



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки;

2.5.6 – технология машиностроения

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СТРУЙНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITY OF MANAGING THE ROUGHNESS PARAMETERS OF STAINLESS STEELS IN THE PROCESS OF JET COMBINED ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT

Попов Александр Иннокентьевич, к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Popov Alexander Innokentievich, candidate of technical sciences, associate professor of the Higher school of mechanical engineering, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрена технологическая возможность управления параметрами шероховатости поверхности в широком диапазоне значений, от обработки поверхностей, выполненных на заготовительных операциях до финишной обработки на наноуровне. В исследованиях использовались образцы из сталей 20X13, 08X18N9T, AISI 304, AISI 310, материалы полученные SLM технологией, сталь AISI 316L, никелевые жаропрочные сплавы ЭП648, Инконель 718. Показано, что технологически обработка предполагает последовательное выполнение комбинированной обработки фокусированной струей электролитной плазмы с последующей финишной обработкой фокусированной плазмой разряда подобного тлеющему. Показано, что предварительная обработка позволяет снизить параметр шероховатости с Ra 80 мкм до Ra 0,2 мкм для разных нержавеющей сталей и сплавов, полученных технологией SLM, а финишная обработка позволяет снизить параметр шероховатости с Ra 0,2 до Ra 0,004 мкм, как например для нержавеющей стали 08X18N9T. Атомно-силовая микроскопия показывает, что поверхность образцов из нержавеющей стали после струйной электролитно-

Annotation. This article discusses the technological possibility of controlling surface roughness parameters in a wide range of values, from processing surfaces made in the preparation operations to finishing at the nanoscale. The studies used samples made of 20Kh13, 08Kh18N9T, AISI 304, AISI 310, materials obtained by SLM technology, AISI 316L steel, and nickel-based heat-resistant alloys such as EP648 and Inconel 718. It was shown that the processing involves a sequential combination of focused electrolyte plasma jet processing followed by focused glow discharge plasma finishing. It has been shown that pre-treatment can reduce the roughness parameter from Ra 80 μm to Ra 0.2 μm for various stainless steels and alloys produced by SLM technology, while finishing can reduce the roughness parameter from Ra 0.2 to Ra 0.004 μm , as is the case for 08X18N9T stainless steel. Atomic force microscopy shows that the surface of stainless-steel samples after jet electrolyte-plasma treatment has an average surface height of Sa 11.713 nm at 2499.515 μm^2 . The results of these studies can be used for surface treatment of stainless steels and alloys in medicine and other fields.

плазменной обработки имеет среднеарифметическую высоту поверхности Sa 11,713 нм на 2499,515 мкм². Результаты данных исследований могут быть использованы для обработки поверхности нержавеющей сталей и сплавов в медицине и других областях.

Ключевые слова: АНОД, ЭЛЕКТРОЛИТ, СТРУЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД, ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ, МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА. **Keywords:** ANOD, ELECTROLYTE, JET, ELECTRIC DISCHARGE, PARAMETERS OF ROUGHNESS, MEDICAL TECHNOLOGY.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Обеспечение технологической безопасности России во многом зависит от внедрения новых решений, их апробации и, что важно, от разработки технических идей. Университеты играют значительную роль в генерации таких идей [1-4]. Одной из них актуальной на сегодня является идея, связанная с задачей управления параметрами шероховатости поверхности. Она особенно важна при производстве медицинской техники. Прежде всего, это связано с возможностью получения антибактериальных поверхностей, внедрением новых материалов [5-8]. Между тем, получение поверхности с низким параметром шероховатости Ra представляет собой определенную трудность. Это связано с применяемыми технологическими методами для снижения шероховатости. Среди них можно выделить механические, химические, электрохимические, электроэрозионные, электролитно-плазменные методы обработки поверхности. Механическое полирование позволяет получить параметр шероховатости Ra 0,05-0,4 мкм. Однако высокая трудоемкость ограничивает применение данного метода [9]. Химическим полированием с использованием сильных кислот можно получить минимальный параметр шероховатости Ra 0,8-0,2 мкм, при этом необходимо отметить отрицательное влияние процесса на здоровье обслуживающего персонала [10]. Электрохимический метод обработки в значительной мере снижает отрицательные факторы и позволяет снизить минимальный параметр шероховатости до $Ra \leq 0,01$ мкм [10, 11]. Метод электроэрозионной обработки позволяет получить чрезвычайно низкий параметр шероховатости Ra 0,002-0,32 мкм [12]. Однако данная технология имеет ограничения по конфигурации и размеру обрабатываемых изделий. Авторы работ [13-17] показывают возможность достижения минимального параметра шероховатости для нержавеющей сталей и титановых сплавов при электролитно-плазменной обработке в электролитической ванне в диапазоне Ra 0,060-0,004 мкм. Конкурирующим способом обработки в электролитической ванне является струйная электролитно-плазменная обработка. В наших работах показана возможность достижения электролитно-плазменной обработкой минимального параметра шероховатости поверхности в диапазоне Ra 0,034-0,020 мкм [18, 19]. Зарубежные авторы показывают достижение среднеарифметической высотной величины шероховатости поверхности Sa 29 нм для обработки в электролитической ванне и Sa 80 нм для струйной обработки [20, 21]. Обработка струей электролита имеет преимущества перед обработкой в электролитической ванне за счет более высокой скорости достижения заданного параметра шероховатости при достижении более высокой точности обработки и более низкой шероховатости поверхности [18, 19]. Однако до сих пор остается неясным вопрос о том, в каком диапазоне можно управлять параметрами шероховатости поверхности струйной обработкой и получать результаты, сопоставимые с обработкой в электролитической ванне.

Целью работы является анализ технологической возможности управления параметрами шероховатости нержавеющей сталей в процессе струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки.

Задачами работы являются проведение оптической, электронной, атомно-силовой микроскопии, анализ морфологии поверхности и параметров шероховатости, динамика изменения параметра шероховатости Ra после струйной электролитно-плазменной обработки.

2 Материалы и методы

При проведении научных исследований была использована экспериментальная установка для струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки. Установка имеет патент № 2623555 (правообладатель СПбПУ) [22]. Сущность комбинированной обработки заключается в последовательном технологическом подходе, заключающемся в предварительной обработке поверхности образцов электролитической струей, а затем финишном снятии микрообъемов материала для получения поверхности с низким параметром шероховатости поверхности Ra.

