

3. Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Триботехнические свойства металлопокрытий, упрочненных поверхностной термомеханической обработкой // Машиностроение. - Мн., 2000. - Вып.16. – С. 149-153.
4. Кончиц В.В. Электропроводность точечного контакта при граничной смазке // Трение и износ. 1991, т.12, №2. – С. 267-277.

УДК 621.923.7

## **О МЕХАНИЗМЕ СГЛАЖИВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

**Синькевич Ю.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Механизм формирования поверхности при электроимпульсном полировании (ЭИП) включает физические, химические, геометрические и технологические аспекты, которые, как правило, взаимосвязаны и на сегодняшний день изучены недостаточно. В настоящее время существует ряд гипотез о механизме сглаживания неровностей поверхности в процессе ЭИП.

Согласно гипотезе, приведенной в [1], наиболее интенсивному воздействию микроразрядов и активированных ионов парогазовой оболочки (ПГО) подвергаются выступы профиля поверхности. Поскольку поверхность во впадинах профиля, по мнению авторов, частично пассивирована, то поверхность впадин в меньшей степени подвержена воздействию. Зеркальный блеск поверхности обеспечивается при равенстве скоростей образования и растворения тончайшей оксидной пленки на обрабатываемой поверхности. При этом физическая природа микроразрядов и активации ионов в ПГО не раскрывается.

Авторы работ [2, 3] полагают, что в ПГО в результате электрического разряда возникает плазма, высокая температура которой приводит к испарению металла на вершинах выступов профиля. Согласно [3], снижение шероховатости поверхности происходит вследствие того, что поверхность электролита на границе с ПГО является предельно гладкой, а обрабатываемая поверхность стремится повторить рельеф поверхности электролита, в результате чего высота неровностей на обрабатываемой поверхности стремится к минимуму.

Автор работы [4] на основании результатов экспериментальных исследований тепловых потоков, расчета теплового баланса процесса ЭИП и конечно-элементного моделирования распределения теплового поля при воздействии разряда на поверхность анода, считает, что под действием разряда в ПГО сглаживание шероховатости поверхности анода происходит в результате микро локальных испарений металла объемом  $2,26 \cdot 10^{-2} - 4,02 \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>3</sup> на вершинах

выступов поверхности. В работе физическая природа разрядов в ПГО не раскрывается. В качестве подтверждения адекватности своей модели автор представил фотографию полированной поверхности образца из стали 12X18H10T, полученную с помощью атомно-силового сканирующего микроскопа. На фрагменте поверхности размером 50x50 мкм виден единственный вулканообразный выступ с кратером диаметром порядка 0,6–0,8 мкм. Однако в ряде работ других исследователей показано, что данный дефект поверхности связан с селективным растворением в процессе ЭИП структурных составляющих стали 12X18H10T, непосредственно примыкающих к карбидной фазе, и последующим удалением карбида в раствор электролита.

По мнению авторов монографии [5], при ЭИП сглаживание рельефа поверхности может обеспечиваться путем реализации двух механизмов. Во-первых, они считают, что при температуре газа в ПГО порядка 100°C высокая напряженность электрического поля способна вызвать ионизацию паров в ПГО и эмиссию ионов и электронов, необходимых для поддержания стационарного тлеющего разряда в оболочке, что обеспечивает электрическую проводимость ПГО и вызывает ее свечение. При этом распределение напряженности электрического поля в ПГО точно соответствует форме рельефа обрабатываемой поверхности при максимальной напряженности поля на выступах профиля, в результате чего дополнительно возникают искровые разряды, в которых выделяется значительная энергия, приводящая к тепловому разрушению вершин выступов. Во-вторых, авторы полагают, что сглаживание шероховатости поверхности возможно путем анодного растворения неровностей по аналогии с электрохимическим полированием. В этом случае на выступах обрабатываемой поверхности с большим градиентом напряженности электрического поля оксидная пленка разрушается тогда, когда отрывающие усилия, создаваемые электрическим полем, превысят прочность сцепления пассивной пленки с поверхностью. При этом разрушение оксидной пленки происходит в первую очередь на выступах профиля поверхности, где оксидный слой наиболее тонкий.

