

Ю. В. Синькевич, д-р техн. наук, доц.

Белорусский национальный технический университет, Беларусь

Тел.: +375 (029) 6316568; E-mail: nashi_roditeli@list.ru

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ МЕХАНИЗМА СГЛАЖИВАНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ И ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований механизма сглаживания неровностей профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования. Установлено, что в процессе обработки происходит равновероятное сглаживание систематических и случайных неровностей. Сформированная топография характеризуется сглаженными систематическими неровностями с большим периодом. Показано, что в структуре случайных неровностей профиля доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой полированной поверхности, проявившейся вследствие селективного анодного растворения компонентов обрабатываемого сплава.

Ключевые слова: полирование, электролит, профиль поверхности, параметры шероховатости.

I. V. Sinkevitch

THE COMPLEX APPROACH TO STUDYING THE MECHANISM OF SMOOTHING OF ROUGHNESSES OF THE STRUCTURE OF THE SURFACE AND FORMATIONS OF TOPOGRAPHY AT ELECTROPULSE POLISHING

The article presents the results of experimental studies of the mechanism of smoothing of roughnesses of the surface profile in conditions of electropulse polishing. It is established, that during processing there is equally probable smoothing regular and accidental roughnesses. The generated topography is characterized by the smoothed regular roughnesses with a large period. It is shown, that in structure of accidental roughnesses of a structure the leading position is borrowed with the roughnesses caused by a microstructure of the polished surface, shown owing to selective anode dissolution of components of a processable alloy.

Keywords: polishing, electrolyte, a structure of a surface, parameters of a roughness.

1. Введение

В последнее время вопросам, связанным с исследованием процесса электроимпульсного полирования (ЭИП) металлов и сплавов и его внедрением в производство, уделяется большое внимание в Беларуси, Болгарии, Германии, Китае, Нидерландах, России, Словакии, США, Украине и других странах. Однако, несмотря на значительный объем исследований технологических и физико-химических аспектов процесса, проведенных учеными разных школ, и большое количество патентов и научных публикаций, широкое внедрение ЭИП в промышленных масштабах сдерживается из-за отсутствия научно обоснованной теории процесса. Одним из основных элементов теории является механизм сглаживания неровностей профиля поверхности и формирования топографии, учитывающий тесно связанные между собой технологические, физико-химические и геометрические закономерности процесса. Существует несколько гипотез о механизме сглаживания неровностей профиля [1–4], которые базируются на опыте электроэрозионной обработки и электрохимического полирования и сводятся к тому, что по сравнению с впадинами профиля обрабатываемой поверхности напряженность электрического поля на вершинах выступов должна быть значительно выше. По этой причине, по мнению авторов гипотез, электрические разряды возникают преимущественно на вершинах выступов. Сглаживание неровностей профиля и формирование поверхности происходит в результате избирательного электроэрозионного и электрохи-

мического сглаживания выступов профиля. Однако, предложенные гипотезы, в том числе в отношении типов и механизмов электрических разрядов в парогазовой оболочке и ионного распыления оксидных слоев, не имеют экспериментального и теоретического обоснования. Они ошибочно базируются на том факте, что на профилограмме реальной поверхности выступы имеют островершинный вид. На самом деле этот эффект связан с различием значений вертикального и горизонтального увеличения профилограммы[5].

Согласно данным, приведенным в работах [1–3, 6, 7], основными факторами, влияющими на эффективность сглаживания шероховатости поверхности при ЭИП, являются химический и фазовый состав обрабатываемого сплава, химический состав, концентрация и температура раствора электролита, продолжительность обработки и уровень шероховатости исходной поверхности. Перечисленные факторы находятся в сложной зависимости между собой, так как изменение того или иного фактора может как положительно, так и отрицательно влиять на эффективность сглаживания шероховатости.

Целью данной работы является изучение механизма и установление основных закономерностей сглаживания неровностей профиля поверхности и формирования топографии в условиях ЭИП.

2. Объекты и методы исследований

Объектами для исследований выбраны качественные углеродистые конструкционные стали 10 и 20 (ГОСТ 1050-88) в виде плоских образцов с размерами 40×20×3 мм. Исходная шероховатость поверхности образцов обеспечивалась шлифованием на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224 до уровня Ra 1,3...0,63 мкм. ЭИП проводилось в 2%-ом водном растворе хлорида аммония при рабочем напряжении 300±5 В. В ходе эксперимента температура электролита изменялась дискретно в диапазоне от 65 до 85 °С и поддерживалась с точностью ±1 °С. Продолжительность обработки выдерживалась с точностью ±1 с. Изучение механизма сглаживания неровностей профиля поверхности проводилось путем анализа характера изменения комплекса параметров шероховатости Ra ; Rq ; Rz ; Rp ; $Rmax$; Sm ; Δq и λq (ГОСТ 25142-82), исследования морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности и вероятностно-статистическим методом с помощью корреляционного преобразования профилограмм. Измерение параметров шероховатости и запись профилограмм производились на профилометре-профилографе Talysurf-5 (Rank Taylor Hobson, Англия), исследование морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности – на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой энергодисперсионного химического микроанализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония). Математическая обработка профилограмм проводилась по методике, приведенной в [8].