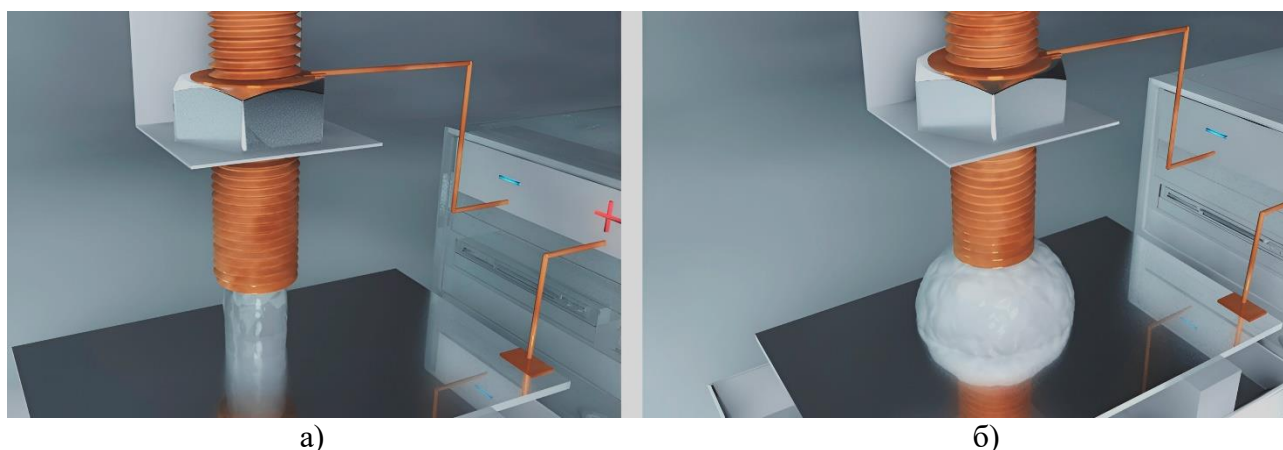


Рисунок 1 – Принципиальные схемы струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки струей электролита (а) и струйным объемным разрядом (б)

В исследованиях комбинированной обработке подвергались образцы из нержавеющей сталей 20X13, 08X18H9T, AISI 304, AISI 310, а также материалов из AISI 316L, ЭП648, Инконель 718, полученных технологией лазерного сплавления SLM. Образцы сталей были нарезаны лазером и механическими ножницами с размерами 30x30x1,5 мм, 50x50x1 мм. Образцы сплавов были напечатаны на 3D-принтере с размерами 30x20x2 мм. В качестве электролитов использовались растворы солей Na_2SO_4 и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

В исследованиях использовался диапазон режимов для струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки (табл. 1).

Таблица 1 – Исходные данные эксперимента

Параметр	Электрохимический режим	Электролитно-плазменный режим
Концентрация, г/л	20-40	20-40
Время обработки, с	660	2200
Напряжение, В	20-130	200-380
Ток разряда, А	1-5	0.01-0.5
Минутная подача, мм/мин	180-500	20-100
Объемный расход электролита, л/ч	10-90	2-10

Измерение параметров шероховатости поверхности проводили с использованием прибора измерения шероховатости профилометра MarSurf M 400 (Германия), профилометра MarSurf PS10 (Германия) со стандартным щупом РНТ6-350, координатно-измерительной машины (КИМ) Mitutoyo модели Crysta-Apex S574 серии 191 (Япония) с измерительным датчиком SurfTest SJ-310.

Оценку морфологии поверхности проводили с использованием металлографического микроскопа МЕТАМ ЛВ 31 (ЛОМО, Россия), съемкой с окуляра мобильным устройством Redmi, растровых электронных микроскопов SUPRA 55VP-25-78 (Германия), и Fei Inspect F50 (США), а также атомно-силового микроскопа модели Ntegra Aura (Россия) с виброизоляцией. Измерения на атомно-силовом микроскопе проводились полуконтактным методом по двум осям. Паспортный уровень шумов атомно-силового микроскопа по осям $< 0,1$ нм [23, 24].

3 Результаты исследований

3.1 Исследование поверхности сталей и сплавов методами оптической и растровой электронной микроскопии

3.1.1 Исследование поверхности сплавов, полученных технологией SLM методами оптической микроскопии

Воздействие струи электролитной плазмы на поверхность образцов сталей и сплавов, полученных технологией SLM и исследование процесса изменения морфологии поверхности методами оптической микроскопии нами подробно изложено в предыдущих работах [18, 19, 25]. Важным критерием, определяющим достижение конечного минимального параметра шероховатости поверхности, является подготовка поверхности и переход граничных условий нанометрового диапазона параметра шероховатости R_a , соответствующих величинам 0,1-0,2 мкм. Этому же диапазону соответствует и предельное достижение на сегодня параметра шероховатости R_a при выравнивании поверхности никелевых жаропрочных сплавов ЭП648, Инконель 718 и стали AISI 316L (рис. 2.). Это связано, прежде всего, с наличием многочисленных дефектов поверхности и объема, сформированных в процессе сплавления частиц металла и последующего гидростатического прессования образцов после технологии SLM.

3.1.2 Исследование исходной поверхности из стали 08X18H9T при малом начальном параметре R_a 0,4 мкм

Анализ морфологии поверхности без струйной фокусированной обработки показывает, что на поверхности имеются риски, не совпадающие с направлением неровностей шероховатости толщиной от 0,5-10 мкм (рис 3, а, б). Исходная поверхность имеет следы дефектов металлургического характера: поры, лунки с острыми краями по границам зерен (рис 3, а, б). При увеличении разрешения на снимке выявляются зерна металла разных размеров от 1 до 10 мкм (рис 3, б, в). Наблюдается четкое формирование границ зерен, как более легко удаляемой фазы металла (рис 3, б, в). Ширина границ зерен составляет величину от 0,1 до 0,4 мкм (рис 3, б, в).

3.1.3 Исследование поверхности стали 08X18H9T при малом начальном параметре R_a 0,4 мкм после струйной электролитно-плазменной обработки

Анализ морфологии поверхности, полученной после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки, показывает, что поверхность имеет ровный гладкий вид с отдельными дефектами в виде несплошностей (углублений) неправильной формы металлургического происхождения, полученных при прокатке листового материала (рис. 4, а).

Размеры дефектов составляют $\varnothing 0,1-0,3$ мм (рис. 4, а). Увеличение разрешения поверхности показывает, что поверхность в нескольких местах пересекается рисками случайного происхождения (рис. 4, б). На поверхности наблюдаются многочисленные места выхода дислокаций и границы кристаллитов (рис. 4, б).

