

Металлографические аспекты возникновения схватывания никельсодержащих электродов при нанесении покрытий в низковольтных импульсных разрядах

Л. А. Крячко, М. Е. Головкова

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича
НАН Украины, г. Киев

Изучены условия возникновения схватывания электродов из Ag—Ni композиционных материалов СН-10 и СН-30 при контактном нанесении покрытий на пластину из меди в низковольтных импульсных разрядах. Установлено, что в зависимости от условий контактирования схватыванию в разной мере подвержены все испытываемые электроды, в том числе и из литого серебра. Проявление схватывания усиливается с ростом содержания никеля в композиции, а для одного и того же состава — с повышением концентрации и размеров Ni-фазы в рабочем слое электродов, что вызывает изменение характера их эрозии в сторону сходства с эрозией электродов из литого никеля. Одновременно снижается и кинетика процесса формирования покрытий из испытываемых электродных материалов. Результаты металлографических исследований подтвердили определяющую роль теплофизических свойств никеля и поверхностных свойств его расплава в процессах схватывания никельсодержащих электродов.

Ключевые слова: схватывание электродов, импульсный разряд, эрозия электродов из серебра, никеля и композиции Ag—Ni.

Сваривание контактов электрических аппаратов является серьезной проблемой, изучению которой посвящено большое число работ [1—6]. Склонность металлов к проявлению указанного эффекта в различных условиях может изменяться, но, как отмечает большинство авторов, она чаще всего остается высокой для никелевых и никельсодержащих контактов. На это указывают как экспериментальные работы [2, 5], так и результаты расчета критерия свариваемости, выполненные по различным методикам [6].

Следует отметить, что экспериментальные работы, как правило, посвящены сравнительному изучению количества и силы свариваний контакт-деталей и не касаются исследования их рабочих поверхностей. На практике сварившиеся контакты либо заменяют, либо — при достаточно слабых сварках — зачищают и используют в дальнейшей эксплуатации. Однако отсутствие данных о состоянии контактирующих поверхностей непосредственно до и во время сваривания осложняет выяснение причин возникновения столь негативного эффекта.

При контактном нанесении покрытий в низковольтных импульсных разрядах иногда также наблюдается аналогичное явление, которое в основном проявляется в виде схватываний или залипаний [7—9] вследствие невысокого контактного нажатия и весьма малых зазоров,

обеспечивающих повышенное давление пара в промежутке между электродами. В этих условиях при отключении питания разведение электродов обычно не составляет труда и сохраняется возможность анализа поверхности для выявления причин, вызвавших сваривание. Такой подход позволил объяснить существующую закономерность повышения склонности к свариванию в ряду $Ag \rightarrow Cu \rightarrow Ni$ [6]. Как следует из данных, приведенных нами в работе [10], указанная закономерность вызвана таким же последовательным изменением механизма эвакуации металла под действием разряда, что, в свою очередь, определяется теплофизическими и поверхностными свойствами материала электрода.

В настоящей работе приведены результаты аналогичных исследований применительно к электродам из композиций системы $Ag-Ni$.

Цель работы — металлографическое изучение изменений на поверхностях и в рабочем слое электродов под воздействием низковольтных импульсных разрядов и оценка влияния этих изменений на массоперенос и склонность к свариванию (схватыванию) $Ag-Ni$ композиций по сравнению с литыми металлами Ag и Ni .

Методика эксперимента

Нанесение покрытий осуществляли по методике, изложенной в работе [10]. Катодом служила пластина из меди, аноды были выполнены из композиций $Ag + 10\% Ni$ (СН-10) и $Ag + 30\% Ni$ (СН-30), изготовленных механическим смешиванием исходных компонентов, — для повышения наглядности проявляемых эффектов. Склонность к схватыванию изучали как при единичных замыканиях, так и в процессе длительного ($\tau = 10$ мин) нанесения покрытий.

