

21. Дикусар А.И., Редкозубова О.О., Ющенко С.П., Яхова Е.А. Анализ влияния макроскопической неоднородности на скорость анодного растворения железа Армко в области смешанной кинетики // Электрохимия. Т. 38. № 6. 2002. С. 712.

22. Kuo H.C., Landolt D. On the Role of Mass Transfer in High Rate Dissolution of Iron and Nickel in Concentrated Chloride Media // Electrochem. Acta. Vol. 20. Nr. 5. 1975. P. 393.

Поступила 01.11.04

### Summary

The method of determination of electrochemical process localization degree at anodic dissolution of partially insulated surface under controlled hydrodynamic conditions with use of local sites of an electrode surface located on a rotating disk (rotating disk electrodes with eccentricity) has been suggested. The method has been used for determination of interconnection between a degree of electrochemical process localization and etching rate in a normal direction on composition of electrolyte and hydrodynamic conditions with reference to electrochemical marking of parts from aluminium alloy D1 (alloying components – copper, magnesium, manganese) and to electrochemical fabrication of holes of complex shape and small depth (15–20  $\mu\text{m}$ ) in steel parts in NaCl solutions of various concentration.

Б.И. Ставицкий, И.Б. Ставицкий

## ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В ПРИКЛАДНОМ ИСКУССТВЕ, ПРОИЗВОДСТВЕ ЮВЕЛИРНЫХ И ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,  
ул. 2-я Бауманская, д.5, г. Москва, 105005, Россия*

С момента появления принципиально нового электрического способа обработки материалов – электроискрового способа – подчеркнута возможность его использования не только для осуществления заготовительных работ, обработки разнообразных деталей, легирования материалов, но и в прикладном искусстве. В ранних работах [1–3] Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко обратили внимание читателей на возможность нанесения надписей и рисунков на металлы и даже стекло, покрытое тонкой электропроводной пленкой, с помощью электропера. Надписи, сделанные электропером, имеют металлический блеск, характерный для поверхностей, обработанных электроискровым способом. Они особенно эффектны на оксидированном металле. Рисунки или надписи можно осуществлять как за счет снятия с обрабатываемой поверхности порций металла (при этом обрабатываемый материал является анодом, а "перо" – катодом), так и за счет его нанесения (в этом случае, наоборот, обрабатываемый материал является катодом, а "перо" – анодом). Электроперо представляет электромагнитную вибрационную систему, питаемую от простейшего RC генератора [2, 3]. Конструктивно оно выполнено в виде авторучки и малогабаритного электрического блока – генератора. В качестве примера на рис.1 представлены образцы, сделанные в 60-х годах электропером художниками ЦНИЛ-Электром АН СССР, на пластинах вороненой стали. В качестве электрода-инструмента использовались вольфрамовые и серебряные проволочки. Росписи осуществлялись снятием отдельных частей металла искровыми электрическими разрядами и электроискровым нанесением на поверхность стали слоев серебра различной толщины.

На рис. 2 показан отпечаток сложного орнамента на стальной щечке ружья, выполненный электроискровым способом специальным латунным электродом-инструментом в ЦНИЛ-Электром АН СССР.



а



б



в



г

Рис. 1. Электроискровая роспись на пластинах вороненой стали



Рис. 2. Отпечаток сложного орнамента на стальной щечке ружья

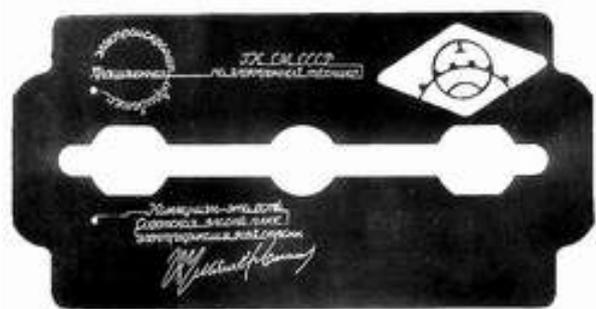


Рис. 3. Сквозные прорези сложного профиля, вырезанные в лезвии бритвы электродом-проволокой диаметром 0,04 мм



а



б



в



г



д

Рис. 4. Образцы значков (а-г) и медали (д), представляющие сквозные сложные профили, вырезанные в заготовках из нержавеющей стали толщиной 1–3 мм



а



б



в

Рис. 5. Образцы значков (а, б) и серьги (в), изготовленные электроискровым копированием

С появлением технологий изготовления прецизионных деталей электронных приборов, основанных на электроискровой вырезке электродом-проволокой и методах электроискрового последовательного копирования [4–10], методы прецизионной электроискровой обработки начали использоваться для изготовления деталей и различных сувениров, которые должны были показать как специалистам различных отраслей промышленности, так и широкой публике большие возможности электроискрового способа обработки материалов.

