

УДК 621.7

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ**

*д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ, канд. техн. наук, доц. Ю.В. СИНЬКЕВИЧ, И.Н. ЯНКОВСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Приведены результаты исследований шероховатости поверхности после электроимпульсного полирования. Показано, что парогазовая оболочка оказывает равновероятное и равноинтенсивное воздействие на микро- и субмикровыступы поверхности и приводит к их равномерному растворению.

Проведенные исследования динамики трансформирования шероховатости поверхности в процессе электроимпульсного полирования позволили выявить основные закономерности изменения микрогеометрии поверхности и разработать механизм ее формирования. Обусловленный предварительной механической обработкой микропрофиль поверхности включает различные по высоте и ширине микровыступы, представляющие собой основные микропики с расположенными на их боковых гранях локальными микропиками. Представлена геометрическая модель формирования единичного микровыступа при электроимпульсном полировании.

Введение. Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности и оказывает значительное влияние на эксплуатационные показатели детали. Широкое промышленное внедрение электроимпульсного полирования (ЭИП), с одной стороны, и практически полное отсутствие систематизированных данных о микрогеометрии полированной поверхности, с другой, требуют разработки научно обоснованной теории формирования микропрофиля поверхности в процессе ЭИП. Механизм формирования микропрофиля при ЭИП достаточно сложен, включает в себя физические, электрохимические и геометрические аспекты, которые на сегодняшний день мало изучены. В данной работе не затрагивается механизм физико-электрохимического взаимодействия парогазовой оболочки с обрабатываемой поверхностью.

Цель настоящей работы – разработка геометрической модели механизма формирования микропрофиля поверхности в процессе ЭИП.

Методы исследований. В качестве объектов исследований были выбраны углеродистая конструкционная сталь 10 (ГОСТ 1050-88) и коррозионно-стойкая сталь 20Х13 (ГОСТ 5632-72). Электроимпульсному полированию подвергались плоские образцы с размерами 40×20×3 мм. Исходная шероховатость поверхности образцов обеспечивалась шлифованием на плоскошлифовальном станке до уровня Ra , равного 1,3...0,63 мкм, который обычно задается в производственных условиях перед операцией полирования. При проведении экспериментов время обработки выдерживалось с точностью ± 1 с, температура электролита изменялась в диапазоне 65...85 °С с шагом 5 °С и поддерживалась с точностью ± 1 °С с помощью термостата СЖМЛ-19/2,5-И1, колебание напряжения не превышало ± 5 В.

Приведенные в работе [1] данные показывают влияние режимов обработки на сглаживание микропрофиля поверхности, позволяют прогнозировать изменение стандартных параметров шероховатости Ra , Rz , $Rmax$ и Sm в процессе ЭИП, но не достаточны для анализа и понимания механизма формирования микропрофиля. Поэтому после ЭИП на профилографе-профилометре Talysurf-5 фирмы Taylor-Hobson по методике [2] измерялись параметры шероховатости Ra , Rq , Rz , $Rmax$, Rp , Rtm , $Rztm$, Sm , Δq , Rsk , λq и HSC .

Результаты и обсуждение. При анализе динамики изменения микропрофиля поверхности в процессе полирования наиболее информативными являются такие параметры шероховатости поверхности, как среднеквадратическое значение длины волны профиля λq и среднеквадратический угол наклона профиля поверхности Δq . Смысл параметра λq становится понятным, если реальный микропрофиль поверхности представить в виде волновой формы. В общем случае микропрофиль может быть получен в результате суммирования двух синусоидальных волн (основной и второстепенной). Основная волна (гармоника) представляет собой основные микропики поверхности, имеет наименьшую частоту и предопределяется характером предварительной механической обработки поверхности. Второстепенная гармоника обусловлена наличием на поверхности основных микропиков локальных микропиков, имеющих относительно небольшие размеры и вызванных различными случайными факторами при механической обработке. При этом основная и второстепенная гармоники, различаясь по частоте, могут иметь одинаковую амплитуду. На рисунке 1 в качестве примера показаны различные микропрофили поверхности, которые получены в результате суммирования основной гармоники с постоянной амплитудой и частотой со второстепенной гармоникой, амплитуда которой переменна.

