

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ СПЛАВОВ ЗОЛОТА ИМПУЛЬСНЫМИ ТОКАМИ

*Костромской государственной технологической университет,
ул. Дзержинского, 17, г. Кострома, 156005, Россия, ikalinnikov@yandex.ru*

Введение. В условиях ужесточающейся конкуренции к качеству ювелирных изделий из различных сплавов золота предъявляются повышенные требования. Один из критериев качества – высокая отражательная способность их поверхности. Также тенденцией современного ювелирного производства является переход на мелкосерийное, а то и на единичное изготовление изделий при всё усложняющемся их дизайне. Часто модные вещи характеризуются сложнопрофилированной и фактурированной поверхностью, поднутрениями, мелким рисунком, сочленёнными движущимися элементами, тонкими, выступающими деталями.

Финишная обработка таких сложных «дизайнерских изысков» вызывает определённые трудности у технологов. Наиболее распространённые на сегодняшний день технологические процессы финишной обработки либо невозможны для таких изделий (турбогалтование), либо не всегда обеспечивают необходимое качество поверхности – блеск и низкую микрошероховатость на всех участках поверхности (виброгалтование), либо являются дорогостоящими и требуют высокой квалификации рабочих (ручное полирование). В этих условиях востребованными становятся старые, не нашедшие по каким-либо причинам широкого распространения технологические приемы и процессы. Один из них – электрохимическое полирование (ЭХП), которое было впервые использовано еще в начале прошлого века [1].

ЭХП постоянными токами широко не внедрялось в ювелирное производство по причине того, что высокое качество поверхности обеспечивается только в дорогостоящих и экологически вредных цианистых электролитах. ЭХП в бесцианистых электролитах более перспективно из-за ужесточившихся требований к экологической безопасности. Совершенствование этого процесса вызвало необходимость использования вместо постоянного импульса тока как униполярных [2], так и биполярных [3]. Промышленное применение столь сложного технологического процесса неизбежно имеет особенности, исследованию которых и посвящена настоящая статья.

Некоторые особенности процесса ЭХП импульсами тока. Согласно теории высокое качество ЭХП достигается, когда скорости анодного растворения и пассивации поверхности соизмеримы и достаточно высоки [4]. При этом обеспечивается ускоренное растворение активированных микровыступов обрабатываемой поверхности по сравнению с пассивированными микровпадинами, что приводит к сглаживанию микрорельефа. Исследования показали, что максимальные величины поляризации, связанные с анодным растворением и пассивацией, достигаются не сразу. Они развиваются с различной динамикой в микро- и миллисекундном диапазоне времен [5]. Поэтому, варьируя амплитудой и длительностью импульсов тока в этом временном диапазоне, можно сформировать анодный потенциал, обеспечивающий оптимальное соотношение скоростей растворения и пассивационных процессов.

Выбором же длительности паузы между импульсами с учетом динамики спада поляризации и особенностей явлений на границе раздела «анод-электролит», сопровождающих этот спад, поддерживаются требуемое состояние поверхности анода и границы раздела. Для каждой пары «анодный материал – электролит определенного состава» скорости развития процессов разные, отличаются и оптимальные величины потенциалов для ЭХП, соответственно отличаются и амплитудно-временные параметры импульсов тока (АВПИТ) (амплитудная плотность, длительности импульса и паузы между импульсами), обеспечивающие наивысшую скорость сглаживания микрорельефа поверхности [6].

На обобщенной анодной поляризационной кривой (рис. 1), в определенной степени характеризующей процессы, происходящие на границе раздела «анод-электролит», выделяются два участка (*CD* и *EF*), на которых возможно ЭХП. Они соответствуют переходу поверхности из активного сос-

тояния в пассивное и пассивного состояния в транспассивное соответственно. На этих участках и наблюдается примерное равенство между скоростями пассивирования и растворения поверхности. Подбором состава и температуры электролита, гидродинамических условий в приэлектродной области и АВПИТ можно обеспечить поддержание величины анодного потенциала в необходимой области CD или EF .

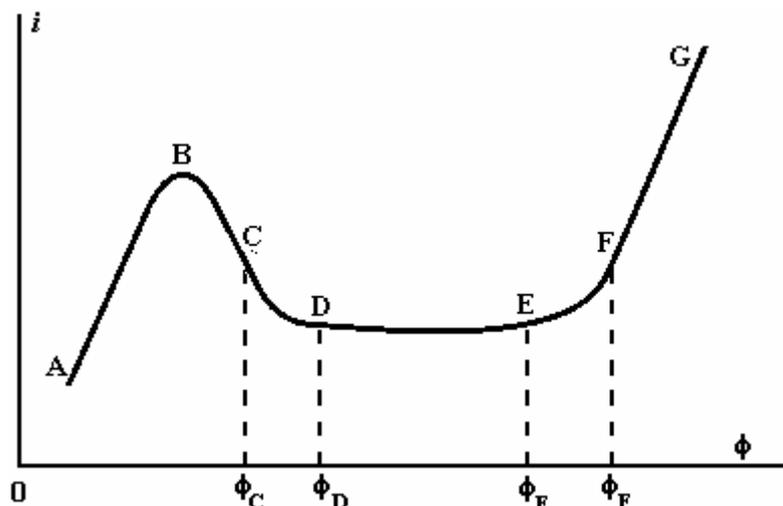


Рис. 1. Обобщенная анодная поляризационная кривая:
 i – плотность тока, ϕ – анодный потенциал

