

На правах рукописи



НГУЕН ТХИ ХОНГ

**МИКРО- И НАНОПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ**

Специальность: 05.02.07 – **Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: Любимов Виктор Васильевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппонент: Рахимьянов Харис Магсуманович
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения»

Грачев Олег Евгеньевич
кандидат технических наук, ООО «Кварц Групп», руководитель проекта управления по производству

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул)

Защита диссертации состоится «30» ноября 2015г. В 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина 92, 9-й корп., ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/nguen-th/>

Автореферат разослан «09» октября 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы. В настоящее время в машиностроении достигнуты значительные успехи, особенно в области обработки высокопрочных материалов, таких как жаропрочные, нержавеющие стали и др., электрофизикохимическими методами обработки (ЭФХМО). С помощью электрофизикохимической обработки можно уменьшить дефекты, которые образуются при использовании традиционных методов, такие как микротрещины, растравливание и др. Одним из основных параметров, определяющих преимущества и эффективность ЭФХМО материалов, является качество поверхности. Качество поверхности непосредственно влияет на технические и эксплуатационные свойства деталей, узлов и изделия в целом. Качество поверхности деталей, полученных после использования ЭФХМО зависит от ряда параметров, таких как условия обработки, качество поверхности до обработки и др. В настоящее время проведено исследование качества поверхности материалов после обработки известными методами обработки, но в основном только на макро- и микроуровнях, а на наноуровне исследований ещё недостаточно. Исследования качества поверхности на макро- и микроуровнях с использованием геометрического и физико-механического параметров, приведенных в ряде известных статей, показали, что качество поверхности зависит только от параметров процесса обработки. При исследовании качества поверхности на наноуровне возникают вопросы: будут ли условия обработки сильно сказываться на качестве поверхности и по какому закону, существуют ли другие параметры, влияющие на качество поверхности после электрофизикохимической обработки и существует ли единство между микро- и нанопараметрами качества поверхности. Таким образом, установление нанопараметров качества поверхности металлов и сплавов после ЭФХМО и определение соотношения между микро- и нанопараметрами качества поверхности являются **актуальной** задачей.

Цель работы. Оценка микро- и нанопараметров качества поверхности металлов и сплавов после электрофизикохимических методов обработки.

Для достижения указанной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Провести анализ современного состояния вопроса о влиянии параметров процесса обработки на показатели качества поверхности на микро- и наноуровнях после ЭФХМО.

2. Провести теоретическое исследование микро- и нанопараметров качества поверхности материалов после электрохимической обработки (ЭХО).

3. Спроектировать и создать экспериментальную установку для проведения ЭХО при различных условиях.

4. Провести экспериментальные исследования геометрических и физико-механических микро- и нанопараметров поверхности материалов после электрохимической (ЭХО), лазерной (ЛО) и электроэрозионной (ЭЭО) обработки.

5. Выполнить сравнительную оценку микро- и нанопараметров поверхности металлов и сплавов после ЭХО, ЛО и ЭЭО.

Объект исследований: микро- и нанопараметры качества поверхности деталей из алюминия АО и нержавеющей стали Х18Н10Т, после ЭФХМО.

Предмет исследований: поверхности металлов и сплавов после ЭХО, ЛО и ЭЭО.

Метод исследований: Теоретические исследования проводились на основе основных положений теоретической и прикладной электрохимии с учетом поляризации электрода и неоднородности состава и свойства обрабатываемого материала. При проведении экспериментальных исследований использовались разработанная и изготовленная установка ЭХО, лазерная установка ЭУ-1, электроэрозионный станок «XENON», а также современная измерительная и регистрирующая аппаратура (сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver PRO P47H, профилограф-профилометр Kosaka Lab. Surfcoorder SE 1700 α -39, микротвердомер ПМТ-3 и сканирующий силовой микроскоп «НаноСкан»).

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель процесса выравнивания исходной микро- и нанощероховатости поверхности металлов и сплавов при ЭХО на основе основных положений теоретической и прикладной электрохимии с учетом поляризации электродов и неоднородности состава и свойства обрабатываемого материала.

2. Экспериментальные схемы ЭХО при плотности тока от 0 до 30 А/см² и в водных растворах 5-; 10- и 15%-ного NaCl.

3. Результаты экспериментальных исследований микро- и нанопараметров качества поверхности металлов и сплавов после ЭФХМО.

4. Сравнительная оценка микро- и нанопараметров качества поверхности металлов и сплавов после ЭФХМО.

Научная новизна заключается в определении условий преимущественного влияния на микро- и нанопараметры качества поверхности в зависимости от методов обработки и оценке соотношения микро- и нанопараметров качества поверхности после использования различных ЭФХМО. Установлено, что на микропараметры качества поверхности больше влияние оказывают параметры процессы обработки, а на нанопараметры – преимущественно влияют свойства материала, а именно структура, размер зерен и химический состав.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. На основании проведенных исследований разработана и изготовлена экспериментальная установка для осуществления ЭХО при различных плотностях тока и концентрациях раствора электролита.

2. Экспериментально определены диапазоны изменения микро- и нанопараметров поверхности металлов и сплавов после ЭФХМО.

Теоретическая значимость работы состоит в исследовании влияния процесса выравнивания исходных микро- и нанощероховатостей поверхности материалов после ЭХО. В рамках предлагаемой модели показано, что при ЭХО с учетом поляризации электрода и неравномерности его потенциала поверхности, на микроуровне влияние числа Вагнера, характеризующего поляризацию электрода, и неравномерности потенциала на скорость выравнивания высоты исходной неровности несущественно, а на наноуровне – чем выше число Вагнера, тем меньше приложенный к аноду потенциал, что приводит к снижению скорости выравнивания.

Реализация работы

Разделы работы использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение» и включены в лекционные курсы дисциплин «Технология физико-химической обработки металлических и неметаллических материалов», «Физико-химические методы микро- и нанообработки», а также применяются при выполнении курсовых и дипломных проектов на кафедре «Электро- и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональных всероссийских научно-технических конференциях «Высокие, критические, электро- и нанотехнологии» (Тула, 2012 – 2014 г.), на международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2013, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, 3 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, списка используемой литературы из 108 наименований; общий объем – 135 страницы машинописного текста, включая 76 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и основные цели диссертационной работы, ее теоретическая и практическая значимость, научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также описана структура диссертации.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния вопроса о микро- и нанопараметрах качества поверхности материалов после ЭФХМО. Основное внимание удалено рассмотрению микро- и наношероховатости, микро- и нанотвердости. Установлено, что наиболее существенное влияние на микропараметры поверхности материалов после ЭФХМО оказывают факторы процесса обработки: метод обработки, плотность тока, концентрация раствора электролита, температура и др. Эти параметры процесса постоянно изменяются по времени и в процессе обработки в каждой точке обрабатываемой поверхности по различным законам. Отличия могут быть незначительными, но вызывают образование микронеровностей и оказывают существенное влияние на микропараметры качества поверхности обрабатываемых материалов. При исследовании нанопараметров качества поверхности материалов после ЭФХМО необходимо установить: будут ли условия обработки существенно сказываться на качестве поверхности и по какому закону, существуют ли другие параметры, влияющие на качество поверхности после электрофизикохимической обработки и существует ли единство между микро- и нанопараметрами качества поверхности.

