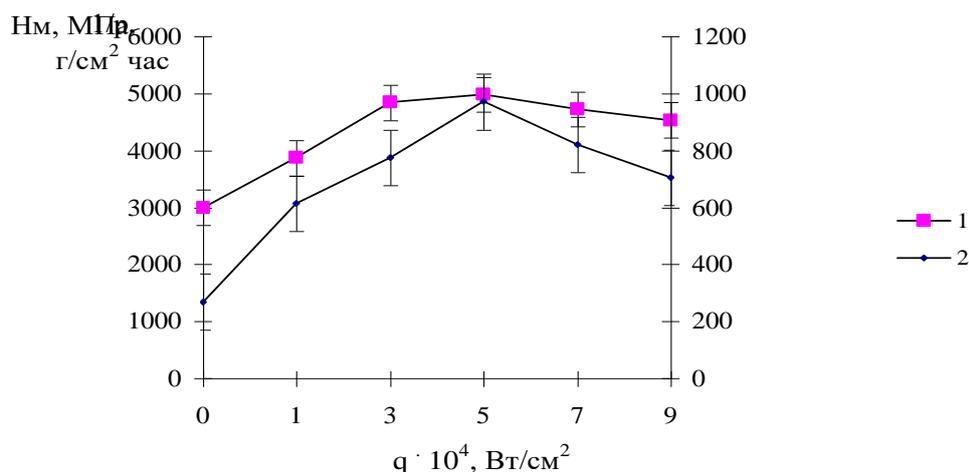


Рис. 6. Зависимости микротвердости (1) и коррозионной стойкости (2) сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения при лазерной термообработке

Обработка результатов экспериментов методами математической статистики приводит с учетом значимости коэффициентов к уравнениям:

1) зависимость микротвердости сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения:

$$Y = -157,42x^2 + 1438,5x + 1643,8; R^2 = 0,9662;$$

2) зависимость коррозионной стойкости сплава ХН70ВМТЮ от плотности мощности лазерного излучения:

$$Y = -63,432x^2 + 529,49x - 199,11; R^2 = 0,9708.$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента, определенное для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы $m = n-2 = 4$, составляет $t_{\alpha m} = 2,77$, т.е. при $T_{\text{расч}} \gg t_{\alpha m}$ на статистически значимом уровне микротвердость и коррозионная стойкость сплава ХН70ВМТЮ коррелируют. Коэффициент парной корреляции близок к 1, следовательно, между коррозионной стойкостью и микротвердостью исследуемого сплава существует линейная зависимость, которая выражается уравнением:

$$\frac{1}{p} = a + bH_{\mu}.$$

Коэффициент b можно рассчитать по формуле:

$$b = \frac{\sum(x_i - x')(y_i - y')}{\sum(x_i - x')^2}.$$

$$b = 0,292.$$

$$a = y' - bx' = 696,33 - 0,292 \cdot 4290,83 = -556,59.$$

Для сплава ХН70ВМТЮ:

$$\frac{1}{\rho} = -556,59 + 0,292H_{\mu}.$$

В рамках проведенных исследований решены следующие задачи:

1. Доказано повышение коррозионной стойкости сплава ХН70ВМТЮ в 3,6 раза после лазерной термообработки.

2. Установлено, что в результате лазерной термообработки при плотности мощности лазерного излучения $5 \cdot 10^4$ Вт/см² микротвердость поверхности сплава ХН70ВМТЮ возрастает в 1,66 раз.

3. Доказано наличие корреляции между коррозионной стойкостью сплава ХН70ВМТЮ и микротвердостью его поверхности после лазерной термообработки, установлено, что между исследуемыми характеристиками существует линейная зависимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлякова Е.В. Повышение стойкости к коррозии и износу поверхностей изделий из жаропрочных сталей и сплавов методом лазерной обработки: дис. ...канд. техн. наук. Омск, 2009. 149 с.

2. Гишваров А. С. Повреждаемость материалов энергетических установок в условиях коррозионно-активной среды. М.: Машиностроение, 2014. 297 с.

