

УДК 621.9.048

О факельном переносе

В. Н. Халдеев

Одним из эффективных способов снижения интенсивности изнашивания электрода-инструмента в процессе электроэрозионной обработки является факельный перенос на его рабочую поверхность материала обрабатываемой заготовки. Приведены результаты экспериментального исследования элементного и фазового составов пленки, образующейся на рабочей поверхности ЭИ.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, интенсивность изнашивания инструмента, защитная пленка, факельный перенос, спектрограмма.

Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО), основанная на тепловом действии электрических импульсов, широко применяется в металлообработке. Подобно механическим методам обработки, ЭЭО характеризуется наличием изнашивания электрода, выполняющего функции инструмента. В подавляющем большинстве случаев износ инструмента негативно влияет на точность обработки и снижает ее экономичность.

Снизить интенсивность изнашивания инструмента можно разными способами: изготовлением ЭИ из материалов, обладающих высокой эрозионной стойкостью [1, 2]; применением специальных схем генераторов импульсов, вырабатывающих электрические импульсы такой формы, которая уменьшает износ ЭИ [3]; добавлением в рабочую жидкость элементоорганических соединений, образующих на рабочей поверхности инструмента эрозионно-стойкий слой; регулированием скорости течения рабочей жидкости в МЭП; подбором электрических параметров режима обработки [3]; созданием на рабочей поверхности ЭИ защитной пленки [4]; за счет продуктов пиролиза рабочей жидкости; из окислов материала ЭИ или заготовки путем электрохимических процессов при обработке в среде слабых электролитов; из материала обрабатываемой заготовки в результате переноса

его в парообразном состоянии на рабочую поверхность ЭИ.

Анализ всех вышеперечисленных способов снижения износа ЭИ показал, что одним из перспективных способов является образование на рабочей поверхности ЭИ пленки из материала обрабатываемой заготовки.

Теория факельного переноса

Металлическая пленка на рабочей поверхности ЭИ образуется следующим образом. При кратковременном воздействии электрического импульса прямой полярности на локальный участок поверхности обрабатываемой заготовки (анода) происходит как плавление, так и испарение малых объемов этого участка. Находящийся в парообразном состоянии металл в соответствии с законами тепломассопереноса переносится на рабочую поверхность ЭИ, поэтому такой способ защиты отличается управляемостью через продолжительность и интенсивность импульса, поскольку перенос испаренного металла и отложение его в виде пленки определяются именно этими характеристиками [5].

Однако испарение металла под воздействием электрического импульса происходит не только на аноде, но и на катоде, т. е. паровые струи (факела паров) образуются на обоих электродах. Количество испаренного металла и ско-

рость перемещения паровых струй зависят от параметров (в основном, от длительности) импульса и теплофизических свойств материалов электродов. При малых длительностях импульса, когда энергия передается электронным компонентом, паровая струя образуется на аноде и перемещается в направлении катода. В этих случаях паровая струя, в зависимости от количества энергии на момент поступления ее на катод, может оказывать разрушающее воздействие на материал катода, а может конденсировать переносимый ею материал на рабочей поверхности катода. Целенаправленное получение на рабочей поверхности катода пленки из материала анода возможно при выполнении следующих условий [6]: факелы паров, образующиеся на аноде и катоде, не должны пересекаться в МЭП; энергия факельной струи в момент торможения на поверхности катода не должна оказывать разрушающего действия на него, но в то же время должна быть достаточной для конденсации металла, составляющего основу факельной струи; материалы электродов должны образовывать друг с другом твердые растворы. При выполнении этих условий на поверхности катода образуется пленка из материала противоположного электрода, что многократно было подтверждено на опыте.

Эксперимент

Экспериментальное исследование проведено по схеме, изложенной в работе [7]. Обработка произведена на электроэрозионном копировально-прошивочном станке 4Л721, оснащенном генератором импульсов ШПИ 40-440. Обработке подвергнуты вольфрамовые сплавы ВНЖ 7-3 и ВНМ 3-2. Электрод-инструмент изготовлен из меди М1. Наличие никеля в составе обрабатываемых заготовок обусловило образование твердых растворов на базе Cu-Ni, поскольку эти элементы способны образовывать друг с другом твердые растворы неограниченной растворимости [8]. Рабочая жидкость, подаваемая в зону обработки через центральное отверстие ЭИ, — деионизованная вода с удельным электрическим сопротивлением порядка 1 Мом · см. Энергия импульса — $3 \cdot 10^{-4} \dots 2,2$ Дж, длительность импульса — $1,7 \cdot 10^{-6} \dots 9 \cdot 10^{-4}$ с.