3. Основное содержание и результаты работы

Анализ полученных данных о динамике параметров шероховатости поверхности Ra , Rz и $Rmax$ при ЭИП стали 10 показал, что при одинаковом уровне шероховатости исходной поверхности, но при разных значениях температуры электролита характер изменения этих параметров подобен (рис. 1а–в). Представленные данные свидетельствуют о том, что повышение температуры электролита от 65 до 85 °С, несмотря на существенное при этом снижение величины съема металла [9], не оказывает заметного влияния на эффективность сглаживания неровностей профиля поверхности. Выявленные закономерности следует учитывать при полировании высокоточных деталей, по-

скольку обработка при высокой температуре электролита (свыше 80 °С) позволяет обеспечить заданную шероховатость поверхности при значительно меньшем съеме металла, что повышает точность обработки.

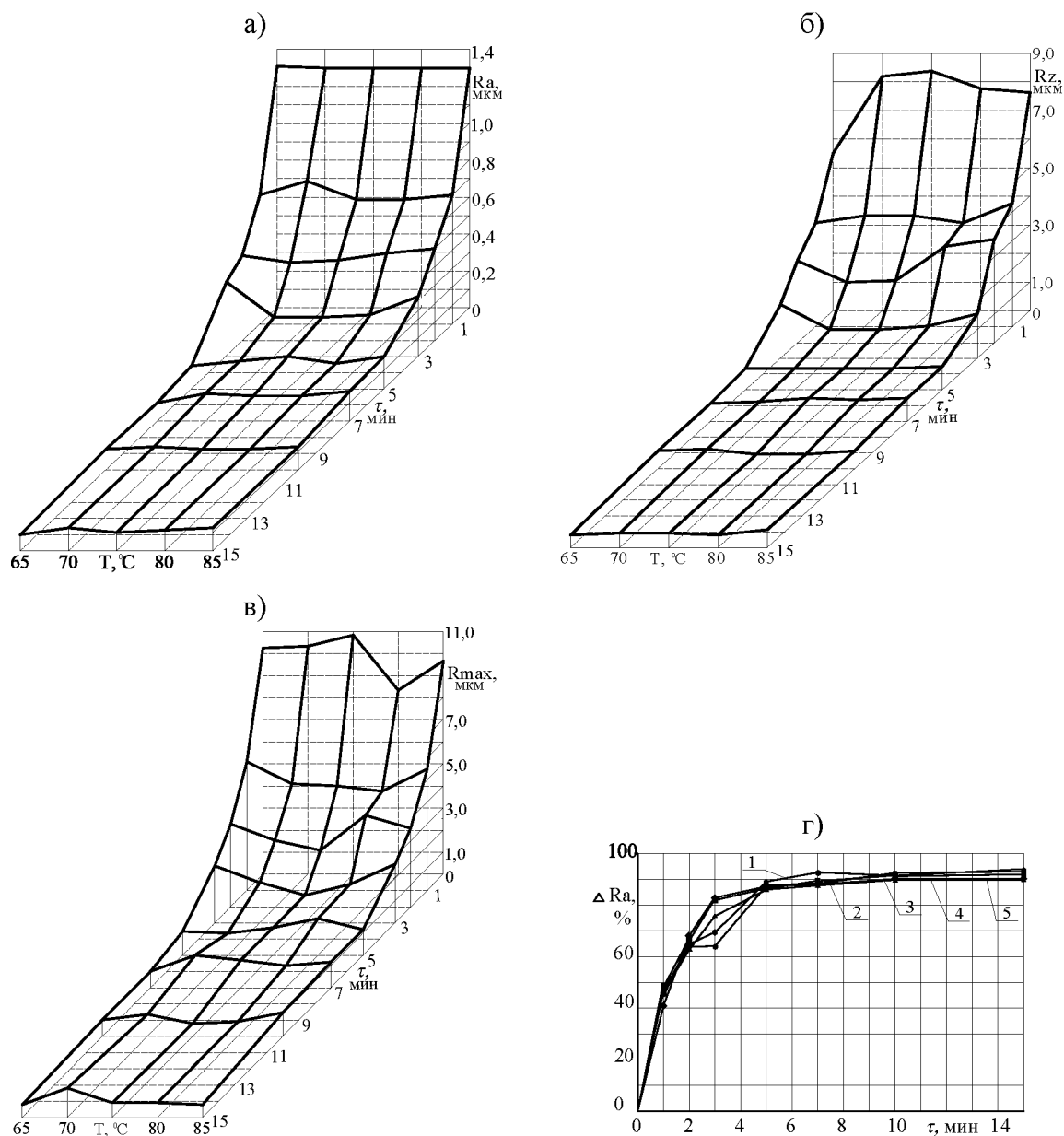


Рис. 1. Динамика параметров Ra (а), Rz (б), $Rmax$ (в) и относительного сглаживания шероховатости поверхности ΔRa (г) при $Ra^{исх}$ 1,25–1,30 мкм: 1 – $T_{эл}=65$ °С; 2 – $T_{эл}=70$ °С; 3 – $T_{эл}=75$ °С; 4 – $T_{эл}=80$ °С; 5 – $T_{эл}=85$ °С

Немаловажным фактом является то, что при ЭИП в течение 5–7 мин. вне зависимости от уровня шероховатости исходной поверхности и температуры электролита в исследованных диапазонах значений обеспечивается достижение практически одинаковых уровней параметров шероховатости (Ra 0,10–0,17 мкм, Rz 0,60–0,99 мкм, $Rmax$ 0,74–1,31 мкм) и относительного сглаживания шероховатости $\Delta Ra=85$ –89% (рис.1). Следовательно, при полировании не ответственных деталей уровень шероховатости

поверхности заготовки можно повысить, что позволит снизить стоимость ее предварительной механической обработки и себестоимость изготовления детали при обеспечении заданного уровня шероховатости поверхности. Увеличение продолжительности обработки свыше 7 мин нецелесообразно, поскольку дальнейшее снижение значений параметров Ra , Rz и $Rmax$ и повышение относительного сглаживания шероховатости ΔRa относительно достигнутых уровней незначительно.