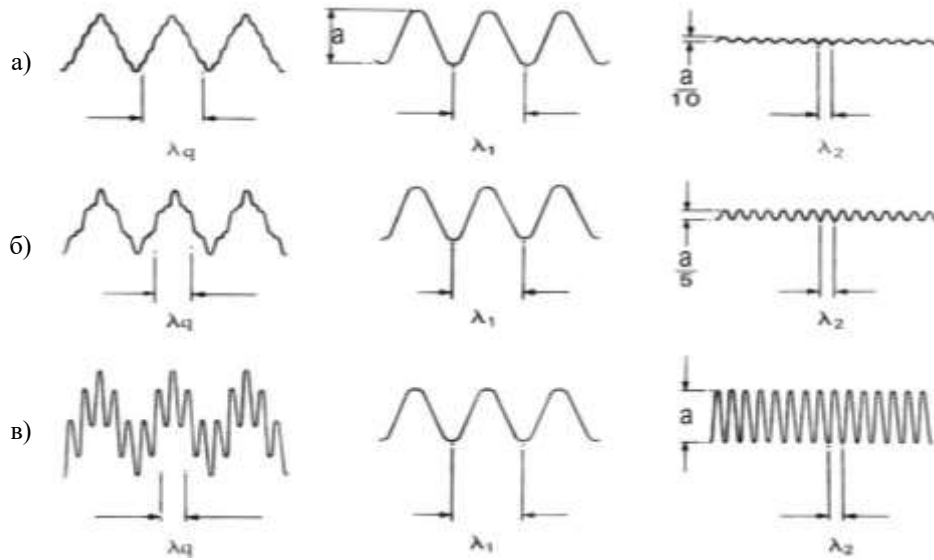


Рис. 1. Изменение λ_q в зависимости от амплитуды основной и второстепенной гармоник

В первом случае (рис. 1, а) суммирование основной гармоник с периодом λ_1 со второстепенной, имеющей малую амплитуду ($a/10$), приводит к общему микропрофилю с периодом λ_q , который лишь незначительно меньше λ_1 . По мере увеличения амплитуды второстепенной гармоник (рис. 1, б) происходит уменьшение периода суммарной гармоник λ_q и в момент, когда амплитуды двух гармоник становятся равными (рис. 1, в), λ_q принимает минимальное значение. Из приведенной схемы очевидно, что при одинаковых высотных и шаговых параметрах микропрофиля двух различных реальных поверхностей форма их микровыступов может существенно отличаться. В случае анализа реального микропрофиля форма их микровыступов по определению [2] характеризует длину волны профиля.

Согласно [3] плотность распределения основной гармоник $x_\beta(t)$, состоящей из одной гармоник $x_\beta(t) = A_\beta \sin \omega t$, имеет вид:

$$p_\beta(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{A_\beta^2 - x^2}}.$$

Плотность нормально распределенной второстепенной гармоник $x_\gamma(t)$ с $Ex_\gamma(t) = 0$ и среднеквадратическим отклонением σ_γ можно представить как

$$p_\gamma(x) = \frac{1}{\sigma_\gamma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_\gamma^2}}.$$

Тогда плотность суммарного закона, описывающего микропрофиль поверхности, определяется как свертка плотностей $p_\beta(x)$ и $p_\gamma(x)$

$$p(z) = \frac{1}{\pi \sigma_\gamma \sqrt{2\pi}} \int_{-A_\beta}^{A_\beta} \frac{e^{-\frac{(z-x)^2}{2\sigma_\gamma^2}}}{\sqrt{A_\beta^2 - x^2}} dx. \tag{1}$$

Вводя $x = A_\beta g$ и вычисляя интеграл по квадратурной формуле, формула (1) приобретает вид:

$$p(z) = \frac{1}{\pi \sigma_\gamma \sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^n e^{-\frac{(z-A_\beta g_k)^2}{2\sigma_\gamma^2}},$$

где $g_k = \cos \frac{2k-1}{2n} \pi$ – квадратурные узлы.

