

XI Международный технологический форум
«ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОИЗВОДСТВО»

Автоматизация технологических процессов электролитно-плазменной обработки для удаления покрытий и полирования поверхности на основе диагностики состояния поверхностного слоя

Парфенов Е.В., Хаматдинов Р.З., Аубакирова В.Р. (Уфимский университет науки и технологий)
Виноградов А.И., Макаров М.В. (ООО «Космические транспортные системы»)

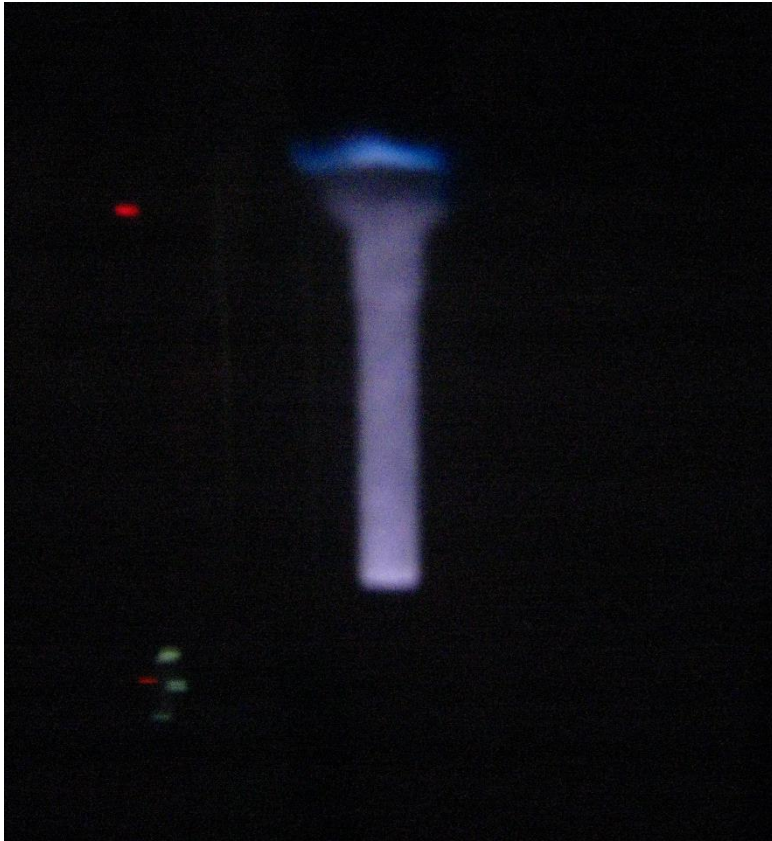


Рыбинск, 17 - 18 апреля 2025

План доклада

1. Особенности электролитно-плазменной обработки
2. Исследование удаления алюминидных покрытий с российских и импортных лопаток методом ЭПП
3. Методы диагностики шероховатости и толщины съема слоя в ходе ЭПП
4. Автоматизированные установки ЭПП для удаления покрытий и полирования поверхности на основе диагностики состояния поверхностного слоя

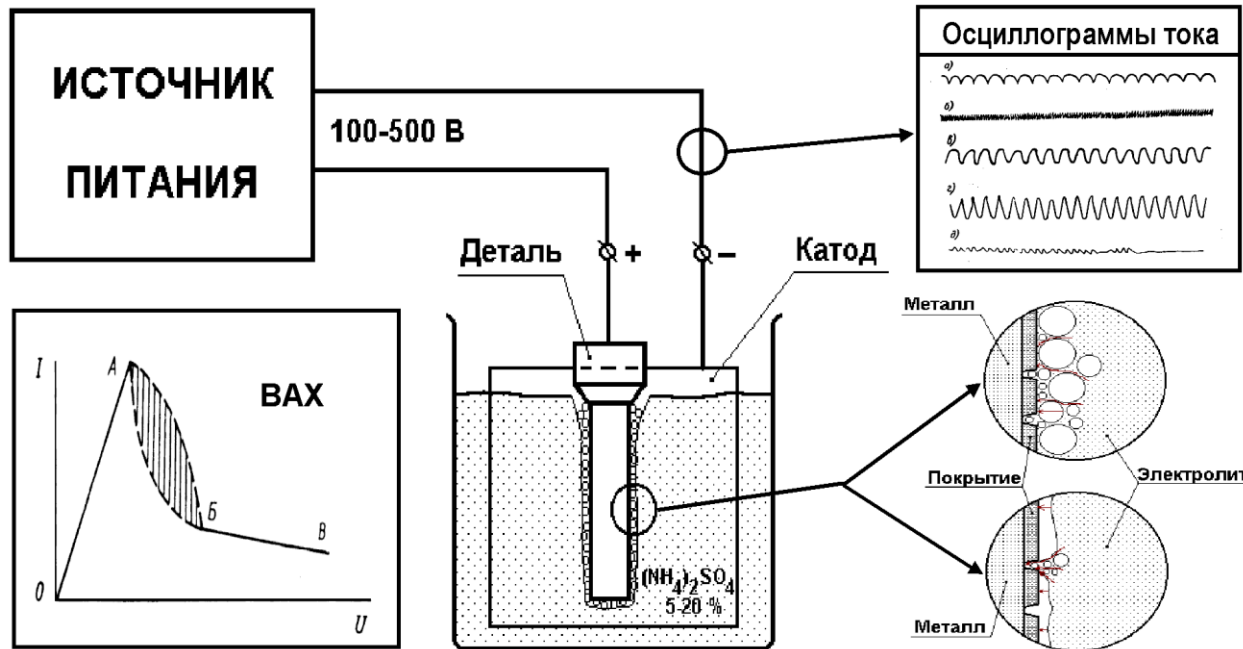
1. Особенности электролитно-плазменной обработки