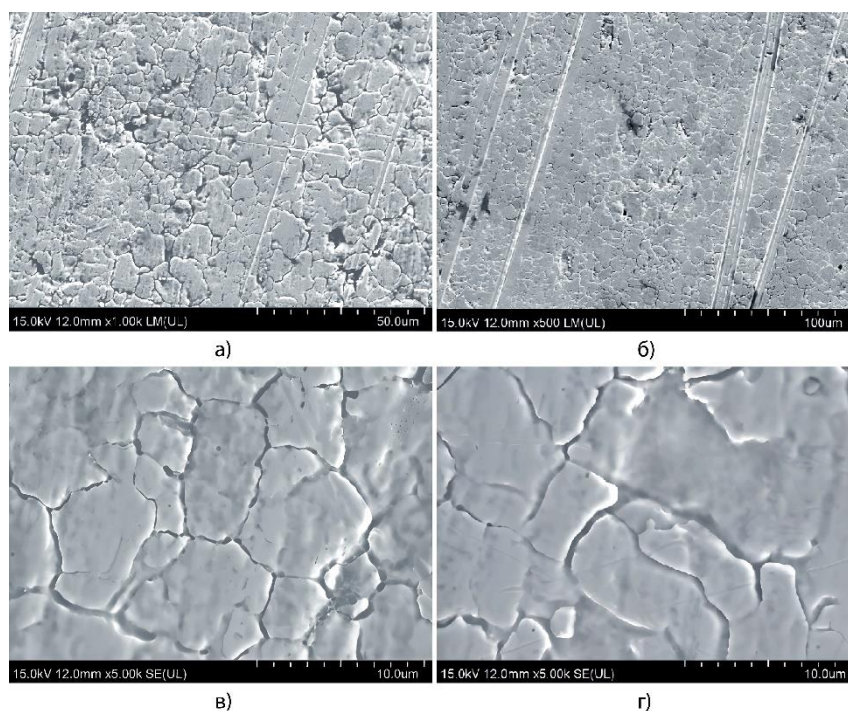
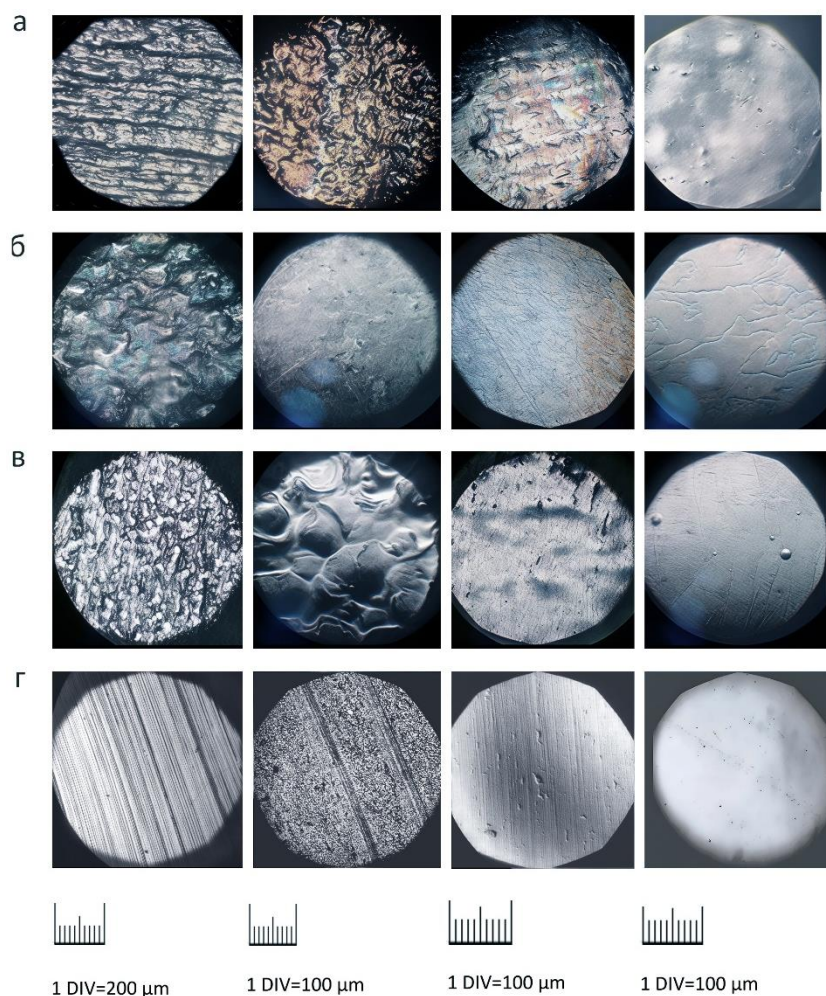
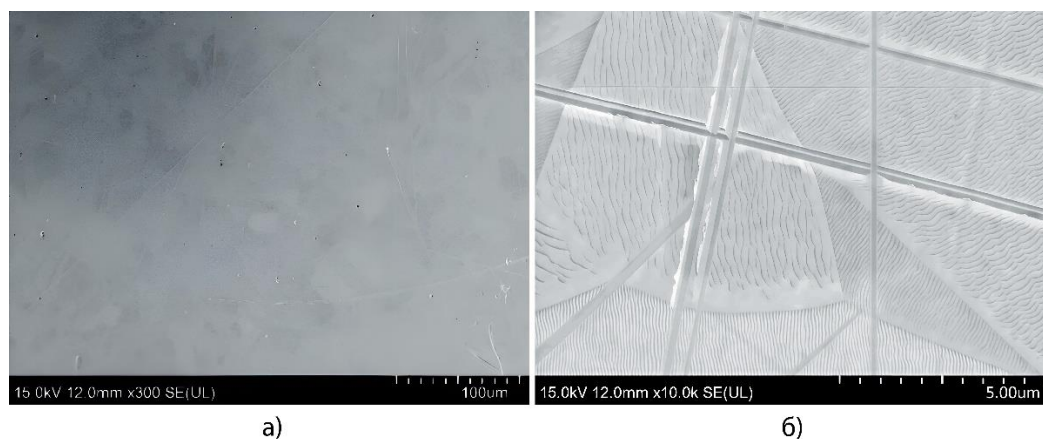


Рисунок 3 – Исходная морфология поверхности образца из стали 08X18H9Т, полученного прокаткой (РЭМ Fei Inspect F50)



а) поле 350x250 мкм; б) поле 12,5x7,5 мкм

Рисунок 4 – Морфология поверхности образца из стали 08X18H9T, полученного прокаткой после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки поверхности (РЭМ Fei Inspect F50)

3.2 Результаты измерений параметров шероховатости

3.2.1 Исследование поверхности после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки при исходном параметре шероховатости R_a 0,4 мкм

Измерение высоты микронеровностей поверхности профилометром SurfTest SJ-310 показывает высоту средней линии, равную 0,005 мкм на базовой длине 0,8 мм при наибольшей высоте неровностей профиля R_{max} , находящейся в диапазоне значений от -0,062 до 0,072 мкм (рис. 5).