Применение импульсного тока (по сравнению с постоянным) позволяет:

- расширить области CD и EF и обеспечить большую технологичность за счет поддержания полирования поверхности в более широких диапазонах изменения условий процесса;
- осуществлять полирование в электролитах простых составов без добавок, что удешевляет и упрощает процесс;
- проводить ЭХП с большей эффективностью, при которой скорость сглаживания микронеровностей обрабатываемой поверхности значительно возрастает;
- проводить ЭХП в относительно холодных электролитах ($20\text{--}40^\circ\text{C}$), что снижает экологическую нагрузку на окружающую среду, необходимые затраты электроэнергии и улучшает условия труда.

Методика эксперимента. Используемый электролит – водный раствор тиокарбамида 9% и серной кислоты 7%. Катоды – пластины из титана ВТ-3. Обработанная поверхность исследовалась на микроскопах МИИ-4 и МЕТАМ-32ЛВ, измерялись высота микронеровностей R_z и отражательная способность [6–8]. Образцы взвешивались на аналитических весах с точностью $\pm 0,0001$ г до и после обработки. Эффективность обработки $\lambda_{\text{ЭФ}}$ [мкм/г] определялась как отношение высоты растворившихся микровыступов к массе растворившегося слоя металла Δm :

$$\lambda_{\text{ЭФ}} = \frac{R_{\text{ZH}} - R_{\text{ЗК}}}{\Delta m}.$$

Величина $\lambda_{\text{ЭФ}}$ позволяет сравнивать между собой различные процессы обработки: чем быстрее уменьшается высота микронеровностей поверхности при меньшем съеме металла, тем эффективнее процесс. Определялась эффективность полирования и с учетом изменения отражательной способности $\Delta\text{ОС}$:

$$\lambda_{\text{ЭФОС}} = \frac{\Delta R_z}{\Delta m} \times \Delta\text{ОС}.$$

На **первом этапе** исследовалась эффективность процесса финишной ЭХП униполярными импульсами тока при различных условиях обработки. Длительности импульсов тока варьировались в пределах $(0,1\text{--}5) \times 10^{-3}$ с при скважности от 1 до 8. Плотность тока изменялась от 0,25 до 5 А/см². Образцы – литые пластины из сплава ЗлСрМ 58,5-8 размером $5 \times 10 \times 0,2$ мм, прошедшие различную механическую обработку, и готовые ювелирные изделия. Исследования проводились при комнатной температуре (20°C) и в подогретых электролитах (60°C), при перемешивании и без него.

На **втором этапе** определялась эффективность ЭХП в зависимости от шероховатости исходной поверхности. Образцы – параллелепипед с плоскими гранями и тремя кастами сложной формы на одной из граней (рис. 2). Поверхность образцов подвергалась различной предварительной обработке:

1) механическим способом ручным инструментом; исходная микрошероховатость поверхности $R_{Zucx} = 0,84 \times 10^{-6}$ м;

2) механическим способом с помощью связного абразива (наждачной бумаги № 320); $R_{Zucx} = 0,59 \times 10^{-6}$ м;

3) поверхность после литья никакой предварительной обработке не подвергалась; $R_{Zucx} = 0,3 \times 10^{-6}$ м.

Поверхность образцов полировалась при следующих АВПИТ:

– униполярные – длительность 3×10^{-3} с; скважность 1,25; амплитудная плотность тока 3–5 А/дм²;

– биполярные – длительность прямого импульса 3×10^{-3} с; скважность 1,25; длительность обратного импульса $0,5 \times 10^{-3}$ с; амплитудная плотность тока в импульсах 3–5 А/дм².

ЭХП проводилось до прекращения уменьшения значения микрошероховатости поверхности. Через каждые 20 с измерялись микрошероховатость и отражательная способность (блеск) поверхности, а также масса образцов.

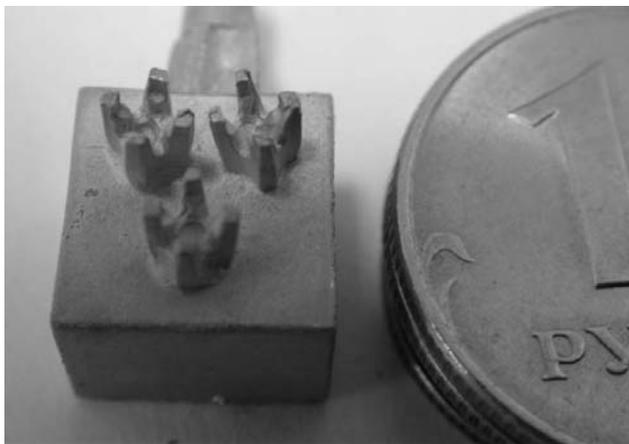


Рис. 2. Внешний вид образцов на втором экспериментальном этапе

На **третьем этапе** образцы изготавливались литьём по выплавляемым моделям, ушки к ним – штамповкой. Сплав $ZlCrM 58,5-8$, лигатура безокислительная *Legor 14K OR129C*. Форма поверхности образцов позволяет фиксировать отличия в качестве полирования участков, неравнодоступных для абразивного материала (рис. 3). Поверхность образцов обрабатывалась по различным последовательностям операций, имитирующим производственный цикл. В качестве подготовительных операций использовались:

– механическая обработка ручным инструментом (надфили, боры и т.д.) – ПР;

– механическая обработка связанным абразивом (шлифовальной бумагой № 320 – П320 и № 600 – П600);

– при высоком качестве отливок подготовительная механическая обработка исключалась – ПБО.

В качестве промежуточных и заключительных операций проводились:

– обработка на шлифовально-полировальных машинах – ЗШПМ;

– галтование на центробежно-дисковых машинах (ЦДМ) – ЗГ;

– ЭХП с использованием униполярных импульсных токов – ЗУТ;

– ЭХП с использованием биполярных импульсных токов – ЗБТ.

В качестве финишных операций применялись:

– обработка на шлифовально-полировальных машинах – ФШПМ;

– галтование на ЦДМ – ФГ;

– ЭХГ с использованием униполярных импульсных токов – ФУТ;

– ЭХГ с использованием биполярных импульсных токов – ФБТ.

Для галтования использовались центробежно-дисковые финишные станки *ОТЕС* серии CF-18 при следующей последовательности операций.

При ЗГ: 1) мокрое галтование с белыми пластиковыми чипсами KX10 и PX10 (по 50% каждый) продолжительностью 6 часов;

2) сухое галтование с гранулами ореховой скорлупы Н1/50–6 часов;

3) сухое галтование с гранулами ореховой скорлупы Н1/500–4 часа.

При ФГ: 1) сухое галтование с гранулами скорлупы ореха Н1/50–4 часа;

2) сухое галтование с гранулами скорлупы ореха Н1/500–4 часа.

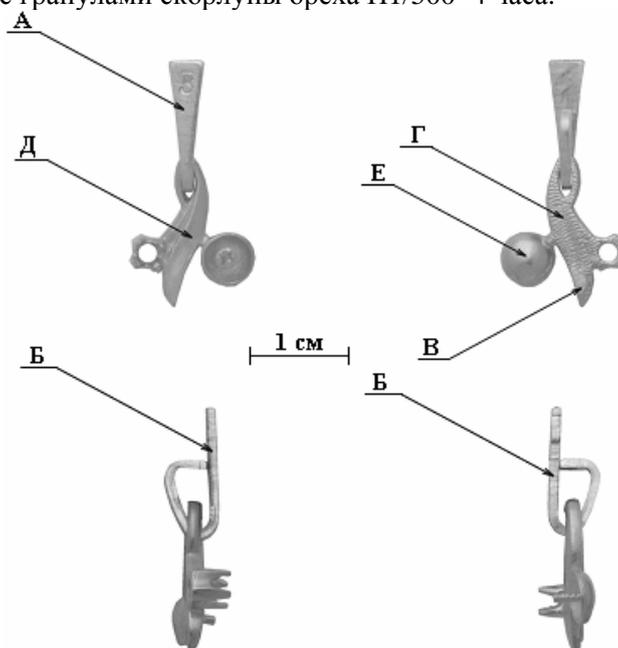


Рис. 3. Внешний вид образцов на третьем экспериментальном этапе и участки их поверхности:

A – отштампованная поверхность, *Б* – место реза штампа, *В* – место обрезки литника, *Г* – предварительно фактурированная поверхность, *Д* – основная, легко доступная поверхность (плоская поверхность листика), *Е* – поверхность чашки для закрепки жемчуга

В каждом случае одновременно обрабатывались три образца. После каждого этапа эксперимента определялись средние величины по группе. Измерения проводились на шести участках: на отштампованной поверхности (рис. 3,А), на месте реза штампа (рис. 3,Б), на месте обрезки литника (рис. 3, В), на предварительно фактурированной поверхности (рис. 3, Г), на легко доступной поверхности (плоской поверхности листика) (рис. 3,Д), на поверхности чашки для закрепки жемчуга (рис. 3,Е). Блеск визуально фиксировался на внутренней стороне кастов. При ЭХП униполярными и биполярными токами через анод пропускалось одинаковое количество электричества.

На **четвертом этапе** исследовалась электрохимическая полируемость поверхности сплавов на основе золота различного цвета – красного, белого и европейского (желтого). Марки использованных лигатур и составы сплавов приведены в табл. 1. Образцы изготавливались литьем по выплавляемым моделям (рис. 2). Температура электролита 20–35°C.

