

В.И. Юрченко *, Е.В. Юрченко *, В.М. Фомичев *, С.А. Баранов **, А.И. Дикусар **,

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОНИТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОМ Al-Sn

* Приднестровский госуниверситет им. Т.Г.Шевченко,
ул. 25 Октября, 128, г. Тирасполь

** Институт прикладной физики АНМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова dikusar@phys.asm.md

При применении электроэрозионной обработки материалов возможны различные варианты ее осуществления: собственно электроэрозионная (электроискровая) обработка, при которой деталь является анодом, а электрод-инструмент (ЭИ) – катодом, и так называемое электроискровое легирование (ЭИЛ), когда ЭИ служит анодом, а на образец (деталь) вследствие полярного переноса наносятся слои из материала ЭИ. В первом случае электроразрядные процессы происходят в диэлектрической среде (керосине, воде), а во втором – на воздухе или в среде инертного газа [1, 2].

Физической основой процессов, происходящих при этих видах обработки, являются локальное плавление металла и перенос его в диэлектрическую среду (в условиях электроэрозионной обработки) либо на поверхность стали в условиях ЭИЛ [1, 2]. В настоящей работе демонстрируется, что в определенных условиях продуктами электроразрядной обработки в воздушной среде могут быть нанонити из материала ЭИ.

Методика эксперимента

Источником питания для электроразрядной обработки служила установка ALIER-31 (фирма SCINTI, Молдова). Электроискровые источники питания типа ALIER названной фирмы с успехом используются для различных видов электроискрового нанесения покрытий [3–5]. Особенностью этой установки является то, что частота генерируемых импульсов непосредственно не связана с частотой вибрации ЭИ, а задается независимо. При этом она зависит от энергии в импульсе. В табл. 1 приведены параметры технологических импульсов генератора установки ALIER-31.

Таблица 1. Параметры технологических импульсов генератора установки ALIER-31

№ п/п	Режим	Длительность импульса, мкс ($\pm 10\%$)	Амплитуда тока импульса, А ($\pm 20\%$)	Энергия импульса, Дж
1	1	16	125	0,036
2	2	31	125	0,07
3	3	62	175	0,2
4	4	125	175	0,39
5	5	250	175	0,79
6	6	500	175	1,58
7	7	1000	175	3,15

В настоящем исследовании использовались все семь режимов установки ALIER-31 (табл. 1) при постоянном времени обработки 1 мин, но частота задаваемых импульсов соответствовала приведенной на рис. 1. Это достигалось с помощью специального регулятора частоты («коэффициента энергии»). При этом следует учитывать, что, поскольку применяли установку с ручным ЭИ, реальное количество импульсов в промежутке зависит от руки оператора и условий в нем. Практически количество импульсов в промежутке можно принять равным 0,6–0,9 от значений, соответствующих приведенным на рис. 1.

ЭИ служили стержни диаметром ~8 мм из специально изготовленного сплава Al – Sn, легированного медью и титаном (~1% (вес.) Cu и 0,1% (вес.) Ti).

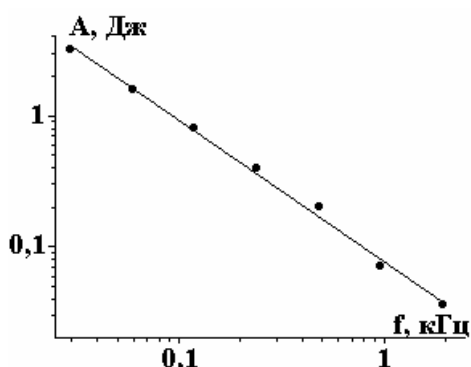


Рис. 1. Частоты и величины энергий в импульсе при различных режимах электроэрозивной обработки

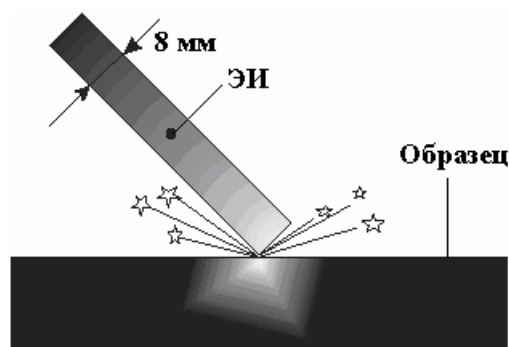


Рис. 2. Схема обработки

Сплав необходимого химического состава расплавлялся в графитовом тигле в индукторе высокочастотной установки В4И10У, а затем разливался в специально изготовленный кокиль размером $\varnothing 8 \times 50$ мм. Технология изготовления содержала следующие операции: а) приготовление шихты; б) плавка в индукционной печи; в) разливка сплава в кокиль; г) отрезка прибылей, очистка, обточка.