Поскольку под влиянием разряда, горящего в воздушной среде, имеет место плавление металлов, при замыкании электродов должно происходить их более или менее прочное сваривание, но в реальных условиях небольшие по силе сварки (схватывания) разрываются за счет усилия отводящего элемента (электромагнита). В настоящей работе влияние отводящего механизма изучали путем нанесения покрытия на край медной пластины, далеко отстоящий от места ее жесткого крепления. Такие условия обеспечивали локализацию области схватывания при единичных замыканиях, тем самым облегчая ее обнаружение и исследование.

Микроструктурные исследования проводили с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа Superprobe-733.

Результаты и их обсуждение

Проведенные эксперименты показали, что при нанесении покрытий на свободный от крепления край медной пластины работа исследуемых композиционных электродов сопровождается схватыванием так же, как это имело место при использовании электродов из литых металлов [10]. Как видно на рис. 1, области схватывания при единичном касании электродов чаще всего ограничены остатками сварных мостиков с уплощенной поверхностью. Но если при разведении пары Ag (анод)— Cu (катод) мостик обрывается у анода и практически весь остается на катоде (рис. 1, *а, б*), то в случае никелевого анода, наоборот, обрыв мостика происходит у катода (рис. 1, *в, з*). По характеру обрыва мостиков серебро-

