

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ СПЛАВАМИ Ni-Cr-Al ОТ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРОДОВ

А.В. Паустовский, Р.А. Алфинцева, В.Е. Шелудько, Т.В. Куринная, В.С. Терещенко

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,  
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03142, Украина, [dep65@ipms.kiev.ua](mailto:dep65@ipms.kiev.ua)*

## Введение

При исчерпании ресурсов прочности материалов используют разные технологии упрочнения и восстановления рабочих поверхностей, вследствие чего увеличивается ресурс работы основного материала. В этом случае наиболее эффективным является метод электроискрового легирования (ЭИЛ) компактным электродом. При выборе материала электрода учитываются два основных фактора: его химический состав, определяющий функциональное назначение покрытия, а также структурное состояние, зависящее от технологии изготовления электрода.

Основной принцип создания электродных материалов для износостойких покрытий - условие гетерогенности их структуры [1, 2]. Одним из вариантов такой структуры является наличие эвтектики, состоящей из твердых растворов на основе металлов с высокой растворимостью в подложке и фаз с высокой твердостью [3, 4].

Анализ литературных данных показал, что результаты исследования зависимости коэффициентов массопереноса при ЭИЛ от структуры электродов носят ограниченный характер.

## Материалы и методика эксперимента

С учетом указанного принципа создания материалов для износостойких покрытий в Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины разработали компактные электроды системы Ni-Cr-Al. Содержание в них Ni, Cr и Al находится в области тройной эвтектики. Электроды следующего состава мас. %: Ni – 50,3; Cr – 40,2; Al – 9,5 (далее 4А) – были изготовлены с использованием следующих технологий: литья, импульсного горячего прессования (ИГП) и спекания. Это дало возможность получить различные структуры и определить их влияние на кинетику массопереноса при ЭИЛ легировании стали 45.

Разработанные сплавы систем Ni-Cr-Al, Ni-Cr-NiAl предназначены для восстановления деталей, износ которых превышает 100 мкм и больше. Исследования [5] показали, что микротвердость этих сплавов в зависимости от их состава находится в интервале 6–12 ГПа. Износ при сухом трении скольжения при удельной нагрузке 0,6 МПа и скорости движения контртела (сталь 65Г) 10 м/с достигает значений 5–12 мкм/км, коэффициент трения - 0,27–0,29. Микротвердость электроискровых покрытий из этих сплавов достигает 8–10 ГПа, износ – 6–14 мкм/км в зависимости от состава, толщина покрытий – 0,7–1,2 мм [6].

Сплавы Ni-Cr-Al выплавлялись в электропечи сопротивления в алундовых тиглях с использованием в качестве шихты никеля Н-О, хрома ЭРХ-О, высокочистого алюминия 9-995. Электроды получали методом литья из расплава в виде стержней  $\varnothing$  4–7 мм.

ИГП этих сплавов проводили в две стадии: спекание порошковой смеси никеля ПНЭ, хрома ПХМ, а также алюминия ПАР-41 и последующее прессование в закрытой пресс-форме с максимальным импульсным ударом под давлением 100–1200 МПа и при температуре 1300 °С. Полученные по такой технологии образцы имели плотность 98–99%.

В связи с тем, что спеченные сплавы системы Ni-Cr-Al проявляли значительную деформацию в результате плавления алюминия, вместо последнего использовали интерметаллид NiAl, имеющий высокую температуру плавления. Были исследованы следующие композиции: 4АС1 (Ni-33; Cr-41; NiAl-26) мас. %; 4АС2 (Ni-39; Cr-35; NiAl-26) мас. %; 4АС3 (Ni-32; Cr-40; Al-2; NiAl-26) мас. %. Соотношение Ni, Cr и NiAl соответствовало составу сплава 4А. Смеси порошков никеля, хрома и интерметаллида NiAl спекались в вакууме в течение двух часов при температуре 1070 °С, что составляло 0,8  $T_{пл}$  эвтектического сплава Ni-Cr-NiAl. Плотность образцов после спекания составляла 82–88%.

Микроструктуру полученных электродов изучали на микроскопе «Neophot-32». Рентгеновские исследования выполнялись на установке «ДРОН-3М» с использованием фильтрованного  $K_{\alpha}$ -излучения меди.