Для получения сплава заданного состава брались чистый алюминий и олово. Легирующие компоненты вводились в виде лигатур (50% Al + 50%Cu) и (90% Al + 10% Ti). Расчет шихты проводился на среднее содержание элементов (% вес.): Sn – 20; Cu – 1; Ti – 01; Al – ост.

В качестве образца использован алюминиевый сплав Д1 (ГОСТ4784). Осуществлялась ручная обработка. При этом ЭИ по отношению к образцу располагался так, как это показано на рис. 2.

ЭИ и образец взвешивались до и после обработки каждого опыта. Их поверхность (до и после обработки) исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп TESCAN с приставкой для элементного анализа поверхности INCA Energy EDX (Oxford, Великобритания)).

Результаты и их обсуждение

Состав и структура использованного ЭИ. На рис. 3 приведена диаграмма состояния двойной системы Al-Sn [6, с.418]. Видно, что при комнатной температуре (до температуры плавления олова - 228°C) материал, используемый в качестве ЭИ (AlSn20), должен представлять собой алюминиевую матрицу с диспергированным в ней металлическим оловом. Это подтверждается результатами сканирующей электронной микроскопии и EDX-элементного анализа (рис. 4), а также сканирования по поверхности образца с одновременным определением алюминия и олова (рис. 5). Видно, что ЭИ действительно представляет собой алюминиевую матрицу с диспергированными в ней частицами олова размером 3–5 мкм (рис. 5).

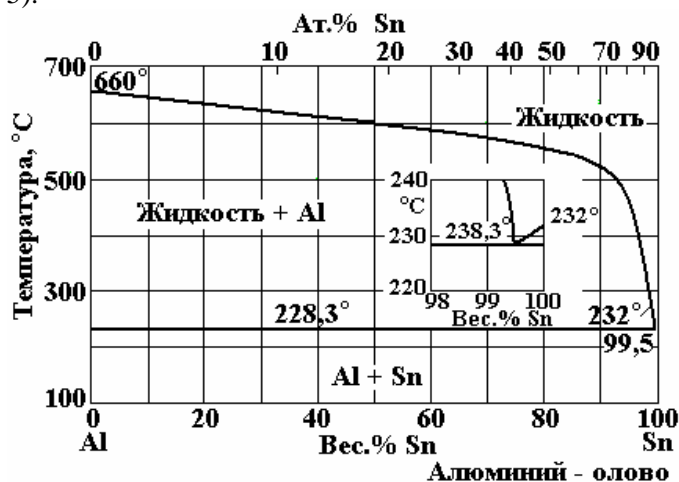


Рис. 3. Диаграмма состояния системы алюминий – олово [6]