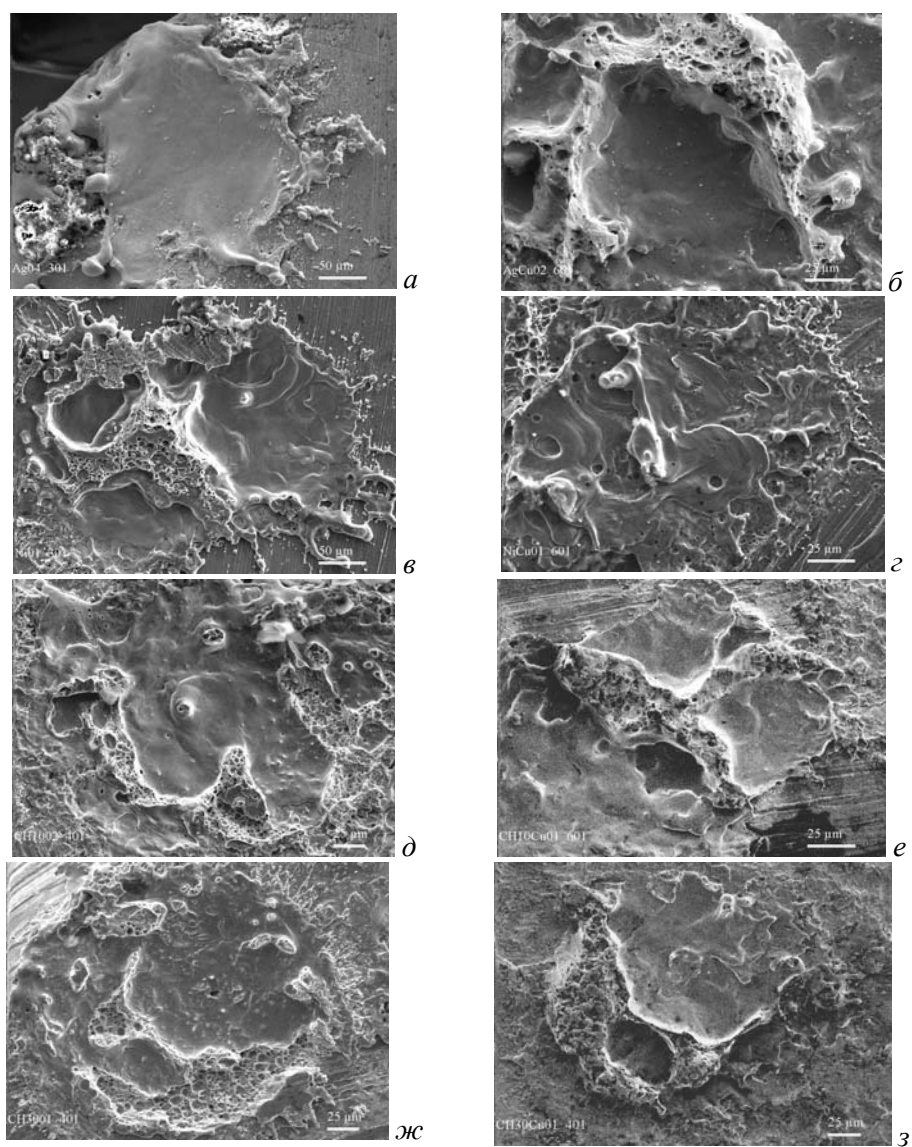


Рис. 1. Области единичных схватываний на аноде (*а, в, д, ж*) и катоде (*б, г, е, з*): *а, б* — Ag—Cu; *в, г* — Ni—Cu; *д, е* — CH-10—Cu; *ж, з* — CH-30—Cu.

никелевые электроды скорее напоминают серебро (рис. 1, *б, е, з*), но с никелем у них также есть заметное сходство, проявляющееся не только в наличии следов мостиков, окаймляющих область схватывания на аноде, но и остающихся внутри этих участков (рис. 1, *в, д, ж*). Указанная особенность свидетельствует об усилении схватывания, проявляющемся у никельсодержащих электродов по сравнению с электродами из серебра.

При длительном нанесении покрытий на жестко закрепленный участок медной пластины отмечались весьма редкие схватывания анода из CH-10 и значительно более частые — анода из CH-30. В этих условиях обнаружено практическое совпадение величин суммарно перенесенной на катод массы Ag и CH-10 (рис. 2, *а*, кр. 1, 3), в то время как для анода из CH-30 эта величина занимает промежуточное положение, но также сдвинутое в сторону кривой для серебряного анода (рис. 2, *а*, кр. 4).

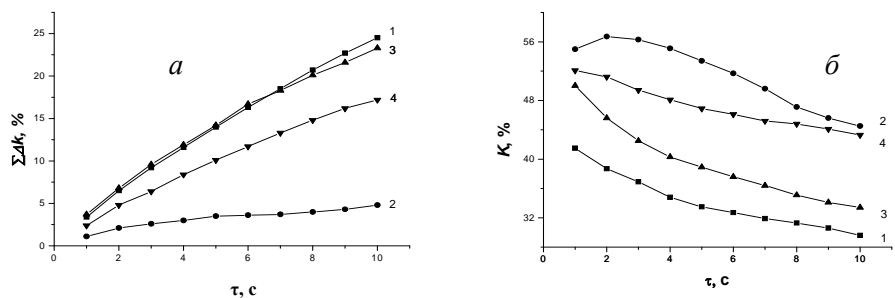


Рис. 2. Зависимость суммарного прироста массы покрытий (*a*) и коэффициента массопереноса (*б*) от времени нанесения покрытий (τ , мин) электродами из Ag (1), Ni (2), CH-10 (3) и CH-30 (4).

Коэффициент массопереноса анодного вещества при этом изменяется в противоположной последовательности: наибольшие его значения зафиксированы для анода из Ni (рис. 2, б, кр. 2), а наименьшие — для анода из Ag (рис. 2, б, кр. 1).