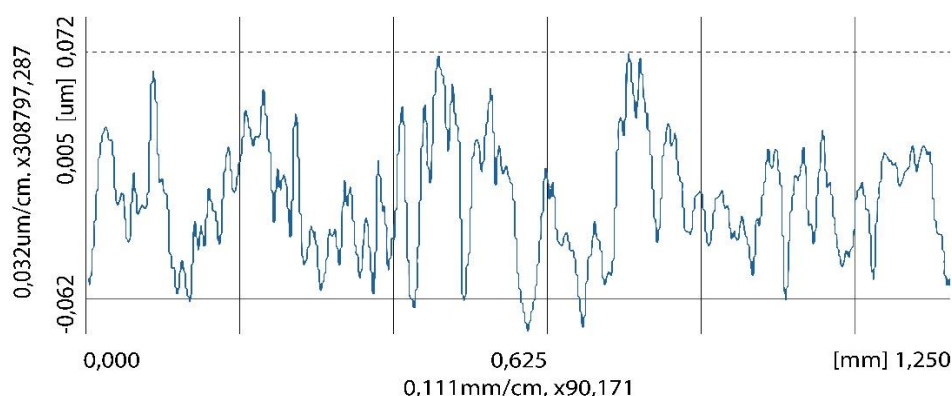
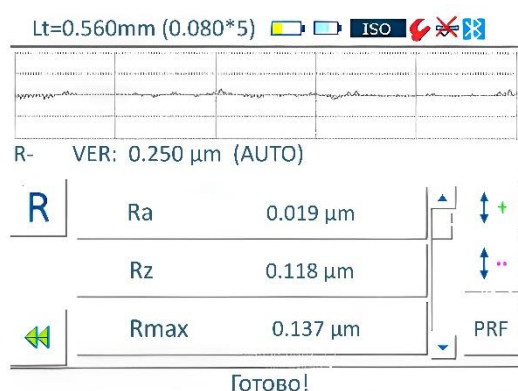


Рисунок 5 – Профилограмма поверхности образца, полученная на координатно-измерительной машине (КИМ) Mitutoyo модели Crysta-Apex S574 серии 191 с измерительным датчиком SurfTest SJ-310

Анализ воздействия струйной фокусированной электролитной плазмы на поверхность образца из стали 08X18H9T, полученного методом прокатки, показывает, что при исходной шероховатости R_a 0,4 мкм после струйной электролитно-плазменной обработки достигается параметр шероховатости R_a 0,019 мкм при длине трассы ошупывания $L_t = 0,560$ мм [26]. Результаты измерения представлены на рис. 6.

В результате исследований, выполненных на атомно-силовом микроскопе модели Ntegra Aura по оценке 3D-параметров поверхности при объеме выборки 65536 As и площади выборки 2499,515 мкм² нами получены следующие данные, приведенные в табл. 2.

Важным параметром при этом является то, что средняя арифметическая высота поверхности, полученная на площади выборки 2499,515 мкм² составила величину 11,713 нм. Измеренные параметры шероховатости для числа выборки 255,1 и длине выборки 49,799 мкм приведены в табл. 3.



а)



б)

Рисунок 6 – Результат измерения образца нержавеющей стали 08X18H9T прибором измерения шероховатости профилометре MarSurf M 400

Таблица 2 – Результаты оценки 3D параметров поверхности [27]

Обозначение параметра	Наименование параметра	Среднее значение ординаты	Размерность
<i>Параметры высоты</i>			
S_q	Среднеквадратичная высота поверхности	14,471	нм
S_a	Средняя арифметическая высота поверхности	11,713	нм
S_{sk}	Экссесс распределения высоты	2,839	
S_{sk}	Неравномерность распределения по высоте	-0,181	
S_z	Максимальная высота поверхности	156,959	нм
S_{10z}	Высота десяти точек	118,353	нм
S_p	Максимальная высота пика	134,639	нм
S_v	Максимальная глубина впадины	22,319	нм
<i>Пространственные параметры</i>			
S_{ds}	Плотность вершин поверхности	2,112	1/мкм ²
S_{sc}	Средняя кривизна вершин	0,309	1/мкм
S_{id}	Направление текстуры поверхности	-59,062	град
S_{idi}	Индекс направления текстуры поверхности	0,664	
S_{rw}	Радиальная длина волны	50,191	мкм
S_{rwi}	Радиальная длина волны	0,0286	
<i>Гибридные параметры</i>			
S_{dq}	Среднеквадратичный уклон поверхности	0,0422	
S_{daq6}	Среднеквадратичный уклон площади	0,0287	
S_{2A}	Проектируемая площадь	2499,515	
S_{3A}	Площадь поверхности	2501,739	
S_{dr}	Коэффициент площади поверхности	0,0889	%
<i>Стандартная статистика. Параметры стандартной статистики</i>			
	Объем выборки	65536	
	Площадь выборки	2499,515	мкм ²
	Среднее значение	38,298	нм
	Минимальное	-22,319	нм
	Максимальное	134,639	нм
	Расстояние от вершины до пика	156,959	нм
	Среднеквадратичное значение, RMS	14,471	нм
	Средняя шероховатость	11,713	нм
S_{sk}	Асимметрия	-0,181	
S_{ka}	Экссесс	2,839	

Таблица 3 – Измеренные параметры шероховатости [28, 29]

Обозначение параметра	Наименование параметра	Среднее значение ординаты	Размерность
<i>Параметры амплитуды</i>			
R_a	Среднее арифметическое отклонение профиля	14,092	нм
R_q	Среднеквадратичное отклонение профиля	16,870	нм
R_{sk}	Асимметрия профиля	0,0722	-
R_{ku}	Эксесс профиля	2,570	-
<i>Параметры амплитуды (пик и впадина)</i>			
R_{max}	Максимальная высота профиля	81,909	нм
R_p	Максимальная высота пика профиля	48,033	нм
R_v	Максимальная глубина впадины профиля	33,876	нм
R_z	Высота неровностей по десяти точкам	40,830	нм
<i>Параметры интервала</i>			
S_m	Средняя ширина элементов профиля	3,671	мкм
S	Среднее расстояние между локальными пиками (ГОСТ 25142)	0,673	мкм
L_q	Среднеквадратичная длина волны профиля	3,302	мкм
L_a	Средняя длина волны профиля	4,519	мкм
L_0	Длина развернутого профиля	3,330	мкм
l_0	Коэффициент развернутого профиля	1,000	-
D	Плотность пиков профиля	13,563	-
D_q	Среднеквадратичный наклон профиля	0,0320	-
D_a	Средний арифметический наклон профиля	0,0234	-

При этом величина среднеарифметического отклонения профиля R_a составила 14,092 нм.

Профиль шероховатости поверхности с диапазоном микронеровностей после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки показан на рис. 7.