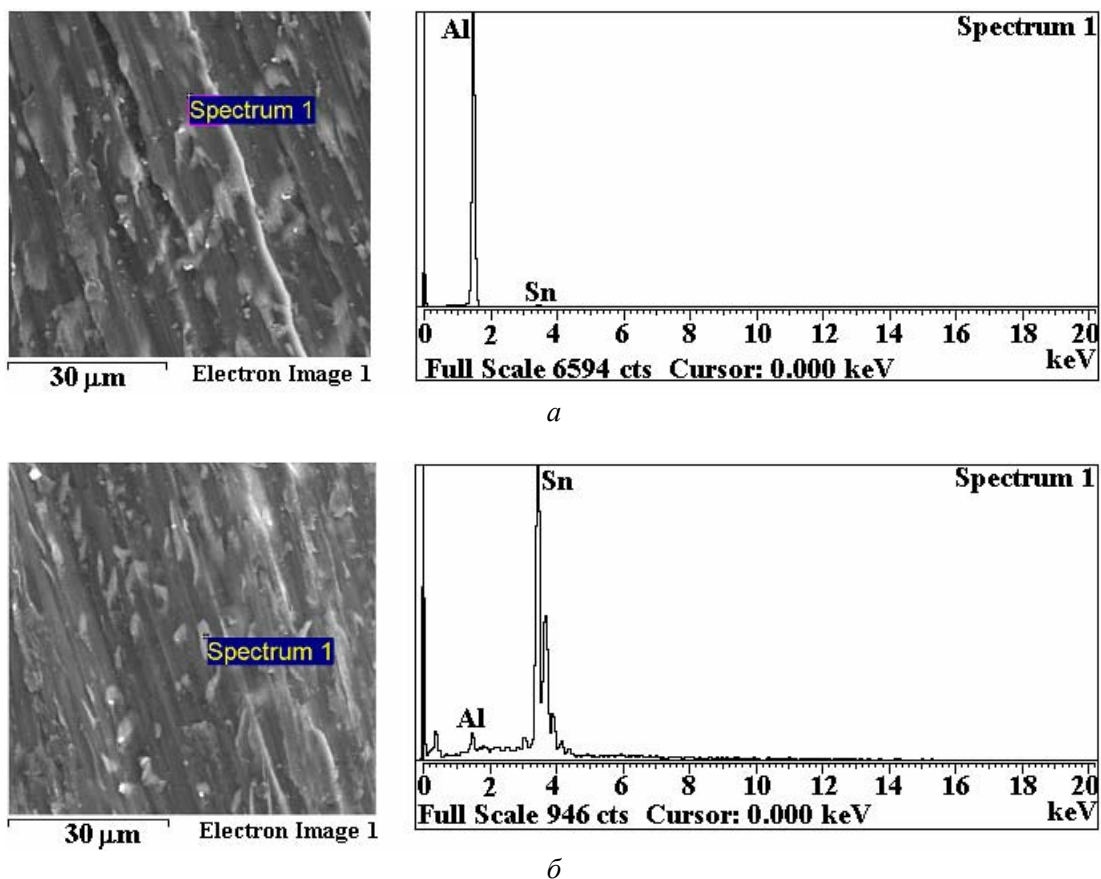


Рис. 4. Микрофотографии поверхности ЭИ и EDX-спектры матрицы (а) и диспергированного олова (б). Крестиками на микрофотографиях показаны места локального EDX-анализа

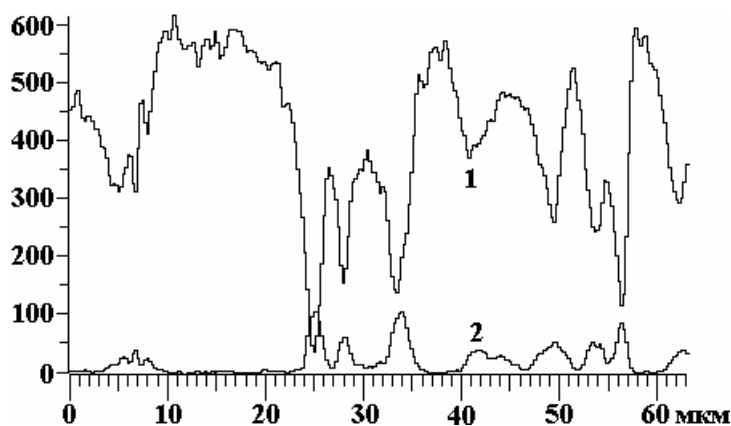


Рис. 5. Распределение алюминия (1) и олова (2) по поверхности ЭИ. Уровни EDX-спектра приведены в относительных единицах

Эффекты переноса массы. На рис. 6 показаны изменения в весе в процессе экспериментов как для образца, так и для ЭИ. Видно, что при относительно малых энергиях импульса (и соответственно высоких частотах, см. рис. 1) имеет место потеря в весе образца, увеличивающаяся с увеличением энергии импульса. Это область I на рис. 6. В указанной области наблюдается также потеря в весе ЭИ, но относительно малая. Очевидно, что область I – область, характерная для электроэрозионной обработки в воздушной среде, для которой характерны удаление вещества с поверхности детали (увеличивающееся с ростом энергии в импульсе) и малый износ ЭИ.

При увеличении энергии в импульсе картина существенно менялась. И при достаточно высоких энергиях наблюдался полярный перенос на поверхность образца, сопровождающийся приращением его в весе. Коэффициент переноса (отношение массы привеса к массе вещества, удаленного с

ЭИ) был равным $\sim 0,3$. Эта область (II на рис. 6) представляет собой классический вариант ЭИЛ применительно к использованному материалу ЭИ.