Выражая σ_γ , A_p и z через значения корреляционной функции $K(\tau)$ при $\tau=0$ ($\sigma_\gamma = \sqrt{\gamma \cdot K(0)}$, $A_p = \sqrt{2(1-\gamma)K(0)}$, $z = k\sqrt{K(0)}$), получим:

$$p(z) \approx \frac{1}{\pi\sqrt{2\pi\gamma K(0)}} \sum_{k=1}^n e^{-\frac{(k-\sqrt{2(1-\gamma)g_k})^2}{2\gamma}}$$

где n – число квадратурных узлов; k – номер узла.

Это выражение показывает, что плотность распределения ординаты микропрофиля поверхности в значительной степени определяется уровнем γ второстепенной гармоники.

На рисунке 2 представлено изменение параметра λq при ЭИП стали 10.

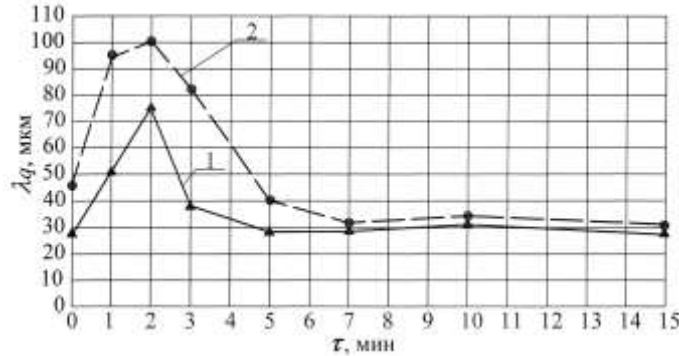


Рис. 2. Зависимость λq от времени обработки τ :

1 – $Ra^{нач} = 0,63$ мкм; 2 – $Ra^{нач} = 1,3$ мкм

Экстремальный характер изменения λq в процессе полирования можно объяснить, опираясь на схему, приведенную на рисунке 1. Так, в первые две минуты обработки локальные микропики ввиду малых своих размеров растворяются быстрее по сравнению с основными. Это вызывает уменьшение амплитуды второстепенной гармоники и соответствующее увеличение λq . Последующее уменьшение λq на участке 2...5 мин вызвано дальнейшим растворением основных и локальных микропиков, а также исключением при расчете λq микровыступов, которые, растворяясь в процессе обработки, перестают пересекать среднюю линию профиля поверхности. Подтверждением этого факта служит также увеличение среднего шага неровностей профиля Sm и уменьшение количества полных пиков HSC микропрофиля, выступающих над средней линией (рис. 3). После 5...7 мин обработки высота микровыступов поверхности достигает своего минимума, ограниченного микроструктурой обрабатываемого металла.