Расшифровку дифрактограмм определяли с помощью картотеки ASTM. Электроискровое легирование проводилось на установке ЭФИ-46А при следующем режиме: частота колебания вибратора - 100 Гц, сила тока короткого замыкания  $I_{к.з.} = 1,5$  А, время обработки - 10 мин/см<sup>2</sup>. Коэффициент массопереноса  $K = \Delta k / \Delta a$  находили посредством определения следующих параметров: удельной эрозии анода  $\Delta a$ , удельного привеса катода  $\Delta k$ , измеренного за каждую минуту обработки 1 см<sup>2</sup> стали 45.

### Результаты и обсуждение

Микроструктура сплава 4А, полученного методами литья и ИГП, а также сплава 4АС1, полученного методами спекания и ИГП, приведена на рис. 1. В литом сплаве 4А (рис. 1,а) наблюдается структура тройной эвтектики. Микроструктура горячепрессованного (ИГП) и спеченного сплавов (рис. 1,б,в) представляет смесь трех фаз: светлой, серой и темной. Микроструктура сплава 4АС1, полученного методом ИГП, отличается от структур спеченного и горячепрессованного сплава 4А меньшими размерами фазовых составляющих, ее можно охарактеризовать как мелкозернистую структуру. По данным рентгенофазового исследования, во всех сплавах наблюдаются три основные фазы  $\gamma$ -,  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердых растворов на основе никеля, хрома и интерметаллида NiAl.

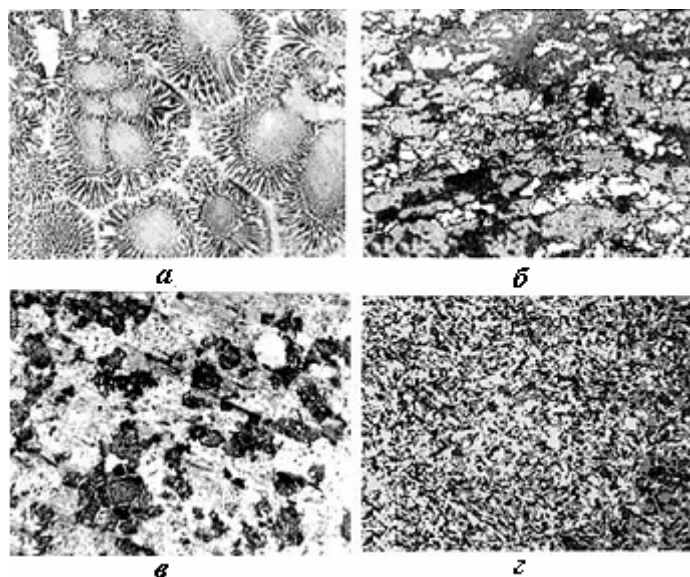


Рис. 1. Микроструктура сплава 4А (а – литой, б – горячепрессованный) и сплава 4АС1 (в – спечённый, з – ИГП),  $\times 500$

Проведенные исследования кинетики ЭИ легирования сплавами 4А (литой и горячепрессованный), а также спеченными сплавами 4АС1, 4АС2, 4АС3 (рис. 2) свидетельствуют, что эрозия спеченных сплавов (рис. 2,а,б,в) в 2–4 раза выше эрозии сплава 4А в литом и горячепрессованном состоянии (рис. 2,г,д).

Общепринятой модели процесса электроискрового легирования, которая позволяла бы объяснить явление, возникающее во время одного цикла обработки, в настоящее время не существует. Наиболее полно модель процесса электроискрового легирования изложена в работах основателя метода Б.Р. Лазаренко [7, 8]. Сущность этой модели состоит в том, что при сближении электродов напряжение электрического поля увеличивается. При определенном расстоянии между электродами возникает искровой электрический разряд, в результате чего образуются канал проводимости и пучок электронов, исходящих от катода и ударяющихся о поверхность анода. В результате воздействия энергии удара от анода отделяется капля расплавленного металла, которая движется к катоду. Капля нагревается, закипает и взрывается. Расплавленные частички оседают на катоде и кристаллизуются. Данная модель предполагает, что вещество в основном переносится в жидкокапельном состоянии. В литературе накоплено большое количество данных относительно эрозии различных материалов, и наиболее убедительно модель представлена в работе [9]. В соответствии с этой моделью масса выбрасываемого материала из анода определяется соотношением:

$$\gamma = qEft,$$

где  $\gamma$  – масса выбрасываемого материала, г;  $E$  – энергия единичного импульса, Дж;  $f$  – частота следования импульсов, Гц;  $q$  – коэффициент пропорциональности, определяемый физическими константами электрода, составом среды и длительностью импульса;  $t$  – время обработки, с.