Таблица 1. Составы исследованных сплавов

Марка сплава	Цвет сплава	Состав сплава, %					
		Au	Ag	Cu	Ni	Zn	In
ЗлСрМ585	Красный	59,50	5,77	33,80	—	0,93	—
ЗлСрМ585	Желтый	58,31	31,14	10,56	—	—	—
ЗлСрНЦМ585	Белый	60,20	1,16	26,66	5,70	5,81	0,47

Результаты экспериментов и их обсуждение

Первый этап. После 40–50 с обработки снижение величины R_z прекращается: она стабилизируется на относительно постоянном уровне при продолжающемся съеме металла (рис. 4). То есть существует оптимальная продолжительность процесса финишной ЭХП, более длительную обработку вести нецелесообразно во избежание лишнего снятия драгоценного металла без улучшения качества поверхности.

На оптимальном режиме эффективно полируется поверхность как образцов, так и готовых ювелирных изделий. Причем обработка не сказывается на качестве ювелирных вставок из фианита и

камней первой группы. Качество самой заправки вставок не ухудшается, так как съём металла на операции финишной ЭХП незначителен.

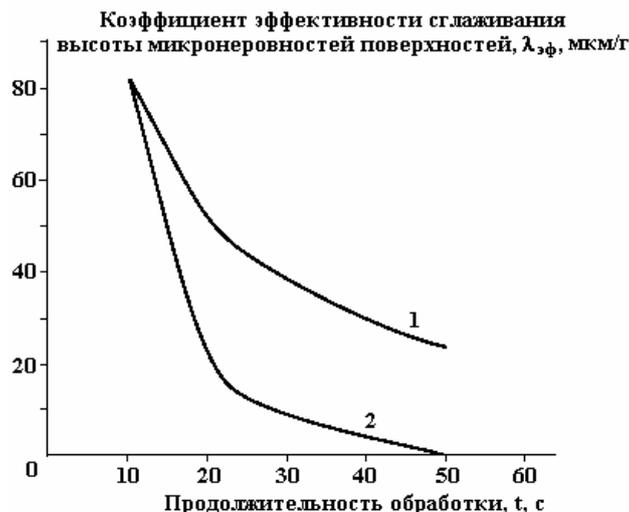


Рис. 4. Зависимость эффективности сглаживания высоты микронеровностей полируемой поверхности от продолжительности финишной ЭХП унipoлярными импульсами тока: 1 – относительно исходного значения, 2 – относительно предыдущего значения

Перемешивание электролита существенно не влияет на ЭХП. Однако при использовании подвесочных приспособлений в виде зажимов или крючков возможны «прижоги» и эрозионные лунки на поверхности образцов или изделий в зоне их контакта с подвеской. Кроме того, в результате активного газовыделения изделия могут выталкиваться на поверхность электролита. Нарушается контакт изделий с подвеской, что приводит к браку – на поверхности образуется экранирующая её белёная пленка. Во избежание этих нежелательных явлений используются подвесочные приспособления в виде корзин. Прижоги отсутствуют только при непрерывном их покачивании, поэтому необходимо осуществлять непрерывное возвратно-поступательное перемещение подвески в процессе ЭХП [9, 10].

Второй этап. Изменение относительного сглаживания поверхности и высоты её микронеровностей в графическом виде представлены на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Изменение относительного сглаживания высоты микронеровностей поверхности образцов в результате ЭХП с течением времени обработки: 1 – ЭХП биполярными импульсами без предварительной обработки; 2 – ЭХП унipoлярными импульсами без предварительной обработки; 3 – ЭХП унipoлярными импульсами при предварительной обработке наждачной бумагой; 4 – ЭХП унipoлярными импульсами при предварительной обработке надфилем

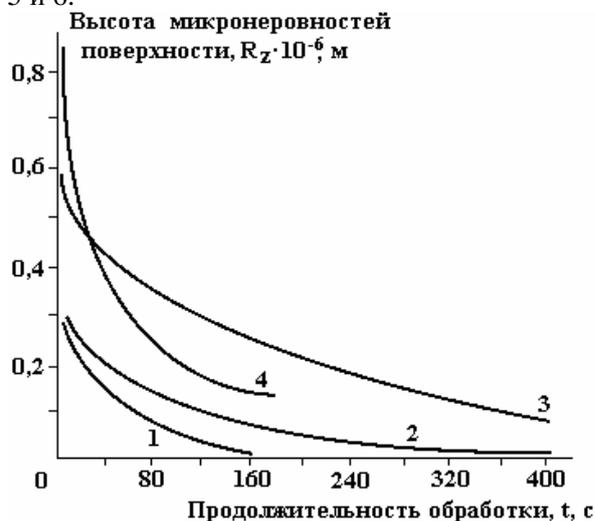


Рис. 6. Изменение высоты микронеровностей поверхности образцов в результате ЭХП с течением времени обработки: 1 – ЭХП биполярными импульсами без предварительной обработки; 2 – ЭХП унipoлярными импульсами без предварительной обработки; 3 – ЭХП унipoлярными импульсами образцов при предварительной обработке наждачной бумагой; 4 – ЭХП унipoлярными импульсами при предварительной обработке надфилем

Визуально фиксировались изменения поверхности кастов и поверхность образца между ними. Поверхность крапанов выгладилась и приобрела блеск уже через 60 с на униполярном режиме и через 40 с на биполярном режиме. Поверхность между кастами приобрела конечную микрошероховатость ($R_z = 0,01 \times 10^{-6}$ м) только через 7 мин на униполярном и через 3 мин на биполярном режимах, при этом острые грани образцов и кастов закруглились. Грубые дефекты, полученные при литье (поры, наплывы и др.), уменьшились в размере, но остались. Это говорит о сглаживании микро-, а не макронеровностей, что является характерным признаком ЭХП.