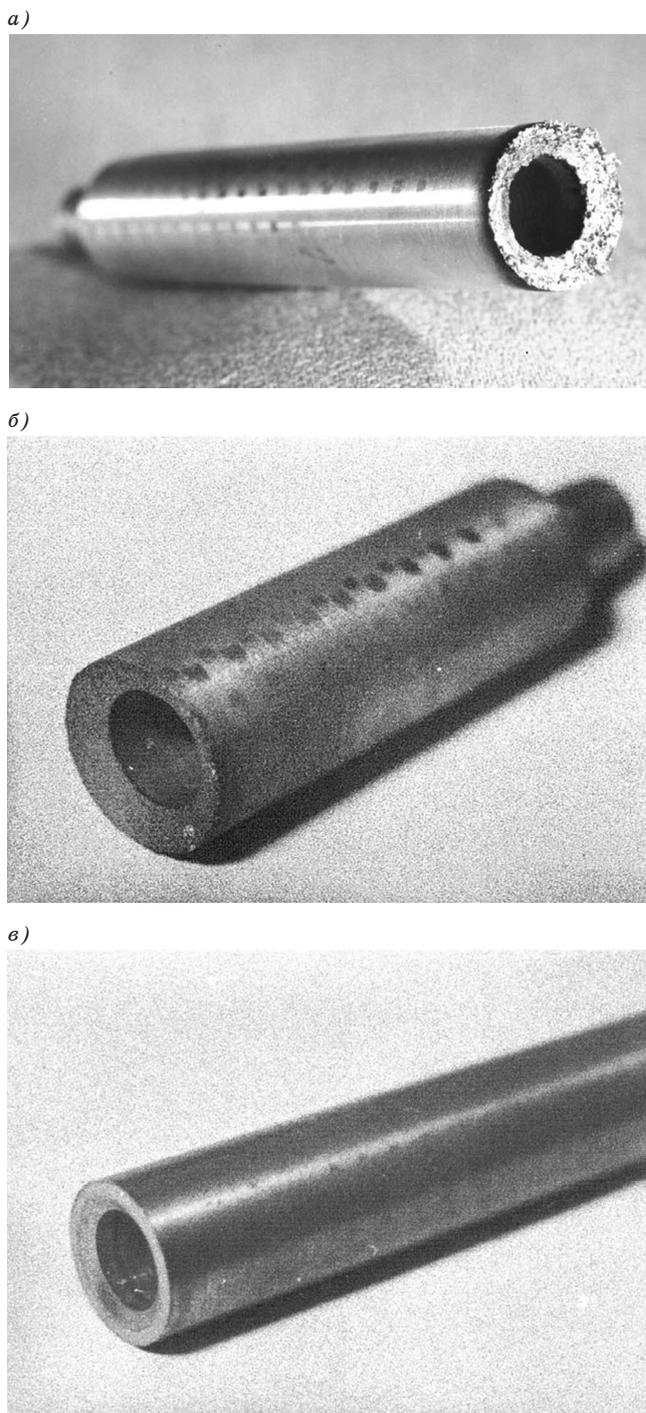


Рис. 1. Медный ЭИ, на рабочей поверхности которого видна пленка, образованная при ЭЭО сферической поверхности из сплава ВНЖ 7-3 при режимах: а — $f = 1$ кГц, $q = 1,1$, $W_{\text{н}} = 2,18$ Дж; б — $f = 66$ кГц, $q = 1,1$, $W_{\text{н}} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ Дж; в — $f = 66$ кГц, $q = 3$, $W_{\text{н}} = 1 \cdot 10^{-3}$ Дж

При этих условиях обработки на рабочей поверхности ЭИ образуется пленка, резко отличающаяся по цвету от материала ЭИ, т. е. от меди (рис. 1).

