

## Технология лазерного нанесения и свойства композитных покрытий на основе алюминия

Разработаны и опробованы составы и методы нанесения износостойких покрытий с помощью лазерного излучения на основе алюминия с упрочняющими добавками, исследованы свойства полученных покрытий.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, упрочняющие фазы, лазерное излучение, композиционные системы, методика исследований, оптимизация составов и параметров, распределение химических элементов

**В**ведение. Одним из эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик рабочих (поверхностных) слоёв деталей, эксплуатирующихся в экстремальных условиях, является лазерная наплавка. Высокая производительность, возможность регулирования тепловых процессов, получение покрытий толщиной от десятков микрометров до нескольких миллиметров, в том числе и на ограниченных участках деталей, обуславливают её высокую универсальность, позволяющую получать покрытия с широким спектром служебных свойств [1-3].

К настоящему времени, в качестве материалов для лазерной наплавки, разработан ряд порошков [4, 5], из которых наибольшее распространение получили сплавы на основе никеля (Ni-Cr-B-Si). Наплавочные покрытия из этих сплавов имеют высокие триботехнические свойства.

Однако существующие наплавочные материалы обеспечивают твёрдость и износостойкость лишь обрабатываемой детали и не влияют на работу пары трения. В то же время практически все детали работают в условиях контактных нагрузок и, при повышении твёрдости одних – снижается эксплуатационная стойкость других. В этой связи является актуальным создание таких покрытий, которые обеспечивают наилучшие условия трения в машинах и механизмах.

В научно-технических исследованиях последнего времени активно разрабатывается новый класс материалов – *алюминиды* – интерметаллические соединения железа, никеля, вольфрама и титана с алюминием. Эти материалы по своим свойствам не уступают суперсплавам. У них низкая плотность, высокая стойкость к окислению, даже при температурах выше 540 °С, хорошая свариваемость. Области возможного применения – элементы конструкций паровых и газовых турбин, газо- и нефтепроводов, авиакосмической техники, автомобильных двигателей и др. [6-8].

Исходя из этого, нами, в качестве материалов для покрытий с целью повышения износостойких, антифрикционных, эрозионно-коррозионностойких и других свойств рабочих поверхностей деталей, выбраны сплавы и композиции на основе алюминия с различными упрочняющими добавками.

*Материалы и методика эксперимента.* В материалах для покрытий как основу применяли поро-

шок дисперсностью 50 мкм из алюминиевого сплава марки А7, ГОСТ 11069-2001, который состоит из 99,7 % мас. алюминия, остальное – примеси кремния, железа, оксиды  $Al_2O_3$  и другие в минимальном количестве – по сути этот сплав представлял собой технически чистый алюминий.

В состав наплавочных смесей входили упрочняющие добавки (порошки дисперсностью 50...100 мкм) из нержавеющей стали 9Х18 (ГОСТ 5632-72) и быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 12265-73).

Эти порошковые смеси определённых составов (таблица) наплавляли с помощью лазерного излучения на подложки из стали 3пс (ГОСТ 380-88).

### Состав наплавочных материалов

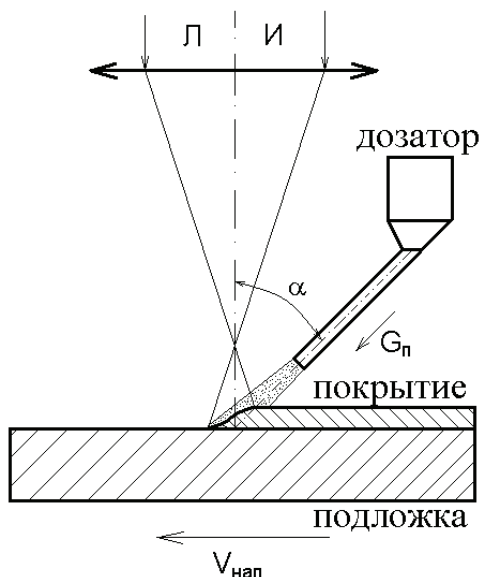
Состав порошка (объёмный) %	Материал подложки
А7	сталь 3пс
А7 + 30 % 9Х18	
А7 + 30 % Р6М5	

Для каждого из составов изготовили по 5 образцов для исследования структурно-фазовых характеристик покрытий и определения их физико-механических свойств с учётом возможности статистической обработки результатов.