Кроме того, вокруг пор в процессе ЭХП на униполярном режиме образуются микротрещины, которые постепенно сполниваются и исчезают. Их формирование, по-видимому, связано с образованием пузырьков газа по краям пор в результате анодных процессов. Такие микротрещины не формируются при биполярном режиме обработки, что можно объяснить удалением пузырьков газа при обратном импульсе тока. Остаточные микротрещины на поверхности – отрицательный фактор, так как на их основе могут образовываться более значительные трещины в процессе дальнейшей обработки и эксплуатации.

Наиболее эффективна обработка на биполярном режиме. Она и протекает в два раза быстрее, и съем металла значительно меньше. Вторая по эффективности – обработка на униполярном режиме с ПР надфилем. Здесь значительно уменьшается высота микронеровностей, хотя конечная их величина большая – $R_z = 0,14 \times 10^{-6}$ м. Такая поверхность требует дополнительного выглаживания на ЦДМ.

Третий этап. Эксперимент показал, что на доступных для абразива участках поверхности результаты полирования различными способами соизмеримы. Принципиально другой результат получен на внутренней стороне кастов, не доступных для абразивного материала, – здесь снижение шероховатости возможно только в результате ЭХП.

Сравнение величин $\lambda_{эф}$ для различных операций показывает, что эффективность обработки уменьшается в ряду: «Галтование» – «ЭХП биполярными токами» – «ЭХП униполярными токами» – «Ручное полирование». Результат ожидаем и связан с тем, что при галтовании металл «размазывается», а не удаляется с поверхности и $\lambda_{эф}$ выше, чем на других операциях.

Самая низкая эффективность обработки для последовательности «ПБО-ЗГ-ФБТ» и «ПБО-ЗГ-ФУТ». Это связано с тем, что после галтования поверхность выглажена, микронеровности «замазаны» металлом. Продолжительное ЭХП (более 40–80 с) в этом случае малоэффективно, так как высота микронеровностей снижается относительно быстро и стабилизируется на достаточно высоком уровне за счет вскрытия «замазанных» микронеровностей, и на поверхности проявляется эффект «лимонной» корки. Блеск поверхности при этом значительно увеличивается при явно заметной невооруженным глазом неровности поверхности.

Сравним эффективность следующих последовательностей операций: «ПР-ЗБТ-ФГ», «П600-ЗБТ-ФГ», «П320-ЗБТ-ФГ». Использование первой последовательности эффективнее в связи с тем, что исходная микрошероховатость поверхности после обработки надфилем выше, нет «замазанных» металлом микровпадин, скорость выглаживания больших микровыступов при ЭХП выше, чем небольших. Эффективность третьей последовательности незначительно выше, чем второй. Это можно объяснить тем, что после обработки шлифовальной бумагой № 320 высота исходной микрошероховатости поверхности перед ЭХП выше по сравнению с обработкой бумагой № 600, и сглаживаются они быстрее.

Последовательности «ПБО-ЗБТ» и «ПБО-ЗУТ» эффективнее других последовательностей операций обработки, а «ПБО-ЗБТ» эффективнее «ПБО-ЗУТ» за счет значительно меньшего съема металла при одинаковом конечном результате по микрошероховатости поверхности.

Эффективность сглаживания микрорельефа не одинакова на участках поверхности образцов, подвергнутых различной ПО. Чем меньше затронута механической обработкой надфилем или шлифовальной бумагой после литья поверхность, тем эффективнее ЭХП. При использовании высококачественного литья предварительная механическая обработка должна быть минимальна. Последующие ЭХП или галтование высокоэффективно сглаживают микронеровности. Это касается и обработки труднодоступных участков поверхности, например внутри кастов. Их не надо подвергать механической обработке, а только ЭХП.

Финишное галтование после ЭХП в ряде случаев уменьшает высоту микронеровностей поверхности. Это связано с тем, что при ЭХП невозможно бесконечно уменьшать высоту микронеровностей от значительной исходной величины. Через определенное время обработки эта высота стабилизируется, и в дальнейшем микрошероховатость либо остается более или менее постоянной при продолжающемся удалении металла, или даже ухудшается из-за межкристаллитного растравливания поверхности в результате продолжающегося анодного растворения [6]. Специально в эксперименте

продолжительность ЭХП была больше оптимальной для определения наиболее выгодной длительности процесса. При превышении оптимальной продолжительности ЭХП качество поверхности ухудшается.