Сделан вывод об актуальности исследования нанопараметров качества поверхности металлов и сплавов после ЭФХО, и определения степени влияния

на микро- и нанопараметры качества поверхности различных параметров. На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй** главе приведены результаты теоретического исследования процесса выравнивания исходной микро- и наношероховатости поверхности металлов и сплавов при ЭХО в различных условиях на основе основных положений теоретической и прикладной электрохимии с учетом поляризации электрода и неоднородности состава и свойства обрабатываемого материала.

В общем случае необходимо решить уравнение Лапласа с различными граничными условиями

$$\operatorname{div}(\chi \operatorname{grad} \Phi) = 0, \quad (1)$$

где χ - удельная электропроводность электролита, Φ - электрический потенциал.

С учетом поляризации электрода и неоднородности состава и свойства обрабатываемого материала граничное условие на аноде для уравнения Лапласа (1) может быть сформулировано как:

$$\Phi = U - \eta(i) + \Phi(x), \quad (2)$$

где $\eta(i) = \eta \cdot \left(\chi \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)$ – некоторая заданная функция, которая является поляризационной характеристикой электрода. $\delta \Phi(x)$ – слагаемое, учитывающее неэквипотенциальность поверхности анода, обусловленную его микроструктурной неоднородностью.

При численном решении использовался метод граничных элементов и метод шагов, т.е. для каждого момента времени производился расчет распределения потенциала электрического поля (по уравнению (2)), а затем осуществлялось перемещение анодной поверхности.

В результате расчетов по принятой модели получены зависимости изменения высоты микро- и наношероховатостей поверхности анода из нержавеющей стали X18H10T с учетом числа Вагнера и неравномерности потенциала электрода после ЭХО (рис. 1-2). Видно, что с ростом поляризации (числа Вагнера) и неравномерности потенциала электрода микро- и наношероховатость поверхности нержавеющей стали X18H10T уменьшается со временем, но закономерности уменьшения микро- и наношероховатости отличаются. С учетом поляризации и неравномерности потенциала электрода микрошероховатость линейно уменьшается за исследуемый промежуток времени, а наношероховатость экспоненциально уменьшается практически до нуля. Такая зависимость наношероховатости поверхности объясняется экспоненциальной зависимостью плотности тока от локального потенциала электрода. Кроме этого, наблюдался большой перепад наношероховатости поверхности нержавеющей стали X18H10T за существенный короткий промежуток времени.

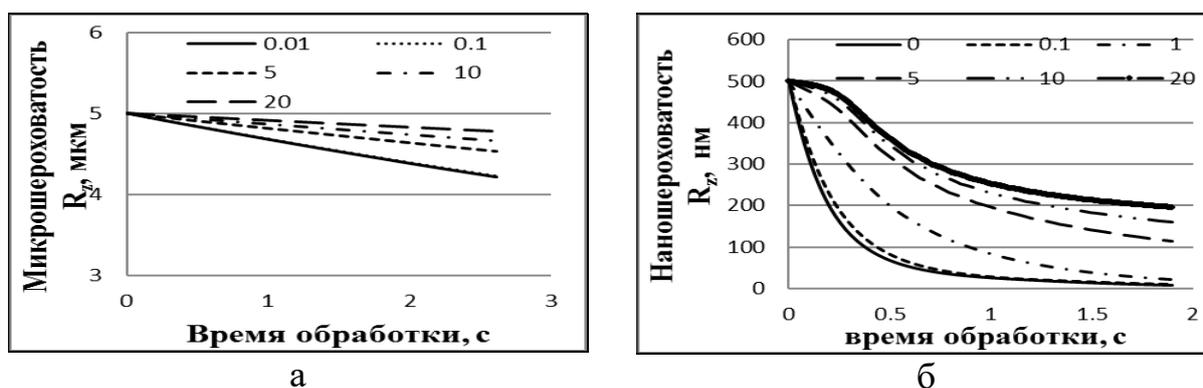


Рис.1. Зависимости высоты микрошероховатости (а) и наношероховатости (б) поверхности анода из нержавеющей стали X18N10T от времени обработки после ЭХО с учетом поляризации электрода

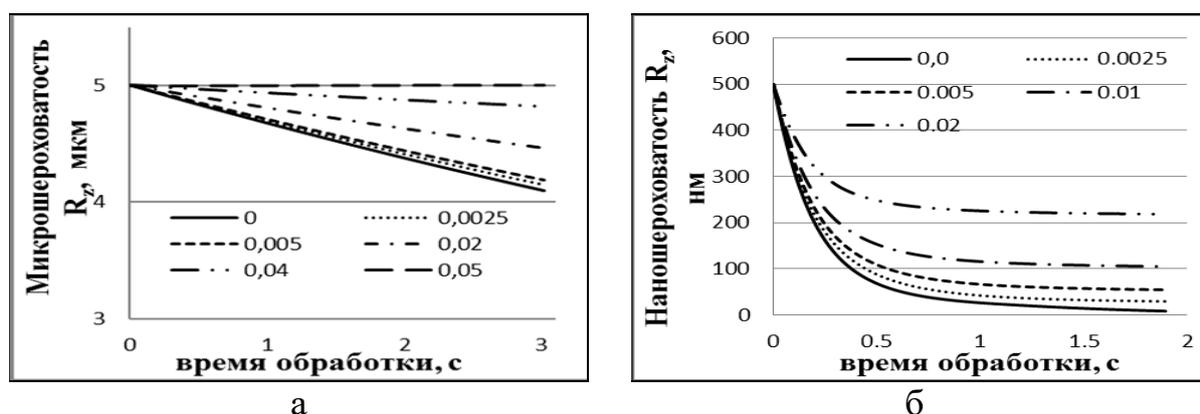


Рис.2. Зависимости высоты микрошероховатости (а) и наношероховатости (б) поверхности анода из нержавеющей стали X18N10T от времени обработки после ЭХО с учетом неравномерности потенциала электрода

Установлено, что при ЭХО с учетом поляризации электрода и неравномерности потенциала поверхности электрода на скорость выравнивания микрошероховатости оказывают влияние числа Вагнера и показателя неравномерности потенциала электрода незначительно, а на скорость выравнивания наношероховатости – это влияние достаточно велико: чем выше число Вагнера, тем меньше приложенный к аноду потенциал, что приводит к снижению скорости её выравнивания.