Исходя из полученных ранее результатов [9], в качестве рабочих режимов нанесения покрытий выбраны: плотность мощности лазерного излучения  $W_p = 1,47...3,67 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; скорость перемещения поверхности подложки  $V = 4,2...20$  мм/с; диаметр пятна фокусировки лазерного излучения  $dn = 1,5...3$  мм; расход присадочного порошка  $G_n = 2,5...6,5$  см<sup>3</sup>/мин с гарантированными геометрическими параметрами покрытий (высота  $h \approx 1,8$  мм, ширина  $b \approx 3$  мм) по схеме (рис. 1). Эти же данные использовали для выбора оптимальных составов наплавочных порошков.

Микроструктуру исследовали с помощью микроскопа «МИМ-10». Для измерения микротвёрдости применяли микротвердомер «ПМТ-3М». Микрорентгеноспектральный анализ проводили на установке «САМЕСА» с шагом измерений 4...11 мкм.

*Микроструктура, химический состав и свойства полученных покрытий.* Покрытия представляют собой



**Рис. 1.** Схема лазерной газопорошковой наплавки с подачей присадочного порошка вслед движению луча

наплавочные слои, соединённые со стальной подложкой металлургической связью и состоящие из сплава А7 с упрочняющими добавками или без них (рис. 2).

Основными структурными составляющими покрытий из сплава А7 (рис. 2, а) являются дендриты алюминиевого твёрдого раствора, алюминий-кремниевая эвтектика (Al+Si) и железо – содержащие фазы ( $\alpha$ -фаза AlSiFe и FeAl), что подтверждается данными в работе [10].

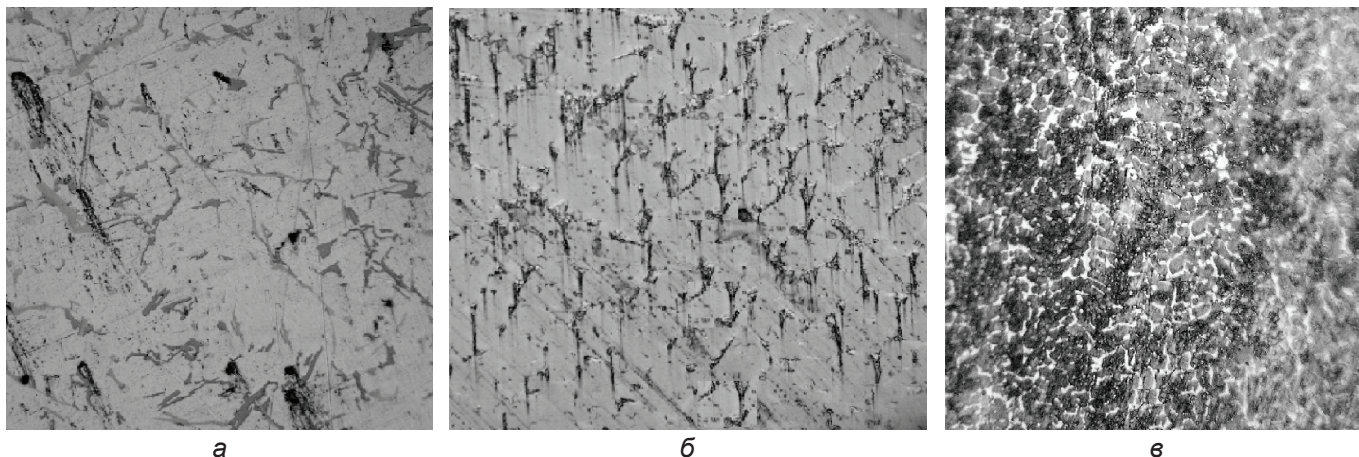
Покрытия из сплава А7 с добавкой стали 9Х18 (рис. 2, б) имеют многообразный состав, так как в исследуемой области между этими материалами при высоких температурах происходит активное взаимодействие с образованием нескольких стабильных фаз и эвтектик на их основе. В узкой изучаемой области, при содержании алюминия до 67...69 (ат.) %, в интервале температур 1300...1160 °С образуются взаимодействующие с алюминием и между собой следующие стабильные фазы: алюминиевый твёрдый раствор, алюминий-кремниевая эвтектика (Al+Si) и железо – содержащие фазы ( $\alpha$ -фаза AlSiFe и  $\beta$ -фаза FeSiAl). Кроме того ещё имеется хромсодержащая фаза во включениях из стали.