Важно отметить, что при выборе тех или иных последовательностей операций необходимо в обязательном порядке учитывать сложнопрофильность обрабатываемых поверхностей. Существует несколько классов изделий, поверхность которых не поддается галтованию, или такая их обработка существенно затруднена [11]. Например, это относится к изделиям, имеющим сложные касты или поднутрения. Визуальный контроль внутренних поверхностей кастов и чашки под закрепку жемчужины после обработки при различных последовательностях операций показал, что придание блеска этим поверхностям возможно лишь при ЭХП. Кроме того, утончение и изменение формы выступающих деталей (крапаны у кастов, штыри для закрепки жемчуга) после ЭХП минимальны.

Также с экономической точки зрения необходимо отметить отличия в регенерации отходов металла при различных операциях обработки. Безвозвратные потери металла от ушедшего в отходы после обработки на ШПМ могут составлять до 40%, после обработки на ЦДМ – до 20, после ЭХП – 1–5%. Следовательно, основное выглаживание поверхности и съем металла с этой точки зрения выгоднее производить на операции ЭХП.

Средняя отражательная способность (или блеск) обработанной поверхности уменьшается в ряду: «ЭХП биполярными токами» (4,88 о.е.) – «ЭХП униполярными токами» (4,64 о.е.) – «Галтование» (4,27 о.е.) – «Ручное полирование на ШПМ» (4,06 о.е.). Хотя при использовании последней операции можно более оперативно прополировать те участки, которые в первую очередь «бросаются в глаза» при осмотре изделия, например основную поверхность (рис. 3,Д) и поверхность чашки для закрепки жемчуга (рис. 3,Е).

Полученные результаты в основном подтверждают положение о том, что уменьшение высоты микронеровностей поверхности приводит к увеличению ее отражательной способности. Однако в предлагаемой методике определения отражательной способности [7] учитывается также и разброс микронеровностей по высоте – чем он больше, тем меньше отражательная способность.

Четвертый этап. Значения ΔR_z , $\lambda_{\text{эф}}$, $\lambda_{\text{эфос}}$ при оптимальных режимах ЭХП представлены в табл. 2.

Таблица 2. Эффективность ЭХП исследованных сплавов

№ пп	Марка сплава	Цвет сплава	Режим ЭХП	ΔR_z	$\lambda_{\text{эф}}$	$\lambda_{\text{эфос}}$
1	ЗлСрМ585	Красный	Оптимальный для данного сплава	0,201	6,484	14,33
2	ЗлСрМ585	Желтый		0,201	4,351	9,22
3	ЗлСрНЦМ585	Белый		0,192	3,582	6,05
4			Оптимальный для сплавов 1 и 2	0,190	3,558	5,76

Анализ результатов показывает следующее [12, 13].

Чем выше температура в пределах 20–35°C, тем быстрее полируется сплав. Однако при этом не достигается минимально возможная шероховатость. Оптимальной является температура 20–25°C.

Отражательная способность поверхности продолжает увеличиваться и на четвертой, а иногда и на пятой минутах обработки, хотя шероховатость поверхности ухудшается из-за частичного растравливания. Поэтому эффективность обработки после трех минут уменьшается.

При прочих равных условиях белое золото полируется медленнее красного и желтого. Минимальная шероховатость формируется на нем через 4 мин, а не через 3. Полируемость для исследованных диапазонов параметров падает в ряду **красное – желтое – белое** золото, то есть существует явно выраженная зависимость полируемости от состава сплава.

Для подтверждения данного положения были проанализированы микроструктуры сплавов.

Красный сплав золота. Структура сплава состоит из двух фаз (рис. 7,а). Первая, представленная светлыми зернами, очевидно, является твердым раствором меди и серебра в золоте. Вторая фаза, более темная, скорее всего представляет собой механическую смесь твердого раствора меди и серебра в золоте с интерметаллидом. Наиболее вероятен интерметаллид Cu_3Au .