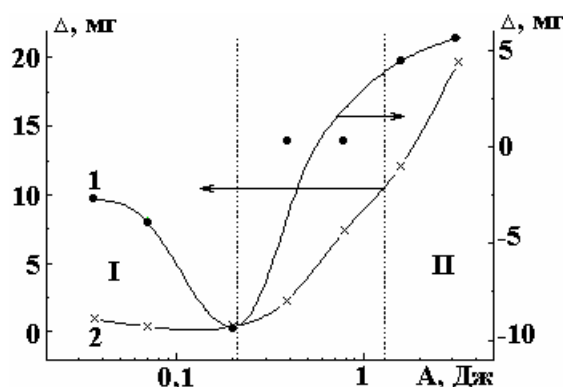


Рис. 6. Влияние энергии импульса на изменение массы образца (1) и электрода-инструмента (2)

В промежуточной области наблюдался значительный износ ЭИ при относительно низком переносе материала на поверхность образца (рис. 6).

Морфология и состав поверхности. На рис. 7 показаны поверхности образца и ЭИ после обработки при режимах, соответствующих области I на рис. 6, а также для промежуточной области. Из результатов элементного анализа (табл. 2) видно, что они представляют смесь оксидов и нитридов алюминия (образец), а также оксидов алюминия, олова и меди (ЭИ). Приведенные фотографии поверхности и результаты анализа типичны для обработки в режимах 1–5. При этом состав поверхностей мог незначительно изменяться. В частности, на поверхностях образцов в режимах 2–5 присутствовало олово (в незначительных количествах), а иногда – и медь. В состав ЭИ и образца входил углерод. Это может быть обусловлено тем, что плавку ЭИ проводили в графитовом тигле. Морфология поверхностей, полученных в указанных условиях, является характерной для оплавленных поверхностей.

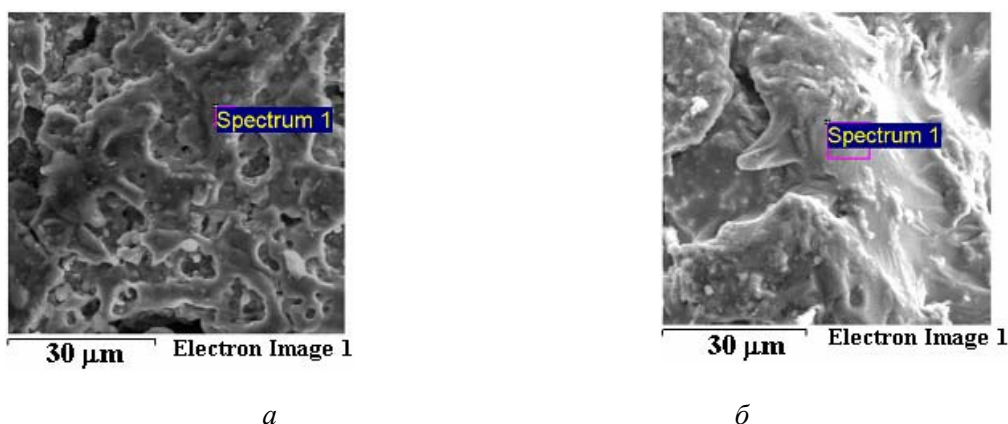


Рис. 7. Морфология поверхности образца (а) и электрода-инструмента (б) после обработки в режимах 1 (а) и 4 (б)

Приведенные результаты подтверждают результаты измерений потерей в весе, из которых следует, что область I – это область электроэрозионной обработки в воздушной среде. Похожая картина наблюдается для образцов, обработанных при режимах 4, 5 (см. табл. 1, область промежуточных режимов, представленных на рис. 6).

Таблица 2. Состав (вес. %) поверхности образца после обработки в режиме 1 (табл. 1) и электрода-инструмента в режиме 4

Элемент	C	N	O	Al	Cu	Sn
Образец	4,1	13,1	29,4	53,3	-	-
ЭИ	10,4	-	3,3	82,7	1,8	1,3

Что же касается области II на рис. 6, то наряду с составом и морфологией поверхности, характерных для области I и промежуточной области, на поверхностях образцов и ЭИ, обрабатываемых

при этих режимах, зафиксированы специфические структуры в виде нитей, диаметр которых меньше 1 мкм (рис. 8). На рис. 9 нанонити представлены при большем увеличении. Видно, что их диаметр лежит в пределах ~200–600 нм.

В табл. 3 представлен состав поверхности образцов после обработки в этих условиях. Видно, что по сравнению с другими режимами резко возрастает концентрация олова на поверхности образца (рис. 10). Анализ состава нитей показывает, что в основном это олово (табл. 4, рис. 8,а). В табл. 4 представлены результаты элементного анализа крупного фрагмента нити на ЭИ, из которого следует, что концентрация олова в нити более 60% (вес.) (см. также EDX-спектр на рис. 8,а).