Покрытия из сплава А7 с добавкой 30 % стали Р6М5 (рис. 2, в) имеют ещё более многообразный состав, так как в стали Р6М5 присутствует большое количество химических компонентов, способных участвовать в различных соединениях. В микроструктуре данных покрытий основой является всё тот же алюминиевый твёрдый раствор, алюминий-кремниевая эвтектика (Al+Si) и железо – содержащие фазы ( $\alpha$  и  $\beta$ ), однако также присутствуют карбиды вольфрама и молибдена, образовавшиеся из химических элементов стали Р6М5. Эти и предыдущие данные соотносятся с результатами работ [11, 12].

Поскольку при лазерном нагреве происходило подплавление подложки, она становилась «источником» насыщения алюминия железом и кремнием, что приводило к образованию в структуре покрытия вышеперечисленных упрочняющих фаз (рис. 2, а). Причём распределение микротвёрдости по глубине покрытия (рис. 3) показывает её стремительный рост (с увеличением количества упрочняющей фазы) в глубь покрытия вплоть до максимума (до 7500 МПа) в закалённом слое, который образуется на поверхности подложки за счёт явления «самозакалки».

При нанесении покрытий сплава А7 с добавкой 30 % стали 9Х18 на подложку из стали Ст3пс (рис. 4) происходило повышение микротвёрдости по глубине покрытия за счёт образования твёрдых растворов и повышения их количества по глубине покрытий при взаимодействии алюминия, железа и добавок, входящих в состав стали 9Х18, в том числе и в результате «влияния» подложки из Ст3пс на материал покрытий.

При температуре 1300 °С в этих сплавах на основе соединения FeAl и хрома образуются тройные твёрдые растворы. Кроме того, хром, являясь монофазным вплоть до 1840 °С, стабилизирует аллотропические модификации железа, образуя с ними непрерывные ряды твёрдых растворов при температурах 820...1400 °С. Наиболее характерно образование твёрдого раствора хрома с  $\gamma$ Fe при содержании хрома до 5 (ат.)%. Введение хрома в состав сплавов значительно увеличивает их твёрдость. Поэтому структура этих покрытий представляет собой двойные и тройные твёрдые растворы с включением фаз: FeAl<sub>3</sub>, CrAl<sub>3</sub> и карбидных.



**Рис. 2.** Микроструктура наплавочных слоёв сплава А7 на подложку из Ст3пс с упрочняющими добавками или без них: сплав А7(а); сплав А7 + 30 % сталь 9Х18 (б); сплав А7 + 30 % сталь Р6М5 (в); x500