ЭП удаление алюминидного покрытия со сплава ЖС6У, 370 В, 50 °С 5 минут. Выдержка 1 с.

- Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) – разновидность электрохимической обработки, проводимой при повышенных напряжениях порядка 150-600 В
- Отличительные особенности – парогазовая оболочка (ПГО) и микроразряды
- Применительно к электролитно-плазменному полированию (ЭПП): обработка на аноде (источник напряжения)
- Распределенный тлеющий разряд с электролитным катодом
- Пузырьковый или переходный тип кипения в парогазовой оболочке
- Проводящая поверхность детали (малая доля оксидов)
- Щадящее электроэрозионное воздействие (легкое упрочнение)
- Гидродинамическое полирование поверхности

Особенности электролитно-плазменной обработки



Типы кипения в ПГО:

- пузырьковый
- пленочный
- переходный

Виды микроразрядов:

- локализованный в порах покрытия
- распределенный в ПГО

Основное падение напряжения:

- на парогазовой оболочке (проводящая поверхность детали)
- на оксидном слое (непроводящая поверхность детали)

- **Экологическая безопасность**
 - Водные растворы безопасных солей низкой концентрации
- **Высокая скорость обработки**
 - Удаление покрытий (ЭПП) – 1...3 мкм/мин
 - Рост покрытий (ПЭО/МДО) – 1...3 мкм/мин
- **Высокое качество обработки**
 - Шероховатость Ra после ЭПП – до 0,1 мкм
 - Токи коррозии после ПЭО/МДО уменьшаются как минимум на порядок
- **Значительное энергопотребление**
 - 100...600 В; 0,1...1,0 А/см², 100...500 Вт/см²
- **Нелинейность электрической нагрузки**
 - Участки ВАХ с отрицательным динамическим сопротивлением
- **Повышенные требования безопасности**
 - Используемые напряжения намного выше, чем при традиционной электрохимической обработке