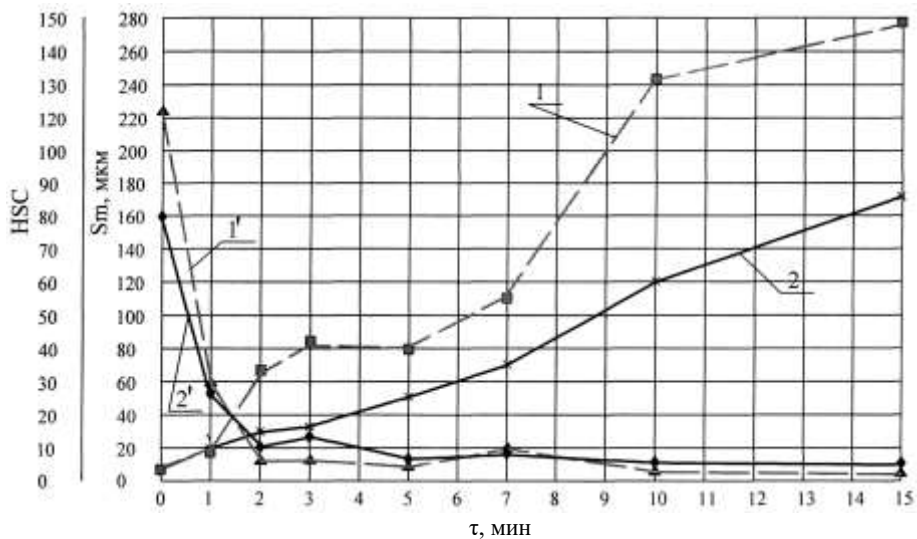


Рис. 3. Зависимости Sm (1; 2) и HSC (1'; 2') от времени обработки τ :

1, 1' – $Ra^{нач} = 0,63$ мкм; 2, 2' – $Ra^{нач} = 1,3$ мкм

Резкое в начале обработки уменьшение параметра Δq (рис. 4) свидетельствует в пользу быстрого растворения локальных микропиков. Их полное растворение приводит к некоторой минимальной величине Δq , определяемой углом наклона профиля оставшихся не полностью растворенных основных микропиков и зерен микроструктуры поверхности.

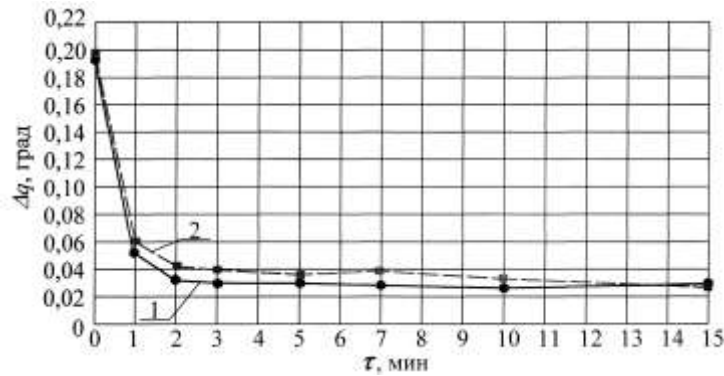


Рис. 4. Зависимость Δq от времени обработки τ :
 1 – $Ra^{нач} = 0,63$ мкм; 2 – $Ra^{нач} = 1,3$ мкм

Аналогичный характер имеют зависимости параметров λq , Δq , Sm и HSC от времени обработки для коррозионно-стойкой стали 20Х13.

С учетом приведенных экспериментальных и теоретических результатов и ранее проведенных исследований [1, 4] можно предложить геометрическую модель механизма формирования микропрофиля поверхности при ЭИП. Обусловленный предварительной механической обработкой микропрофиль поверхности включает различные по высоте и ширине микровыступы, представляющие собой основные микропики с расположенными на их боковых гранях локальными микропиками. Учитывая, что длина волны профиля после механической обработки в 3...6 раз превышает высоту микровыступа [2], а паргазовая оболочка при ЭИП имеет соизмеримую с высотой микровыступов толщину [4], электрохимическое растворение как основных, так и локальных микропиков будет равновероятным и равноинтенсивным.

На рисунке 5 представлена геометрическая модель формирования единичного микровыступа при ЭИП.