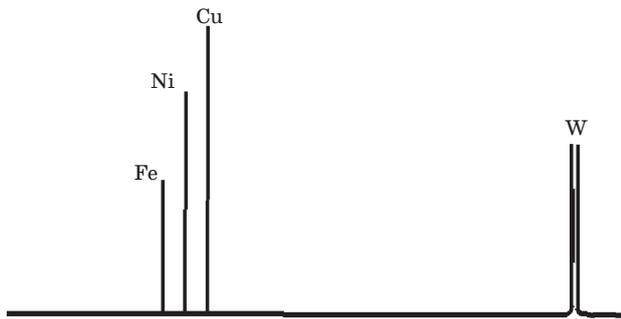


Рис. 2. Масс-спектрограмма напыленного на медный ЭИ слоя материала заготовки из ВНЖ 7-3

Вполне закономерно возникает вопрос: какие компоненты из материала заготовки (в случае обработки многокомпонентного материала) присутствуют в составе пленки? Поэтому для выявления компонентов материала заготовки в напыленном слое на лазерном микрозондовом масс-спектрометре ЛАММА-1000 проведен масс-спектральный анализ. Сущность исследования состояла в следующем. Импульсным лазерным лучом длительностью $t_{\text{л}} = 5 \cdot 10^{-9}$ с и энергией $W_{\text{л}} = 4 \cdot 10^{-6}$ Дж при длине волны $\lambda = 2,55 \cdot 10^{-7}$ м испарялся малый объем исследуемой пленки, образованной в процессе ЭЭО на рабочей поверхности ЭИ. Испаренный лазерным лучом материал, разгоняясь в электрическом поле, разделялся на пики масс, что и отражено на рис. 2.

Анализируя эту спектрограмму, легко установить, что в материале исследуемой пленки находятся все компоненты (пленка на медном ЭИ образована в результате обработки вольфрамового сплава ВНЖ 7-3), входящие в состав обрабатываемой заготовки (Ni, W, Fe), а также составляющие основу материала ЭИ (Cu). Грубая количественная оценка показывает, что пленка состоит в основном из Cu и Ni, а W и Fe в ней существенно меньше, хотя в состав обрабатываемой заготовки входит более 90 % W.

Одним из наиболее важных этапов металлографического исследования пленки было определение глубины проникновения компонентов слоя в медное основание и их концентрации в слое. С этой целью выполнен анализ микроструктуры участка рабочей поверхности медного ЭИ с образовавшейся на нем пленкой из компонентов сплава ВНМ 3-2. Это исследова-

ние проведено с помощью рентгеновского микроанализатора JCMA-733 по программе LINE, CAL IBN. Глубина диффузии компонентов сплава ВНМ (W, Ni, Cu) в рабочую поверхность медного ЭИ измерена электронными зондами (диаметром 0,3 мм) с шагом сканирования 1 мкм.

Изменение концентраций W, Ni, Cu в пленке проведено по линии от центра одного зерна W через прослойку (Ni-Cu)W до центра другого зерна W электронным лучом диаметром 1 мкм и шагом 1 мкм. Площади (объемы) фаз W и (Ni-Cu)W-связки в плоскости шлифа определяли на анализаторе изображений YBAS-2000, при этом на каждом образце анализировали приблизительно 10 полей размерами 450 × 470 мкм.

Концентрация и глубина внедрения основных компонентов сплава ВНМ (W, Ni, Cu) в рабочую поверхность медного ЭИ представлена на рис. 3 в виде графических зависимостей концентрации компонентов сплава от глубины их внедрения.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что в поверхности напыленного слоя более всего содержится вольфрам, концентрация которого снижается по мере увеличения расстояния от поверхности пленки. На расстоянии от поверхности, большем 30 мкм, концентрация вольфрама в пленке становится нулевой. Большая часть вольфрама, содержащегося в сплаве ВНМ, входит в состав пленки. Содержание никеля в составе пленки (рис. 3),

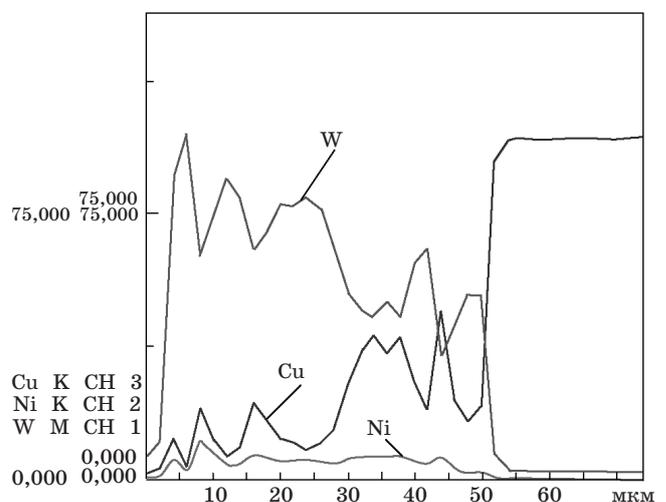


Рис. 3. Глубина внедрения компонентов сплава ВНМ в поверхность медного ЭИ

сравнительно невелико (не превышает 11 %), т. е. состав пленки, в первом приближении, идентичен составу материала обрабатываемой заготовки.