Следует отметить, что, несмотря на установленные закономерности, параметры шероховатости поверхности, связанные с высотными свойствами неровностей профиля (Ra , Rq , Rz , Rp и $Rmax$), не дают никакой информации об изменении формы неровностей и не могут служить основой при изучении механизма сглаживания неровностей профиля поверхности и формирования топографии в условиях ЭИП. Более информативными оказались параметры шероховатости, связанные с формой неровностей (Δq) и свойствами неровностей в направлении длины профиля (Sm и λq). На рис. 2 представлены данные, характеризующие зависимость среднего шага неровностей профиля Sm от продолжительности обработки при температуре электролита 65 и 85 °С и разном уровне шероховатости исходной поверхности образцов из стали 10.

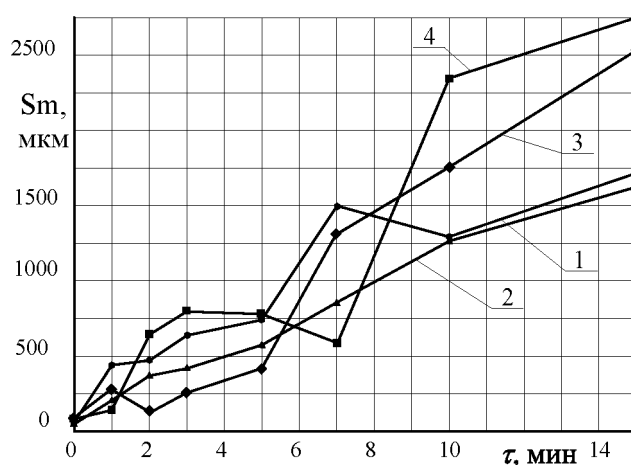


Рис. 2. Зависимость среднего шага неровностей Sm от продолжительности обработки:
 1 – $Ra^{исх}$ 1,30 мкм, $T_{эл}$ = 65 °С; 2 – $Ra^{исх}$ 1,30 мкм, $T_{эл}$ = 85 °С;
 3 – $Ra^{исх}$ 0,78 мкм, $T_{эл}$ = 65 °С; 4 – $Ra^{исх}$ 0,63 мкм, $T_{эл}$ = 85 °С

Эмпирические кривые можно с достаточной точностью аппроксимировать линейными функциями. Видно, что скорость сглаживания неровностей профиля, выражающаяся в динамике роста Sm , выше для поверхностей с более низкой исходной шероховатостью, а влияние температуры электролита несущественно при обработке поверхностей с одинаковым уровнем исходной шероховатости. Линейный характер изменения параметра Sm и пропорциональное снижение значений параметров Rp и $Rmax$ (табл.1) указывают на возможное равновероятное сглаживание неровностей профиля, включая местные выступы, расположенные на выступах и во впадинах профиля поверхности. В табл.1 в качестве примера приведены значения параметров Rp и $Rmax$ в зависимости от уровня шероховатости исходной поверхности образцов из стали 10 и продолжительности обработки при температуре электролита 75 °С.