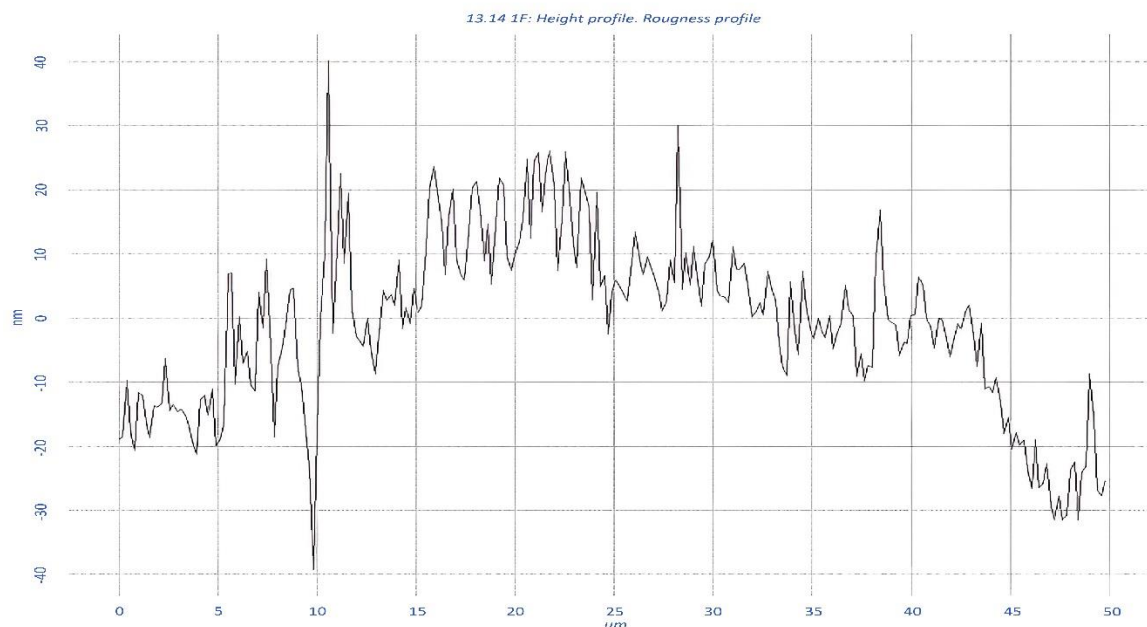


Рисунок 7 – Измерение профиля шероховатости поверхности

В результате проведенных исследований получены сканы поверхности образца из нержавеющей стали 08X18H9T после струйной фокусированной электролитной плазменной обработки. Морфология поверхности сканов показывает, что поверхность имеет развитый микрорельеф. На

поверхности фиксируются следы остатков пиков вершин шероховатости, совпадающих с направлением шероховатости в виде гребней и впадин микронеровностей (рис. 8, а, б).

На сканах наблюдается единичный дефект каплевидной формы с размером около 1 мкм (рис. 8, а, б, левый верхний угол). Первичное предположение о наличии в этом месте электрического разряда не подтверждается самой формой дефекта, который мог быть получен вследствие прокатки металла листа стали 08X18H9T. Кроме этого дефекты разного диаметра и также угловатой формы наблюдаются на исходных образцах до обработки и на образцах после струйной электролитно-плазменной обработки. Характерно, что внешний вид дефектов не имеет округлой формы в виде сфер, присущих искровому разряду, а имеет неправильные заостренные формы. Это ставит под сомнение их происхождение, как электроискровых разрядов.

Анализ результатов измерений (рис. 8, в, г) показывает, что при изменении диапазона измерений минимальная величина параметра шероховатости поверхности R_a лежит в диапазоне измерений 4,20–4,40 нм. При этом базовая длина измерения шероховатости составляет величину 10 мкм.

3.2.2 Динамика изменения параметра шероховатости поверхности R_a в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки

Анализ динамики изменения шероховатости после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки показывает, что возможность получения низких параметров шероховатости имеется при снижении исходного параметра шероховатости поверхности R_a до диапазона 0,4–0,1 мкм. Превышение этого диапазона ведет к увеличению волнистости поверхности, росту финишного параметра шероховатости поверхности R_a или технологически неоправданному увеличению времени обработки, а в отдельных случаях, к невозможности получить заданный параметр шероховатости R_a .

Динамика изменения параметра шероховатости поверхности R_a от времени обработки представлена на рис. 9. Время достижения заданного параметра во многом зависит от исходного состояния поверхности, выбора электролита, условий формирования плазмы.

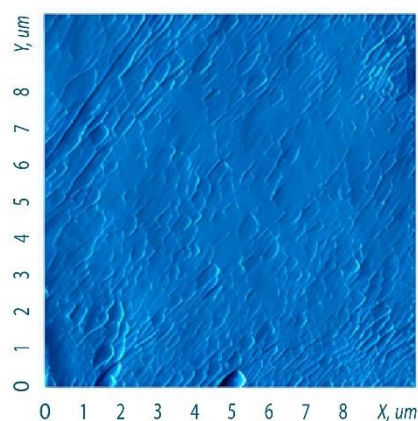
4 Обсуждение и заключение

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что комбинированная обработка позволяет в широких пределах изменять параметр шероховатости поверхности R_a от начальных значений R_a 80 мкм до чрезвычайно малых величин R_a 0,004 мкм, полученных нами на базовой длине 10 мкм. Это означает, что технологически возможно изменение параметра шероховатости поверхности R_a до заданной величины после механической обработки во всем диапазоне значений за счет струйной комбинированной обработки.

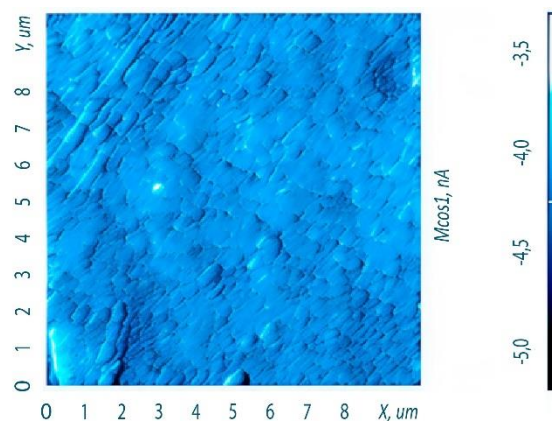
Результаты, полученные в исследованиях, значительно превосходят значения параметров шероховатости после электролитно-плазменной обработки в ванне (R_a 0,06–0,01 мкм) для нержавеющей сталей [13–15].

Полученные зарубежными авторами [20,21] величины среднеарифметической высоты поверхности S_a 80 нм и S_a 29 нм при обработке струей электролита значительно больше в сравнении с достигнутыми нами результатами среднеарифметической высоты поверхности S_a 11,713 нм, зафиксированными на атомно-силовом микроскопе модели Ntegra Aura.

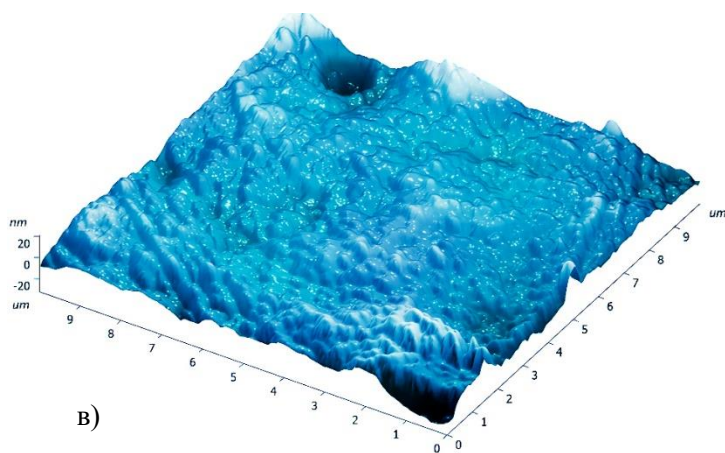
Исследования морфологии поверхности после финишной струйной электролитно-плазменной обработки показывают, что поверхность не имеет видимых следов от единичных разрядов. Это может говорить о том, что величина энергии единичных разрядов при обработке нанопервоповерхностей значительно меньше, чем указанные нами в работе [30]. Предполагается, что энергия единичного разряда необходимого для финишной обработки поверхности с наноразмерной шероховатостью составляет $E = 1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$ Дж.