Таблица 3. Состав поверхностей образцов после обработки в режимах 6 и 7 (средние значения)

Элемент	Al	Sn	O	N	C
вес. %	50,0 ± 4,8	34,8 ± 2,6	7,7 ± 1,5	2,2 ± 0,6	5,3 ± 2,6

Таблица 4. Элементный состав нити на ЭИ после обработки в режиме 6 (см. рис. 8,а)

Элемент	Al	Sn	O	N	C
вес. %	19,1	61,5	11,5	4,9	3,0

Однако ответить на вопрос, являются ли они исключительно состоящими из олова (его оксидов) или содержат также алюминий и его оксиды (но в меньшем, чем олово количестве), нельзя, поскольку используемый метод анализа фиксирует соотношение компонентов в объемах, превышающих объем только нитей, а частично включает объемы поверхностных слоев, на которых эти нити находятся.

Физические основы получения нанонитей. Причиной образования нанонитей является, видимо, специфика диаграммы состояния Al-Sn при температурах, превышающих температуру плавления олова (228°C), но меньших температуры плавления сплава Al-Sn (~ 655°C для сплава AlSn20) (рис. 3). В этом случае система представляет собой расплавленные частички диспергированного олова, находящегося в твердой матрице алюминия (рис. 3–5). Перенос этих частиц в межэлектродный промежуток осуществляется вследствие пондеромоторных сил, которые деформируют поверхность расплавленной капли в том случае, если для расплавленных частиц сила поверхностного натяжения системы расплав-воздух достаточно мала. Известно [7], что именно для системы расплав олова – воздух наблюдаются минимальные значения сил поверхностного натяжения. Очевидно, что вследствие малости сил поверхностного натяжения расплавленных частиц олова (или олова, частично обогащенного алюминием) пондеромоторные силы, возникающие вследствие наличия поля в промежутке, настолько их превышают, что в результате образуются нити диаметром ~ 1мкм и менее (рис. 8, 9).

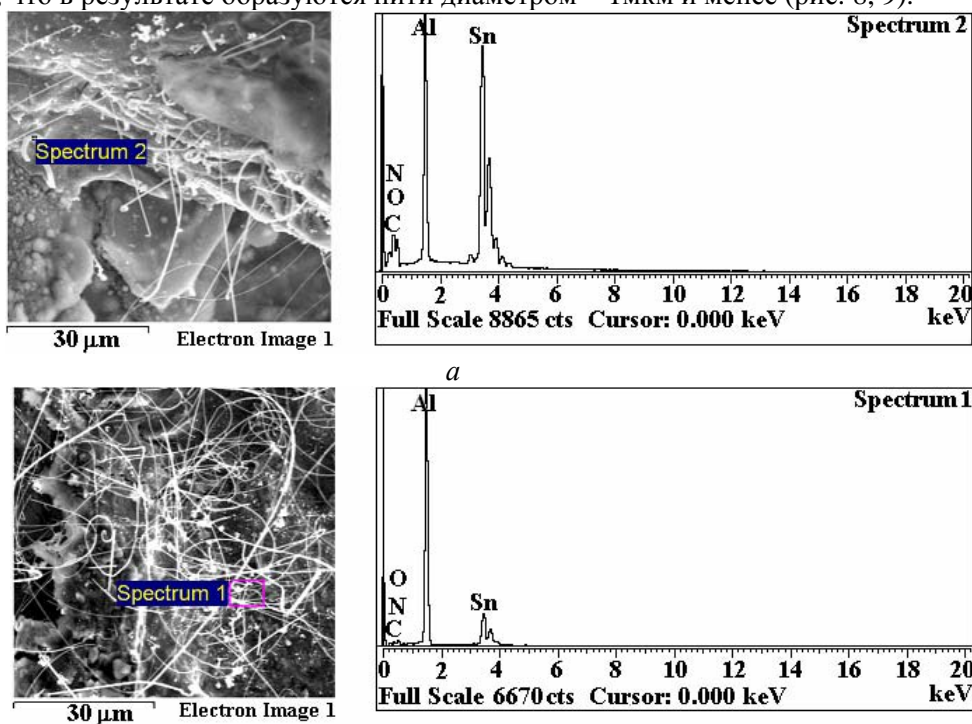


Рис.8. Морфология поверхности и EDX-спектры ЭИ (а) и образца (б) после обработки в режимах 6 (а) и 7 (б)

Эффекты подобного рода должны наблюдаться не только для системы Al-Sn, но и для любых других систем, которые при определенных температурах будут представлять собой систему расплавленных частиц, находящихся в твердой матрице, например для системы Al-Pb [6].