Для проверки гипотезы о равновероятном сглаживании неровностей профиля был проведен анализ характера изменения средней квадратической длины волны про-

филя λ_q и среднего квадратического наклона профиля Δq , которые характеризуют профиль реальной поверхности в равной мере на выступах и во впадинах профиля [5].

Таблица 1. Значения параметров шероховатости поверхности R_p и R_{max}

| Шероховатость исходной поверхности, мкм | Параметры R_p (в числителе) и R_{max} (в знаменателе), мкм | | | | | | | |
|---|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Продолжительность обработки, мин | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
| $Ra^{исх} 0,65$ | <u>3.50</u> | <u>1.80</u> | <u>1.40</u> | <u>0.67</u> | <u>0.68</u> | <u>1.39</u> | <u>0.67</u> | <u>0.33</u> |
| | 7,80 | 3,20 | 3,20 | 0,94 | 0,98 | 1,88 | 0,90 | 0,61 |
| $Ra^{исх} 1,30$ | <u>6.70</u> | <u>2.30</u> | <u>1.20</u> | <u>0.70</u> | <u>0.69</u> | <u>0.79</u> | <u>0.51</u> | <u>0.49</u> |
| | 10,80 | 4,80 | 2,60 | 1,26 | 1,20 | 1,21 | 0,61 | 0,68 |

Физический смысл λ_q становится понятным, если профиль реальный поверхности представить в виде волновой формы. Профиль, как и любой сигнал, может быть получен в результате суммирования двух синусоидальных волн – основной волны (основная гармоника) и дополнительной волны (второстепенная гармоника). Основная гармоника, представляя собой, основные неровности профиля поверхности, определяется характером механической обработки поверхности и имеет меньшую частоту. Второстепенная гармоника обусловлена наличием на поверхности основных неровностей местных выступов и впадин, появившихся в результате влияния случайных факторов при механической обработке. Следует отметить, что основная и второстепенная гармоники, различаясь по частоте, могут иметь одинаковую амплитуду. На рис. 3 показаны профили, представляющие собой композицию основной гармоники с постоянной амплитудой и частотой с второстепенной гармоникой с одинаковой частотой, но с переменной амплитудой [5].