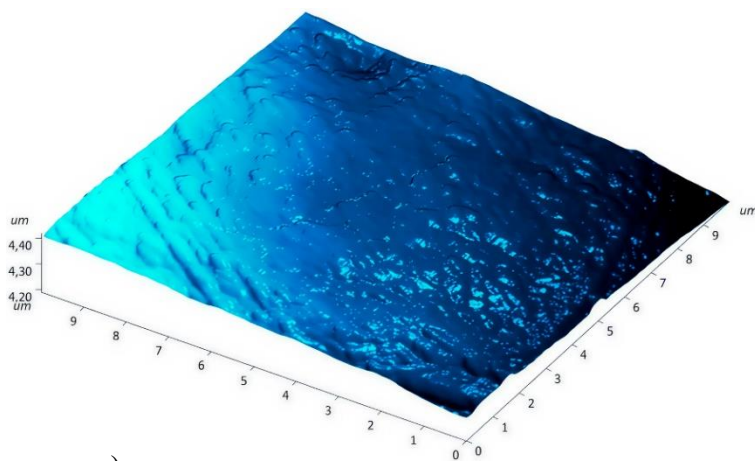
а)



б)



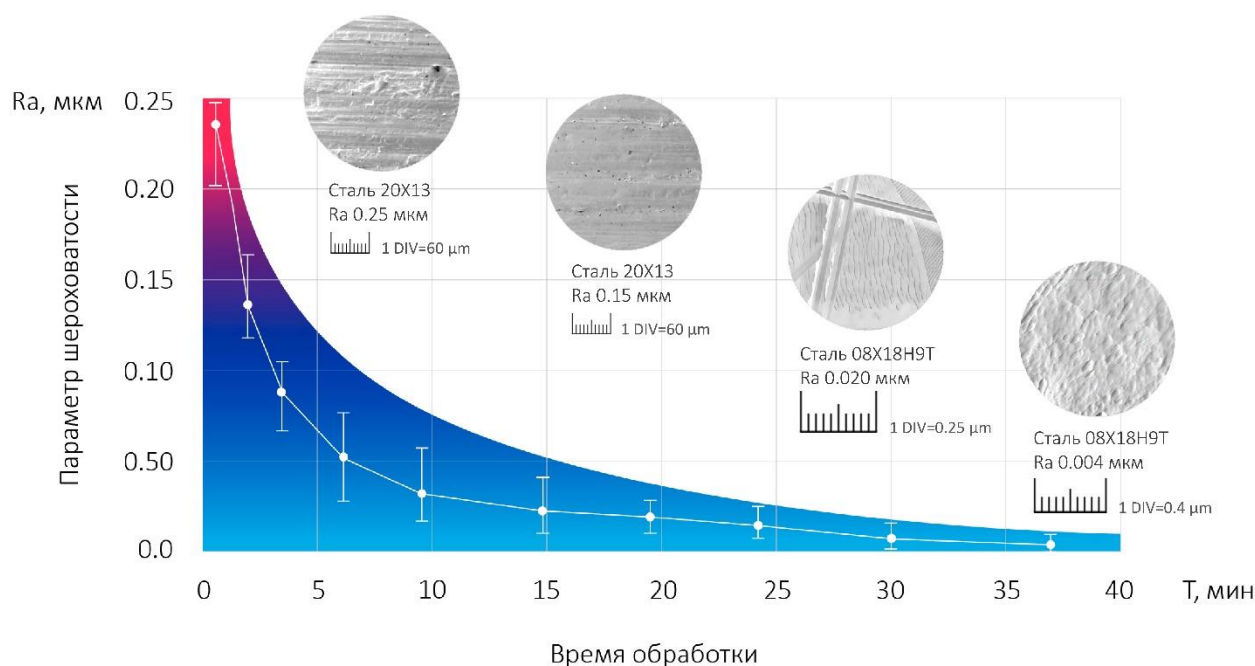
в)



г)

- а) расстояние от поверхности до кантелевера 5,1 нА;
- б) расстояние от поверхности до кантелевера - 4,5 нА;
- в) диапазон высоты измерения наносероховатости -20,00 – 20,00 нм; г) диапазон высоты измерения нано сероховатости 4,20 – 4,40 нм;

Рисунок 8 – Морфология поверхности образца из стали 08Х18Н9Т, обработанная струйной электролитно-плазменной обработкой с параметром шероховатости Ra 0,004 мкм (АСМ Ntegra Aura)



1, 2 образцы – сталь 20X13(РЭМ); 3-й образец – поверхность стали 08X18H9T (РЭМ);
4 образец – поверхность стали 08X18H9T(АСМ)

Рисунок 9 – Изменение параметра шероховатости поверхности Ra и морфологии поверхности в зависимости от времени обработки

Выводы:

1 В процессе струйной комбинированной фокусированной обработки возможно снижение параметра шероховатости Ra с ~80 мкм до ~0,004 мкм, что охватывает практически весь диапазон шероховатости после механической и SLM обработки.

2 Струей электролита при объемных расходах $Q = 10-90$ л/ч возможно получение параметра шероховатости Ra 0,2 мкм как для нержавеющей сталей, полученных технологией SLM (AISI 316L), так и для никелевых жаропрочных сплавов типа ЭП648, Инконель 718.

3 Струйным фокусированным электролитно-плазменным разрядом возможно получение предельно малой величины шероховатости поверхности, подтвержденное измерениями на атомно-силовом микроскопе для среднеарифметической высоты поверхности Sa 11,713 нм на площади измерения 2499,515 мкм².

4 Технологически возможно получение чрезвычайно малой величины шероховатости до Ra 0,004 мкм, что подтверждается измерениями на атомно-силовом микроскопе на базовой длине 10 мкм.

5 На поверхности с параметром шероховатости Ra 0,004 мкм после струйной фокусированной обработки не фиксируется следов от электрических разрядов. При этом поверхность выглядит сглаженной. Это может говорить о том, что для разряда подобно тлеющему энергия единичных разрядов, воздействующих на поверхность, может составлять $E = 1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$ Дж.

Благодарность Автор выражает благодарность графическому дизайнеру Диане Александровне Поповой за подготовку иллюстраций.

Список литературы

1 Степанова, Т. Д. Технологический суверенитет России как элемент экономической безопасности / Т. Д. Степанова // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2022. – Т. 12, № 9-1. – С. 567-577. – DOI 10.34670/AR.2022.19.76.044. – EDN JNNZEN.

2 Петров, В.В. Технологический суверенитет России: концептуальные подходы и практическая реализация // Проблемы развития экономики. - 2020. - Т. 26, № 2. - С. 47-56.