Например, в лезвии бритвы из закаленной стали толщиной 0,08–0,1 мм (рис. 3) вольфрамовым электродом-проволокой ВА-3 диаметром 0,03–0,04 мм вырезались пазы шириной 0,05–0,06 мм в виде различных надписей: "Прецизионная электроискровая обработка", "ГК СМ СССР по электронной технике", "Коммунизм – это есть Советская власть плюс электрификация всей страны" с автографом "В. Ульянов (Ленин)". Для завода проволоки перед вырезанием надписи в лезвии предварительно электроискровым способом прошивалось отверстие диаметром 0,05–0,1 мм. В правом углу лезвия (рис.3) методом электроискрового копирования специальным электродом-инструментом сделана сложнопрофильная сквозная полость, изображающая товарный знак оборудования, которое выпускалось в 60-х годах ОКБМ НИИ ГК СМ СССР по электронной технике (позже НПК – СТМ-6 ГНПП "Исток"). Совершенно ясно, что осуществить такие надписи или фигуры на лезвии бритвы традиционными способами невозможно.

Особой популярностью в 60–70-х годах пользовались различные сувениры, изготовленные электроискровой вырезкой или копированием. Такие сувениры выпускались, как правило, к различным юбилейным датам или мероприятиям. На рис. 4 представлены образцы значков и медали, изготовленные электроискровым способом. В пластинах полированной нержавеющей стали электродом-проволокой диаметром 0,04 мм насквозь вырезаны портреты В.И. Ленина, Ф.Э. Дзержинского, Ю.А. Гагарина и Сергея Есенина, а в колодках методом электроискрового копирования сделаны отпечатки цифр, букв и лавровых веточек. Электрод-инструмент для операции электроискрового копирования представлял медную пластину толщиной 1–3 мм с вырезанными электродом-проволокой диаметром 0,04–0,08 мм сквозными полостями в виде соответствующего рисунка – веточек, цифр и букв.

На медали (рис. 4,д) под портретом В.И. Ленина воспроизведен его автограф "В.Ульянов (Ленин)" с углублением в металл примерно на 0,1 мм и шириной элементов букв около 0,06 мм. Для этого вначале изготавливался первичный электрод-инструмент, представляющий собой прямоугольную медную пластину толщиной 1 мм, в которой электродом-проволокой диаметром 0,04 мм насквозь вырезалась соответствующая надпись. Перемещение проволочного электрода-инструмента при этом осуществлялось копированием увеличенного в 50 раз «чертежа» с соответствующим масштабированием. Ширина сложнопрофильной сквозной прорези составляла 0,06 мм. С помощью электрода методом электроискрового копирования изготавливался вторичный электрод-инструмент, на торце которого создавалась выступающая на 1–1,5 мм сложнопрофильная надпись шириной линий 0,04 мм, которая затем электроискровым способом отпечатывалась на медали.

Следует отметить, что поверхность, получаемая электроискровой обработкой, представляет совокупность перекрывающихся друг друга лунок, каждая из которых образована в результате прохождения между электродами одного электрического разряда. Поэтому поверхность, полученная в результате электроискровой обработки, не имеет зеркального блеска и является матовой. Причем параметры лунок, а следовательно, и декоративные свойства поверхности можно изменять регулировкой режимов обработки. Это свойство поверхности первоначально использовалось при изготовлении различных сувениров, а в дальнейшем – при изготовлении формообразующих поверхностей пресс-форм и чеканочных штампов. На рис. 5 представлены образцы значков и серьги, изготовленные электроискровым копированием. В пластинах полированной нержавеющей стали или других сплавов изготавливались сложнопрофильные полости глубиной 0,1–0,2 мм. Поверхность таких полостей является матовой и, следовательно, контрастной по отношению к полированной поверхности. Для увеличения контрастности изображения на полированную поверхность, до электроискрового нанесения рисунка, иногда наносили различные тонкие цветные покрытия. Например, использовали воронение поверхности, золочение, наносили нитрид титана. В этом случае полученная электроискровой обработкой полость становилась матовой, цвета материала заготовки, а остальная поверхность оставалась зеркальной, цвета нанесенного покрытия. Электрод-инструмент для копирования производился по технологии, аналогичной изготовлению электрода-инструмента для получения надписи на медали, представленной на рис. 4,д и описанной выше.