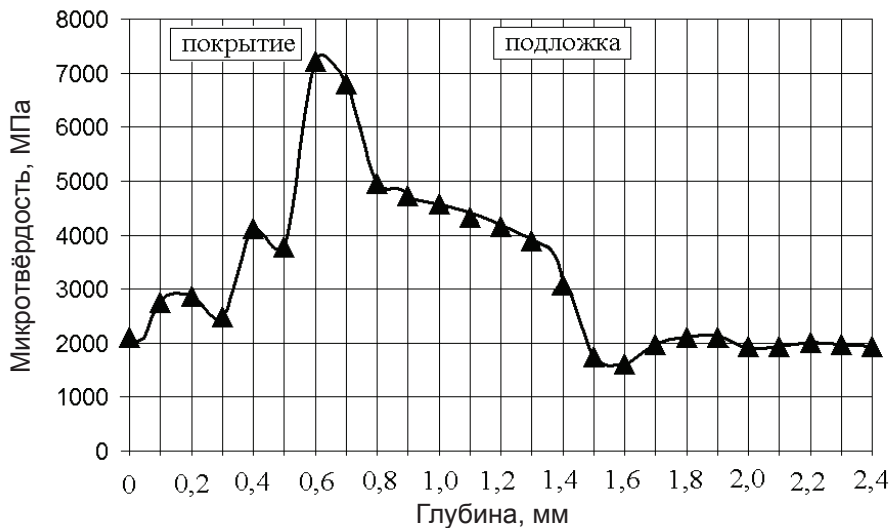


Рис. 3. Распределение микротвёрдости покрытий из сплава А7 на подложках из СтЗпс

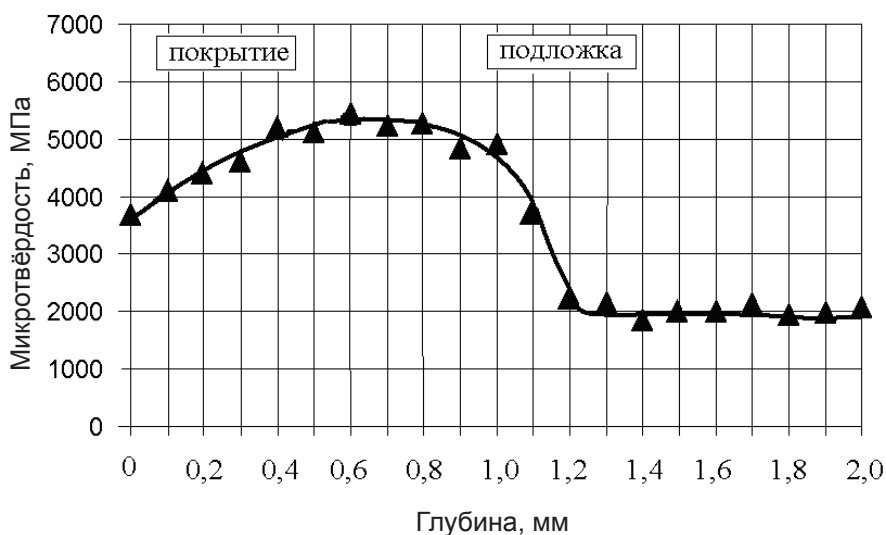


Рис. 4. Распределение микротвёрдости покрытий из сплава А7 с 30%-добавками стали 9Х18 на подложках из СтЗпс

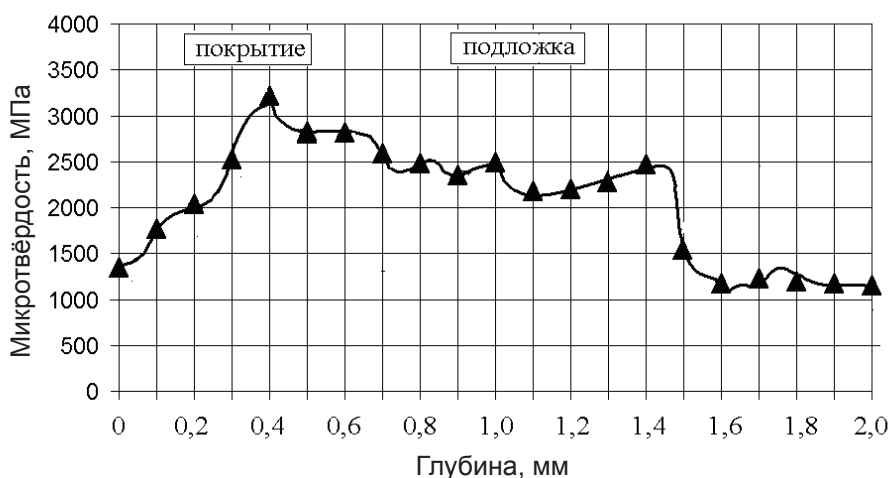


Рис. 5. Распределение микротвёрдости покрытий из сплава А7 с 30%-добавками стали Р6М5 на подложках из СтЗпс