В данном случае исходные электроды имеют один и тот же элементный состав и наносятся при одном и том же режиме ЭИЛ, но отличаются характером структуры (рис. 1), обусловленном технологией их изготовления. Отличие в исходной микроструктуре электродов и определяет различие в величине их эрозии. Кроме того, электроды, полученные методом спекания, содержат остаточную пористость, что также сказывается на величине значения эрозии. Очевидно, большие значения эрозии для спечённых сплавов объясняются менее прочной связью между отдельными фрагментами структуры, что и приводит к более сильному разрушению при электроискровом импульсе.

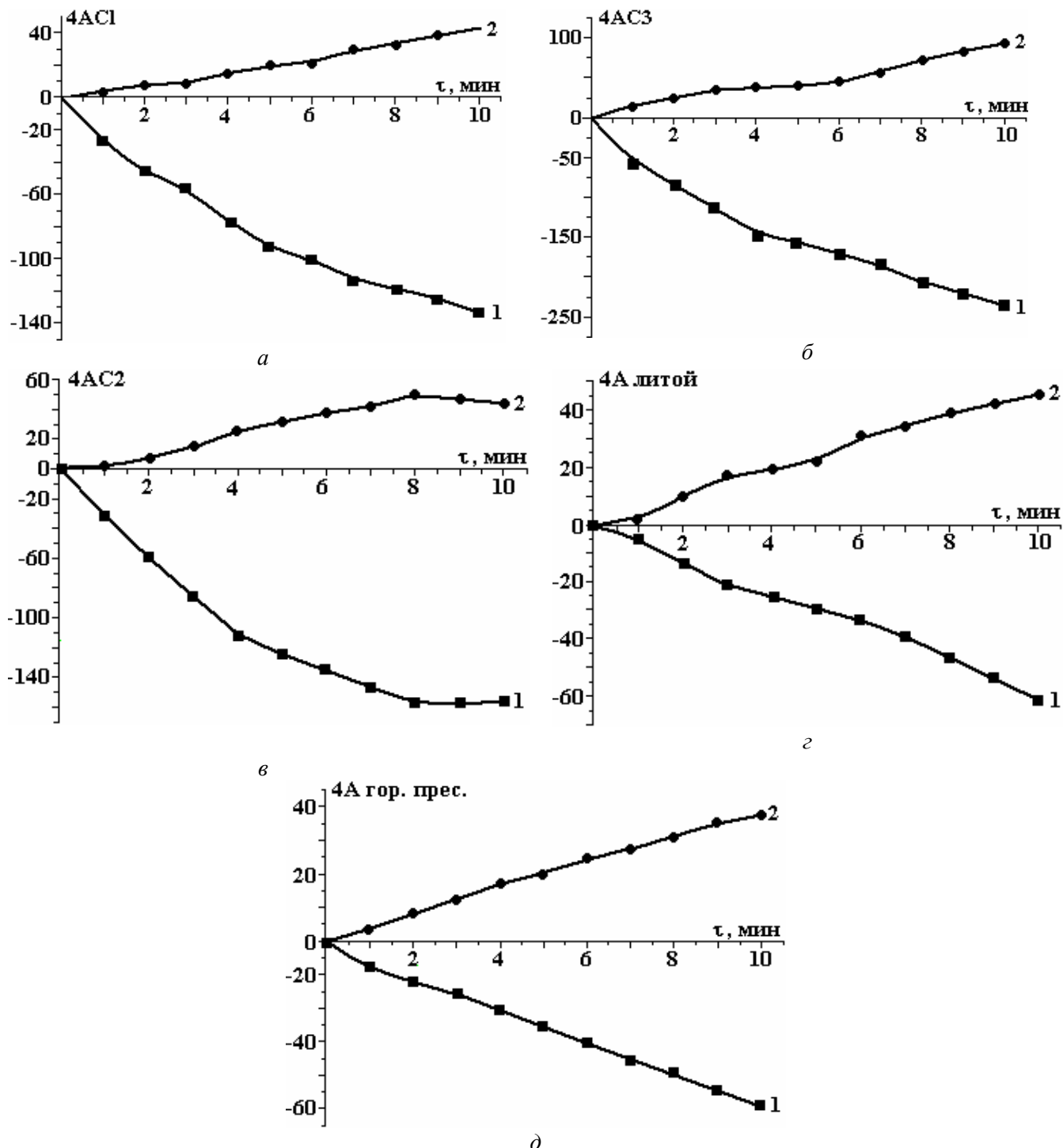


Рис. 2. Кинетические зависимости эрозии анода  $\Delta a$ , прироста массы катода  $\Delta k$  при ЭИЛ разными сплавами 1 см<sup>2</sup> стали 45 (время легирования  $\tau=600$  с/см<sup>2</sup>): а – 4АС1, б – 4АС2, в – 4АС3, г – 4А литой, д – 4А горячее прессование. 1 – % ( $\Delta a$ , мг/см<sup>2</sup>); 2 – % ( $\Delta k$ , мг/см<sup>2</sup>)

Несмотря на большую массу эрозии, количество материала, который переносится на катод, практически не зависит от величины эрозии. Привес катода при легировании спеченными сплавами 4АС1, 4АС2,

4АС3 мало отличается от привеса катода при легировании литым и горячепрессованным сплавами. Можно предположить, что относительно невысокий привес катода при легировании спеченными сплавами обусловлен тем, что большая часть эродированных частиц находилась в твердом состоянии, поэтому не смогла закрепиться на подложке и перешла в продукты эрозии.

