

УДК 621.9.048

**Иванов В.И.**, зав. лабораторией, кандидат технических наук;

**Костюков А.Ю.**, ведущий научный сотрудник,

кандидат технических наук

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение*

*«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,*

*г. Москва, Российская Федерация*

**Коневцов Л.А.**, научный сотрудник,

кандидат технических наук

*ИМ ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск, Российская Федерация*

**Игнатков Д.А.**, доктор технических наук, профессор

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,*

*г. Минск, Республика Беларусь*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

***Аннотация.** В работе приведены результаты анализа литературных данных и выполненных экспериментальных исследований по формированию ультрамелкозернистых и нанокристаллических поверхностных слоев металлических материалов путем применения метода электроискрового легирования (ЭИЛ). Проведен анализ технологических параметров метода ЭИЛ, способствующих получению таких слоев, сформулированы основные принципы формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур этим методом.*

***Ключевые слова:** электроискровое легирование, металлическая поверхность, технологические параметры, зерно, нанокристаллическая структура, ультрамелкозернистая структура.*

Повышение прочности материалов достигается как совершенствованием их объемных физико-механических свойств, так и модифицирующей обработкой путём нанесения на поверхность защитных и упрочняющих покрытий с использованием концентрированных источников энергии.

Одним из направлений модифицирующей обработки является создание на металлической поверхности ультрамелкозернистых структур (величина зерна до 1000 нм), а также консолидированных наноматериалов (величина зерна до 100 нм) нанесением разнообразными методами плёнок и покрытий из металлов, сплавов и металлоподобных соединений или интенсивной пластической деформацией, или контролируемой кристаллизацией из аморфного состояния. Это направление обосновано тем, что механические свойства компактных материалов в значительной степени связаны с величиной зерен и состоянием межзеренных границ, составляющих структуру этих материалов. Указанная взаимосвязь особенно ярко выражена у нанокристаллических материалов [1, 2].

Размер зерен существенно влияет на микротвердость материалов, которая связана с пределом текучести  $\sigma_T$ . Это влияние размера зерен хорошо изучено на металлических и керамических материалах с размером зерен  $D$  более 1 мкм. Согласно закону Холла-Петча [3, 4],

$$\sigma_T = \sigma_o + k_y D^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_o$  – внутреннее напряжение, препятствующее движению дислокаций;  $k_y$  – постоянная.

При температуре  $T/T_{пл}$  0,4 – 0,5 ( $T_{пл}$  – температура плавления) твердость  $H_V$  (микротвердость по Виккерсу) связана с пределом текучести  $\sigma_T$  эмпирическим соотношением  $H_V / \sigma_T \approx 3$  [5]. Отсюда следует размерная зависимость твердости:

$$H_V \approx H_0 + k D^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $H_0$  и  $k$  – постоянные.

В качестве примера автор [6] отмечает, что при 300 °К микротвердость нанокристаллических материалов в 2-7 раз выше, чем  $H_V$  крупнозернистого материала.

В настоящее время в технически развитых странах уделяется значительное внимание созданию нанокристаллических (НК) и ультрамелкокристаллических (ультрамелкозернистых – УМЗ) материалов [7]. Это касается как объемных материалов, так и поверхностных слоев обычных материалов и связано с возможностью получения металлических изделий, обладающих уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами [8 – 13].

Существуют различные методы формирования НК и УМЗ структур металлических материалов. Как в России, так и за рубежом с этой целью применяют интенсивное пластическое деформирование, температурно-силовое воздействие, а также используют концентрированную электрическую энергию, в частности, ионную имплантацию [14].

Перспективным представляется использование для получения таких структур технологичного и универсального метода электроискрового легирования (ЭИЛ). Известны работы по использованию НК и УМЗ электроискровых (ЭИ) покрытий для решения практических задач, например, для восстановления изношенных рабочих поверхностей деталей и повышения их износостойкости [15, 16], улучшения прочностных характеристик ЭИ покрытий пластической деформацией для работы в условиях трения скольжения [17]; создаются наноструктурированные композиционные СВС-материалы для ЭИЛ [18, 19]. При этом опубликованные в российских и зарубежных изданиях работы, связанные с исследованиями измененных поверхностных слоев, не раскрывают основных принципов формирования НК и УМЗ структур применением ЭИЛ и не являются основой для решения задач существенного улучшения прочностных свойств ЭИ покрытий посредством управления размерными параметрами элементов структуры формируемых покрытий.