Третья глава посвящена методике экспериментальных исследований, которая включила подготовку исследуемых поверхностей и измерение геометрических и механико-физических микро- и нанопараметров поверхности материалов после ЭХО, ЛО и ЭЭО. Спроектирована и изготовлена экспериментальная электрохимическая установка для обработки образцов материалов при ММЭЗ и при различных плотностях тока и концентрациях электролита (рис.3). В качестве источника питания 1 использовался источник постоянного напряжения. Для прокачки электролита применялся самовсасывающий насос «Калибр НБЦ-380» 3. Электрохимическая ячейка 2 фиксировалась на держателе 4, который служил для закрепления образцов и плавного регулирования ММЭЗ (рис.4). Ячейка 2 изготовлена из оргстекла размером 40x40x40 мм. Штуцер 2 использовался для присоединения ячейки к насосу подачи 3 электролита. В ка-

честве катода 4 использовалась нержавеющая сталь, а анода 3 – исследуемый образец из алюминия или нержавеющей стали. С помощью микроскопа БМ-1М с микрометровой индикацией устанавливался межэлектродный зазор в электрохимической ячейке, регулируемый в пределах $s = 100 \dots 600$ мкм. В качестве образцов использована нержавеющая сталь X18H10T, электролитов – водный раствор 5 – 20 %-ный NaCl. Электрохимическая обработка проводилась при различных плотностях тока, в диапазоне $0 - 30$ А/см² в водном растворе 5-, 10-, и 15 %-ного NaCl.

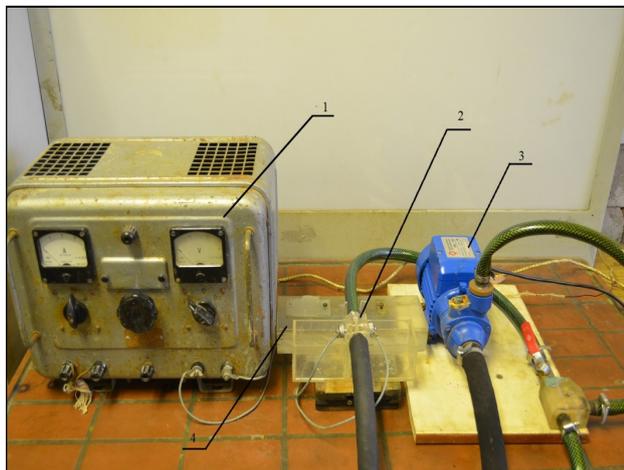


Рис.3. Общий вид экспериментальной установки для ЭХО образцов на ММЭЗ:

1 – источник питания; 2 – электрохимическая ячейка; 3 – насос для прокачки электролита; 4 – держатель

Для исследования микрошероховатости применялся профилограф-профилометр KosakaLab.SurfcorderSE 1700α-39, микротвердости - микротвердомер ПМТ-3, наношероховатости - СЗМ Solver PRO P47H, нанотвердости - сканирующий микроскоп «НаноСкан».

Кроме этого, в работе использовались образцы из алюминия и нержавеющей стали X18H10T после ЛО и ЭХО для исследования микро- и нанопараметров качества поверхности материалов.

В **четвертой** главе приведены результаты экспериментальных исследований нанопараметров качества поверхности материалов после ЭХО, ЛО и ЭХО. С помощью СЗМ получены параметры качества поверхности нержавеющей стали X18H10T после ЭХО при плотности тока $7,07, 14,15, 28,3$ А/см² в водном растворе 5-, 10-, и 15 %-ного NaCl.

Из анализа результатов видно, что после ЭХО в водном растворе 5 %-ного NaCl с ростом плотности тока наблюдается заметное отличие процесса формирования поверхности нержавеющей стали X18H10T: при плотности тока $7,07$ А/см² на поверхности образуются каверны и кратеры диаметром $3 - 4$ мкм вследствие того, что на поверхности нержавеющей стали X18H10T титан обычно находится в виде карбида TiC и частично может присутствовать в виде карбонитрида TiCN. Избирательное растворение титана как бы катализирует анод-

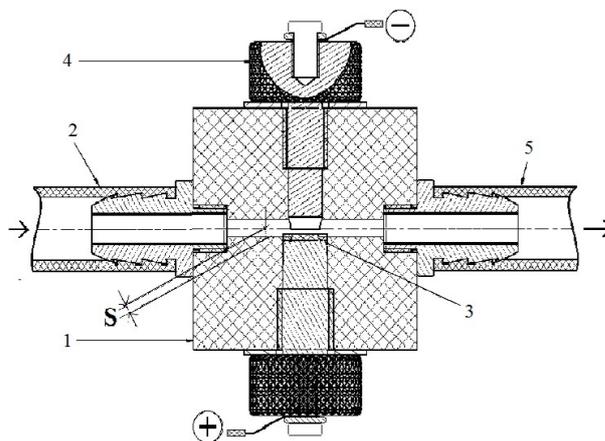


Рис.4. Схема электрохимической ячейки:

1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – анод; 4 – катод; 5 – шланги

ное растворение этой стали, следовательно, наблюдаются выпадение карбидных фаз (образование каверн) и образование кратеров. При увеличении плотности тока до величины $14,15 \text{ A/cm}^2$ на поверхности нержавеющей стали X18H10T после ЭХО ещё наблюдаются каверны и кратеры, но их размер уменьшился до $1,5 - 2,5 \text{ мкм}$ и наблюдаются некоторые выступы, ширина дна которых $1 - 2,5 \text{ мкм}$ и высота $75 - 233 \text{ нм}$. Формирование выступов связано с сохранением пассивного состояния карбида хрома при ЭХО с недостаточно высокой величиной плотности тока. После ЭХО при плотности тока $28,3 \text{ A/cm}^2$ получены поверхности нержавеющей стали X18H10T с самой низкой наношероховатостью: $R_a = 58,5 \text{ нм}$; $R_z = 128,6 \text{ нм}$. Кроме этого, на поверхности нет каверн, кратеров и выступов (рис.5).