3 Роль университета в интеграции образования, науки и бизнеса / С. И. Головкина, А. И. Попова, С. А. Черногорский, Н. В. Валебникова // Университет как фактор модернизации России: история и перспективы (к 55-летию ЧГУ им. И.Н. Ульянова) : Материалы Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 18 октября 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 138-140. – EDN NERYTD.

4 Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / А. И. Надеев, А. И. Попова, А. В. Сурина, Ю. К. Свечников // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

5 Нано/микротекстурирование поверхностей для антибактериальной защиты / А. А. Настулявичус, С. И. Кудряшев, Н. А. Смирнов [и др.] // Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2018: Сборник научных трудов IV Международной конференции, Москва, 30 января – 01 2018 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2018. – С. 537-538. – EDN YUMHTV.

6 Sub-picosecond laser surface modification of Ti–Ni alloy and its antibacterial activity / I. N. Saraeva, A. A. Nastulyavichus, I. V. Sozaev [et al.] // Laser Physics Letters. – 2023. – Vol. 20, No. 11. – P. 115602. – DOI 10.1088/1612-202x/acfd93. – EDN XFNXXP.

7 A bacterial misericorde: Laser-generated silicon nanorazors with embedded biotoxic nanoparticles combat the formation of durable biofilms / I. N. Saraeva, E. R. Tolordava, A. A. Nastulyavichus [et al.] // Laser Physics Letters. – 2020. – Vol. 17, No. 2. – P. 025601. – DOI 10.1088/1612-202X/ab5fca. – EDN SUYAUN.

8 Патент № 2799364 С1 Российская Федерация, МПК C23C 18/44, A61L 27/28, A61L 27/54. Способ получения антибактериального покрытия на поверхности сплавов на основе титана медицинского назначения: № 2022131663: заявл. 05.12.2022: опубл. 05.07.2023 / Т. О. Теплякова, А. С. Конопацкий, С. Д. Прокошкин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС". – EDN PLOISS.

9 Шальнов, В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов / В. А. Шальнов. – Москва: Машиностроение, 1972. – 271 с.: ил.: 9000.00.

10 Назарова, Д. Ю. Анализ методов химического и электрохимического полирования сплава алюминия АМг6 / Д. Ю. Назарова, А. М. Гайдукова // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 14(276). – С. 72-74. – EDN XCJQTM.

11 Строилов, А. М. Сравнительный анализ отражательной способности сплава алюминия Д16 после химического и электрохимического полирования / А. М. Строилов, А. М. Гайдукова // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 4(253). – С. 113-115. – EDN LEGDSN.

12 Электроэрозионная обработка металлов / К. Е. Анохин, И. В. Гузь, Д. С. Солдатов, Д. А. Носков // Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей XIX Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 23 января 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 30-32. – EDN QUZENJ.

13 Parfenov, E.; Mukaeva, V.; Farrakhov, R. Plasma electrolytic treatments for advanced surface finishing technologies. Mater. Technol. Des. 2014, 1, 34–41.

14 Захаров, С. В. Ионизационная модель электролитно-плазменного полирования / С. В. Захаров, М. Т. Коротких, Е. В. Гонибесова // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 255-258. – EDN PNORZK.

15 А. Ю. Королёв, В. А. Томило, В. С. Нисс Энергетические характеристики стадии формирования парогазовой оболочки при электролитно-плазменной обработке. Доклады Национальной академии наук Беларуси, V. 68, N 4, с. 344-352, 2024 <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>

16 Wang J, Zong XM, Liu JF, Feng S (2017) Influence of voltage onelectrolysis and plasma polishing. ICMEIM 2017. Atlantis Press:2352-5401. <https://doi.org/10.2991/icmeim-17.2017.333>.

17 Smyslova MK, Tamindarov DR, Plotnikov NV, Modina IM, Semenova IP (2018) Surface electrolytic-plasma polishing of Ti-6Al-4V alloy with ultrafine-grained structure produced by severe plastic deformation. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng IOP Publishing 461(1):012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012079>

18 Анализ морфологии поверхности после струйной электролитно-плазменной обработки SLM-материалов / К. Л. М. Диату, Д. Н. Иванов, С. Ю. Симонов [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 683-696. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-130. – EDN IMSCVE.

19 Оценка возможности полирования нержавеющей сталей струйной электролитно-плазменной обработкой / М. В. Новоселов, Н. Г. Шиллинг, А. А. Рудавин [и др.] // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 94-102. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10. – EDN YVASNY.

20 Huang, Y., Wang, C., Ding, F. et al. Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 1893–1912 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07012-7>

21 Ghezri, A.; Pratama, K.; Scholl, Y.; Küenzi, A.; Nelis, T.; Burger, J.; Bessire, C. Energy Efficient Jet Polishing via Electrolytic Plasma Enhances Corrosion Resistance in Stainless Steel. *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, 8, 289. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060289>

22 Патент № 2623555 С1 Российская Федерация, МПК С25F 7/00. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток: № 2016120180: заявл. 24.05.2016: опубл. 27.06.2017 / А. И. Попов, М. М. Радкевич, В. Н. Кудрявцев [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN USJMHV.

23 Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE

24 ГОСТ Р 8.700-2010 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Государственная система обеспечения единства измерений МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope.

25 Попов, А. И. Анализ условий формирования плазмы в струе электролита при обработке поверхности анода в диапазоне 20-500 в / А. И. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 3, № 3(49). – С. 3-16. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-1-1. – EDN FLXDZE.

26 ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения.

27 ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

28 ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности

29 ГОСТ 25142— 82 (СТ СЭВ 1156—78). Шероховатость поверхности. Термины и определения.

30 Попов, А. И. Атомно-дислокационная модель удаления поверхностных слоев струйным электролитно-плазменным полированием / А. И. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 1, № 1(47). – С. 31-51. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-31-51. – EDN DWAPMM.

References

1 Stepanova, T. D. Russia's Technological Sovereignty as an Element of Economic Security / T. D. Stepanova // *Economy: Yesterday, Today, Tomorrow*. - 2022. - Vol. 12, No. 9-1. - Pp. 567-577. - DOI 10.34670/AR.2022.19.76.044. - EDN JNNZEN.

2 Petrov, V.V. Russia's Technological Sovereignty: Conceptual Approaches and Practical Implementation // *Problems of Economic Development*. - 2020. - Vol. 26, No. 2. - Pp. 47-56.

3 The Role of the University in the Integration of Education, Science, and Business / S. I. Golovkina, A. I. Popova, S. A. Chernogorsky, N. V. Valebnikova // *University as a Factor in Russia's Modernization: History and Prospects (on the 55th Anniversary of I. N. Ulyanov Cheboksary State University): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, October 18, 2022*. - Cheboksary: Limited Liability Company "Publishing House" Sreda ", 2022. - Pp. 138-140. - EDN NERYTD.