На рис. 6 показаны образцы сувениров с отпечатками на полированной поверхности кусочков литого магнитного сплава ЮНДК, который, как известно, отличается высокой хрупкостью и не поддается механической обработке. Передние поверхности и основания кристаллов, расположенные под углом 70–80° друг к другу, получены электроискровой вырезкой электродом-проволокой с последующей полировкой передних поверхностей. Глубина отпечатков составляет 0,1–0,15 мм. Отпечатки автографов, расположенные под портретами, имеют ширину линий не более 0,06 мм.

На рис. 7 представлены куски яшмы, на полированной поверхности которых сделаны аппликации элементов, вырезанных электродом-проволокой. Элементы выполнены из хромистой меди и полированной нержавеющей стали толщиной 0,5–1,0 мм.

Интересно отметить, что профиль В.И. Ленина на всех представленных рисунках идентичен, так как выполнялся по одному чертежу. Аппликация портрета В.И. Ленина на рис. 7 по сравнению с портретом на медали является негативным изображением его электрода-инструмента. Следовательно, отход электрода-инструмента может быть использован для аппликации на яшме или другом материале.

Помимо описанных сувениров с применением электроискрового метода обработки изготавливались различные украшения, например кулоны. Отличительная особенность изделий, полученных электроискровой вырезкой, от аналогичных изделий, полученных штамповкой или литьем, состоит в том, что в первом случае они имеют острые кромки по всему периметру вырезанной фигуры, что придает изделиям своеобразный, более “строгий”, вид. Образцы кулонов, изготовленных электроискровой вырезкой в заготовке толщиной 1 мм, представлены на рис. 8, других изделий, изготовленных электроискровым способом, – на рис. 9 и 10.

Несмотря на возможности, которые открывал электроискровой способ обработки, его применение в производстве ювелирных изделий ограничено. Технологии их производства по ряду причин за последние десятилетия не претерпели каких-либо существенных изменений. Изготовление ювелирных изделий традиционно является одной из самых консервативных областей производства.

Кроме этого, многие нетрадиционные технологии, разработанные для нужд оборонной, электронной и других областей промышленности, открывающие большие возможности для производства ювелирных изделий, не могут найти применения из-за незнания разработчиками потребностей ювелирного производства. В то же время ювелирным предприятиям, как правило, неизвестны многие современные достижения в области технологии обработки материалов и возможности инструментального производства.

Сдерживает применение электроискровой обработки высокая стоимость материалов ювелирных изделий. Высокая стоимость сырья и необходимость сбора всего удаляемого с заготовки материала для последующей его переработки заставляют ювелиров использовать методы обработки либо исключаящие съем материала (выдавливание, гибку, литье), либо позволяющие легко и без потерь собирать удаляемый материал (вырубка на разделительных штампах, обработка резанием). Новые технологии, основанные на электрофизических и электрохимических методах обработки материалов, как правило, затрудняющие утилизацию снимаемого материала, применяются главным образом для производства бижутерии, сочетающей использование дешевых материалов, современный дизайн и большой тираж выпускаемых изделий.

Если непосредственно для изготовления ювелирных изделий электроискровая обработка применяется недостаточно широко, то при производстве инструментов для изготовления ювелирных и художественных изделий этот способ стал, безусловно, незаменимым, а в ряде случаев и единственно возможным. Использование электроискровой обработки позволило принципиально изменить технологию изготовления многих видов инструментов – разделительных (вырубных) и чеканочных штампов, именных, клейм, накатных валков и т.д.