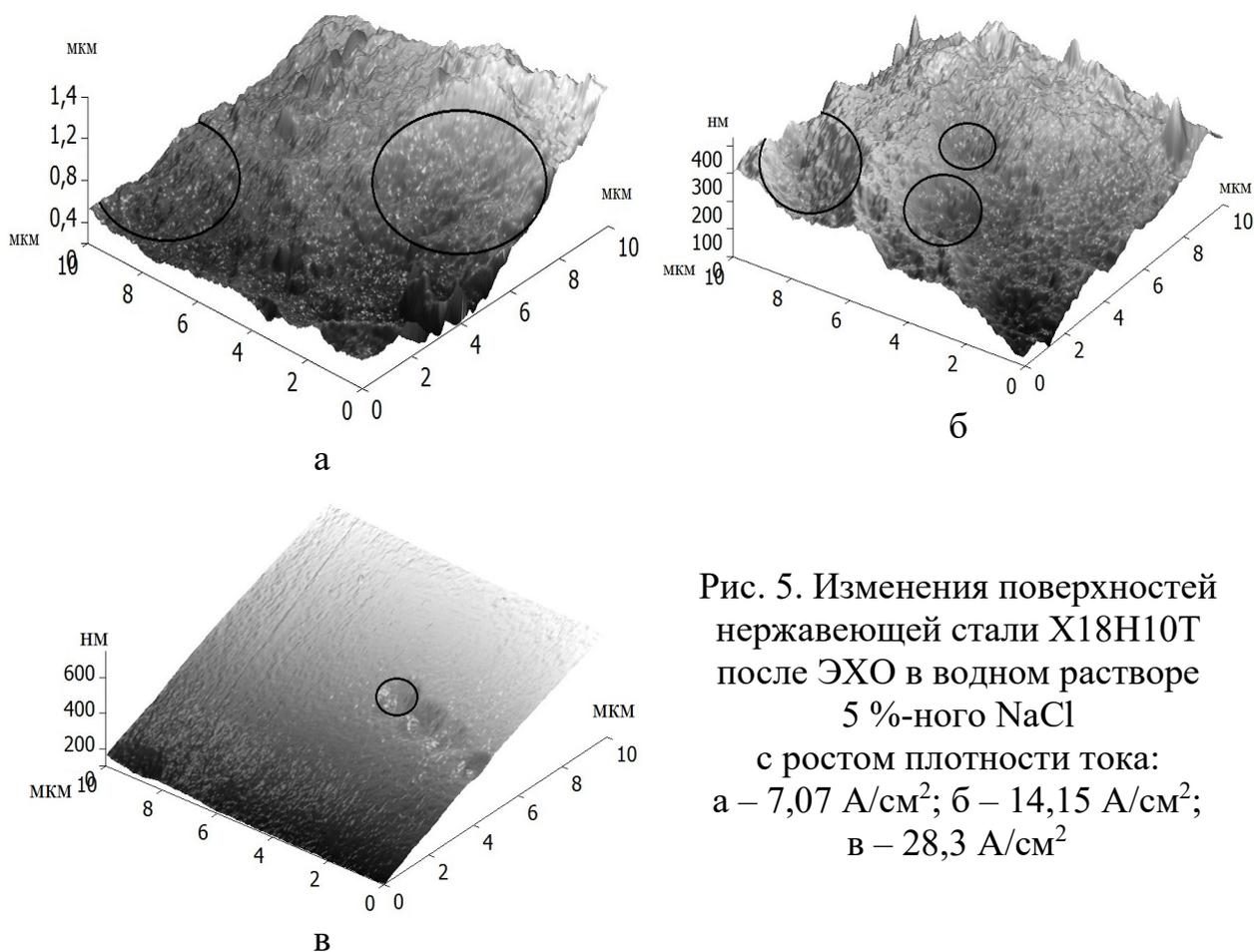


Рис. 5. Изменения поверхностей нержавеющей стали X18H10T после ЭХО в водном растворе 5 %-ного NaCl с ростом плотности тока:
 а – $7,07 \text{ A/cm}^2$; б – $14,15 \text{ A/cm}^2$;
 в – $28,3 \text{ A/cm}^2$

Сканируемые поверхности нержавеющей стали X18H10T после ЭХО при плотности тока $14,15 \text{ A/cm}^2$ с ростом концентрации электролита представлены на рис. 6. После ЭХО в водном растворе 5 %-ного NaCl на поверхности одновременно наблюдались каверны, кратеры и выступы. При увеличении концентрации электролита до 10 %-ного NaCl исчезали каверны и кратеры, но выступы увеличивались, и одновременно вершины выступов становились заостреннее.

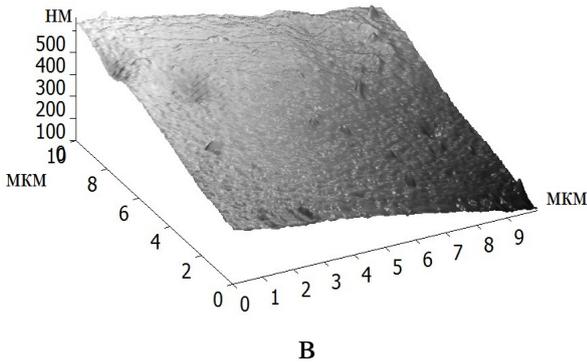
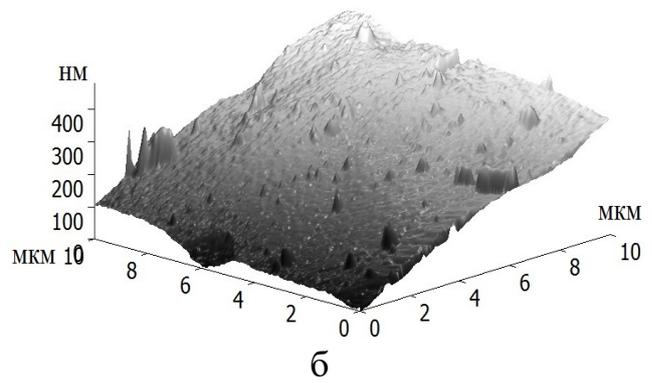
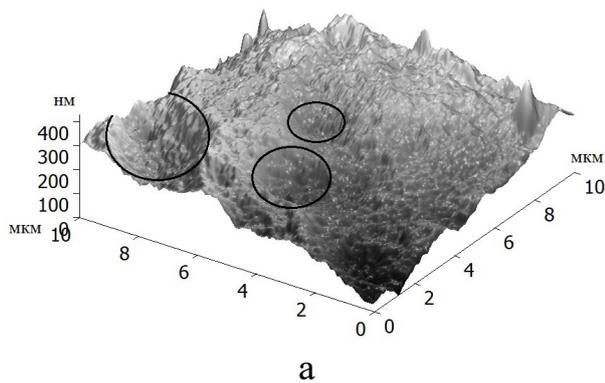


Рис. 6. Изменения поверхностей нержавеющей стали X18H10T после ЭХО при плотности тока 14,15 А/см² с ростом концентрации электролита:
 а – 5 %-ного NaCl;
 б – 10 %-ного NaCl;
 в – 15 %-ного NaCl