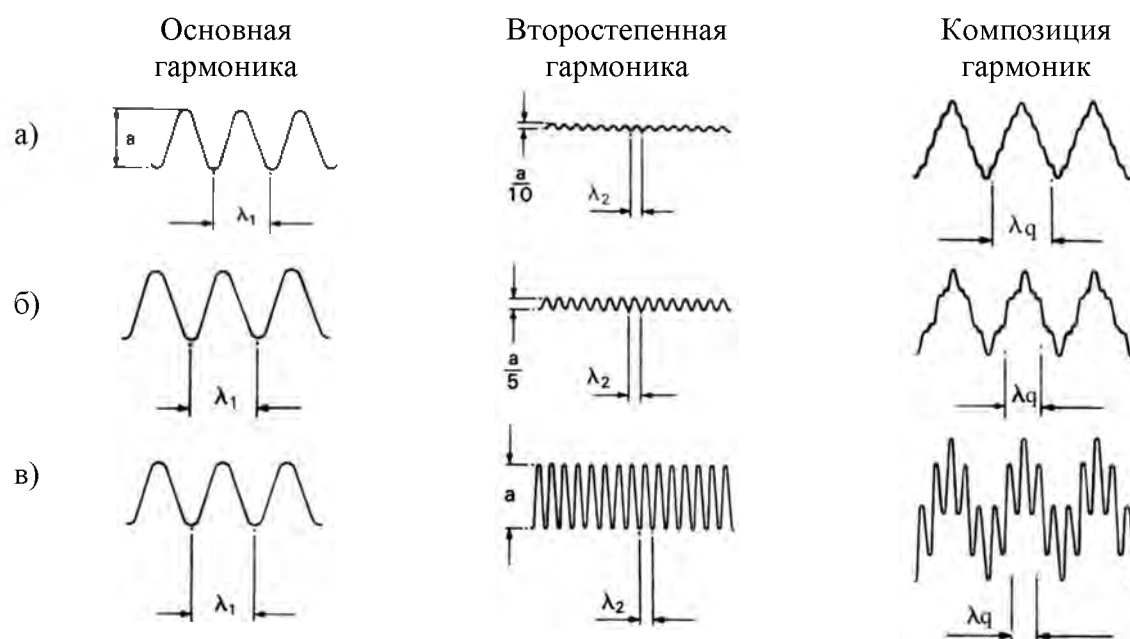


Рис. 3. Влияние амплитуды второстепенной гармоники на длину волны профиля λ_q

Суммирование основной гармоники с периодом λ_1 с второстепенной гармоникой с периодом λ_2 , имеющей малую амплитуду, приводит к профилю с периодом λ_q , кото-

рый незначительно меньше периода λ_1 (рис.3а). По мере увеличения амплитуды второстепенной гармоники происходит уменьшение периода λq суммарного профиля (рис.3б) и в момент, когда амплитуды обеих гармоник оказываются равными, λq принимает минимальное значение (рис.3в). В случае анализа реального профиля поверхности параметр шероховатости λq по определению ГОСТ 25142-82 характеризует среднюю квадратическую длину волны профиля. Из схемы следует, что для двух различных реальных поверхностей при одинаковых параметрах шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей и свойствами неровностей в направлении длины профиля, форма их выступов и впадин может существенно отличаться.

На рис. 4а представлены данные, характеризующие зависимость средней квадратической длины волны профиля λq от продолжительности обработки при температуре электролита 65 °С и 85 °С и разном уровне шероховатости исходной поверхности образцов из стали 10.

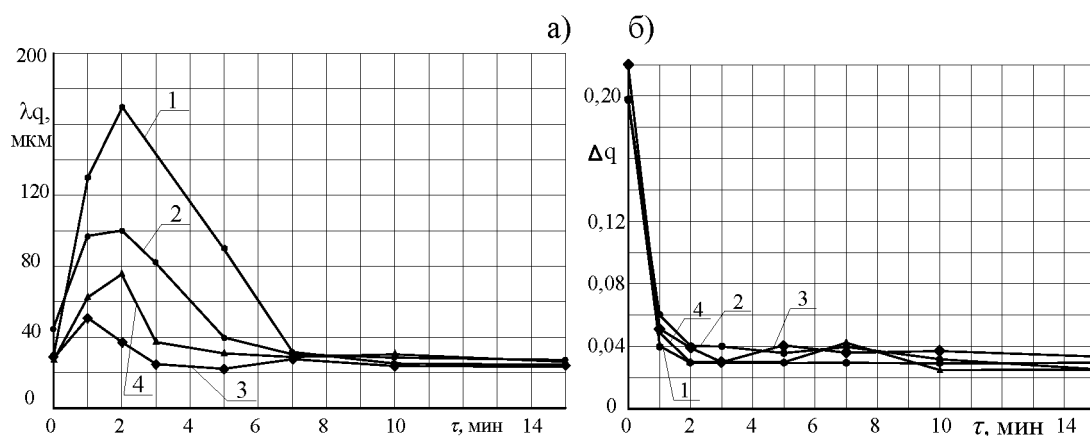


Рис. 4. Влияние продолжительности обработки на среднюю квадратическую длину волны λq (а) и средний квадратический наклон Δq (б) профиля поверхности:

1 – $Ra^{исх}$ 1,30 мкм, $T_{эл}$ =65 °С; 2 – $Ra^{исх}$ 1,30 мкм, $T_{эл}$ =85 °С;

3 – $Ra^{исх}$ 0,78 мкм, $T_{эл}$ =65 °С; 4 – $Ra^{исх}$ 0,63 мкм, $T_{эл}$ =85 °С

Из данных, представленных на рис. 4а, следует, что на динамику λq существенное влияние оказывают продолжительность обработки, уровень шероховатости исходной поверхности и температура электролита. Причем, чем выше исходная шероховатость и ниже температура, тем больше выражен экстремальный характер зависимости параметра λq . Наблюдаемую динамику можно объяснить, опираясь на схему, представленную на рис.3. На промежутке до 2 мин местные выступы, расположенные на профиле поверхности, вследствие малых размеров сглаживаются быстрее по сравнению с основными выступами, что приводит к уменьшению амплитуды второстепенной гармоники и увеличению λq . Последующее уменьшение λq на промежутке от 2 до 5 мин связано с дальнейшим сглаживанием основных и местных выступов с соответствующим снижением их высоты и исключением полностью сглаженных местных выступов при расчете значений параметра λq . Подтверждением этого положения служит увеличение среднего шага неровностей профиля S_m (рис. 2). Продолжение обработки свыше 5–7 мин приводит к достижению минимально возможной шероховатости поверхности, характеризующейся примерно одинаковыми амплитудами основных и второстепенных гармоник и минимальным значением параметра λq .