Для выяснения характера соединений, образовавшихся в результате взаимодействия компонентов пленки как между собой, так и с материалом ЭИ, проведен рентгенофазовый анализ. В качестве исследуемого образца использован микрошлиф медного ЭИ, на рабочей поверхности которого имеется пленка из компонентов вольфрамового сплава ВНЖ 7-3. Рентгенофазовый анализ этого образца проведен на рентгеновском дифрактометре D_{\max}/RC фирмы Rigaku (Япония) с использованием излучения медного анода. Исследуемый участок облучался рентгеновским пучком диаметром 0,03 мм при напряжении 40 кВ. По полученным дифрактограммам определены дифракционные пики и соответствующие им межплоскостные расстояния. По найденным межплоскостным расстояниям и интенсивностям пиков по каталогу JCPDS определен фазовый состав пленки.

Облучению и последующему анализу подвергались два участка образца, находящиеся на различной глубине от поверхности пленки. Первый участок находился на границе пленка — медь. Основные фазы этого участка, как следует из рис. 4, — медь и твердый раствор никеля в меди.

Второй обследуемый участок выбран примерно в среднем сечении пленки. Этот участок пленки состоит из следующих фаз (рис. 5): чистого вольфрама, твердого раствора никеля в меди и твердого раствора железа в вольфраме.

Итак, металлическая пленка, образующаяся (при соблюдении определенных условий) на рабочей поверхности медного ЭИ в процессе размерной ЭЭО сферической поверхности, материалом которой является вольфрамовый сплав ВНЖ 7-3, представляет собой совокупность твердых растворов (никеля в меди и железа в вольфраме) и чистых металлов (меди и вольфрама). Не исключено также образование и других соединений, но возможное отсутствие данных по ним в каталоге JCPDS не позволило их выявить.

Именно образованием твердых растворов можно объяснить взаимопроникновение, т. е. взаимную диффузию между медной рабочей поверхностью ЭИ и компонентами сплава ВНЖ и ВНМ, а также и некоторых других сплавов. Благодаря же развитому процессу диффузии пленка устойчиво удерживается на рабочей поверхности ЭИ, обеспечивая тем самым резкое снижение интенсивности его изнашивания.

Выводы

1. Перенос паровой составляющей продуктов эрозии с поверхности обрабатываемой за-