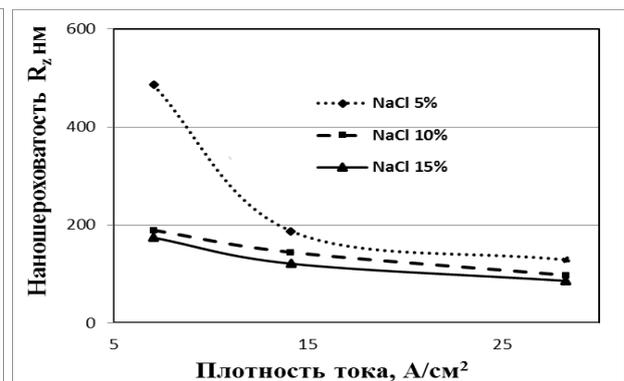
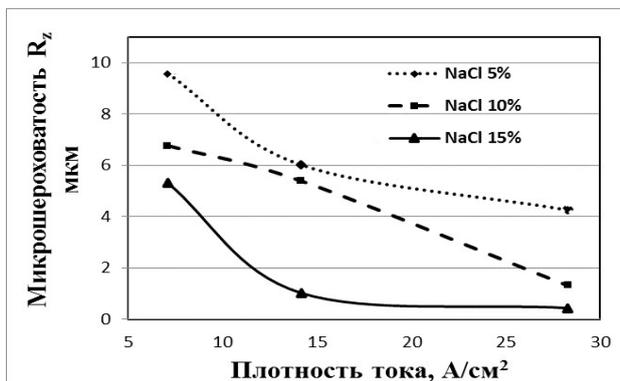
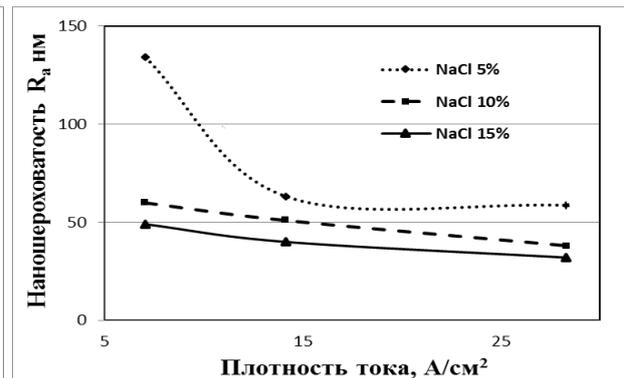
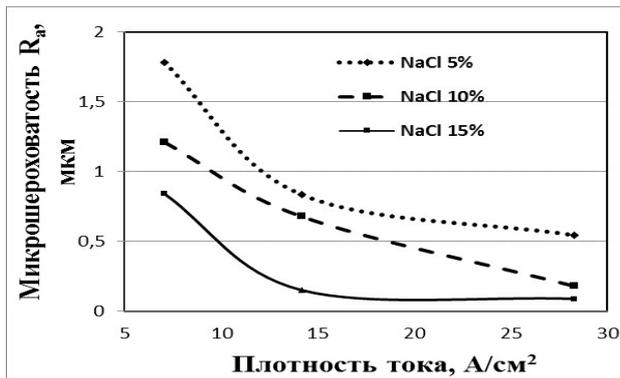


Рис.7. Зависимости микрошероховатости (а) и наношероховатости (б) поверхности нержавеющей стали X18H10T после ЭХО от плотности тока

Для сравнительной оценки степени влияния плотности тока и концентрации электролита на микро- и наношероховатости получены зависимости микро- и наношероховатости от этих параметров (рис.7-8). С ростом плотности тока

микрошероховатость уменьшается по экспоненциальному закону, а наношероховатость уменьшается различным образом и, следовательно, существует отличие между микро-и наношероховатостью поверхности материалов после ЭХО. Кроме этого, полученные графики показали, что степень влияния на микро- и наношероховатость поверхности материалов после ЭХО концентрации электролита является одинаковой. Таким образом, на наношероховатость поверхности материалов после ЭХО влияние оказывают не только параметры процесса обработки, а также другие параметры, такие как структура, размер зерен и химический состав самих обрабатываемых поверхностей.

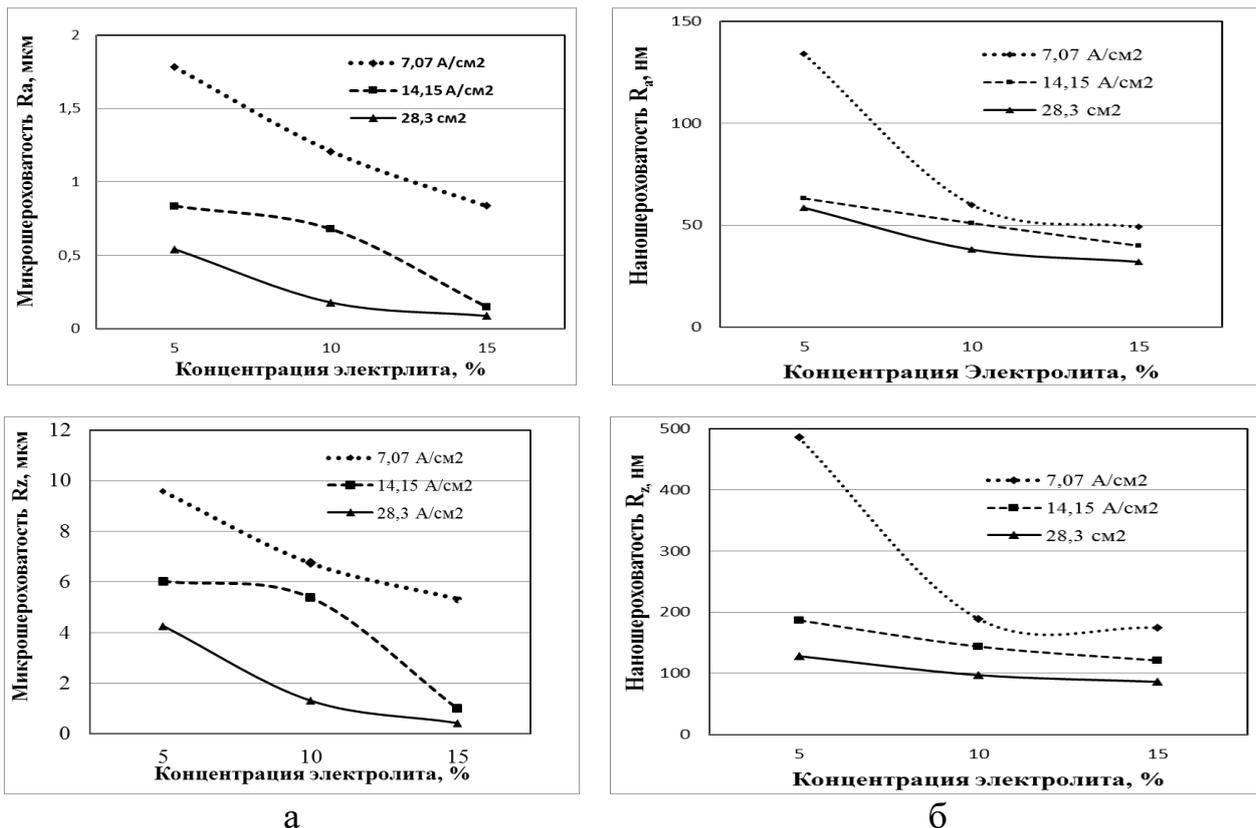


Рис.8. Зависимости микрошероховатости (а) и наношероховатости (б) поверхности нержавеющей стали X18H10T после ЭХО от концентрации электролита

