

3. Ковнеристый, Ю. К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. – М. : Наука, 1982. – 164 с.
4. Алексеев, А. Г. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев, О. М. Гусева, В. С. Семичев // НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
5. Банный, В. А. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена / В. А. Банный, И. В. Царенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 3. – С. 3–6.
6. Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В. А. Гольдаде [и др.]. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2000. – 260 с.
7. Радиопоглощающий материал для верхней одежды : пат. 7364 ВУ, МКП 7 А41D31/00, G21F3/02 / В. А. Банный, Л. С. Пинчук, А. В. Макаревич. – № a20011080 ; заявл. 19.12.2001 ; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3.
8. Банный, В. А. Модифицированные углеродным наполнителем радиопоглощающие композиционные материалы на основе полиэтилена / В. А. Банный, И. В. Царенко, С. И. Красюк // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 129–130.
9. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергия, 1969. – 408 с.
10. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая Рос. энцикл., 1994.

УДК 6217.014

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

М. Н. Верещагин², М. Ю. Целуев², С. Н. Целуева¹

¹*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

²*Государственное научное учреждение «Институт механики
металлополимерных систем имени В. А. Белого»
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Одной из распространенных технологических схем процесса лазерной обработки металлических деталей является лазерное «глазурирование» нанесенного тонкого слоя порошка на подложку [1], [5]. Взаимодействие лазерного излучения (ЛИ) с твердым телом обеспечивает возможность получения микроструктурных и аморфных структур в тонких поверхностных слоях деталей [0]. Неравновесная структура образуется вследствие воздействия лазерного луча с высокой плотностью энергии на металл за короткий промежуток времени. При этом основная часть ЛИ идет на локальное расплавление малых объемов металла вблизи поверхности, тогда как основная масса детали остается «холодной». Наличие такого взаимодействия пары *расплав–деталь* позволяет фиксировать высокие скорости охлаждения около 10^5 – 10^7 К/с. Импульсное плавление малых объемов металла на поверхности обеспечивает получение однородных жидкостей (расплавов), которые после кристаллизации могут фиксировать структуру жидкости с уникальными свойствами.

Основными физическими параметрами процесса импульсной лазерной поверхностной обработки (ИЛПО) твердых тел является удельная плотность мощности поглощенного лазерного потока (10^3 – 10^6 Вт/см²) и время взаимодействия металла с лучом (10^{-3} – 10^{-5} с).

Целью работы является исследование процесса модифицирования поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой.

Для экспериментального изучения влияния технологических факторов на свойства изделий, получаемых методом модифицирования поверхностных слоев лазерной обработкой, разработана экспериментальная установка, включающая лазерную установку для импульсной сварки, резки и термообработки Квант-15 и координатный стол.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что результаты ИЛПО с изменением химического состава, определяемые конечными свойствами и структурой обработанных материалов, существенно зависят от уровня технологических факторов процесса.

Одним из наиболее значимых факторов процесса ИЛПО является плотность мощности (величина энерговклада) ЛИ на обрабатываемой поверхности. Полученные экспериментальные данные о результатах ИЛПО с изменением химического состава поверхности заготовки позволяют сделать вывод о наличии трех диапазонов энерговклада. При малом энерговкладе (отсутствует проплавление материала основы или присутствуют только локальные очаги оплавления) процессы легирования и наплавки не осуществляются в связи с отсутствием адгезионной связи между металлом основы и легирующим слоем. При среднем энерговкладе (однородное по длине лазерной дорожки проплавление материала основы на небольшую глубину) происходит процесс лазерной наплавки материала с незначительным изменением химического состава наплавляемого слоя, при этом за счет сплавления материала основы с наплавляемым металлом формируется высокая адгезионная связь между покрытием и заготовкой. При высоком энерговкладе (значительное проплавление материала основы) происходит процесс легирования поверхности изделия со значительным перераспределением легирующего слоя вглубь основы. При этом температура поверхности обработки значительно превышает температуру кипения материала, что приводит к удалению жидкой фазы из зоны обработки с образованием кратеров и наплывов на поверхности изделия. В общем случае при увеличении энерговклада происходит ухудшение характеристик качества поверхности изделия.

Конкретные диапазоны энергетических воздействий зависят от теплофизических и оптических характеристик обрабатываемых материалов, а также качества теплового контакта основы образца и предварительно нанесенного покрытия. В качестве образцов использовали стали Ст3, 45, 20Х13 и медь М2. Диаграммы результатов ИЛПО с изменением химического состава поверхности образцов из стали 45 и меди М2 с предварительно нанесенным слоем толщиной 100 мкм из аморфизируемого сплава $Fe_{63}Ni_5Co_3Cr_7Mo_4V_{18}$ представлены на рис. 1. Для определения границ интервалов энерговклада, определяющих соответствующие результаты ИЛПО, использовали обработку экспериментальных данных (точки на графиках) методом наименьших квадратов [2]. Наплавка покрытия из сплава системы Fe–Ni–Co–Cr–Mo–V на металлическую основу из сталей Ст3, 45, 20Х13 начинается при плотности ЛИ на поверхности обработки 1800–2000 Вт/мм², а легирование – при 3500–4000 Вт/мм².