Характер зависимости среднего квадратического наклона профиля Δq от продолжительности обработки при ЭИП образцов из стали 10 показан на рис. 4б. На начальном этапе обработки (до 2 мин) происходит резкое уменьшение значений параметра Δq . Данный факт свидетельствует в пользу быстрого сглаживания местных выступов профиля. Видно, что влияние уровня шероховатости исходной поверхности и температуры электролита на динамику Δq не существенно. При продолжении обработки свыше 2 мин наступает момент, когда Δq достигает минимального значения, которое в большей мере определяется не столько наклоном боковых линий не полностью сглаженных выступов профиля, сколько средним квадратическим наклоном профиля элементов микроструктуры, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного анодного растворения структурных составляющих стали (рис. 5).

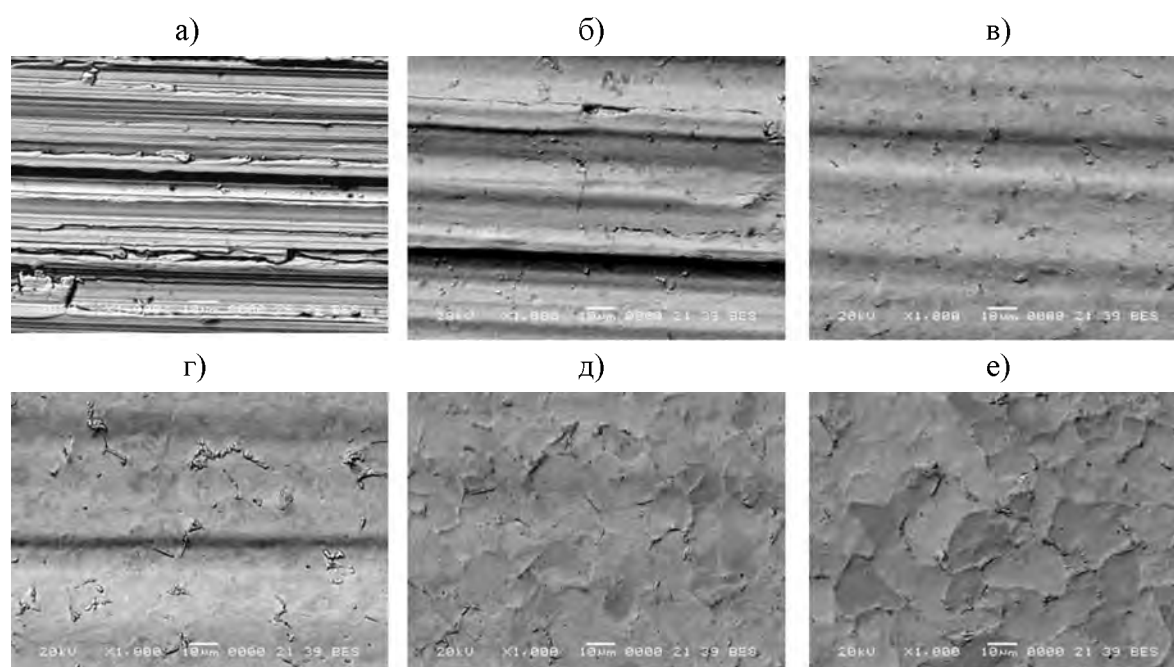


Рис. 5. Структура шероховатости исходной поверхности (а) и поверхности образцов из стали 20 после ЭИП в течение, с: б – 20; в – 40; г – 60; д – 120; е – 300 (x1000)

В результате математической обработки профилограмм поверхности образцов из стали 10, снятых до и после ЭИП в течение от 1 до 15 мин, для каждой из них были построены коррелограмма, спектрограмма, сглаженная гистограмма и график зависимости коэффициентов корреляционной функции от продолжительности обработки. Аппроксимация коррелограмм проводилась с помощью Curve Fitting Tool пакета MATLAB функцией, позволяющей учитывать систематические неровности с большими и малыми шагами и имеющей вид [10]:

$$K(\tau) = c^2 Ra^2 \left[\gamma e^{-\tau} + \frac{\beta \cos 2\pi}{T_\beta} \tau + \frac{\nu \cos 2\pi}{T_\nu} \tau \right],$$

где $K(\tau)$ – значение корреляционной функции в точке с абсциссой τ ; c – коэффициент, зависящий от формы неровностей и закона их распределения по высоте; γ – коэффи-

коэффициент случайности профиля; α – коэффициент частотного состава случайных неровностей; β – коэффициент высот систематических неровностей с периодом T_β ; ν – коэффициент высот систематических неровностей с периодом T_ν .