В данной работе выполнен анализ основных параметров, присущих методу ЭИЛ, управление которыми может обеспечить формирование НК и УМЗ поверхностных слоев металлических материалов. Управляемые технологические параметры ЭИЛ сведены в таблицу вместе с характеристиками, производными от этих параметров, и их значениями. При этом все управляемые параметры составляют группы: электрические, механические, физико-химические и временные.

Таблица – Управляемые технологические параметры ЭИЛ и их производные параметры

Технологические параметры ЭИЛ		
Управляемые параметры	Производные	
	параметры	значения
<b>А - Э л е к т р и ч е с к и е</b>		
напряжение холостого хода		
емкость конденсаторов	энергия импульсов [Дж]	0,01...30
	длительность импульсов [мкс]	10...2000
частота импульсов	удельное число импульсов [с <sup>-1</sup> ]	5...10000
<b>Б - М е х а н и ч е с к и е (кинематические и размерные)</b>		
<i>а) электрод-инструмент с вибрирующим стержневым (дисковым) электродом</i>		
частота вибрации электрода	удельное число контактов [с <sup>-1</sup> ]	50-1000
амплитуда вибрации	длина хода электрода [мм]	0,01...0,8
	скорость движения электрода [м/с]	до 0,1
	сила удара электрода [Н]	2...10
сила прижатия электрода	давление электрода на деталь [Н]	20...50
<i>б) электрод-инструмент с вращающимся стержневым электродом</i>		
скорость вращения электрода	частота вращения [мин <sup>-1</sup> ]	до 3000
сила прижатия электрода	давление электрода на деталь [Н]	20...50
<i>в) электрод-инструмент с вибрирующим и вращающимся стержневым электродом</i>		
частота вибрации электрода	удельное число контактов [с <sup>-1</sup> ]	50-1000
амплитуда вибрации	длина хода электрода [мм]	0,01...0,8
	скорость движения электрода [м/с]	до 0,1
	сила удара электрода [Н]	1...6
сила прижатия электрода	давление электрода на деталь [Н]	20...50
скорость вращения электрода	частота вращения [мин <sup>-1</sup> ]	до 3000

Окончание таблицы

г) многоэлектродный вращающийся электрод-инструмент со стержневыми электродами		
частота вращения инструмента	линейная скорость электрода [м/с]	0,5...2,5
	удельное число контактов [с <sup>-1</sup> ]	10...50
	время контакта с деталью [мкс]	5...50
	сила удара электрода [Н]	6...30
длина перекрытия детали	длина пути контакта [мм]	10...50
	давление электрода на деталь [Н]	20...50
д) размерные		
размеры поперечного сечения электрода	температура электрода в рабочей зоне, $f(T_{пл})$	$T \square T_{пл}$
В - Ф и з и к о - х и м и ч е с к и е		
материал анода	физико-химические свойства материалов в исходном состоянии и в соединениях	функции охлаждения, антикоррозионной защиты или структурообразования
материал катода		
состав межэлектродной среды		
Г - В р е м е н н ы е		
продолжительность обработки	удельное время обработки [с/см <sup>2</sup> ]	5...600

Электрические параметры связаны с управлением работой генератора технологических импульсов установки ЭИЛ и обеспечивают получение искровых импульсов определенной энергии, длительности и частоты. Механические параметры зависят от кинематики движения электрода-анода, и определяют скоростные и силовые условия на контакте «электрод – деталь», а также размерные характеристики электрода. Физико-химические параметры позволяют управлять микрометаллургическим процессом формирования измененных поверхностных слоев на детали за счет взаимодействия элементов материалов электрода, детали и состава межэлектродной среды. Временной параметр определяет длительность процесса обработки.

Согласно существующим представлениям, можно достичь уменьшения зернистости кристаллического металлического материала либо интенсивной пластической деформацией, либо тепловым воздействием с большим градиентом температур. Этому способствует также введение в основной материал элементов малой зернистости.

Анализ технологических параметров ЭИЛ, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод о возможности влияния на зернистость кристаллического металлического материала управлением электрическими и физико-химическими параметрами процесса об-

работки. Электрические параметры определяют энергетические показатели на контакте «электрод – деталь» в зоне действия искрового разряда: локальная температура от 3500 до 10000 °С, а по некоторым источникам - до 20000 °С; длительность искрового разряда 10-2000 мкс; скорость охлаждения – до 1000 град/с; согласно [20] давление ударной волны от электрической искры составляет  $(2...7) \cdot 10^3$  ГПа. Механические параметры ЭИЛ в значительно меньшей степени влияют на зернистость материала сформированного слоя.