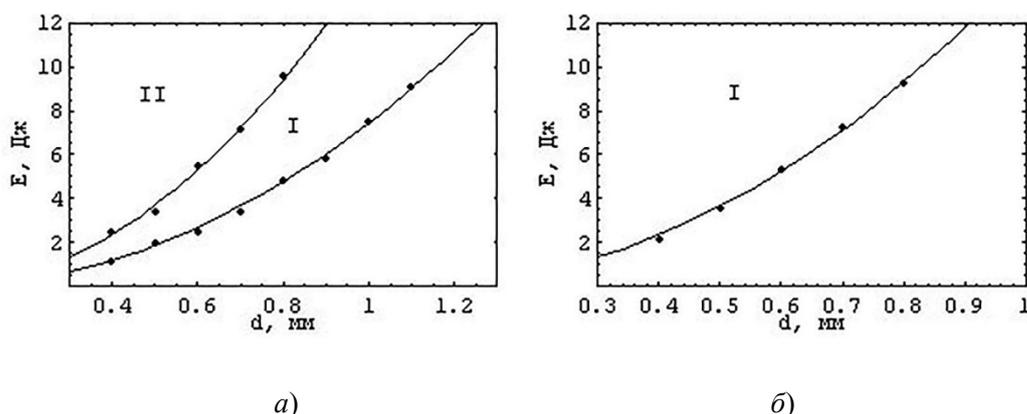


Рис. 1. Диаграммы результатов ИЛПО с изменением химического состава поверхности заготовки:
 а – материал заготовки – сталь 45; б – материал заготовки – медь М2:
 I – область наплавки; II – область легирования

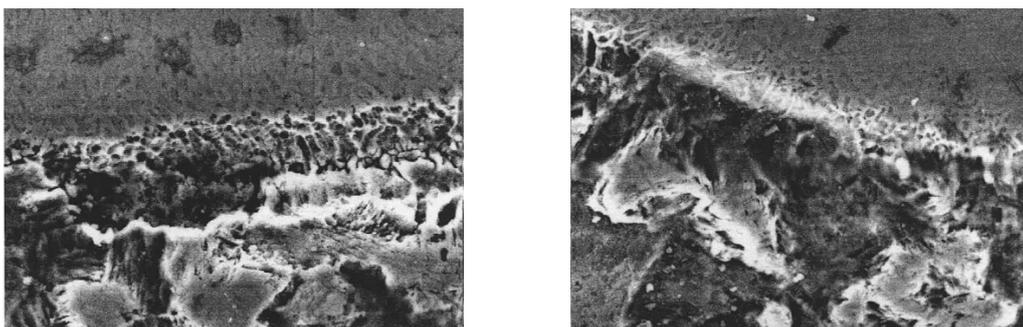
Другим важным фактором ИЛПО является частота следования импульсов ЛИ. С увеличением этого технологического параметра процесса происходит снижение времени остывания металла в паузах между импульсами, что ведет к повышению энергонакопления, а значит, и средней температуры в материале образца. В ходе экспериментов установлено, что для получения аморфно-кристаллического слоя на поверхности изделия частота следования импульсов ЛИ не должна превышать 3–8 Гц. При увеличении частоты следования импульсов ЛИ более 10 Гц аморфизация поверхности не происходит.

Поскольку при ИЛПО различные слои материала нагревались до разных температур, зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение. По результатам измерения микротвердости и исследования микроструктуры по глубине ЗЛВ в общем случае зафиксировано три принципиально различных по природе фазовых превращений слоя. Первый слой от поверхности образца – зона оплавления, получен при закалке из расплавленного состояния. Количество аморфной фазы в поверхностном слое изделия составляло 70–80 %. Кристаллическая составляющая была представлена α -фазой, интерметаллическими соединениями FeCr и FeCrMo и металлическим соединением Fe_2V . Микротвердость ЗО составляла 800–910 HV, причем большие значения наблюдались в нижней части зоны. Второй слой ЗЛВ – зона термического влияния (ЗТВ), получен при закалке из твердого состояния. Особенности структуры данного слоя для сталей обусловлены неполной и неомогенной (по углероду) аустенизацией материала основы образцов в условиях высокоскоростного лазерного нагрева и, как следствие, закалкой из двухфазной ($\alpha + \gamma$ -фаза) области. Третий слой имеет структуру и микротвердость исходного состояния материала основы образцов.

Наибольший интерес представляет структура и микротвердость соответствующих слоев ЗЛВ в случаях, когда в процессе ИЛПО с изменением химического состава в поверхности зафиксирована аморфно-кристаллическая структура. При наплавке аморфизируемого сплава Fe–Ni–Co–Cr–Mo–V на металлическую основу из стали 45 (рис. 2, а) аморфно-кристаллический (до 25 % кристаллической фазы) слой имеет толщину 75–100 мкм и микротвердость 800–870 HV; ЗТВ характеризуется структурной неоднородностью: вблизи границы оплавления вокруг мартенсита, сформированного на месте бывших перлитных колоний, образуется тростито-ферритная сетка, переходящая в фер-

ритную вблизи к границе с зоной, имеющей исходную структуру основы металла; микротвердость ЗТВ 290–350 HV; ЗТВ имеет толщину 15–25 мкм и переходит в исходную феррито-перлитную структуру с микротвердостью 120–140 HV.