Металлографическое изучение поверхностей анодов показало, что свободное движение расплава, свойственное серебру (рис. 3, *a*), несколько сдерживается на аноде из CH-10 (рис. 3, *б, в*) и в еще большей степени — на аноде из CH-30 (рис. 3, *з, д*), в то время как на никелевом аноде оно и вовсе прекращается (рис. 3, *е*). Таким образом, в характере эрозийного разрушения исследуемых электродов прослеживается закономерность, проявляющаяся в последовательном изменении условий эвакуации вещества с поверхности анода. Как видно на микрофотографиях (рис. 3), выброс серебра из анодных лунок довольно активно происходит не только в виде пара, но и в виде расплава (рис. 3, *a*), что обеспечивает более высокий темп роста массы покрытия на катоде (рис. 2, *a*, кр. 1). В то же время никель эродирует в основном в виде пара (рис. 3, *е*), что закономерно уменьшает скорость массопереноса на катод (рис. 2, *a*, кр. 2) [11]. Снижение коэффициента массопереноса является следствием потерь вещества, рассеивающегося главным образом из промежутка в виде пара. Хотя все металлические электроды в данных условиях эродируют, прежде всего, в паровой фазе, характер этого процесса у разных металлов отличается и зависит от комплекса свойств, определяющих вид эрозии. Высокое давление пара, свойственное серебру при повышенных температурах, в сочетании с его низкой теплотой испарения и высокой пластичностью способствует образованию на поверхности анода лунок с расширенным раствором. Такая форма лунок хотя и создает условия для ускоренного охлаждения и конденсации пара, но в то же время облегчает его рассеяние из межэлектродного промежутка, вследствие чего растут потери электродного материала, а следовательно, снижается коэффициент массопереноса.

Эрозия анодов из никеля, как правило, сопровождается направленным выбросом паровых струй из узких каналов, часто с образованием кратеров (рис. 3, *е*), что ограничивает рассеяние пара. Указанное отличие является следствием присущей никелю совокупности теплофизических и поверхностных свойств (таблица). В частности, процесс парообразования у никеля сопровождается более высоким потреблением тепловой мощности

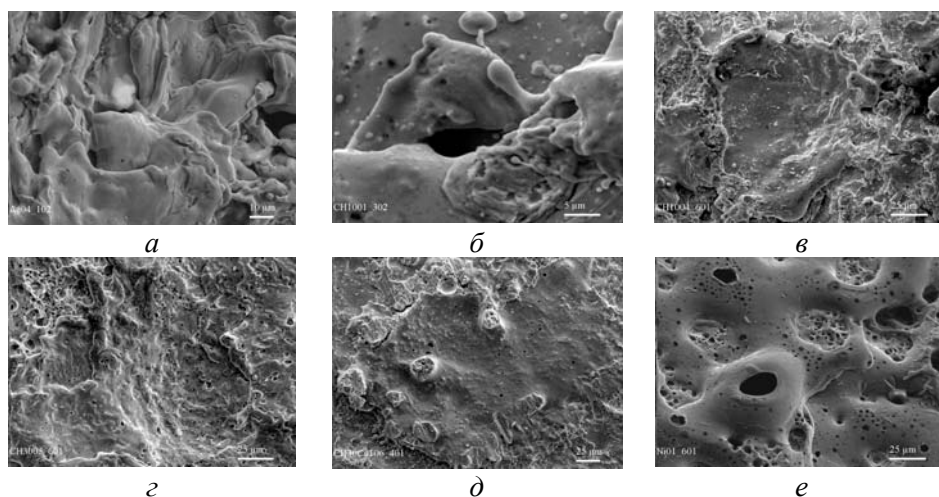


Рис. 3. Морфологические особенности электроэрозионного разрушения анодов из Ag (а), CH-10 (б, в), CH-30 (г, д) и Ni (е).

Теплофизические характеристики металлов и свойства их расплавов

Свойства электродных материалов	Материал электрода	
	Ag	Ni
Температура плавления $T_{пл}$, К [12]	1233,8	1728
Теплота испарения $Q_{исп}$, кДж/моль [13]	254,0	380,6
Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)* [12]	249,7	543
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)* [12]	414	66,2
Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$, м ² /с* [12]	161	14,1
Поверхностное натяжение σ , мДж/м ² [14]	920 ($T = 1273—1573$ К)	1835 ($T = 1733$ К)
Динамическая вязкость расплава η , г/см·с [15]	3,69 ($T = 1293$ К)	4,1 ($T = 1823$ К)

*При $T = 0,5T_{пл}$.