Монотонный рост массы катода с увеличением времени легирования свидетельствует о том, что за 10 мин легирования не был достигнут порог хрупкого разрушения поверхностного слоя. Толщина полученного слоя достигает значений 500–700 мкм, что даёт основание рекомендовать данный сплав для восстановления изношенных поверхностей деталей. Покрытие из литого и горячепрессованного электродов обладает высокой сплошностью, что обеспечивает высокие показатели жаростойкости. Покрытие из спеченных сплавов имеет более низкую сплошность.

Коэффициент массопереноса при легировании литым и горячепрессованным 4А сплавами превышает в 2–3,5 раза коэффициент массопереноса при легировании спеченными сплавами 4АС1, 4АС2, 4АС3 (рис. 3). Наибольший коэффициент массопереноса (среднее значение 81,2 %) наблюдается при легировании ИГП сплавом. Сравнение коэффициентов массопереноса сплавом 4АС1, полученным методом спекания и ИГП (рис. 4), показало, что средний коэффициент массопереноса для спеченного сплава достигает 20 %, для горячепрессованного – 50 %. Такое различие в значениях коэффициента массопереноса определяется характером микроструктуры, обусловленном технологией их изготовления.

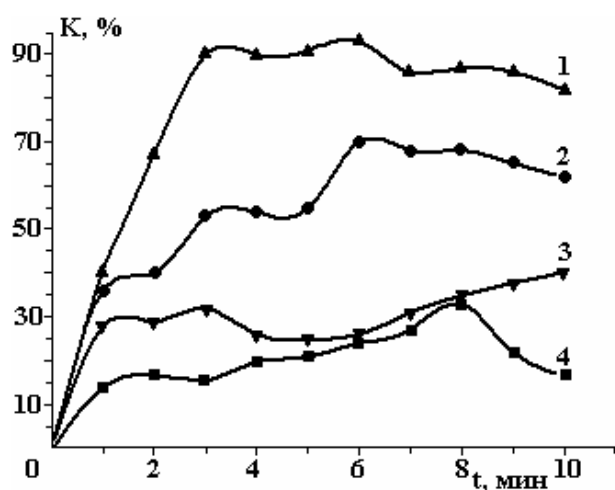


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопереноса от времени легирования для сплава 4А и для сплавов 4АС1 и 4АС3: 1 – 4А (ИГП), 2 – 4А (литой), 3 – 4АС3 (спекание), 4 – 4АС1 (спекание)