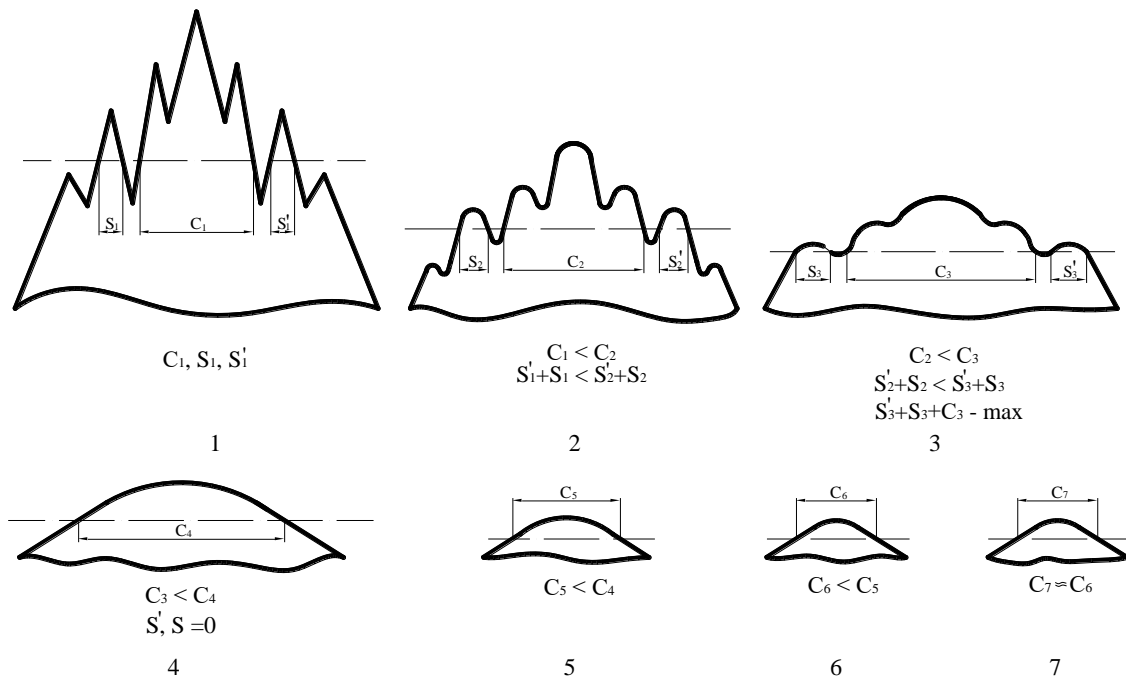


Рис. 5. Геометрическая модель формирования единичного микровыступа при ЭИП:
 1...7 – этапы формирования микровыступа поверхности;
 C – толщина основного микропика; S, S' – толщина локального микропика

На начальных этапах полирования (см. рис. 5, этапы 2 и 3) наряду с растворением основного микропика происходит также растворение и существенное сглаживание локальных микропиков, что приводит к постепенному увеличению толщины микровыступа по средней линии профиля, сглаживанию его профиля и уменьшению угла наклона боковых граней. Дальнейшая обработка приводит к полному растворению локальных микропиков. Толщина микровыступа достигает максимума. Продолжение обработки способствует постепенному сглаживанию оставшегося основного микропика, уменьшению его высоты и толщины по средней линии профиля, конечное значение которых ограничивается микроструктурой обрабатываемого металла (см. рис. 5, этапы 4...7).

Выводы. Установлено, что парогазовая оболочка оказывает равновероятное и равноинтенсивное воздействие на микро- и субмикровыступы поверхности и приводит к их равномерному растворению в процессе полирования.

Проведенные исследования динамики трансформирования шероховатости поверхности в процессе ЭИП позволили выявить основные закономерности изменения микрогеометрии поверхности и разработать механизм ее формирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синькевич, Ю.В. Обеспечение геометрических параметров качества поверхности электроимпульсным полированием / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Международный сб. науч. тр. / ДонНТУ. – Донецк, 2006. – Вып. 32. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – С. 200 – 206.
2. Dagnall, H. Exploring surface texture / H. Dagnall. – Great Britain: Rank Taylor Hobson, 1980. – 170 p.
3. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов; под ред. А.А. Первозванского. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
4. Синькевич, Ю.В. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международ. сб. науч. тр. / ДонНТУ. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 206 – 212.

Поступила 14.06.2007