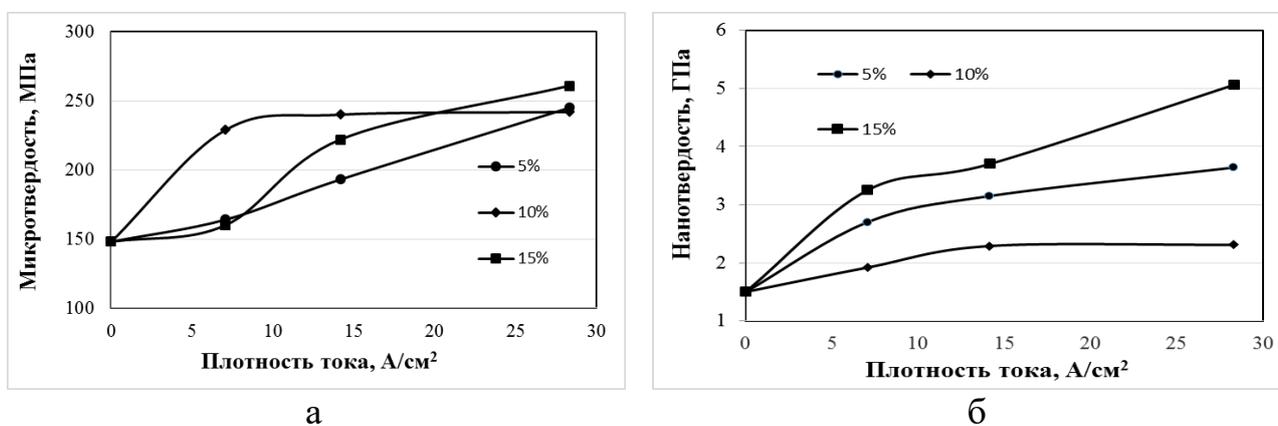


Рис.9. Зависимости микротвердости (а) и нанотвердости (б) поверхности нержавеющей стали X18H10T от плотности тока

С ростом плотности тока микро- и нанотвердости поверхности нержавеющей стали X18H10T увеличиваются. При ЭХО в водном растворе 10 %-ного NaCl при увеличении плотности тока в 3 раза микротвердость увеличивается в 0,6 раз, а наношероховатость в 5 раз. После ЭХО нанотвердость поверхности из нержавеющей стали может достигнуть до 5 ГПа (рис.9).

Были выполнены исследования рельефа поверхности деталей из алюминия АО после лазерной обработки. Рельеф поверхности алюминия после ЛО состоит из совокупности каверн и наплывов. Ширина каверн находится в пределах 2–6 мкм, глубина – не более 930 нм, ширина наплывов в пределах 2,6–7 мкм, высота – не более 600 нм. С ростом времени обработки каверны постепенно заполняются, количество наплывов увеличивается, а ширина и высота их уменьшаются. Вершины наплывов становятся более острыми. На поверхности алюминия после ЛО наблюдается струйность. С ростом времени обработки количество струй уменьшается (рис.10).

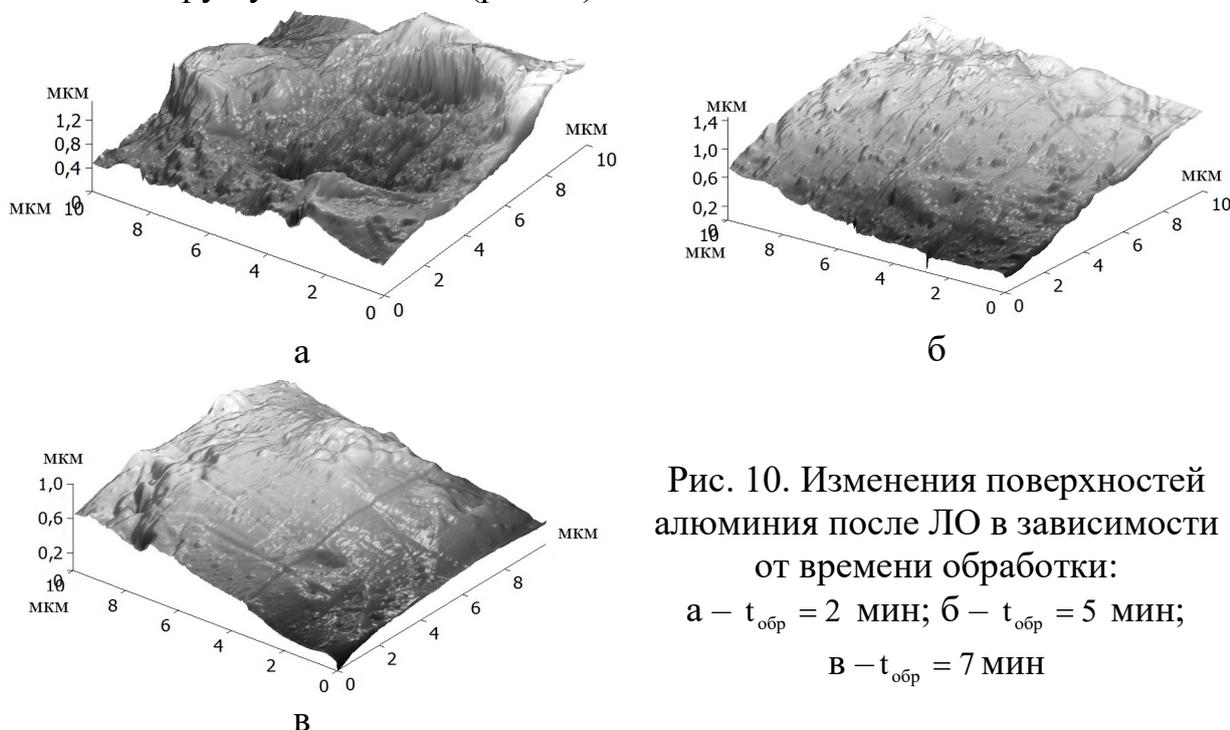


Рис. 10. Изменения поверхностей алюминия после ЛО в зависимости от времени обработки:

а – $t_{\text{обр}} = 2$ мин; б – $t_{\text{обр}} = 5$ мин;

в – $t_{\text{обр}} = 7$ мин

Из анализа полученных данных видно, что время обработки также оказывает влияние на наношероховатость поверхностей алюминия и нержавеющей стали X18H10T при ЛО и не существует никаких общих закономерностей этой зависимости от времени обработки наношероховатости. При малом времени обработки ($t_{\text{обр}} \leq 5$ мин) наношероховатость поверхностей заготовок уменьшается с ростом времени обработки. При времени обработки выше 5 мин с ростом времени обработки наношероховатость поверхности увеличивается для разных типов обрабатываемых поверхностей. Это объясняется тем что, чем больше время обработки, тем выше тепловой поток, проходящий через поверхность обрабатываемого образца и, следовательно, тем больше размер единичных лунок, что приводит к увеличению наношероховатости поверхности. Существует различие между зависимостями наношероховатости и микрошероховатости поверхностей от времени обработки. Микрошероховатость поверхности алюми-

ния значительно уменьшается с ростом времени обработки, а наношероховатость – увеличивается. Микрощероховатость поверхности нержавеющей стали X18H10T с ростом времени обработки увеличивается, а наношероховатость – уменьшается. Возможно, что причиной этого различия является структура самого поверхностного слоя обрабатываемых образцов (рис.11).