3. Гишваров А.С., Давыдов М.Н. Методы испытаний лопаток турбин на высокотемпературную газовую коррозию // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 1 (67). С. 45–54.

4. Гецов Л.Б., Иванов С.А., Круковский П.Г., Рыбников А.И. Методика оценки ресурса лопаток ГТД без покрытий с учетом процессов высокотемпературной коррозии // Научные труды VI Международного симпозиума «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева. Т.2. Великий Новгород, 2003. С.347-358.

5. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002. 335 с.

6. Гецов Л.Б. Коррозия материалов и ее влияние на прочность энергоустановок. СПб: СПбГПУ, 2005. 324 с.

7. Гецов Л.Б., Дашунин Н.В., Рыбников А.И. Эксплуатационная надежность лопаток ГТУ из современных жаропрочных сплавов // Материалы VI Международной конференции «Современные материалы, технологии и их использование в технике». СПб: СПбГПУ, 2004. С.204-208.

8. Гецов Л.Б., Зеленский В.Г. Эрозионные процессы в энергетических машинах // Труды ЦКТИ. 2002. № 289. С.169-178.

9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 6. С. 60–70.

10. Д.С. Кашин Д.С., Дергачева П.Е., Стехов П.А. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом (обзор)//Труды ВИАМ. 2018. №5 (65). С.64-74.
11. К вопросу об эффективности многокомпонентных покрытий для жаропрочных сплавов / Абраимов Н.В. [и др.] //Коррозия: материалы, защита. 2005. № 10. С. 10-13.
12. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий//Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.
13. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
14. Коррозионно-электрохимическое поведение стали У-10, подвергнутой лазерной обработке /Решетников С.М. [и др.]//Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. 2012. Вып. 2. С.37-42.
15. Коррозионно-электрохимическое поведение стали 40Х, подвергнутой лазерной обработке /Решетников С.М. [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т.13. С. 255-261.
16. Упрочнение и повышение стойкости к коррозии деталей двигателя внутреннего сгорания методом лазерной термообработки /Шлякова Е.В. [и др.]//Вестник академии военных наук. 2013. № 4(45).С.196-202.
17. Смирнова Н.А., Мисюров А.И. Особенности образования структуры при лазерной обработке //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С.115-129.
18. Мозговой И.В., Соловьев А.А., Шлякова Е.В. Антикоррозионная поверхностная обработка металлов. Омск: ОмГТУ, 2006. 188 с.

RESEARCH OF INFLUENCE OF LASER HEAT TREATMENT ON THE CORROSION RESISTANCE OF THE ALLOY XH70BMTЮ

E.V. Shlyakova

Omsk Tank-Automotive Engineering Institute
Physics and Mathematics Department

The article presents the results of an experimental study of the effect of laser heat treatment on the corrosion resistance of heat-resistant Ni-cell alloy XH70BMTЮ. A significant decrease in the corrosion rate due to laser irradiation of the alloy, which does not lead to melting of the surface, due to structural changes in the alloy, was found. The results of the study of changes of microhardness of alloy XH70BMTЮ after laser heat treatment, were described increase of microhardness of the alloy surface XH70BMTЮ as a result of laser heat treatment was proved. The correlation between the corrosion resistance and microhardness of the surface of the alloy XH70BMTЮ after exposure to laser radiation in optimal conditions is calculated. The presence of a linear

relationship between the corrosion resistance and microhardness of the alloy ХН70ВМТЮ is proved, a mathematical model of laser heat treatment is derived. It which allows using pulsed laser radiation as a method of corrosion protection and hardening of the Nickel alloy ХН70ВМТЮ.

Key words: corrosion, corrosion resistance, microhardness, heat-resistant Nickel alloys.

Об авторе:

ШЛЯКОВА ЕЛЕНА ВАЛЕРИЕВНА, кандидат технических наук, доцент кафедры физико-математических дисциплин Омского автобронетанкового инженерного института, e-mail: elena6500462@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 июля 2018 года