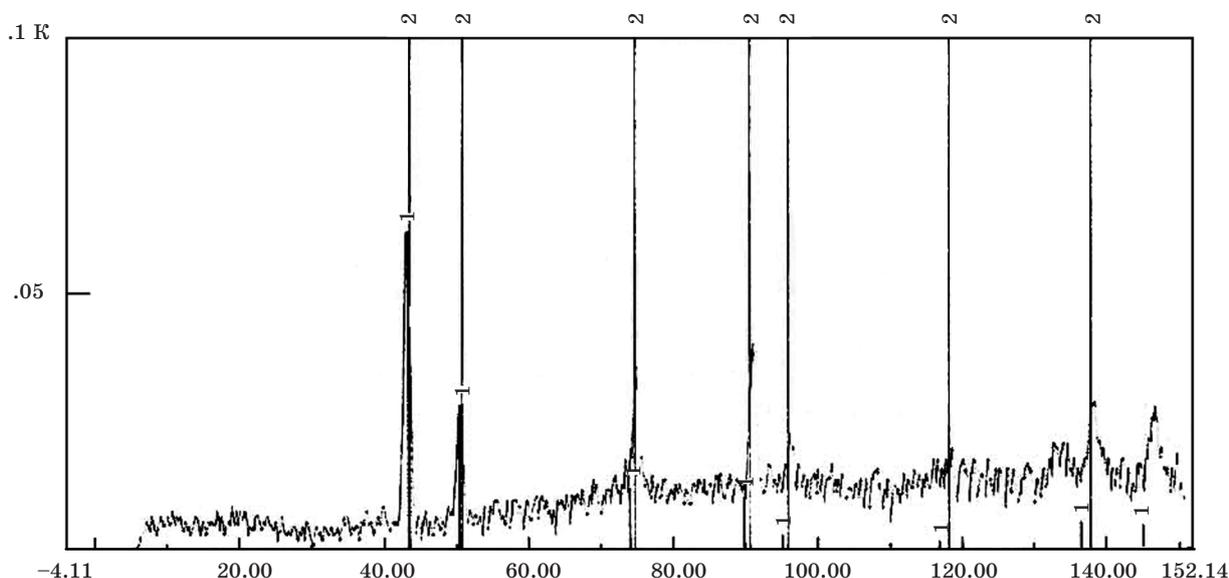


Рис. 4. Дифрактограмма граничной области пленка — медь

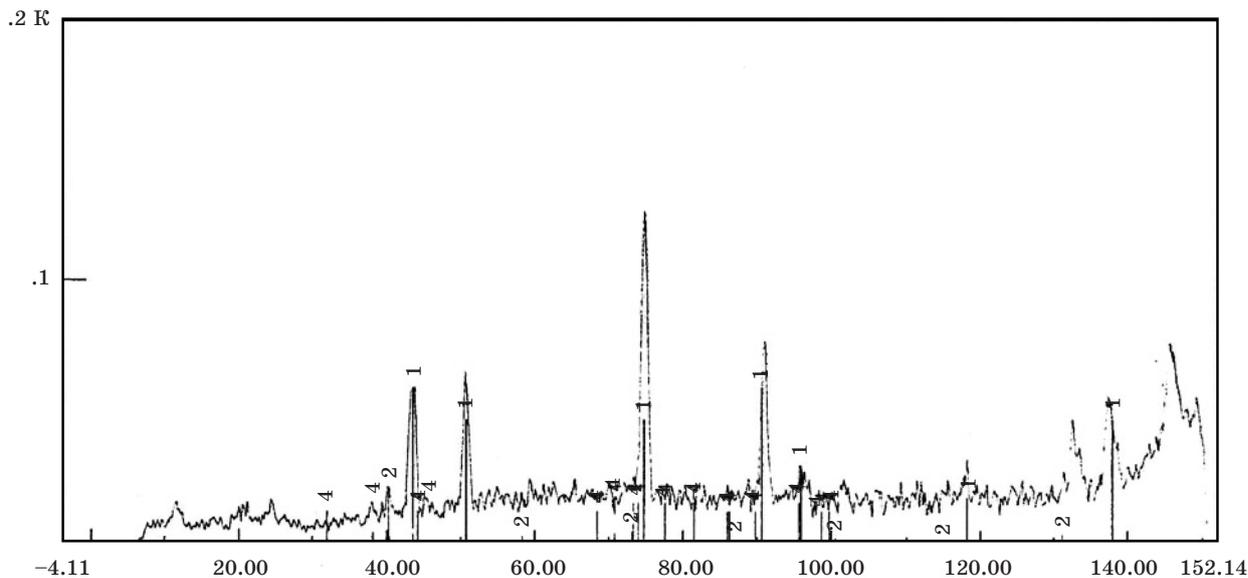


Рис. 5. Дифрактограмма среднего сечения пленки

готовки на рабочую поверхность электрода-инструмента подтвержден экспериментально.

2. Определен фазовый состав металлической пленки, образующейся на рабочей поверхности ЭИ. Наличие твердых растворов в составе пленки обуславливает ее хорошее сцепление с материалом электрода-инструмента.

Литература

1. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1968. 581 с.
2. Шмаков Г. С. Повышение электроэрозионной стойкости металла путем создания в его основе соевой структуры из частиц дисперсной тугоплавкой

фазы // Электронная обработка материалов. 1970. № 1. С. 12–14.

3. Коренблюм М. В. Чистовая электроэрозионная обработка с малым износом инструмента // Станки и инструмент. 1980. № 6. С. 31–33.

4. Золотых Б. Н., Гиоев К. Х. Роль факелов импульсного разряда в передаче энергии и эрозии электродов. В кн.: Физические основы электроискровой обработки материалов. М.: Наука, 1966. С. 16–37.

5. Вилистер В. П., Седова М. Л. Факельный механизм защиты электрода-инструмента при электроэрозионной обработке // Физика и химия обработки материалов. 1968. № 6. С. 33–40.

6. Халдеев В. Н. Факельная защита электрода-инструмента от износа // Электронная обработка материалов. 1988. № 5. С. 5–7.

7. Халдеев В. Н., Макаров М. Н. К вопросу о факельном компоненте энергии электрического разряда // Металлообработка. 2014. № 4. С. 13–22.

8. Халдеев В. Н., Завалишин Ю. К. Материаловедение. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 504 с.