При нанесении покрытий из сплава А7 с добавками из стали Р6М5 на подложки из СтЗпс (рис. 5) микротвёрдость растёт, но менее интенсивно, чем в предыдущем случае (см. рис. 4), хотя закономерности соблюдаются. В этой стали (Р6М5) при содержании железа до 78 %мас. присутствует большой набор легирующих элементов. Поэтому в расплаве алюминия и железа из стали Р6М5 и материала подложки при их взаимодействии образуются многокомпонентные системы, в которых образование фаз и твёрдых растворов замедляется. Присутствие в твёрдых растворах таких добавок как вольфрам, молибден, хром, никель, углерод повышает их твёрдость. Сплав железа с вольфрамом, молибденом, углеродом сохраняет твёрдость даже при нагревании. Кроме того, при высоких температурах в зоне лазерного воздействия (до 3000 °С) образуются алюминиды металлов (о чём упоминалось ранее), которые также способствуют упрочнению структуры материала покрытий.

При определении содержания химических элементов в исследуемых покрытиях (микрорентгеноспектральный анализ), ширина изучаемой зоны (рис. 6) составляла 980 мкм. Как видно на рисунке при нанесении покрытий из сплава А7 (рис. 2, а) характер распределения легирующих элементов (кремния, железа) по глубине наплавленного слоя практически не меняется. Все пики на кривой графика соответствуют образовавшимся фазовым выделениям в материале покрытия.

При изучении покрытий из сплава А7 с добавкой порошка стали 9Х18 (см. рис. 2, б) ширина исследуемой зоны (рис. 7) составляла 1100 мкм. В металле наплавленного слоя наблюдается химическая неоднородность по легирующим элементам покрытия (хрома и железа), что характерно при их ликвиции.

Для покрытий из сплава А7 с добавкой порошка стали Р6М5 (рис. 2, в) ширина исследуемой зоны (рис. 8) составляла 1400 мкм, шаг – 14 мкм. В материале покрытия основа (алюминий) и легирующие элементы (железо, вольфрам, молибден, кремний)



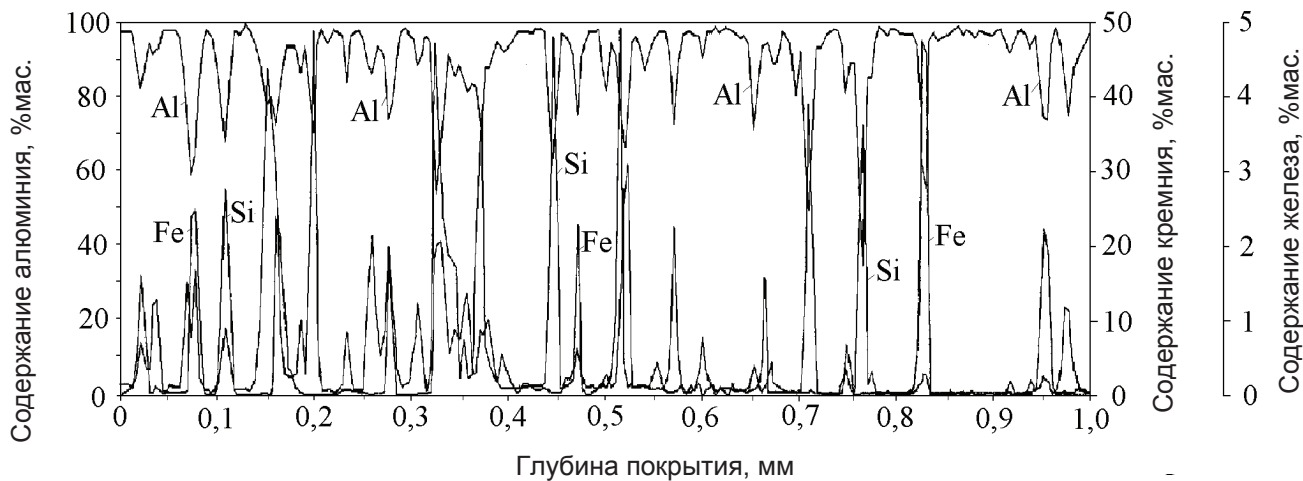


Рис. 6. Распределение основных химических элементов по глубине покрытия из алюминия

распределяются практически равномерно. По вольфраму и молибдену в наплавочном слое наблюдается химическая неоднородность. Это объясняется тем, что указанные элементы являются в свою очередь легирующими для стали Р6М5, поэтому эти элементы находятся в материале покрытия в виде включений, что и обуславливает их химическую неоднородность.