Влияние парогазовой оболочки на процесс ЭПП

Устойчивая ПГО
пузырьковый тип кипения



Толстая ПГО (350 В, 90 °С)
Видео со светом и без света
Результат: ЭПП

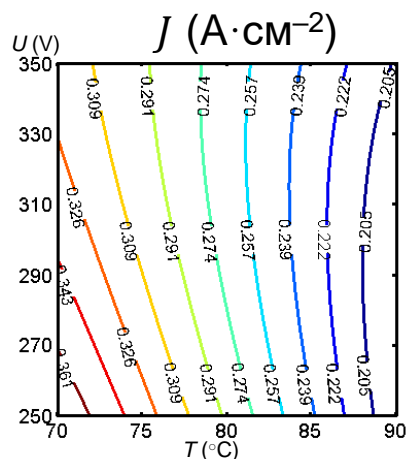
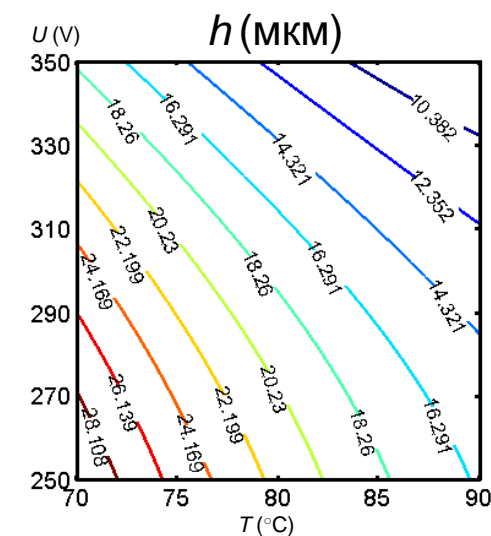
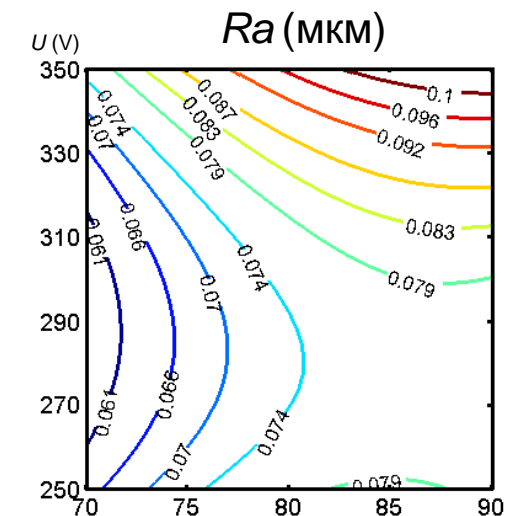
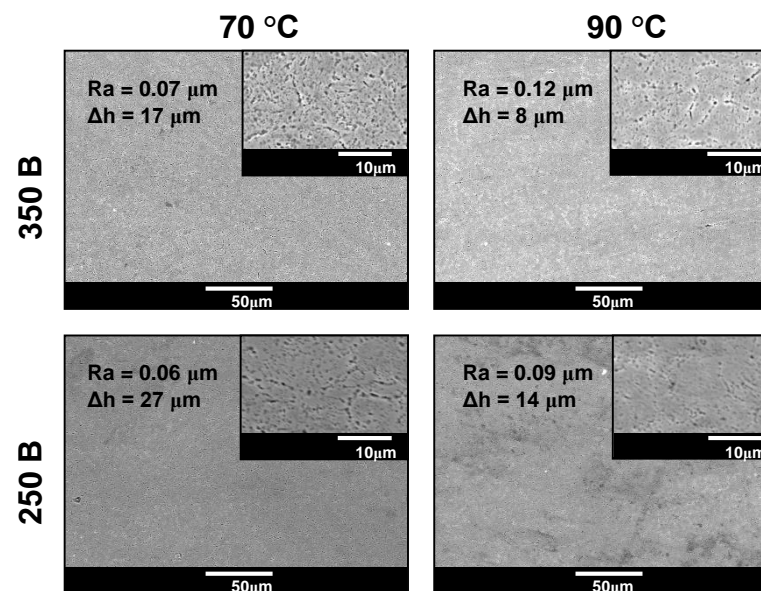
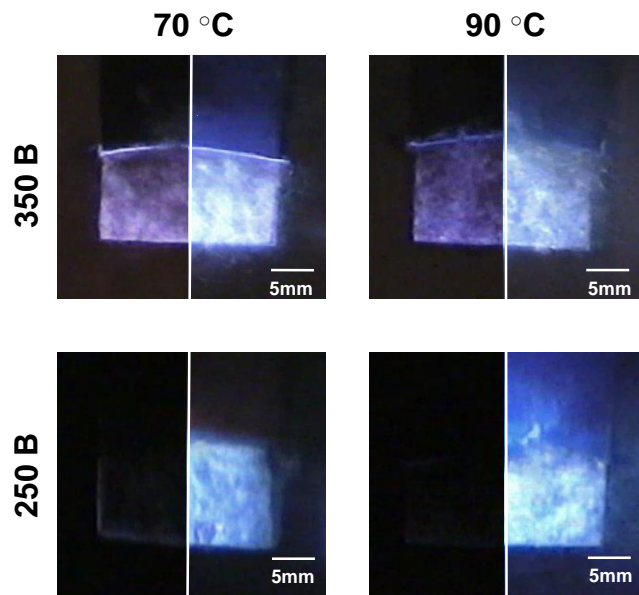
Неустойчивая ПГО
переходный тип кипения



Тонкая ПГО (250 В, 70 °С)
Видео со светом
Результат: растрав поверхности

Цилиндрические образцы, диаметр 5 мм, длина 50 мм, сплав ЖС6У

Рабочие характеристики и механизм процесса ЭПП

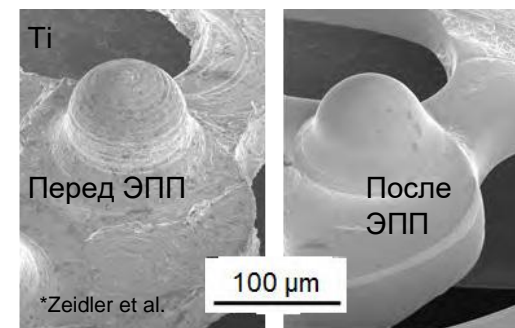


Механизм явлений:

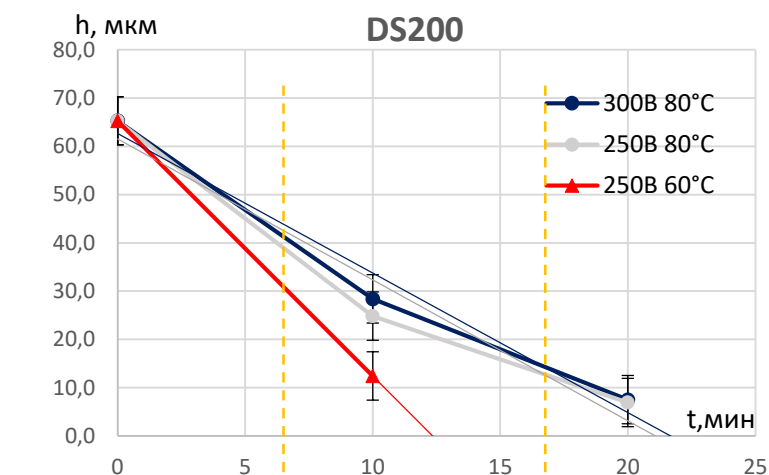
- Плазменный разряд / свечение не влияет на плотность тока, шероховатость и толщину съема металла
- Следовательно, доминирующий механизм ЭПП – электрохимическое анодное растворение
- Роль ПГО – предотвращение осаждения оксидов / гидроксидов Fe, Cr, Ni, Al на поверхность