В качестве параметров, характеризующих НК и УМЗ покрытий, формируемые методом ЭИЛ, являются размеры блоков (зерен) структуры  $a$  и масса элементов покрытия  $m_{имп}$ , создаваемых каждым электроискровым импульсом. В первом приближении зависимость  $a$  и  $m_{имп}$  от факторов, определяющих их значение, представим в следующем виде:

$$a; m_{имп} = f(e_{имп}, \tau_{имп}, T_{пл\ эл}, g_{эл}), \quad (3)$$

где  $e_{имп}$  - энергия единичных импульсов;

$\tau_{имп}$  - длительность единичных импульсов;

$T_{пл\ эл}$  – температура плавления материала электрода;

$g_{эл}$  – плотность материала электрода.

Выполненные экспериментальные исследования по нанесению НК и УМЗ покрытий на сталь 45 и серый чугун СЧ18 показали эффективность влияния режимов обработки на зернистость поверхностного слоя образцов (рисунок).

Изменением электрических параметров ЭИЛ получена возможность управления размерами блоков кристаллической структуры поверхностного слоя покрытий твердым сплавом ВК8 на стали 45 от 700 до 40 нм, при этом доля нанокристаллических блоков (100 нм) в общем объеме составляла от 5 до 50 %.

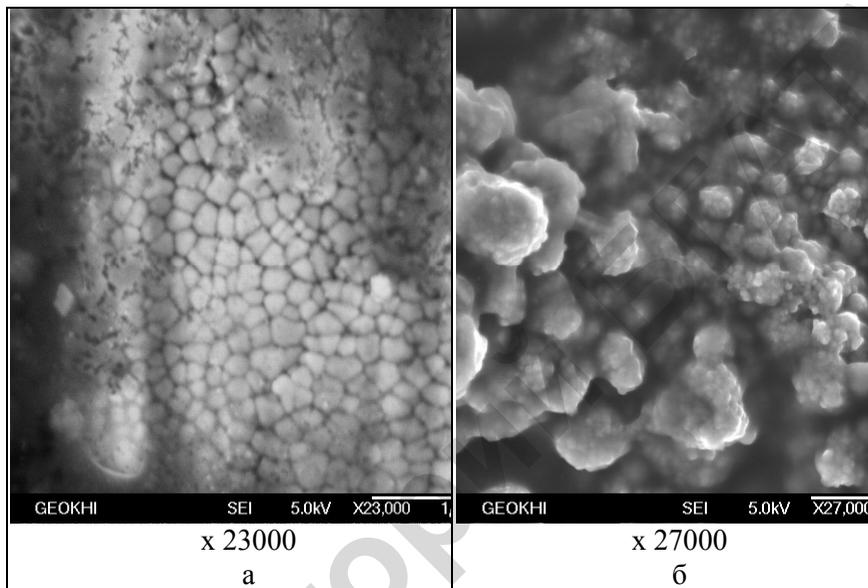
Установлено влияние на изменение размеров блоков технологических параметров ЭИЛ в исследованном диапазоне частоты импульсов 160 – 1500 Гц:

- ужесточение электрического режима (увеличение энергии импульсов от 0,045 до 0,29 Дж) ведет к повышению их размеров и снижению доли наноразмерных блоков;

- увеличение удельной длительности обработки от  $\tau$  до  $5\tau$  способствует уменьшению зернистости и увеличению их количества;

- использование твердого сплава СТИМ с нанозернистыми добавками также отразилось на уменьшении зернистости поверхностного слоя и увеличении количества наноразмерных блоков;

- обработка методом ЭИЛ с использованием электродов из металлокерамического твердого сплава ВК8 (величина зерна 1-3 мкм) способствует измельчению карбидных зерен в покрытиях.



а - режим 2 (1-0,2) –  $E=0,045$  Дж, частота импульсов  $f_{имп}=600$  Гц, условная удельная длительность обработки  $2\tau$ ; б - соответственно: 7 (2-0,4) –  $E=0,09$  Дж;  $f_{имп}=600$  Гц;  $2\tau$ .

Рисунок – Фотографии блочной структуры поверхности ЭИ покрытий ВК8 (а) и СТИМ-ЗБОА<sub>ц</sub> (з) на стали 45 (установка «БИГ-4»)

Результаты анализа литературных данных и выполненных экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Метод ЭИЛ позволяет управлять блочностью кристаллической структуры металлических материалов с получением НК и УМЗ покрытий.

2. Основные принципы ЭИЛ, способствующие формированию НК и УМЗ покрытий: применение электрических режимов с низкими энергией и длительностью импульсов; увеличение удельной длительности обработки; использование материалов катода с низкой теплопроводностью, а анода - низкой теплоемкостью; перенос элементов анода на катод в твердом состоянии.