Согласно [6], ПГО способствует протеканию на обрабатываемой поверхности интенсивных химических и электрохимических реакций, приводящих к анодному окислению поверхности. Авторы полагают, что разрушение оксидного слоя происходит в результате генерирования на поверхности анода множественных искровых разрядов, которые вследствие повышенной напряженности электрического поля происходят преимущественно на вершинах выступов неровностей, в результате чего достигается высокая скорость сглаживания неровностей и исключается точечное травление поверхности.

Гипотеза о тепловом разрушении преимущественно выступов на рельефе обрабатываемой поверхности под воздействием стримерных разрядов в ПГО предложена в работе [7], согласно которой стример зарождается на поверхности электролитного катода и движется в направлении вершины выступа на поверхности металлического анода (обрабатываемой детали). На заключительной стадии стримерного разряда формируется плазменный канал,

который под действием пинч-эффекта и обратного процесса расширения газа разрушается в виде взрыва на вершине выступа. Однако, как и в предыдущих гипотезах, базирующихся на электрических разрядах в ПГО, авторы не раскрывают возможный механизм появления свободных электронов на поверхности электролитного катода на границе с ПГО, без которых развитие электрических разрядов различной природы в ПГО невозможно.

Следует отметить, что приведенные гипотезы базируются на основных закономерностях электрических разрядных процессов и съема металла в условиях электролитного нагрева в катодном [8] и анодном [9] режимах обработки, электроэрозионной обработки и электрохимического полирования [10]. В общем случае они сводятся к тому, что напряженность электрического поля на вершинах выступов профиля поверхности должна быть значительно выше по сравнению с впадинами, в результате чего возникновение электрических разрядов наиболее вероятно на вершинах выступов. Кроме того, гипотезы ошибочно базируются на том факте, что на профилограмме реальной поверхности выступы имеют островершинный вид. На самом деле данный эффект связан с различием в масштабах вертикального и горизонтального увеличения профилограммы и показан на рисунке 1, из которого следует, что профиль реальной поверхности при одинаковых значениях вертикального и горизонтального увеличения имеет плавный, пологий вид.

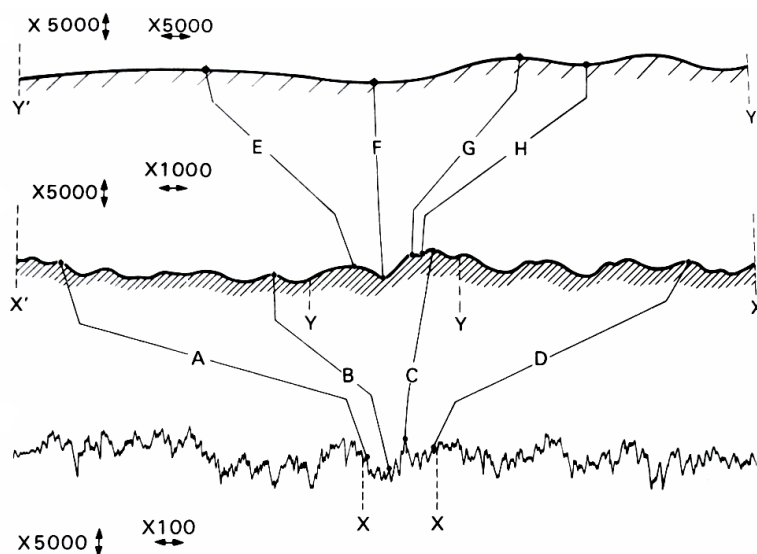


Рисунок 1 – Внешний вид профиля поверхности в зависимости от горизонтального увеличения профилограммы [11]

Учитывая рисунок 1 и тот факт, что ПГО представляет собой динамически устойчивую систему со средней толщиной, соизмеримой с высотой неровностей поверхности, можно предположить, что «пробой» ПГО может происходить с равной вероятностью, как на выступах, так и во впадинах профиля обрабатываемой поверхности в области случайных неоднородностей электрического поля. По этим причинам, а также в связи с отсутствием теоре-

тического и экспериментального обоснования приведенных гипотез о механизме сглаживания шероховатости поверхности в условиях ЭИП эти гипотезы представляются неадекватными.

Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности и оказывает значительное влияние на эксплуатационные характеристики поверхности деталей. Создание обоснованной теории формирования топографии в условиях ЭИП станет возможно в результате проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований процесса ЭИП с учетом всего комплекса факторов, приведенных выше.

1. Электролитно-плазменное полирование // ОДО «СТЕКЛОВАК» [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://finishing.narod.ru>. – Дата доступа: 16.03.2023.
2. Podhorský, Š. The possibilities of plasma polishing of the steel DIN 1.0570 in electrolyte / Š. Podhorský, A. Malík // METAL 2010: 19th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic, May 18th – 20th 2010 [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: <http://www.metal2011.com/en>. – Date of access: 16.03.2023.
3. 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.
4. Новиков, В.И. Повышение эффективности изготовления сложнопрофильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.07 / В.И. Новиков; СПб гос. политехн. ун-т. – СПб, 2010. – 19 с.
5. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 232 с.
6. Способ электрохимического полирования изделий из хромоникелевых сталей: пат. 2118412 РФ, МПК6 С 25 F 3/24 / А.С. Ставышенко, С.В. Скифский, П.Е. Наук; заявитель Тюменский гос. нефтегаз. ун-т. – № 97106310; заявл. 24.04.97; опубл. 27.08.98 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1998.
7. Cornelsen, M. Electrolytic Plasma Polishing of Pipe Inner Surfaces / M. Cornelsen, C. Deutsch, H. Seitz // METAL [Electronic resource]. – 2017. – Volume 8. – Issue 1. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/1/12>. – Date of access: 16.03.2023.
8. Cionea, C. D. Microstructural evolution of surface layers during electrolytic plasma processing / C. D. Cionea. – The University of Texas at Arlington: Cristian Cionea. – 2010. – 137 p.

9. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И.В. Суминов [и др.]; под общ. ред. И.В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.
10. Попилов, Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник / Д.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
11. Н. Dagnall, M.A. Exploring surface texture / M.A. Н. Dagnall. – LEICESTER, ENGLAND: RANK TAYLOR HOBSON, 1980. – 170 p.

УДК 682.62.018.012

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ**

**Соколовский С.С., Соломахо В.Л.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Проектирование методик выполнения измерений (МВИ) как одну из ключевых задач предполагает выбор лучшего варианта проектного решения из некоторой совокупности конкурирующих вариантов. В основу такого выбора предлагается положить квалиметрическое сопоставление всех выделенных возможных вариантов МВИ по целому ряду свойств, определяющих их качество, с последующим выделением превалирующего варианта по интегральному показателю качества измерений. Планируемый порядок решения данной задачи позволяет определить общую структуру системы информационной поддержки процесса автоматизированного проектирования МВИ, и выделить следующие основные модули, которые должны входить в эту структуру с существующими функциональными взаимосвязями между ними: **[Модуль 1]** - модуль классификации и кодирования контролируемых геометрических параметров деталей; **[Модуль 2]** - модуль классификации и кодирования типовых измерительных задач; **[Модуль 3]** - модуль типовых проектных решений МВИ; **[Модуль 4]** - модуль квалиметрического оценивания проектных решений конкурирующих вариантов МВИ. Обобщённая структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке 1. Согласно приведенной структурной схемы общий порядок функционирования такой системы следующий.

В первый модуль должна поступать исходная информация об измерительной задаче, подлежащей решению, на основании которой ей должен быть присвоен определённый код. Этот код, отражающий принципиальные особенности измерительной задачи, должен поступать на вход второго модуля, где на основании присвоенного рассматриваемой измерительной задаче кода