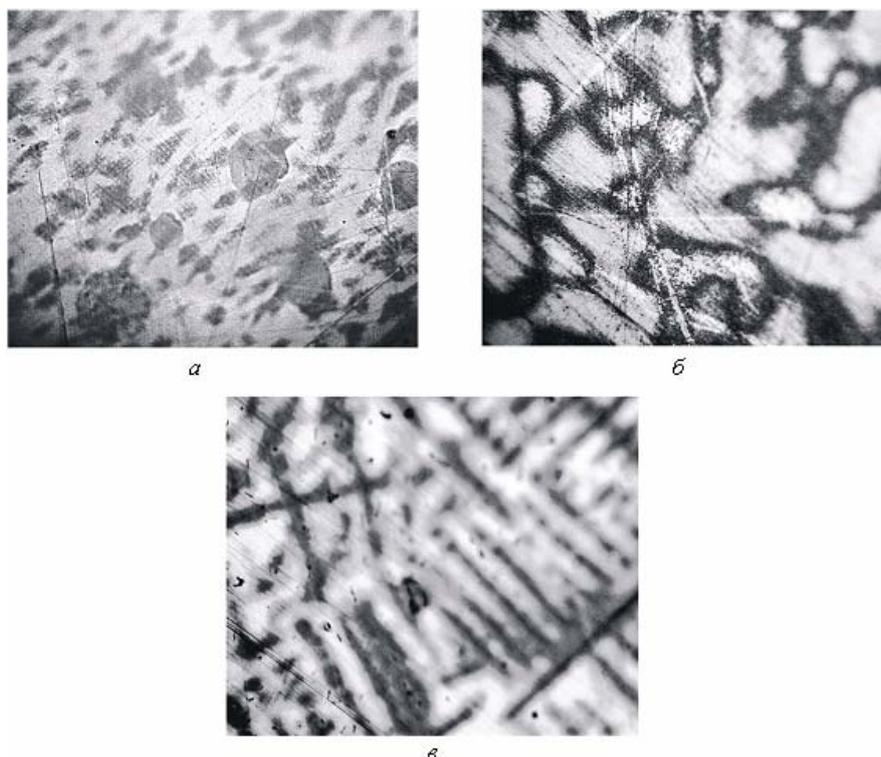


Рис. 7. Микрошлифы исследованных сплавов золота:
a – 3лCrM585 (красное), *б* – 3лCrM585 (жёлтое), *в* – 3лCrHЦM585 (белое)

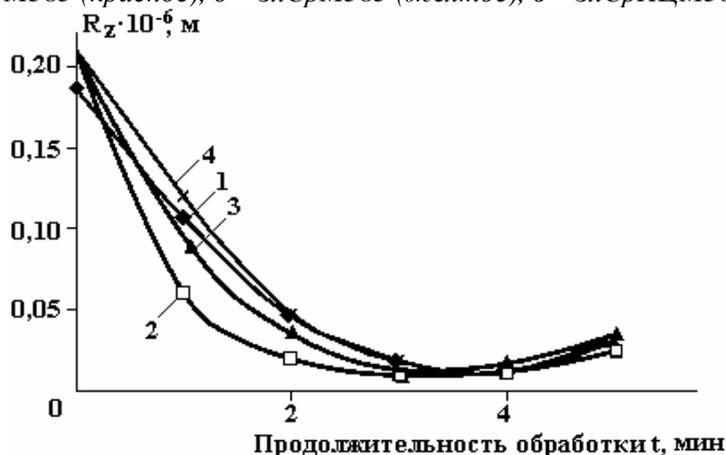


Рис. 8. Изменение шероховатости поверхности образцов из золота различного цвета при обработке на общем режиме: белый 1 – режим, оптимальный для обработки красного и жёлтого золота и не оптимальный для белого; желтый, красный, белый – режимы, оптимальные для обработки соответствующих сплавов. 1 – белое; 2 – желтое; 3 – красное; 4 – белое

Желтый сплав золота. Структура сплава также двухфазная (рис. 7,б). Первая, представленная светлыми зернами, очевидно, как и у красного сплава, является твердым раствором меди и серебра в золоте, вторая, более темная, – механической смесью твердого раствора меди и серебра в золоте с интерметаллидом CuAu или Cu_3Au . Однако размеры второй фазы больше, чем у красного золота, зерна разветвленные и протяженные.

Белый сплав золота. Структура сплава также двухфазная (рис. 7,в), и первая, светлая фаза, – твердый раствор меди и серебра в золоте. Вторая – механическая смесь интерметаллидов с твердым раствором. Здесь возможно формирование интерметаллидов Cu_3Au , CuZn и других представителей семейства Cu-Zn. Форма зерен второй фазы более вытянутая, «игольчатая», по длине в несколько раз превосходящая зерна желтого и красного сплавов.

Из анализа микроструктур можно заключить, что на полируемость влияет размер зерен. Чем зёрна развитее, длиннее, тем менее электрохимически однородна поверхность при ЭХП, тем медленнее и хуже полируется сплав.

При изготовлении ювелирных изделий часто возникает необходимость ЭХП нескольких сплавов золота одновременно в случае, если элементы изделий составляют единое целое. Кроме того, при незначительных объемах заготовок из разнообразных сплавов желательно производить их одновременное ЭХП. Для этих случаев можно осуществлять обработку на режимах, оптимальных для красного и желтого золота. Отклонения от эффективности обработки для белого золота в этом случае незначительны (рис. 8, табл. 2).

Выводы

1. Показана эффективность использования ЭХП импульсными токами для обработки сложно-профилированных поверхностей заготовок ювелирных изделий как на заключительных, так и на промежуточных этапах.

2. Существует оптимальная продолжительность процесса финишного ЭХП униполярными импульсами тока. После 40–50 с обработки снижение величины R_z прекращается: она стабилизируется на относительно постоянном уровне при продолжающемся съеме металла. Поэтому нецелесообразно вести более длительную обработку во избежание лишнего снятия драгоценного металла без улучшения качества поверхности.