Коэффициент γ определяет долю случайной составляющей в реальном профиле поверхности. Коэффициент α характеризует частотный состав случайных неровностей. Чем меньше значение α , тем плавнее случайные неровности и больше расстояние между ними [11]. Коэффициенты γ , β и ν определяют вклад, вносимый соответствующими составляющими шероховатости поверхности в Ra^2 , причем $\gamma+\beta+\nu=1$. По соотношению значений коэффициентов γ , β , ν можно судить о характере неровностей профиля, а по динамике изменения T_β , T_ν , γ , β , ν , α – о механизме формирования профиля поверхности в процессе обработки. Результаты расчета значений параметров корреляционной функции представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения параметров уравнения корреляционной функции

| Шероховатость исходной поверхности | Время обработки, мин | γ | β | ν | T_β , мкм | T_ν , мкм | α |
|------------------------------------|----------------------|----------|---------|-------|-----------------|---------------|----------|
| $Ra^{исх} 1,3$ мкм | 0 | 0,715 | 0,138 | 0,147 | 499,4 | 266,3 | 0,040 |
| | 1 | 0,646 | 0,339 | 0,015 | 466,8 | 220,3 | 0,016 |
| | 2 | 0,650 | 0,340 | 0,010 | 609,6 | 260,0 | 0,009 |
| | 3 | 0,743 | 0,214 | 0,043 | 582,6 | 208,2 | 0,013 |
| | 5 | 0,636 | 0,117 | 0,247 | 462,8 | 219,8 | 0,066 |
| | 7 | 0,568 | 0,351 | 0,081 | 451,0 | 241,0 | 0,034 |
| | 10 | 0,540 | 0,440 | 0,020 | 531,2 | 283,1 | 0,037 |
| | 15 | 0,481 | 0,456 | 0,093 | 781,7 | 305,7 | 0,037 |
| $Ra^{исх} 0,63$ мкм | 0 | 0,730 | 0,118 | 0,152 | 345,7 | 72,8 | 0,088 |
| | 1 | 0,750 | 0,143 | 0,107 | 438,3 | 161,8 | 0,047 |
| | 2 | 0,827 | 0,123 | 0,050 | 431,7 | 111,0 | 0,019 |
| | 3 | 0,750 | 0,133 | 0,117 | 307,0 | 158,5 | 0,010 |
| | 5 | 0,492 | 0,226 | 0,282 | 544,3 | 284,9 | 0,043 |
| | 7 | 0,800 | 0,070 | 0,130 | 408,0 | 268,0 | 0,074 |
| | 10 | 0,310 | 0,588 | 0,102 | 527,4 | 308,6 | 0,043 |
| | 15 | 0,621 | 0,289 | 0,090 | 478,0 | 335,0 | 0,088 |

Последовательный анализ спектрограмм показал, что в структуре шероховатости исходной поверхности значительное место занимают высокочастотные случайные и систематические неровности с периодом до 200 мкм. Амплитуды неровностей по мере увеличения продолжительности обработки убывают вне зависимости от их периода. Рост коэффициента β (табл. 2) свидетельствует об увеличении шагов систематических неровностей и повышении влияния низкочастотных неровностей профиля на шероховатость поверхности. После 10 мин обработки происходит выделение одной или двух преобладающих низкочастотных гармоник с периодами от 180 до 600 мкм. При этом их вклад в величину среднего квадратического отклонения профиля поверхности Rq дос-

тигает 69%. Вклад неровностей с мелким шагом и малой амплитудой постепенно уменьшается и после 5–7 мин обработки эти неровности практически исчезают из структуры шероховатости поверхности.

Вид сглаженных гистограмм показал, что закон распределения, близкий к нормальному, характерен только для исходных шлифованных поверхностей. В остальных случаях наблюдается либо асимметрия кривой, либо многовершинность, что указывает на наличие в профиле систематической компоненты и снижение влияния случайной составляющей на структуру шероховатости полированной поверхности. При увеличении продолжительности обработки происходит плавное снижение уровня случайной составляющей, характеризующееся уменьшением коэффициента γ (табл. 2). Профиль становится более периодичным.