На рис. 11,а в качестве примера представлены матрицы чеканочных штампов для производства кулонов, а на рис. 11,б – электроды-инструменты для изготовления рабочих поверхностей этих чеканочных штампов. Электроды-инструменты изготовлены в МГТУ им. Н.Э.Баумана по технологии, основанной на применении электрофизических методов обработки материалов и полностью исключаящей традиционное гравирование, как, впрочем, и другие виды механической обработки материалов.

Широкое применение электроискрового способа в производстве ювелирных и художественных изделий стало возможным благодаря появлению систем числового программного управления (ЧПУ). Современные системы ЧПУ позволяют резко сократить трудоемкость изготовления инструментов вследствие автоматизации процесса обработки, а также снижения или полного исключения

слесарной подгонки, получать рабочие фигуры и поверхности высокой сложности, не осуществимые при слесарном исполнении. Кроме этого, они обладают многими специальными функциями, расширяющими возможности изготовления инструментальной оснастки, например масштабирование выре-



Рис. 6. Сувениры с отпечатками, выполненными комбинированным электроискровым способом на полированных поверхностях кусочков литого магнитного сплава ЮНДК



Рис. 7. Аппликации на полированных поверхностях яшмы элементов, вырезанных из хромистой меди (а) и полированной нержавеющей стали (б) толщиной 0,5–1,0 мм



Рис.8. Образцы кулонов, изготовленных электроискровой вырезкой в заготовке толщиной 1 мм

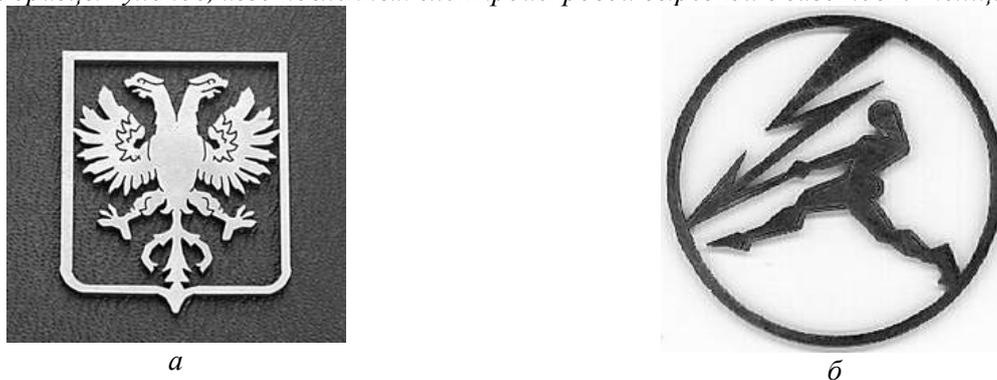


Рис. 9. Сложные профили, вырезанные электродом-проволокой в нержавеющей стали толщиной 1,0 мм



а



б

Рис. 10. Значки, выпущенные к международному симпозиуму, посвященному 50-летию электроискровой обработки материалов EDM-50 (а) и 50-летию СССР (б)



а



б

Рис. 11. Матрицы чеканочных штампов (а) и электроды-инструменты для их изготовления (б)



Рис. 12. Электрод-инструмент для изготовления формообразующих поверхностей чеканочного штампа, предназначенного для производства серег