из канала разряда (с учетом повышенного значения теплоты его испарения), что обеспечивает высокую энергоемкость паровых струй. В то же время низкая по сравнению с серебром теплопроводность тормозит размягчение и плавление достаточного объема металла вблизи теплового источника, а высокое поверхностное натяжение удерживает выброс расплава, как из кратеров, так и с поверхности электрода (рис. 3, е).

Поскольку серебро и никель практически взаимно нерастворимы, эрозия Ag—Ni электродов в большей мере определяется эрозией серебра, поэтому ее характер в целом схож с описанным для серебра (рис. 3, в, г). Тем не менее, с повышением содержания в них никеля в их поведении появляется все больше признаков, свойственных эрозии никелевых анодов. Процесс схватывания становится заметным не только по неустойчивой работе вибратора, но и фиксируется металлографически, особенно у пары CH-30 (анод)—Cu (катод). В частности, для этой пары

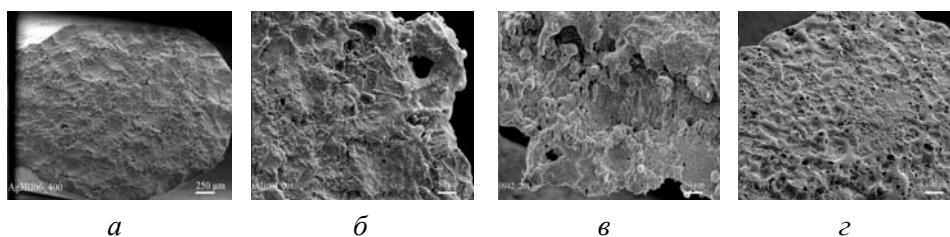


Рис. 4. Поверхности электродов из Ag (а), СН-10 (б), СН-30 (в), и Ni (г) после нанесения покрытий в течение 10 мин.

характерно формирование локальных мостиков внутри общего следа схватывания в течение всего процесса нанесения покрытий (рис. 3, д), а не только при единичных замыканиях. Вокруг таких мостиков образуются обширные области расплава вследствие выделения джоулева тепла при протекании сквозных токов (рис. 3, д). В то же время работа электродов из СН-10 характеризуется более редкими и менее прочными схватываниями с меньшей длительностью. Это проявляется в изменении формы участка схватывания, свидетельствующей, что указанный процесс осуществляется лишь по контуру лунки. Последующие микроразряды, протекающие вследствие вибрации электрода, вызывают усиленное парообразование в зоне контактирования, способствующее расхождению электродов. Внутри таких лунок на поверхностях электродной пары СН-10 (анод)—Cu (катод) при длительном нанесении покрытий локальных следов схватывания не обнаружено (рис. 3, в).

В процессе исследований у анодов из серебро-никелевых композиций также обнаружено смещение поверхностного слоя в направлении их перемещения по катоду (рис. 4, б, в), чего не наблюдалось при работе электродов из чистых металлов (рис. 4, а, г). Отмеченная особенность поведения Ag—Ni анодов вызвана, очевидно, более высокой по сравнению с серебром теплоемкостью никеля и его пониженной теплопроводностью (таблица), что задерживает охлаждение поверхностного слоя электродов, сохраняя его подвижность. Никелевым электродам такая особенность не свойственна (рис. 3, е) в связи с низкими литейными качествами никеля [16], которые определяются высоким поверхностным натяжением его расплава [14].

Шлифы продольного сечения Ag—Ni электродов свидетельствуют об изменениях, происходящих в их рабочих слоях под действием разряда и обусловленных исходной структурой анодов. Так, сравнительно малая объемная доля никеля в СН-10 вызывает лишь диспергирование Ni-фазы в рабочем слое как анода, так и катода (рис. 5, а—в). Повышенное содержание никеля в СН-30 ведет к укрупнению Ni-фазы не только в основе электродного материала, но и в рабочем слое электрода за счет агломерации частиц никеля в расплаве серебра (рис. 5, г). Более того, вследствие совместного влияния импульсных разрядов и перемещения анода в рабочем слое последнего возможно формирование слоистой структуры с прослойками Ni-фазы значительной протяженности (рис. 5, д). С учетом выявленных особенностей эрозии никеля [10] такая структура рабочего слоя создает предпосылки для схватывания электродов под действием концентрированных источников тепла.