Типичные применения электролитно-плазменного полирования

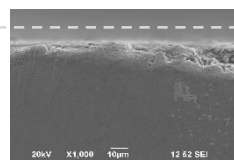
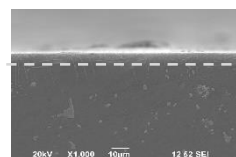
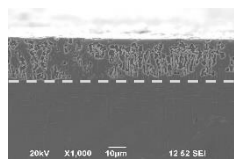
- Первый патент – ГДР, No. 238074, авторы Хойер Х. и др. (1986)
- Полирование изделий из нержавеющей стали
 - Медицинские инструменты и имплантаты
 - Лопатки газовых турбин
 - Бижутерия
- Удаление покрытий при ремонте лопаток ГТД
- Полирование деталей из конструкционных сталей
- Полирование деталей из медных, никелевых, хромовых сплавов
 - Запорная арматура
 - Медицинские имплантаты
- Полирование деталей из титановых сплавов
 - Медицинские имплантаты
 - Лопатки компрессоров
- Полирование металлических изделий, получаемых аддитивными технологиями



2. Исследование удаления алюминидных покрытий методом ЭПП



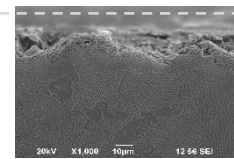
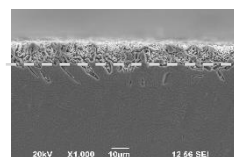
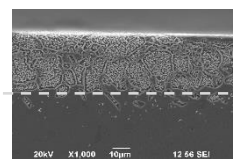
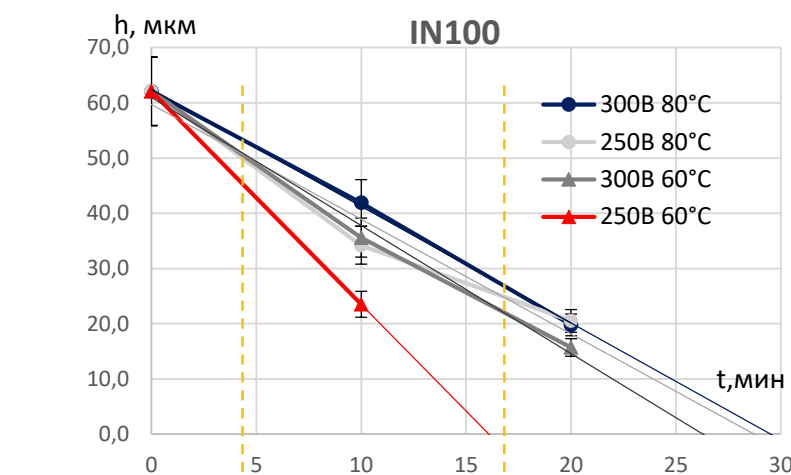
300 В 80°C



Внешняя зона

Внутренняя зона

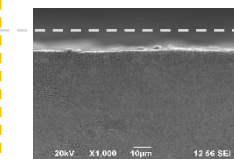
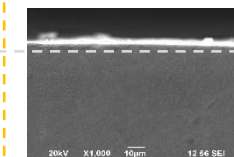
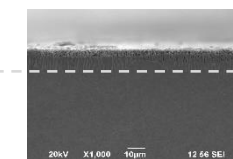
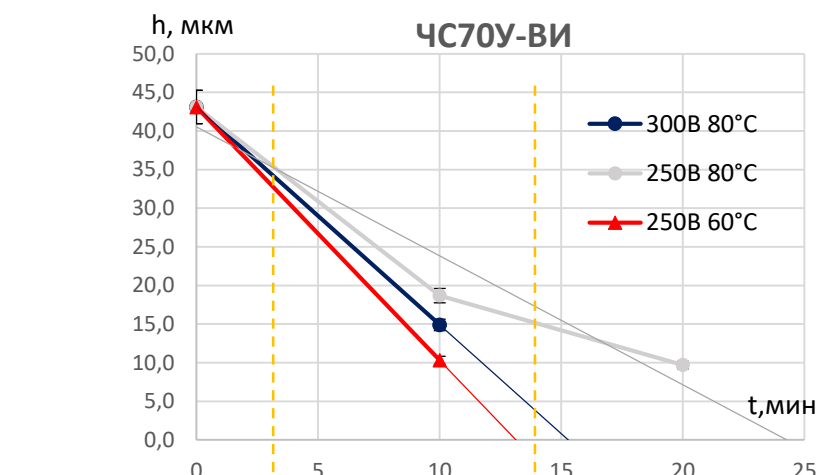
Сплав