Все вышеуказанные процессы происходят в неравновесных условиях лазерного нагрева и последующего быстрого охлаждения за счёт теплопроводности образца. Поэтому данные покрытия представляют собой гетерогенные структуры из разных материалов, получить которые другими способами не представляется возможным.

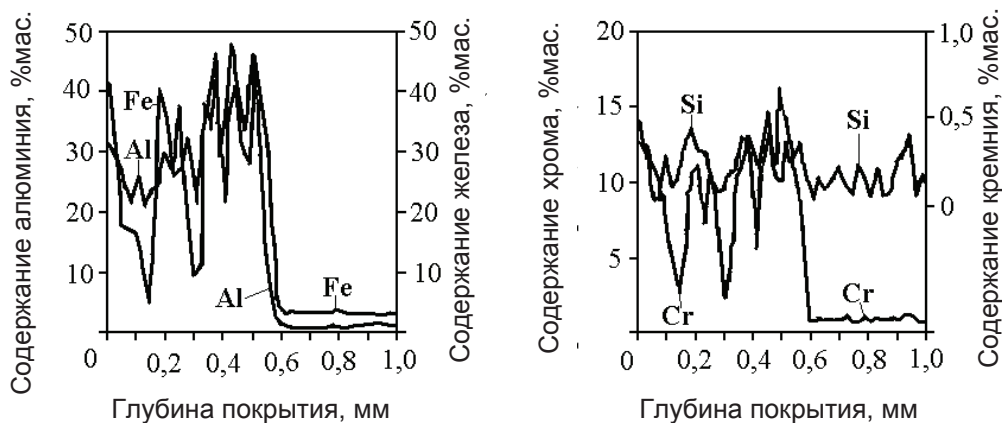


Рис. 7. Распределение основных химических элементов по глубине покрытия из алюминия с добавками частиц стали 9Х18

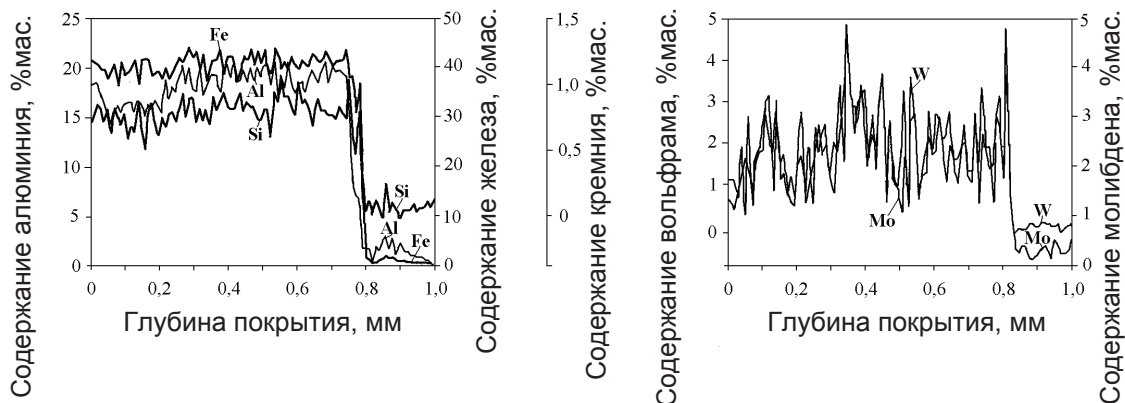


Рис. 8. Распределение основных химических элементов по глубине покрытия из алюминия с добавками стали Р6М5

## Выводы

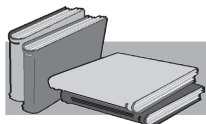
Выполненные исследования позволили определить оптимальный состав сплавов на основе алюминия и параметры лазерного излучения для нанесения их на стальную подложку.