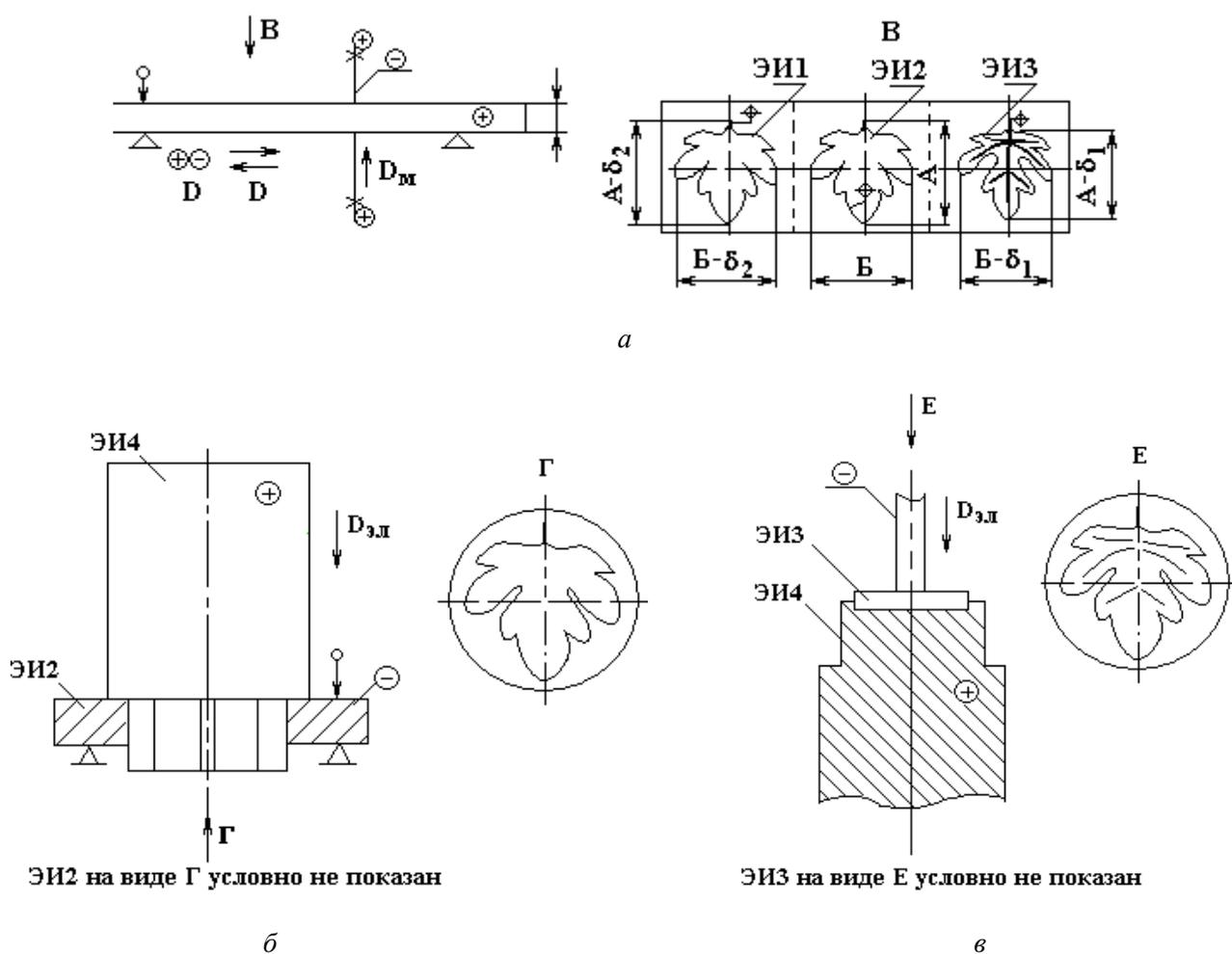
заемой рабочей фигуры, обкатка инструментом заготовки, зеркальное отображение вырезаемого контура, конусная вырезка и т.д.

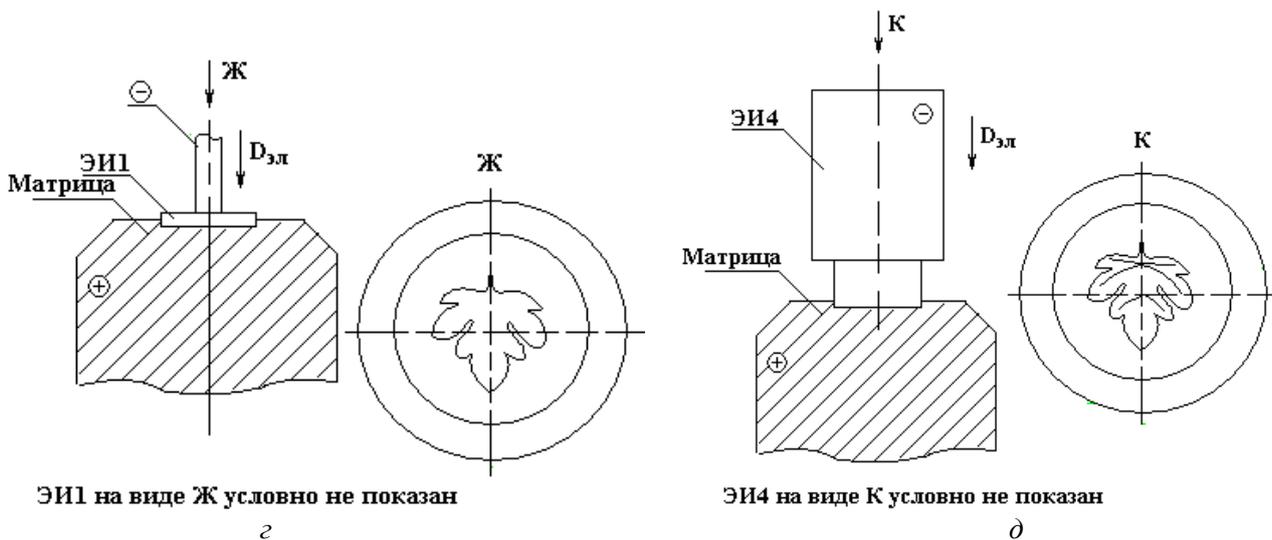
На рис.12 представлен электрод-инструмент, предназначенный для электроискрового изготовления формообразующих поверхностей чеканочного штампа производящего декоративные элементы серег. Электрод-инструмент изготовлен из меди марки М1 электроискровым способом.