4 Principles of Building Automated Systems to Support the Life Cycle of Innovative Products / A. I. Nadeev, A. I. Popova, A. V. Surina, Yu. K. Svechnikov // *Sensors and Systems*. - 2006. - No. 11. - Pp. 59-63. - EDN KWMQTP.

5 Nano/microtexturing of surfaces for antibacterial protection / A. A. Nastulyavichus, S. I. Kudryashev, N. A. Smirnov [et al.] // *Laser, plasma research and technologies - LaPlas-2018: Collection of scientific papers of the IV International conference, Moscow, January 30 – January 01, 2018*. - Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2018. - P. 537-538. - EDN YUMHTV.

6 Sub-picosecond laser surface modification of Ti–Ni alloy and its antibacterial activity / I. N. Saraeva, A. A. Nastulyavichus, I. V. Sozaev [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2023. – Vol. 20, No. 11. – P. 115602. – DOI 10.1088/1612-202x/acfd93. – EDN XFNXXP.

7 A bacterial misericorde: Laser-generated silicon nanorazors with embedded biotoxic nanoparticles combat the formation of durable biofilms / I. N. Saraeva, E. R. Tolordava, A. A. Nastulyavichus [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2020. – Vol. 17, No. 2. – P. 025601. – DOI 10.1088/1612-202X/ab5fca. – EDN SUYAUN.

8 Patent No. 2799364 C1 Russian Federation, IPC C23C 18/44, A61L 27/28, A61L 27/54. Method for producing an antibacterial coating on the surface of titanium-based alloys for medical purposes: No. 2022131663: declared 05.12.2022: published 05.07.2023 / T. O. Teplyakova, A. S. Konopatsky, S. D. Prokoshkin; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National University of Science and Technology "MISiS". – EDN PLOISS.

9 Shalnov, V.A. Grinding and polishing of high-strength materials / V.A. Shalnov. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 271 p.: ill.: 9000.00.

10 Nazarova, D. Yu. Analysis of methods of chemical and electrochemical polishing of aluminum alloy AMg6 / D. Yu. Nazarova, A.M. Gaidukova // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. – 2023. – Vol. 37, No. 14(276). – Pp. 72-74. – EDN XCJQTM.

11 Stroilov, A.M. Comparative analysis of the reflectivity of aluminum alloy D16 after chemical and electrochemical polishing / A.M. Stroilov, A.M. Gaidukova // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. – 2022. – Vol. 36, No. 4(253). – Pp. 113-115. – EDN LEGDSN.

12 Electrical Discharge Machining of Metals / K. E. Anokhin, I. V. Guz, D. S. Soldatov, D. A. Noskov // *Results of Modern Scientific Research and Development: Collection of Articles from the XIX All-Russian Scientific and Practical Conference, Penza, January 23, 2023*. – Penza: Science and Education (IP Gulyaev G. Yu.), 2023. – Pp. 30-32. – EDN QUZEHJ.

13 Parfenov, E.; Mukaeva, V.; Farrakhov, R. Plasma electrolytic treatments for advanced surface finishing technologies. *Mater. Technol. Des.* 2014, 1, 34–41.

14 Zakharov, S. V. Ionization Model of Electrolytic-Plasma Polishing / S. V. Zakharov, M. T. Korotkikh, E. V. Gonibesova // *SPbPU Science Week: Proceedings of the Scientific Conference with International Participation*. In 2 parts, St. Petersburg, November 18–23, 2019. Volume 2. – St. Petersburg: Polytech-Press, 2020. – Pp. 255–258. – EDN PNORZK.

15 A. Yu. Korolev, V. A. Tomilo, V. S. Niss. Energy Characteristics of the Vapor-Gas Shell Formation Stage during Electrolytic-Plasma Processing. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, Vol. 68, No. 4, pp. 344–352, 2024 <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>

16 Wang J, Zong XM, Liu JF, Feng S (2017) Influence of voltage onelectrolysis and plasma polishing. *ICMEIM 2017*. Atlantis Press:2352-5401. <https://doi.org/10.2991/icmeim-17.2017.333>.

17 Smyslova MK, Tamindarov DR, Plotnikov NV, Modina IM, Semenova IP (2018) Surface electrolytic-plasma polishing of Ti-6Al-4V alloy with ultrafine-grained structure produced by severe plastic deformation. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng IOP Publishing* 461(1):012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012079>

18 Analysis of surface morphology after jet electrolytic-plasma processing of SLM materials / K. L. M. Diatu, D. N. Ivanov, S. Yu. Simonov [et al.] // *Modern mechanical engineering. Science and education*.

19 Evaluation of the Feasibility of Polishing Stainless Steels by Jet Electrolytic-Plasma Treatment / M. V. Novoselov, N. G. Shilling, A. A. Rudavin [et al.] // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. – 2018. – Vol. 20, No. 1. – Pp. 94-102. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10. – EDN YVASNY.

20 Huang, Y., Wang, C., Ding, F. et al. Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 1893–1912 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07012-7>

21 Ghezri, A.; Pratama, K.; Scholl, Y.; Küenzi, A.; Nelis, T.; Burger, J.; Bessire, C. Energy Efficient Jet Polishing via Electrolytic Plasma Enhances Corrosion Resistance in Stainless Steel. *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, 8, 289. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060289>

22 Patent No. 2623555 C1 Russian Federation, IPC C25F 7/00. Installation for electrolytic-plasma treatment of turbine blades: No. 2016120180: appl. 24.05.2016: published 27.06.2017 / A. I. Popov, M. M. Radkevich, V. N. Kudryavtsev [et al.]; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (FGAOU VO "SPbPU"). – EDN USJMHW.

23 Technical conditions TU 4254-001-58699387-2010: Normative and technical documents establishing requirements for scanning probe microscopes Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE

24 GOST R 8.700-2010 NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION State system for ensuring the uniformity of measurements METHOD OF MEASURING THE EFFECTIVE HEIGHT OF SURFACE ROUGHNESS USING A SCANNING PROBE ATOMIC FORCE MICROSCOPE. State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness: effective height measurements using a scanning probe atomic force microscope.

25 Popov, A. I. Analysis of plasma formation conditions in an electrolyte jet during anode surface machining in the 20-500 V range / A. I. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2024. - Vol. 3, No. 3(49). - Pp. 3-16. - DOI 10.34220/2311-8873-2024-1-1. - EDN FLXDZE.

26 GOST 27964-88. Measurement of roughness parameters. Terms and definitions.

27 ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions, and surface texture parameters.

28 GOST R ISO 4287-2014. National standard of the Russian Federation. Geometrical product characteristics (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions, and surface structure parameters

29 GOST 25142—82 (ST SEV 1156—78). Surface roughness. Terms and definitions.

30 Popov, A. I. Atomic-dislocation model of surface layer removal by jet electrolytic-plasma polishing / A. I. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2024. - Vol. 1, No. 1 (47). - Pp. 31-51. - DOI 10.34220/2311-8873-2024-31-51. - EDN DWAPMM.

© Попов А. И., 2025