Определены структурно-фазовые параметры, химический состав и прочностные характеристики полученных покрытий. Установили, что оптимальным со-

ставом покрытий являются: основа (70 % Al) и упрочняющие добавки (30 % - стальные гранулы).

Показано, что композиты с упрочняющими добавками из сталей 9Х18 и Р6М5 в количестве 30 % от их массы существенно повышают твердость и прочность покрытий на основе алюминия.

Полученные результаты могут применяться в технологиях повышения эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей в различных деталях.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин. – К.: Техніка, 1990. – 191 с.
2. Коваленко В. С. Лазерное легирование конструкционных материалов / В. С. Коваленко, В. И. Волгин // Технология и организация производства. – 1976. – № 7. – С. 60-62.
3. Неволин В. Н. Импульсное лазерное осаждение наноструктурированных композитных покрытий. I. Исследование структуры и свойств / В. Н. Неволин, В. Ю. Фоминский, А. Г. Гнедовец, Р. И. Романов // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 4. – С. 39-47.
4. Никифоров Л. В. Порошковые наплавочные материалы / Л. В. Никифоров. – Пенза. – 1993. – № 5. – С. 56-57.
5. Толочко Н. К. Закономерности формирования порошковых покрытий под действием лазерного излучения // Н. К. Толочко, М. К. Аршинов, И. А. Ядройцев. – Перспективные материалы, 2004. – № 6. – С. 63-69.
6. Чернышова Т. А. Дисперсно-наполненные композиционные материалы на базе антифрикционного силумина для узлов трения скольжения / Т. А. Чернышова, Л. И. Кобелева, Т. В. Лемешева. – Перспективные материалы, 2004. – № 3. – С. 69-75.
7. Гаврилов В. Ю. Пористые композиты на основе оксид-алюминиевых керметов (синтез и свойства) / Монограф. под науч. ред. В. Ю. Гаврилова. – Новосибирск.: Гео. – 2004. – 205 с.
8. Трыков Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов – М.: Металлургиздат, 2004. – 230 с.
9. Шатрава А. П. Физико-механические характеристики покрытий сталь-бронза, полученных с помощью лазерной наплавки / А. П. Шатрава // Авт. сварка. – 2002. – № 5. – С. 60-61.
10. Банных О. А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О. А. Банных, М. Е. Дрица. – М.: Металлургия 1986. – 439 с.
11. Пригунова А. Г. Силумины: Атлас микроструктур и фрактограмм пром. сплавов: (Справочник) / А. Г. Пригунова и др.; Под ред. Ю. Н. Тарана, В. С. Золоторевского, М.: МИСИС 1996. – 174 с.
12. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных сплавов / М. В. Мальцев. – М.: Металлургия 1970. – 367 с.

### Анотація

*Шатрава О. П., Бондарь Л. А., Козлова З. Л.*

Технологія лазерного нанесення та властивостей композитних покриттів на основі алюмінію

*Розроблено та випробувано склади та методи нанесення зносостійких покриттів за допомогою лазерного випромінювання на основі алюмінію зі зміцнюючими добавками. Досліджено властивості отриманих покриттів.*

### Ключові слова

*алюмінієві сплави, зміцнюючі фази, лазерне випромінювання, композиційні системи, методика досліджень, оптимізація складу і параметрів, розподіл хімічних елементів*

### Summary

*Shatrava A., Bondar L., Kozlova L.*

Technology of laser surfacing and properties of composite coatings on aluminium-based

*Developed and tested formulations and methods of hardfacing using laser radiation the aluminum base coatings with reinforcing additives, investigated the properties of the resulting coatings*

### Keywords

*aluminum alloys, the hardening phase, laser radiation, the composition system, research methodology, optimizing the structure and parameters, distribution of chemical elements*

Поступила 06.04.2015