В чеканочном штампе, как известно, самым сложным элементом, с точки зрения изготовления, является матрица. Наибольшую сложность при ее изготовлении представляет рабочая фигура, у которой малые размеры, сложная трехмерная геометрия и высокое качество поверхности. Одним из наиболее эффективных среди существующих методов изготовления рабочих фигур является электроискровая обработка.

Ниже приводятся технологии изготовления представленного на рис.12 электрода-инструмента и соответствующей рабочей поверхности матрицы чеканочного штампа для производства серег. Для создания рабочей фигуры в матрице изготовлено четыре вспомогательных электрода-инструмента (ЭИ).

Первоначально на электроискровом вырезном станке модели А.207.92М изготовлены три вспомогательных электрода-инструмента ЭИ1, ЭИ2 и ЭИ3 (рис. 13,а). Вырезка электродов-инструментов осуществлялась из медной пластины марки М1 толщиной 2 мм медной проволокой диаметром 0,15 мм, габариты рабочей фигуры штампа А×Б (11×10 мм). ЭИ1 представляет вырезанную из медной пластины рабочую фигуру, эквидистантно уменьшенную на величину межэлектродного промежутка  $d_2$ , образуемого при дальнейшей электроискровой прошивке рассматриваемым электродом. ЭИ2 представляет сквозную полость с размерами А×Б, вырезанную в медной пластине; ЭИ3 – вырезанную из той же пластины рабочую фигуру, но эквидистантно уменьшенную на толщину наружного канта  $d_1$  рабочей фигуры (виноградного листа) с прорезанными пазами (будущими прожилками листа).





ЭИ1 на виде Ж условно не показан

ЭИ4 на виде К условно не показан

Рис. 13. Технологическая схема изготовления матрицы чеканочного штампа

Далее методом электроискрового копирования с помощью ЭИ2 из медного прутка изготовлен внешний контур вспомогательного электрода-инструмента ЭИ4 (рис. 13,б). Следует отметить, что все копировально-прошивочные операции выполнены на вырезном электроискровом станке модели А.207.61, где вместо электрода-проволоки в специальном приспособлении устанавливались необходимые электроды-инструменты, причем устанавливались горизонтально. Однако эти операции могут быть выполнены и на прецизионных копировально-прошивочных станках.

Следующая операция электроискрового копирования на заготовке электрода-инструмента ЭИ4 – с помощью вырезанного ранее ЭИ3 изготовлен рельеф рабочей фигуры (рис.13,в). В результате получен вспомогательный электрод-инструмент ЭИ4, представленный на рис.12.

Далее в предварительно термообработанной заготовке матрицы из стали Х12М методом электроискрового копирования при помощи ЭИ1 выполнена рабочая полость (рис.13,г). При обработке использовались полустатические режимы, при которых на формируемой поверхности видны составляющие ее лунки. Это делалось для того, чтобы впоследствии при штамповке изделий получать этой частью рабочей фигуры явно выраженную матовую поверхность, похожую на «шагреньевую кожу».