3. На операции ЭХП невозможно производить одновременное электрохимическое шлифование и полирование поверхности, то есть бесконечно уменьшать ее шероховатость в процессе обработки. В результате ЭХП улучшается отражательная способность (блеск) поверхности, даже если она не полностью «выглажена», то есть удаляются микронеровности на макронеровной поверхности.

4. ЭХП можно применять в качестве финишной операции при изготовлении изделий при обеспечении следующих условий:

– после литья и предварительной механической обработки перед ЭХП микрошероховатость поверхности не должна превышать значение $R_z = 0,3 \times 10^{-6}$ м (например, после обработки наждачной бумагой № 600–1200) для обеспечения конечной микрошероховатости $R_z = 0,01 \times 10^{-6}$ м после ЭХП;

– качество литья должно обеспечивать отсутствие большого количества пор на поверхности;

– продолжительность финишного ЭХП не должно превышать 20–40 с, чтобы не ухудшилось качество поверхности из-за вскрытия участков поверхности, «замазанных» металлом на более ранних операциях.

5. ЭХП можно использовать в качестве промежуточной операции после литья по выплавляемым моделям и штамповки (при обеспечении высокого качества отливок и поверхности) с последующим приданием глянца в ротационно-дисковых машинах. При этом в результате ЭХП придаётся достаточный блеск труднодоступным местам на поверхности изделий.

6. Биполярный режим ЭХП значительно эффективнее униполярного – в два раза быстрее происходит сглаживание микронеровностей и почти в два раза меньше относительный съём металла с поверхности.

7. Отражательная способность поверхности после ЭХП при условии, что высота микронеровностей составляет $R_z = 0,01 \times 10^{-6}$ м, выше, чем у поверхности, отполированной механическим способом, за счет бóльшей равномерности оставшихся микронеровностей по высоте.

8. Сплавы на основе золота различных лигатур и цвета можно эффективно электрохимически полировать при использовании биполярных импульсов тока. Экспериментально определены оптимальные режимы ЭХП различных сплавов на основе золота в электролите одного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шпитальский Е.И.* Привилегия по заявке в г. Москве, от 19.01. 1911 г. Охранное свидетельство № 45537.
2. *Галанин С.И.* Способ импульсного электрохимического глянцеования золота и его сплавов. Патент РФ на изобретение № 2184801 от 31.07.2002 г., зарегистрирован 10.07.2002 г.
3. *Галанин С.И.* Способ электрохимического полирования сплавов на основе золота импульсным биполярным током. Патент РФ на изобретение № 2288978, зарегистрирован 10.12.2006 г.
4. *Гриликес С.Я.* Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойства металлов. Л.: Машиностроение. 1987. 232с.
5. *Galanin S.I., Kalinnikov I.V.* Polarization of jewelry gold alloys by bipolar current pulses in a polishing electrolyte // Surface Eng. Appl. Electrochem. 2008. Vol. 44. No 5. P. 359–366.

6. Галанин С.И., Сорокина М.В., Токмаков А.Ю., Субботин Д.Н. Эффективность различных процессов полирования поверхности ювелирных изделий из сплава золота 585 пробы // *Металлообработка*, 2006. № 4. С. 20–25.
7. Галанин С.И., Успенский С.В., Сорокина М.В., Ломагин В.Н., Субботин Д.Н. Способ определения блеска поверхности // *Вестник КГТУ*. 2006. № 13. С. 71–74.
8. Галанин С.И., Успенский С.В., Галанина А.С., Агафонов В.О. Способы определения оптических характеристик металлических поверхностей // *Вестник КГТУ*. 2008. № 17. С. 119–123.
9. Галанин С.И., Успенский С.В. Электрохимическое полирование поверхности сплава ЗлСрМ 585-80 импульсами биполярного тока // *Металлообработка*. 2005. № 2 (26). С. 10–13.
10. Галанин С.И., Сорокина М.В., Токмаков А.Ю. Электрохимическое полирование поверхности ювелирных изделий с использованием импульсных токов // *Материалы IV Международного симпозиума ювелиров «Традиции, инновации и перспективы современного ювелирного производства»*, июль 2005. С-Петербург. С. 186–198.
11. Галанин С.И., Сорокина М.В., Токмаков А.Ю. Дизайн ювелирных изделий с учетом технологии финишной обработки // *Ювелирное обозрение*. Апрель 2005. С. 28–30.
12. Галанин С.И., Сорокина М.В., Галанина А.С. Электрохимическое полирование ювелирных сплавов золота импульсами биполярного тока // *Физика и химия обработки материалов*. 2007. № 5. С. 67–71.
13. Галанин С.И., Сорокина М.В., Галанина А.С. Особенности электрохимического полирования сплавов золота различного цвета: *Материалы 2-й МНТК «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей»*. Кострома-Москва, 2007. С.77–79.

Поступила 30.11.08

Summary

The features of the electrochemical polishing of complex shape jewelries made of different gold alloys have been examined by means of unipolar and bipolar current impulses. The comparison with the other polishing processes has been carried.