Из возможных практических приложений, следующих из результатов описываемых экспериментов, необходимо указать на возможность повышения концентрации легкоплавкого компонента в поверхностном слое в условиях ЭИЛ с использованием ЭИ подобного типа (рис. 10).

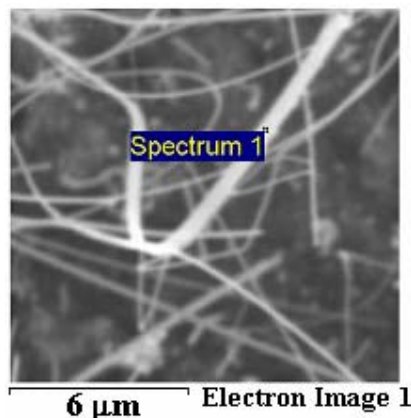


Рис. 9. Поверхность образца после обработки в режиме 7 (фрагмент рис. 8,б)

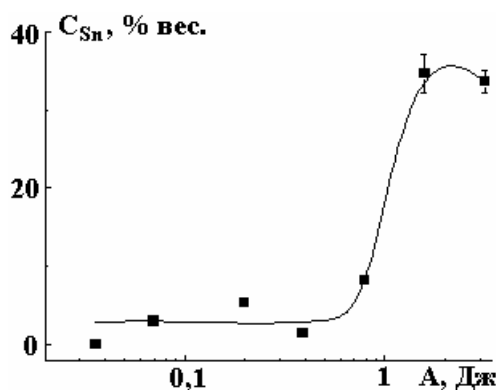


Рис. 10. Влияние энергии импульса на концентрацию олова в поверхностях образцов

Заключение

Показано, что в условиях электроискрового легирования (ЭИЛ) материалами, представляющими механическую смесь легкоплавкого компонента, диспергированного в высокоплавком (например, система Al-Sn), возможно образование в межэлектродном промежутке нанонитей из материала, обогащенного легкоплавким компонентом. Образующиеся нанонити переносятся с поверхности ЭИ на поверхность образца, что резко увеличивает концентрацию легкоплавкого компонента в поверхностном слое при ЭИЛ. Полученные результаты свидетельствуют о существенной роли пондеромоторных сил в переносе расплавленных частиц в условиях ЭИЛ.

Авторы выражают благодарность А.М.Парамонову за полезные обсуждения и Э. Монайко (Центр исследования и тестирования материалов Технического университета Молдовы) за исследование морфологии поверхности и элементного анализа.

Работа частично финансировалась в рамках проекта АНМ „Procese electrofizico-chimice de suprafața la scara micronanometrică”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка металлов. М.: Госэнергоиздат, 1950. 120 с.
2. Гитлевич А.М., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
3. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Питюлин А.Н., Боровинская И.П. Особенности влияния добавок ультрадисперсного алмаза на процесс горения и структурообразования СВС-систем Ti-B, Ti-Cr-C-Ni, Ti-Ta-C-сталь // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 2000. № 3. С. 74–79.

4. Левашов Е.А., Кудряшов Е.А., Потапов Н.Г. Новые СВС-материалы для электроискрового легирования с использованием ультрадисперсных порошков // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 2000. № 6. С. 67–72.
5. Barbas V., Mindru D., Grichuk D., Dikusar A.I. Electrodischarge Treatment of Surfaces Using Electrode Materials Fabricated by SMS // International Workshop “Technology Transfer in Electronic Engineering Multifunctional Materials and Fine Mechanics”. Chisinau / September 17, 2005. P. 84–85.
6. Вол А.Е. Структура и свойства двойных металлических систем. М.: Физматгиз. 1959.
7. Ниженко В.И., Флока А.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Справочник. М., 1981.

Поступила 19.03.09

Summary

It has been showed the principal possibility of nanowires manufacturing using electrodischarge treatment by means of materials composed of mechanical mixture of low-melting component dispersed into high-melting template (e.g. Al-Sn alloys). The basic component of nanowires it is low-melting component, thereof in superficial layer at electrodischarge treatment sharply increased Sn concentration. Experimental results demonstrate that an important influence on transfer of molten particles at electrodischarge treatment have ponderomotive forces.