На последней операции методом электроискрового копирования при помощи ЭИ4 в матрице на сформированной предыдущей операцией поверхности получены внутренний рисунок (прожилки листа) и внешний кант рабочей поверхности (рис.13,д). При этом обработка велась на режимах, обеспечивающих минимально возможные значения параметров шероховатости поверхности. Применение названных режимов позволило полностью исключить окончательную доводку и полировку рабочей поверхности матрицы.

Описанная технология требует применения четырех вспомогательных электродов-инструментов. Так как габариты рабочих фигур в ювелирном производстве небольшие, то время на изготовление вспомогательных инструментов невелико, а применение современных систем ЧПУ и методов подготовки управляющих программ позволяет резко сократить трудоемкость перечисленных операций. Наибольшую сложность в описанной технологии вызывает взаимное позиционирование электродов-инструментов при копировально-прошивочных операциях. Для решения этой задачи и соблюдения высокой точности позиционирования применяли два микроскопа МИР-2, установленных в разных точках.

Говоря о технологии, нельзя не сказать несколько слов об оборудовании, на котором она реализуется. Прежде всего следует отметить электроискровые прецизионные станки российского производства, так как именно в СССР этот метод был открыт, всесторонне исследован и созданы первые в мире электроискровые станки [10]. При этом вырезное электроискровое оборудование создавалось в первую очередь для удовлетворения потребностей электронной промышленности при изготовлении мелких, ажурных деталей и лишь затем для других производств. Поэтому оборудование, производимое на предприятиях электронной промышленности, отличается достаточно высокой точностью, компактностью, работает с обычной водопроводной водой в качестве рабочей жидкости и хорошо удовлетворяет требования ювелирного производства. При этом цена на такие станки в настоящее время в несколько раз ниже цен на станки японского или швейцарского производства. Можно рекомендовать для использования вырезные станки моделей А.207.92М и А.207.94, выпускаемые ГНПП

«ИСТОК». К сожалению, в электронной промышленности выпускается в основном вырезное оборудование, поэтому отечественные универсальные копировально-прошивочные станки, производимые другими предприятиями, могут использоваться для ювелирного производства в меньшей степени. Однако оснащение названного вырезного оборудования дополнительными приспособлениями для закрепления и базирования электродов позволяет успешно использовать их для осуществления копировально-прошивочных операций.

Сегодня совершенно очевидно, что применение электроискровой обработки материалов и современное оборудование для реализации этого способа позволяют поднять производство ювелирных и художественных изделий, а также инструмента для их производства на качественно новый уровень.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р. Электроэрозионный способ обработки металлов. Докт. дис. НИИ МЭП. М., 1947.
2. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка металлов. М., 1950.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. АН СССР, М., 1958.
4. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Труды НИИ МРТП СССР. 1957. № 11(47). С. 67–88.
5. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Практика применения электроискровой обработки металлов. Сб. № 2. МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1959. С. 35–52.
6. Ставицкий Б.И., Холоднов Е.В., Гуларян К.К. Электроискровая прецизионная обработка токопроводящих материалов. ЦИТЭИН. М-60-127/4. М., 1960.
7. Ставицкий Б.И. Электроискровое формообразование наружных и внутренних поверхностей непрофилированным электродом // Технология машиностроения. ЦИНТИМАШ. 1960. № 3. С. 42–47.
8. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление деталей непрофилированным обрабатывающим электродом // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. 1960. № 3–4.
9. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Электроискровая обработка металлов. 1960. Вып. 2. АН СССР. С. 67–113. (Труды ЦНИЛ-ЭЛЕКТРОМ АН СССР).
10. Ставицкий Б.И. Основные этапы, современное состояние и перспективы развития электроискровой обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1994. № 1. С. 7–11.

*Поступила 22.12.04*

## Summary

The article is devoted to the application of a method of an electric spark machining of materials for manufacturing of jewelry and art articles. The technological methods for manufacturing different souvenirs and articles of applied art from the moment of an electric spark machining appearance and till now are described. The illustrations of articles manufactured by the described method are presented. An expediency of using an electric spark machining for manufacturing jewelry and art articles, especially for manufacturing of jewelry tools is underlined in the article. The technology for making of working surfaces of embossing stamps for manufacturing parts of ear-rings or pendants and technology for making appropriate electrode-instruments are described as an example. The possibility to use of serially producible universal electrospark equipment for jewelry manufacturing and the recommendations for use of electrospark machines manufactured in Russia is considered.