Внешняя зона

Внутренняя зона

Сплав



Внешняя зона

Внутренняя зона

Сплав

- Удаление покрытия идет послойно, с различной скоростью для разных покрытий, условий и электролитов
- Превалирует механизм анодного растворения, нет электроэрозионного повреждения поверхности

Исследование удаления алюминидного покрытия методом ЭПП

Лопатка второй ступени из IN100



Исходное

5 минут

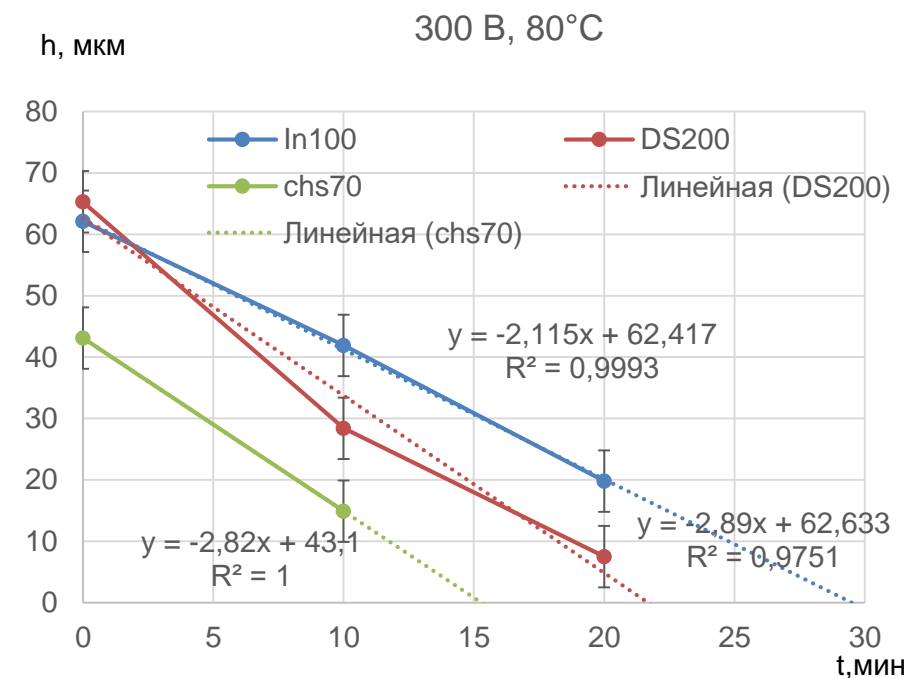
10 минут

15 минут

20 минут

Алюминидное покрытие удаляется полностью:

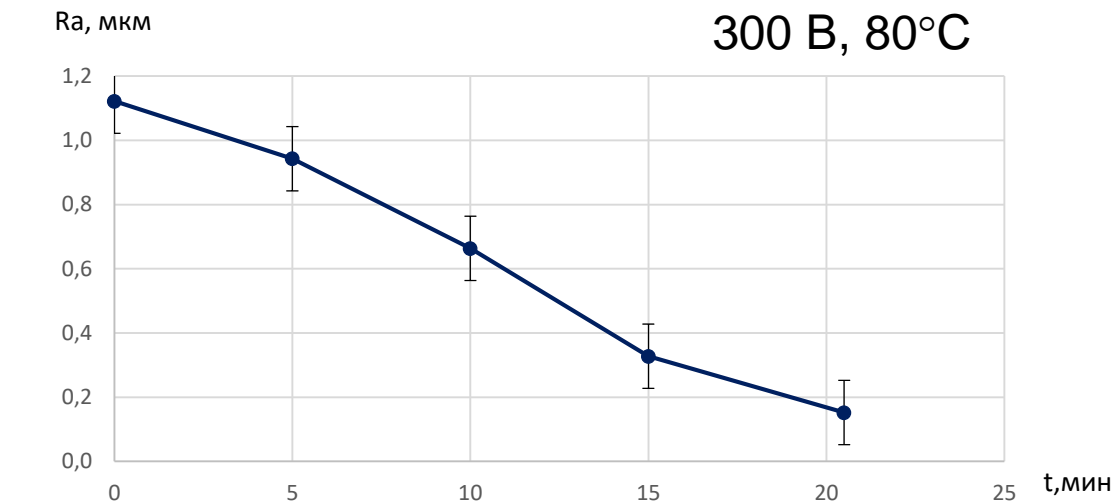
- с лопатки из сплава DS200 за 21-22 минуты
- с лопатки из сплава IN100 за 28-29 минут
- с лопатки из сплава ЧС70У-ВИ за 15-16 минут