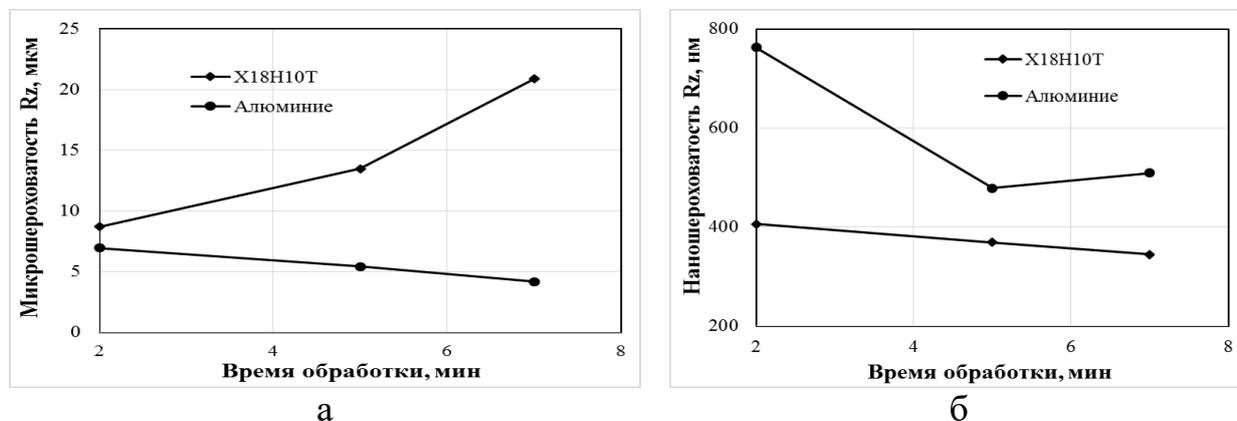


Рис.11. Зависимости микрощероховатости (а) и наношероховатости (б) поверхности материалов после ЛО от времени обработки

С увеличением времени обработки упрочнению подверглись поверхности из всех рассматриваемых материалов. Упрочнение поверхности всех образцов может происходить в результате процесса быстрого нагрева и охлаждения материала поверхности образца, который находится в окрестности подвергнутой лазерным воздействием области детали. Микротвердость нержавеющей стали X18H10T значительно выше микротвердости алюминия. Максимальная величина микротвердости достигнута при обработке нержавеющей стали X18H10T и составила 310 МПа, т.е. возросла в 1,7 раза. Для алюминия рост микротвердости при увеличении времени обработки не столь значительный. Нанотвердость нержавеющей стали X18H10T составила 6,97 ГПа. Нанотвердости поверхности образцов из алюминия измерить не удалось, так как полученные нанорельефы этих образцов слишком велики и, следовательно, затруднен процесс царапания поверхности (рис.12).

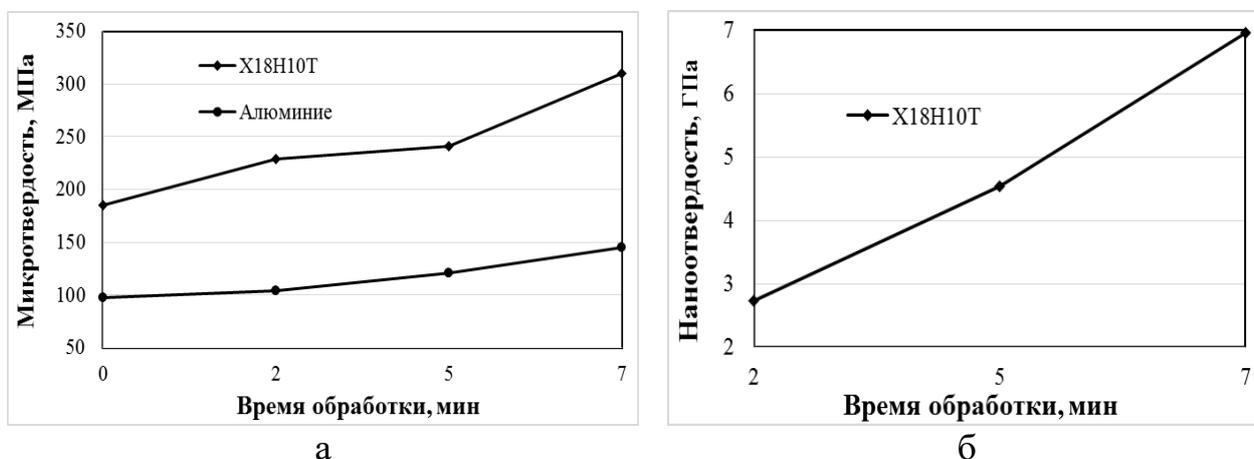


Рис.12. Зависимости микротвердости (а) и нанотвердости (б) поверхности материалов после ЛО от времени обработки

Кроме этого, проведено исследование нанощероховатости поверхности алюминия АО после ЭЭО. Нанощероховатость поверхности алюминия составила $R_a = 1211$ нм и $R_z = 4560$ нм. Для оценки геометрических параметров рельефа были использованы СЗМ-изображения в разных сечениях. По профилограмме сечений произведена оценка высотных характеристик, углов при вершине граней, а также шагов неровности. По полученным результатам можно судить о геометрических параметрах рельефа: высота элементов рельефа составляет 220 – 660 нм, шаги неровностей поверхности 2,51 – 4,98 мкм, а двугранный угол при вершине $65^{\circ}58'$ – $75^{\circ}16'$. Таким образом, поверхность материалов после ЭЭО имеет наибольшую нанощероховатость по сравнению с поверхностями после ЭХО и ЛО.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в установлении нанопараметров качества поверхности металлов и сплавов после ЭФХО и определения соотношения между микро- и нанопараметрами качества поверхности. В результате выполнения работы были сделаны следующие выводы:

1. Проведен анализ современного состояния вопроса о влиянии параметров процесса обработки на показатели качества поверхности на микро- и наночастицах. Определено, что после ЭФХО на микрошероховатость и микротвердость поверхности материалов значительное влияние оказывают параметры самого процесса обработки. Установлено, что в настоящее время недостаточно приведены сведения о нанощероховатости и нанотвердости поверхности материалов после ЭФХО, и отсутствуют данные об оценке уровня влияния параметров процесса обработки на эти показатели.