Анализ зависимости коэффициента α (табл. 2) от продолжительности ЭИП показал, что за первую минуту обработки его значение снизилось на 52–60%. Увеличение продолжительности до 2–3 мин. приводит к уменьшению достигнутого значения коэффициента α . Следовательно, при ЭИП случайные неровности, так же как и систематические, постепенно сглаживаются, расстояние между ними увеличивается. При обработке свыше 2–3 мин. на поверхности начинает проявляться микроструктура (рис. 5д; е), приводящая к росту коэффициента α .

Анализ данных, полученных в ходе исследования морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности образцов из стали 20, позволил представить и обосновать процесс съема металла с поверхности в условиях ЭИП как процесс анодного растворения компонентов стали, протекающий в области смешанной электрохимической и диффузионной кинетики по механизму комплексообразования через ряд последовательно-параллельных промежуточных стадий [12, 13]. На первой стадии на поверхности железа образуются адсорбционные комплексы с участием хемосорбированных молекул воды. В последующих стадиях принимают участие анионы раствора электролита. На заключительной стадии на обрабатываемой поверхности образуются растворимые в воде соединения, которые при переходе в электролит диссоциируют на простые ионы. Съем металла происходит в результате селективного растворения структурных составляющих стали. Диффузионные ограничения возникают вследствие затрудненного ионного массопереноса через поверхностные солевые, оксидные и гидроксидные адсорбционно-фазовые пленки.

4. Выводы

В условиях ЭИП формирование профиля и топографии поверхности происходит вследствие равновероятного сглаживания систематических и случайных неровностей. Случайные неровности, расположенные на выступах и во впадинах профиля поверхности и имеющие существенно меньшие размеры по сравнению с систематическими неровностями, сглаживаются за более короткое время. Наибольшая скорость сглаживания систематических и случайных неровностей наблюдается на начальном этапе обработки. При увеличении продолжительности обработки до 5–7 мин доля случайных неровностей в структуре шероховатости поверхности существенно снижается. Дальнейшая обработка приводит к профилю, сформированному сглаженными систематическими неровностями с большим периодом. При этом в структуре случайных неровностей профиля доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой полированной поверхности, проявившейся вследствие селективного анодного растворения компонентов обрабатываемого сплава. Растворение протекает в области сме-

шанной электрохимической и диффузионной кинетики по механизму комплексообразования через ряд последовательно-параллельных промежуточных стадий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Куликов И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 232 с.
2. Новиков В. И. Повышение эффективности изготовления сложно профильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.07 / В. И. Новиков. – СПб, 2010. – 19 с.
3. Электролитно-плазменное полирование// ОДО «СТЕКЛОВАК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.finishing.narod.ru/index3.html>. – Дата доступа: 7.12.2015.
4. Хмыль А. А. Влияние метода полирования стали на шероховатость и эксплуатационные свойства контактных поверхностей / А. А. Хмыль [и др.] // Трение и износ. 1996. – Том 17. – № 4. – С. 491–496.
5. H. Dagnall, M.A. Exploring surface texture / M.A. H. Dagnall. – LEICESTER, ENGLAND: RANK TAYLOR HOBSON, 1980. – 170 p.
6. Веселовский А. П. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах / А. П. Веселовский, Л. А. Ушомирская // Металлообработка. 2001. – № 4. – С. 29–31.
7. Исаевич Л. А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12Х18Н10Т волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л. А. Исаевич, Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев // Вестник БНТУ. 2005. – № 6. – С. 30–33.
8. Синькевич Ю. В. Вероятностно-статистическая оценка шероховатости поверхности электроимпульсно полированных деталей / Ю. В. Синькевич, А. А. Гриневич, И. Н. Янковский // Вестник БНТУ. 2011. – № 5. – С. 9–18.
9. Синькевич Ю. В. Электроимпульсное полирование деталей из коррозионно-стойких и углеродистых конструкционных сталей: дис. канд. техн. наук: 05.03.01; 05.02.08 / Ю. В. Синькевич. – Минск, 1998. – 163 с.
10. Витенберг Ю. Р. Оценка шероховатости с помощью корреляционных функций / Ю. Р. Витенберг // Вестник машиностроения. 1969. – № 1. – С. 55–57.
11. Витенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю. Р. Витенберг. – Л.: Судостроение, 1971. – 101 с.
12. Иванова Н. П. Исследование морфологии и химического состава электроимпульсно полированной поверхности углеродистых и коррозионно-стойких сталей / Н. П. Иванова, Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Наука и техника. 2012. – № 6. – С. 3–10.
13. Иванова Н. П. Механизм анодного растворения коррозионно-стойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях электроимпульсного полирования / Н. П. Иванова, Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Наука и техника. 2013. – № 1. – С. 24–30.

Поступила в редколлегию 22.01.2016 г