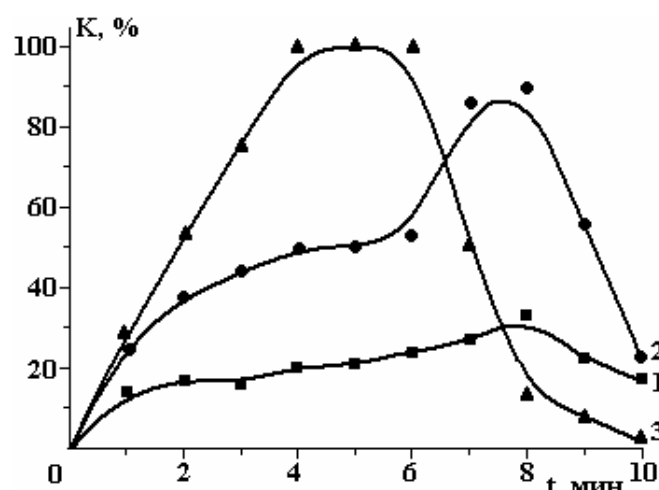


Рис. 4. Зависимость коэффициента массопереноса от времени легирования сплавом 4АС1 в спечённом и горячепрессованном состояниях. 1 – % (спекание,  $T = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 2 – % (гор. прес.  $T = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 3 – % (гор. прес.  $T = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### Выводы

Коэффициент массопереноса при ЭИЛ стали 45 электродами, имеющими фазовый состав в области тройной эвтектики  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ -твердых растворов, полученных различными технологиями и имеющими разные структуры, изменяется от максимального значения 81,2% для горячепрессованного сплава до 20% для спеченного. Такое различие определяется структурными факторами.

Учитывая вышеприведенное, можно сделать вывод, что ЭИЛ горячепрессованными электродами эффективнее, чем ЭИЛ спеченными электродами.

*Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины, грант 29.2/011.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И. В. *Трение и износ*. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
2. Киндрачук М. В., Душик Ю. А., Лучка М. В. Локальный характер напряженно-деформированного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения. *Порошковая металлургия*. 1994, (9–10), 56–61.
3. Киндрачук М. В., Шурин А. К., Панарин В. Е. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения. *Проблемы трения и изнашивания. Науч.-техн. сборник*. К.: Техніка, 1981, (19), 17–28.

4. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л., Ардатовская Е. Н. *Газотермические покрытия из порошковых материалов*. Справочник. К.: Наукова думка, 1987. 544 с.
5. Паустовський О. В., Ткаченко Ю. Г., Анісімов Г. М., Алфінцева Р. А., Кириленко С. М., Бовкун Г. О. *Технологія та матеріали для електроерозійного зміцнення та відновлення деталей машин. Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”*. Зб. наук. статей. К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. 553-557.
6. Паустовський О. В., Ткаченко Ю. Г., Алфінцева Р. А., Кириленко С. М., Юрченко Д. З., Анісімов Г. М. *Розробка та використання електроіскрового поверхневого зміцнення і відновлення деталей машин і інструментів. Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”*. Зб. наук. статей. К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. 589-594.
7. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. *Электрическая эрозия металлов*. М.: Гостехиздат, 1946. (2). 32 с.
8. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. *Электроискровая обработка токопроводящих материалов*. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 184 с.
9. Лазаренко Н. И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей. *Электронная обработка материалов*. 1965, (1), 49–53.

*Поступила 02.07.10*

### **Summary**

Investigated here is the dependence of mass transfer parameters on the structure of Ni-Cr-Al and Ni-Cr-NiAl electrode systems at electrospark alloying of Steel 45. The microstructure of cast, sintered and hot-pressed alloys represents a mix of nickel-, chromium- and NiAl intermetallide-based solid solutions. The mass-transfer factor at alloying by cast and hot-pressed alloys in 2-3,5 times exceeds that of at alloying by sintered ones. Such difference is defined by differences in the structures of the electrodes obtained by different technologies.

---