2. Проведены теоретические исследования процесса выравнивания высоты исходной микро- и нанощероховатости поверхности материалов после ЭХО при различных условиях. Установлено, что при ЭХО с учетом поляризации электрода и неравномерности потенциала поверхности электрода на скорость выравнивания микрошероховатости оказывают влияние числа Вагнера и показателя неравномерности потенциала электрода незначительно, а на скорость выравнивания нанощероховатости – это влияние достаточно велико: чем выше число Вагнера, тем меньше приложенный к аноду потенциал, что приводит к снижению скорости её выравнивания.

3. Спроектирована и создана экспериментальная установка для проведения ЭХО при плотности тока 0–30 А/см² в водном растворе 5-, 10-; и 15 %-ного NaCl. С помощью созданной установки получены обработанные поверхности образцов из нержавеющей стали X18H10T с высоким качеством: микрошероховатость $R_a = 0,086$ мкм и $R_z = 0,436$ мкм, т.е. уменьшается на 20 – 30 раз в сравнении с ее значением до обработки, микротвердость 310 МПа, нанощероховатость $R_a = 58,5$ нм; $R_z = 128,6$ нм, нанотвердость 5,06 ГПа.

4. Проведено исследование нанощероховатости поверхности нержавеющей стали X18H10T после ЭХО с помощью сканируемой зондовой микроско-

пии. Установлено, что на полученных поверхностях нержавеющей стали X18H10T после ЭХО при низкой величине плотности тока ($7,07 \text{ А/см}^2$) наблюдается большое количество каверн и кратеров диаметром 3–4 мкм; с увеличением плотности тока ($28,3 \text{ А/см}^2$) количество и диаметр каверн и кратеров уменьшаются и одновременно образуются выступы. Это связано с неоднородностью структур поверхности образцов и избирательным растворением разных фаз материалов поверхности.

5. Определен уровень влияния параметров процесса ЭХО (плотности тока и концентрации электролита) на микро- и наношероховатость поверхности нержавеющей стали X18H10T. Найдены сходства и отличия микро- и наношероховатости поверхности, связанные с ростом плотности тока и концентрации электролита. После ЭХО микро- и наношероховатость уменьшается, но закономерность их изменения – различна. Вероятно, что отличие связано с тем, что на наношероховатость оказывают влияние не только параметры процесса обработки, но и структура, размер зерен и химический состав самих обрабатываемых поверхностных слоев.

6. Проведено сравнение уровней влияния параметров процесса ЭХО (плотности тока и концентрация электролита) на микро- и нанотвердость поверхности нержавеющей стали X18H10T. Установлено, что с ростом плотности тока и концентрации электролита микро- и нанотвердость поверхности нержавеющей стали X18H10T достигают 261 МПа и 5 ГПа соответственно. ЭХО в водном растворе 10 %-ного NaCl показала, что при увеличении плотности тока в 3 раза приводит к увеличению микротвердости в 0,6 раза, а наношероховатость – в 5 раз.

7. Проведено исследование наношероховатости поверхности алюминия и нержавеющей стали X18H10T после лазерной обработки в зависимости от времени обработки. С ростом времени обработки каверны постепенно заполняются, количество наплывов увеличивается, а ширина и высота их уменьшаются. Вершины наплывов становятся более острыми. Определено различие между зависимостями величин микро- и наношероховатости поверхности от времени обработки. Микрошероховатость поверхности алюминия АО с ростом времени обработки значительно уменьшается, а наношероховатость – увеличивается. Для нержавеющей стали X18H10T микрошероховатость поверхности увеличивается с ростом времени обработки, а наношероховатость – уменьшается.

8. Проведено исследование микро- и нанотвердости поверхности образцов из алюминия АО и нержавеющей стали X18H10T после лазерной обработки в зависимости от времени обработки. С повышением времени обработки упрочнению подверглись поверхности всех рассматриваемых материалов. Нанотвердость нержавеющей стали X18H10T составила 6,97 ГПа.

9. Проведено исследование наношероховатости поверхности алюминия после электроэрозионной обработки. Установлено, что после электроэрозионной обработки наношероховатость поверхности алюминия составила $R_a = 1211 \text{ нм}$ и $R_z = 4560 \text{ нм}$. По полученным результатам можно судить о геометрических

параметрах рельефа: высота элементов рельефа 220 – 660 нм, шаги неровностей поверхности 2,51 – 4,98 мкм, а двугранный угол при вершине $65^{\circ}58'$ – $75^{\circ}16'$.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Нгуен Тхи Хонг. Разработка электрохимической ячейки для анализа качества поверхности материала после электрохимической обработки // Научные труды Международной молодежной научной конференции «XXXIX Гагаринские чтения»: в 9 т. Москва, 9-13 апреля 2013 г. М.: МАТИ, 2013. Т3. С. 155 – 156.

2. Нгуен Тхи Хонг. Исследование нано- и микрошероховатости поверхности деталей из 1X18Н10Т после электрохимической обработки // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 12. Ч. 1. С. 11 – 16.

3. Нгуен Тхи Хонг. Исследование наношероховатости деталей из 1X18Н10Т после электрохимической обработки // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 1. Ч. 1. С. 140 – 145.

4. Нгуен Тхи Хонг. Нанорельефы поверхностей образцов из нержавеющей стали X18Н10Т после электрохимической обработки // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 1. Ч. 1. С. 146 – 151.

5. Нгуен Тхи Хонг. Разработка электрохимической ячейки для анализа качества поверхности материала после электрохимической обработки // Научные труды Международной молодежной научной конференции «XL Гагаринские чтения»: в 9 т. Москва, 7-11 апреля 2014 г. М.: МАТИ, 2013. Т3. С. 153 – 154.

6. Нгуен Тхи Хонг. Высокие критические электро- и нанотехнологии // Труды I Региональной научно-технической конференции. Тула, 29 октября 2014 г., Изд-во ТулГУ 2014. С. 138 – 141.

7. Нгуен Тхи Хонг. Исследование нанотвердости поверхностей деталей из x18н10т после электрохимической обработки // Сборник Международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества»: в 14 т. Тамбов, 30 апреля 2015 г. ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. Т. 1. С.89 – 92.

Подписано в печать .09.2015.

Формат бумаги $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 0,9. Уч.-изд. л. 0,8.

Тираж 100 экз. Заказ .

Тульский государственный университет.
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.
300012, г. Тула, пр. Ленина, 97, а