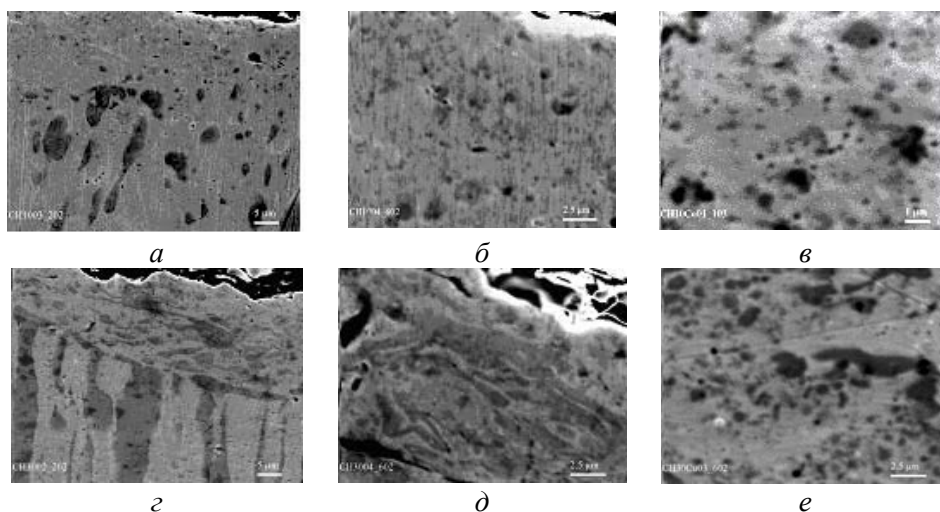


Рис. 5. Микроструктура рабочего слоя электродов: *а, б* — СН-10; *z, д* — СН-30; *в* — покрытие из СН-10 на катоде; *е* — покрытие из СН-30 на катоде.

Таким образом, сравнительные металлографические исследования поведения электродов из серебра, никеля, СН-10 и СН-30 при нанесении ими покрытий в низковольтных импульсных разрядах подтверждают, что схватывание композиционных Ag—Ni электродов вызывается особенностями эрозии никеля, которые определяются комплексом его теплофизических и поверхностных свойств.

Выводы

Изучены особенности поведения электродов из композиционных материалов системы Ag—Ni (СН-10 и СН-30) при контактном нанесении ими покрытий в низковольтных импульсных разрядах. Установлено, что испытываемые электроды обоих составов проявляют склонность к схватыванию, которая возрастает с повышением содержания никеля в композиции и фиксируется металлографически по следам жидкого мостика, формирующегося на их рабочих поверхностях при разведении электродов.

Обнаружены отличия в структуре областей схватывания в парах с анодом из серебра и композиции Ag—Ni. Для серебра и в значительной мере для СН-10 характерно вытягивание жидкого мостика по контуру области схватывания, в то время как при схватывании электродов из СН-30 образуются локальные мостики и внутри этой области.

Микроструктурными исследованиями электродов выявлено диспергирование никеля в рабочем слое анодов из СН-10 и образование крупных включений никелевой фазы в СН-30, что создает условия для схватывания.

Закономерности эрозии и массопереноса последовательно изменяются в ряду Ag → СН-10 → СН-30 → Ni в связи с отсутствием взаимодействия между компонентами в системе Ag—Ni.

В целом результаты металлографического исследования подтверждают определяющую роль теплофизических свойств никеля и поверхностных свойств его расплава в процессах схватывания никельсодержащих электродов.

1. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: ИЛ, 1961. — 464 с.
2. Усов В. В. Металловедение электрических контактов. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 208 с.
3. Мерл В. Электрический контакт. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 183 с.
4. Намитоков К. К. Электроэрозионные явления. — М.: Энергия, 1978. — 456 с.
5. Вальчук Е. Исследование свариваемости контактных материалов // Электрические контакты. — М.: Наука, 1973. — С. 84—87.
6. Li Zhenbiao, Cheng Lichun, Zhang Guansheng. A review on theoretical investigation of electrical contact materials // IEEE Trans. on CHMT. — 1996. — 19, No. 3. — P. 488—493.
7. Самсонов Г. В., Верхотуров А. Д., Бовкун Г. А., Сычев В. С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. — К.: Наук. думка, 1976. — 219 с.
8. Верхотуров А. Д. Влияние схватывания электродов на эрозию анода в процессе электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. — 1984. — № 6. — С. 22—25.
9. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф., Егоров Ф. Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. — М.: Наука, 1988. — 224 с.
10. Крячко Л. А., Головкова М. Е. О причинах схватывания электродов из Ag, Cu и Ni при нанесении покрытий в низковольтных импульсных разрядах // Порошковая металлургия. — 2009. — № 9/10. — С. 140—149.
11. Бакуто И. А., Мицкевич М. К. О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки // Электронная обработка материалов. — 1977. — № 3. — С. 17—19.
12. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.
13. Таблицы физических величин: (Справ.) / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
14. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы): (Справ.). — М.: Металлургия, 1981. — 208 с.
15. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства / Под ред. Г. В. Самсонова. — М.: Металлургия, 1976. — 599 с.
16. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. — К.: Вища школа, 1976. — 423 с.

Металлографічні аспекти виникнення схоплення нікельвмісних електродів при нанесенні покриттів в низьковольтних імпульсних розрядах

Л. О. Крячко, М. Є. Головкова

Вивчено умови виникнення схоплення електродів з Ag—Ni композиційних матеріалів СН-10 і СН-30 при контактному нанесенні покриттів на пластину з міді в низьковольтних імпульсних розрядах. Встановлено, що в залежності від умов контактування схопленню в різній мірі схильні усі досліджувані електроди, в тому числі і з литого срібла. Виявлення схоплення підсилюється з ростом вмісту нікелю в композиції, а для одного й того ж складу — з підвищенням концентрації і розмірів Ni-фази в робочому шарі електродів, що викликає зміну характеру їх ерозії в бік схожості з ерозією електродів з литого нікелю. Одночасно змінюється і кінетика процесу формування покриттів з випробуваних електродних матеріалів. Результати металлографічних досліджень підтвердили визначальну роль

теплофізичних властивостей нікелю та поверхневих властивостей його розплаву в процесах захоплення електродів, що вміщують нікель.

Ключові слова: захоплення електродів, імпульсний розряд, ерозія електродів із срібла, нікелю та композиції Ag—Ni.

Metallographic aspects of seizure of nickel-containing electrodes during coating deposition under low-voltage pulsed discharged

L. Kryachko, M. Golovkova

The conditions of seizure of electrodes from Ag-Ni composites, namely SN-10 and SN-30, have been studied in the course of contact deposition of coatings on a copper plate using a low-voltage pulsed discharges. It has been established that all of the studied electrodes including those from cast silver undergo seizure to different degree depending on the conditions of contacting. The manifestation of seizure increases with increasing the nickel content in the composition and, for the same composition, with increasing the concentration and size of the Ni phase in the electrode working layer. This makes the electrode erosion similar to that of cast nickel electrodes. Also, herein the kinetics of coating formation is reduced. The results of metallographic examination confirm the determining role of thermophysical properties of nickel and surface properties of nickel melt in the process of seizure of nickel-containing electrodes.

Keywords: electrode seizure, pulse discharge, erosion of electrodes made of silver, nickel and composition Ag—Ni.