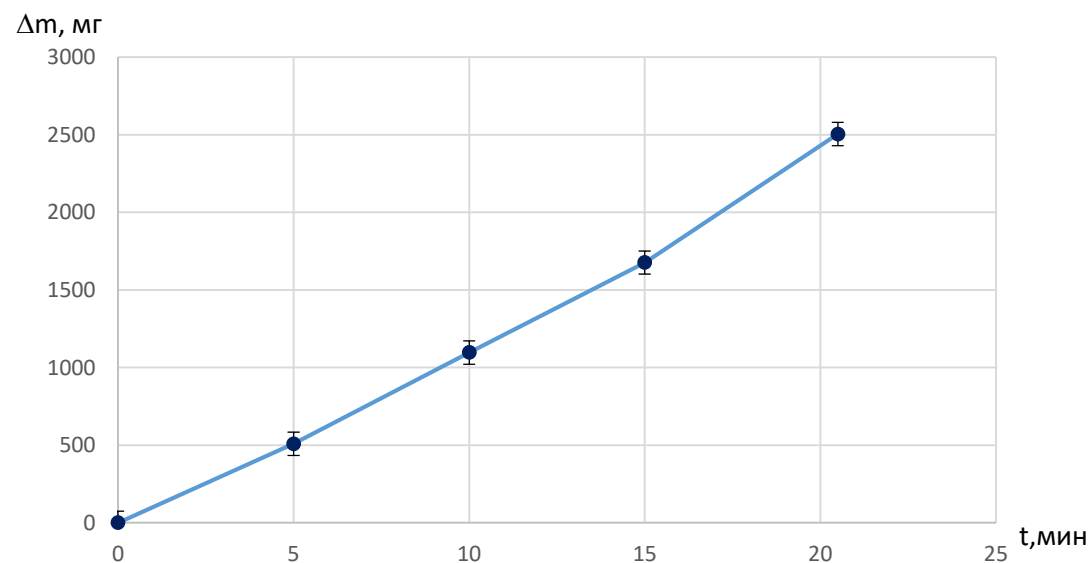
Условия обработки:

- Напряжение 300 В
 - Температура электролита 80 °С
- обеспечивают удаление покрытия без растрыва

Пример: результаты ЭПП лопатки второй ступени из IN100



Профиль поверхности до ЭПП



Профиль поверхности после 20 минут ЭПП



3. Методы диагностики шероховатости и толщины съема слоя в ходе ЭПП

		$U = 250 \text{ В}$	$U = 300 \text{ В}$	$U = 350 \text{ В}$	R^2
Шероховатость поверхности $Ra, \text{ мкм}$ $Ra = A \cdot \exp(-t / \tau) + C$ $R^2 = 0,992$ Апериодическое звено 1-го порядка					0,99
Толщина съема поверхностного слоя $h, \text{ мкм}$ $h = v \cdot t,$ $R^2 = 0,998$ Интегрирующее звено					0,99

 $T = 70(-), 80(-), 90(-) \text{ } ^\circ\text{C}$

Линии № 1,3,5 - $Ra_0 = 0,32 \text{ мкм}$

Линии № 2,4,6 - $Ra_0 = 0,63 \text{ мкм}$

Материал 20X13

Способ диагностики шероховатости в ходе ЭПП

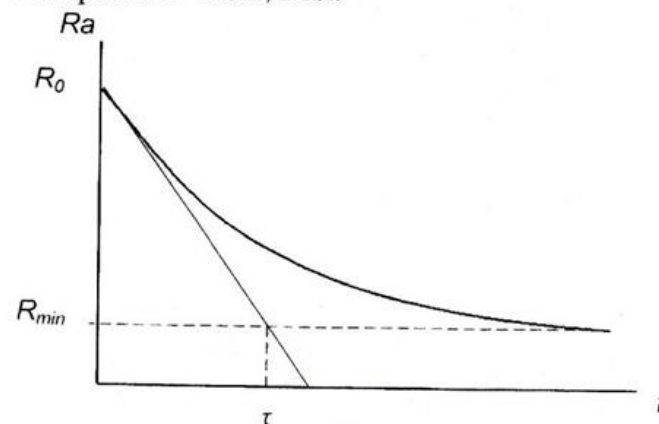
RU 2 475 700 C1

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

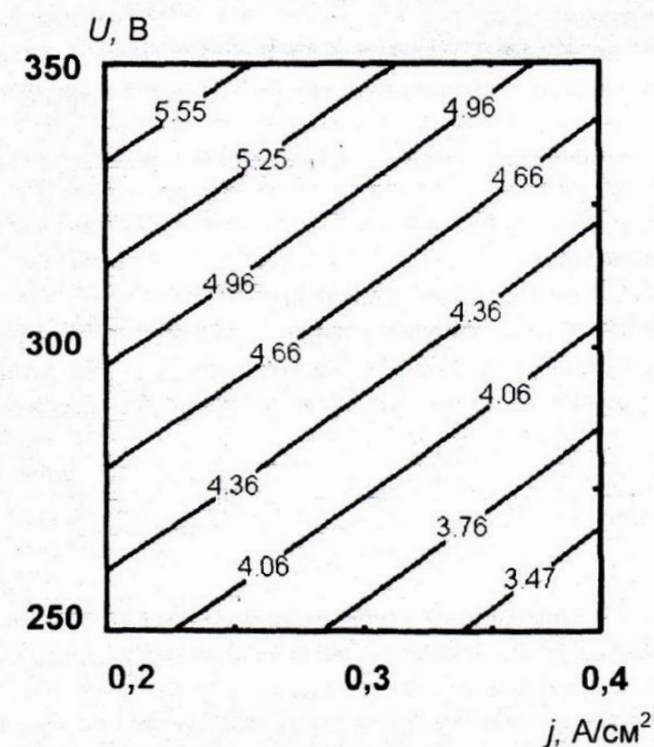
(57) Реферат:

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано в машиностроении для контроля шероховатости поверхности электропроводных изделий, например, из нержавеющей стали в процессе электролитно-плазменной обработки. Сущность: прикладывают высоковольтное напряжение между обрабатываемой деталью, являющейся анодом, и катодом. Измеряют значения плотности тока j и высоковольтного напряжения U . Шероховатость поверхности в ходе обработки определяют по формуле: $Ra = R_{min} + (R_0 - R_{min}) / \exp(t / (\tau_0 + k_1 j + k_2 U))$, где R_{min} - минимально достижимая для используемого электролита шероховатость поверхности; R_0 - начальное значение шероховатости поверхности обрабатываемой детали; t - время; j - плотность тока; U - напряжение; τ_0 - среднее значение постоянной

времени; k_1 , k_2 - коэффициенты пропорциональности, зависящие от материала детали, природы и концентрации электролита. Величины τ_0 , k_1 , k_2 вычисляют по семейству тарировочных кривых зависимости постоянной времени снижения шероховатости от напряжения U и плотности тока j . Технический результат: увеличение быстродействия измерения. 1 табл., 2 ил.



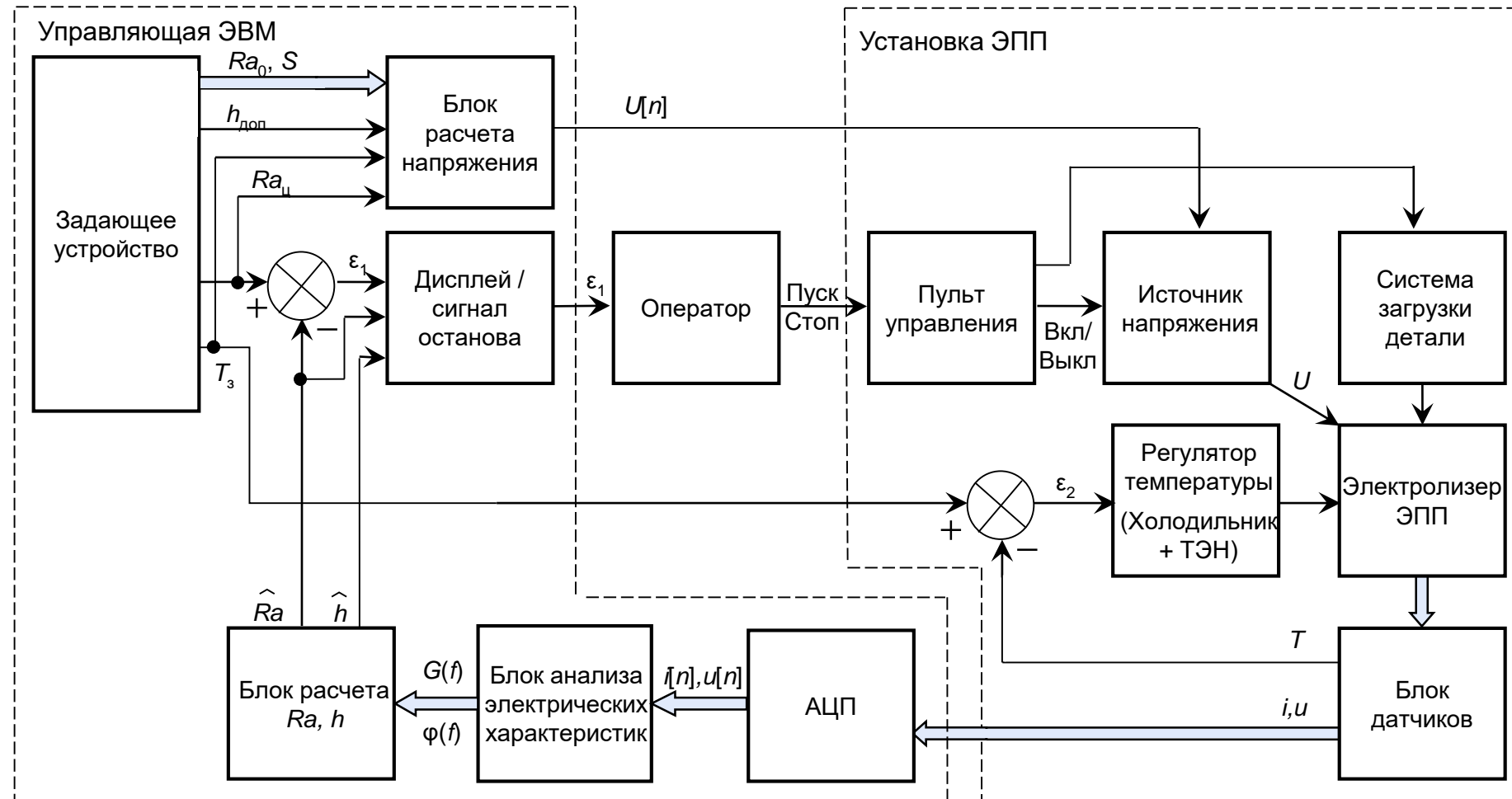
Фиг.1



Фиг.2

Получены патенты (RU): 2119975, 2133943, 2202451, 2227181, 2240500, 2360045, 2440878, 2475700

4. Структура АСУ ТП ЭПП



- Новый контур обратной связи обеспечивает диагностику ненаблюдаемых характеристик поверхностного слоя – шероховатости поверхности и толщины съема слоя, что позволяет своевременно остановить процесс ЭПП при достижении целевых значений

Установка для электролитно-плазменного полирования



Технические характеристики установки ЭПП:

Мощность	до 18 кВт
Рабочее напряжение	300 В
Максимальный ток	63 А
Температура электролита	70-90 °С
Плотность тока	0,3-0,6 А/см ²
Объем ванны	30 л
Обрабатываемая площадь	до 200 см ²
Достигаемая шероховатость Ra	0,05 мкм
Длительность обработки	до 5 минут
Обрабатываемые материалы:	нержавеющие стали, никелевые суперсплавы, кобальт-хромовые, медные сплавы

Техническая задача:

Снижение шероховатости поверхности изделий на 2 класса, вплоть до зеркального блеска, при использовании водных нетоксичных солей малой концентрации, на основе воздействия парогазовой оболочки и анодного растворения