В случае обработки образцов с основой из стали 20X13 (рис. 2, б) ЗО представляет собой аморфно-кристаллический слой (до 20 % кристаллической фазы) толщиной 70–90 мкм с микротвердостью 800–850 HV; ЗТВ толщиной 15–30 мкм имеет микротвердость 430–470 HV и состоит из мартенсита и большого количества остаточного аустенита; исходная структура основы образцов феррито-перлитная с микротвердостью 210–280 HV.



а) (×4000)

б) (×1000)

Рис. 2. Микроструктуры образцов после ИЛПО с изменением химического состава поверхности:

а – материал основы – сталь 45; $\nu = 5$ Гц; $E = 7$ Дж; $d = 1$ мм;
 б – материал основы – сталь 20X13; $\nu = 3$ Гц; $E = 8$ Дж; $d = 1$ мм

Для всех образцов, обработанных в режиме наплавания покрытия, анализ микроструктуры материала в месте контакта ЗО и ЗТВ показывает хорошую адгезию наплавленного слоя к металлической основе. На всем протяжении границы оплавления наличия пор, трещин или каких-либо других дефектов не обнаружено. Испытания на изгиб приводили к появлению сетки трещин на поверхности образцов, однако отделение наплавленного покрытия от основы образца не наблюдалось.

Результаты исследований триботехнических характеристик полученных образцов показывают, что ИЛПО с изменением химического состава поверхности в режиме наплавки позволяет получать износостойкие покрытия без пор и дефектов. У аморфно-кристаллического покрытия фактически отсутствует период приработки и снижается склонность к схватыванию, при этом коэффициент трения составляет 0,17–0,2.

В общем случае ИЛПО с оплавлением поверхности приводит к ухудшению качества рельефа поверхности, поскольку высокие градиенты температуры, имеющиеся в зоне оплавления, приводят к значительным градиентам поверхностного натяжения жидкой фазы и образованию циркуляционного движения в жидкости [4]. Обработка поверхности в режиме наплавки при средних величинах энергозатрат приводит к формированию зоны оплавления, имеющей небольшую глубину и относительно большую ширину. В случае увеличения энергозатрат происходит значительное резкое ухудшение качества поверхностного слоя, определяемое волнистостью (максимальной высотой напылов) и микрогеометрией (шероховатостью).

На основании полученного экспериментального материала при получении износостойких покрытий с аморфной и аморфно-кристаллической структурой на поверх-

ности металлических изделий методом ИЛПО с изменением химического состава поверхности рекомендуется использовать средний диапазон энерговклада (определяемый для различных материалов экспериментально или с помощью соответствующих математических моделей) и частоту следования импульсов излучения до 3–8 Гц.

Л и т е р а т у р а

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
3. Криштал, М. Л. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера / М. Л. Криштал, А. А. Жуков, А. Н. Кокора. – М. : Metallurgia, 1973. – 192 с.
4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
5. Леонтьев, П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, Н. Г. Чеканова, М. Г. Хан. – М. : Metallurgia, 1986. – 142 с.

УДК 541.124:542.952.6:547.313

**ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА
ТИТАНА НА АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ–ОЛОВО**

**О. П. Бачко, А. В. Пянко, П. Б. Кубрак,
О. А. Алисиенок, А. А. Черник**

*Учреждение образования «Белорусский государственный
технологический университет», г. Минск*

Перспективным направлением в исследованиях является разработка и исследование материалов с исключительными физическими, химическими и функциональными свойствами. Потребность в улучшенных эксплуатационных характеристиках материалов приводит к разработке новых нанокomпозиционных покрытий. К таким покрытиям относятся антибактериальные покрытия, которые эффективно убивают бактерии на металлических поверхностях без необходимости ультрафиолетового излучения.

Для антибактериальных покрытий повышенные износостойкость и коррозионная стойкость являются ключевыми требованиями. Таким образом, цель работы заключалась в разработке состава электролита для формирования электрохимических антибактериальных покрытий и исследовании свойств осаждаемых покрытий. Высокая эффективность уничтожения бактерий требует высокого содержания серебра или меди в составе покрытий, что приводит к сильному снижению его твердости и, следовательно, его защитной способности. В связи с этим в качестве объекта исследования был выбран сплав олово–никель с внедрением наноразмерного диоксида титана [1]–[4].

Наноразмерный диоксид титана обладает способностью поглощать видимый свет, антибактериальными свойствами, имеет повышенную фотокаталитическую активность [3]. В связи с этим был разработан технологический процесс, позволяющий получать композиционное электрохимическое покрытие на основе сплава никель–олово, содержащее 65 % олова и 35 % никеля, с включением наночастиц золя TiO_2 менее 1 %.

Исследовано влияние температуры осаждения и рН фторид-хлоридного электролита электрохимического формирования покрытия никель–олово–диоксид титана