Список использованной литературы

1. Roco M. C. / Towards a US national nanotechnology initiative // J. Nanoparticle Research. - 1999. - V.1. - № 4. - P. 435-438.
2. Compano R., Holman A. /Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators// Nanotechnology. - 2002. - V. 13. - № 3. - P. 243-247.
3. Drexler K. E. /Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation. – New York: Wiley, 1992. – 518 p.
4. Ten Wolde A. /Nanotechnology: Towards a Molecular Construction Kit. – Boston: New World Ventures, 1998. – 357 p.
5. Nanostructured Materials. / Ed. J. Yi-Ru Ying. – New York: Academic Press, 2001. – 350 p.
6. Гусев А.И. / Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – 2-е изд., испр. // М.: Физматлит, 2009. – 416 с.
7. Черноиванов В. И. / Индустрия наносистем и материалов: Перспективы использования в сельском хозяйстве. // Научно-аналитический обзор. – Москва – Челябинск. – 2007 г. - 240 с.
8. Гусев А. И. / Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства// Екатеринбург: УрО РАН. - 1998. – 200 с.
9. Патент RU № 2181776. Способ обработки стали. / Р.Г. Зарипова, О. А. Кайбышев, Г. А. Салищев, К. Г. Фархутдинов // Опубликовано 27.04.2002 Бюл. № 12.
10. Валиев Р. З., Александров И. В. / Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией // М.: Логос. - 2000. - 272 с.
11. Валиев Р.З. / Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. 2006. - Т.1. - № 1-2. - С. 208-216.
12. Равноканальное угловое прессование металлических материалов: достижения и направления развития. /Тематическая подборка статей. - Под ред. В. М. Сегала, С. В. Добаткина и Р.З. Валиева. // Металлы. - 2004. - № 1, № 2.
13. Копцева Н. В. /Закономерности формирования ультрамелкозернистой структуры, обеспечивающей улучшение свойств углеродистых конструкционных сталей. // Автореф. на соиск. учен. степ. д.т.н. – Магнитогорск. - 2012.
14. Кашин О. А. Деформационное поведение в области микропластической деформации титана и сплава Ti-Al-V с

ультрамелкозернистой структурой при различных видах термосилового воздействия. // Автореф. на соиск. учен. степ. д.т.н. – Томск. - 2007.

15. Бурумкулов, Ф. Х. Электроискровые нанокompозитные покрытия и их износостойкость. / Ф. Х. Бурумкулов, С. А. Величко, В. И. Иванов, П. А. Ионов, М. А. Окин, А. В. Столяров // Техника в сельском хозяйстве. - 2009. - №1. - С. 11-13.

16. Burumkulov, F. Kh. The properties of nanocomposite coatings formed on a steel 20H surface by means of electrospark processing using rod-shaped electrodes of steels 65 G and Sv 08. / F. Kh. Burumkulov, P. V. Senin, S. A. Velichko, V. I. Ivanov, P. A. Ionov, and M. A. Okin // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. - Volume 45, Number 6 / 2009. – S. 455-460.

17. Михайлюк А.И., Житару Р.П. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении. / Электронная обработка материалов. – 2008. – Т. 44. - № 5. – С. 49-56.

18. Levashov E.A., Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Kurbatkina V.V., Andreev V A., Zaitsev A. A., Sidorenko D. A. Nanostructured Materials for Electrospark Deposition and Disperse-Strengthening by Nanoparticles Diamond Tools / Journal of Physics: Conference Series 416 (2013) 012004 doi:10.1088/1742-6596/416/1/012004.

19. Погожев Ю.С., Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Замулаева Е.И., Новиков А.В., Потанин А.Ю. Композиционные СВС-материалы на основе карбида и никелида титана, легированные тугоплавким нанокompонентом. / Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2012, № 2, с. 24-32.

20. Chen, Z.; Zhou, Y.: Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization. Surface & Coatings Technology. 2006. - P. 1503-1510.

**Abstract.** The paper presents the results of the analysis of literature data and experimental studies on the formation of ultrafine-grained and nanocrystalline surface layers of metallic materials by applying the method of electrospark alloying (EIL). The analysis of technological parameters of the EIL method facilitating the production of such layers is carried out, the main principles of the formation of ultrafine-grained and nanocrystalline structures by this method are formulated.

**Keywords:** electrospark alloying, metal surface, technological parameters, grain, nanocrystalline structure, ultrafine-grained structure.