Имеющийся задел:

Защищено 2 кандидатских и 1 докторская диссертации, реализовано 2 гранта РФФИ

Уровень готовности технологии:

TRL 6 – Полнофункциональный образец

Патенты РФ:

2240500, 2360045, 2440878, 2475700

Предприятия-партнеры:

ООО «ЕСМ», НПА «Технопарк АТ»

Особенность разработки:

Контроль шероховатости поверхности в ходе ЭПП на основе косвенной диагностики по спектральным параметрам электрических характеристик

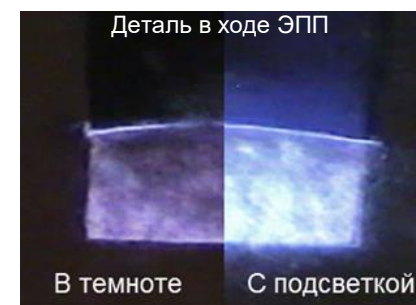
Краткое описание разработки

Разработана опытно-промышленная установка ЭПП, обеспечивающая эффективную и экологически безопасную полировку деталей сложной формы.

Краткое описание технологии

Электролитно-плазменное полирование (ЭПП) – электрохимическая обработка при больших напряжениях 250-350 В. Деталь подключается в качестве анода и обрабатывается в электролизере. Отличительные особенности – парогазовая оболочка, низко-температурная плазма.

Технологический результат



Потенциальные заказчики

Предприятия машиностроения, производители медицинской техники, метизов, столовых приборов, бижутерии

Выводы

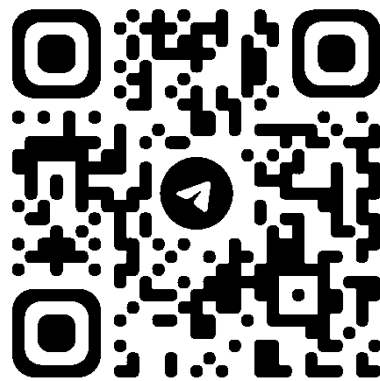
1. Электролитно-плазменная обработка – это электрохимическая обработка при высоких напряжениях, отличающаяся образованием парогазовой оболочки и/или микроразрядов
2. Показана возможность удаления методом ЭПП алюминидных покрытий толщиной 40-70 мкм с ремонтных импортных лопаток из сплавов IN100 и DS200 и с отечественных лопаток из ЧС70У-ВИ за время не более 30 минут
3. Продемонстрированы методы диагностики ненаблюдаемых характеристик поверхностного слоя – шероховатости поверхности и толщины съема слоя в ходе процесса ЭПП
4. Показана структура автоматизированных установок ЭПП для удаления покрытий и полирования поверхности на основе диагностики состояния поверхностного слоя, позволяющих своевременно остановить процесс ЭПП при достижении целевых значений
5. Предлагается поставка установок ЭПП производства УУНиТ для ремонта лопаток ГТД

Контакты

Парфенов Евгений Владимирович

+7 917 406 2250

evparfenov@mail.ru



@EVGENY_PARFENOV

