

Электролитно-плазменное полирование изделий из титанового сплава Ti6Al4V аддитивного производства

С. Н. Григорьев, Т. Л. Мухачева, И. В. Тамбовский, И. А. Кусманова, А. А. Залетова, В. А. Гапонов, Э. С. Мустафаев, И. В. Суминов, С. А. Кусманов^{*}

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

г. Москва, 127994, Россия,

^{*}e-mail: sakusmanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.08.2025

После доработки 24.09.2025

Принята к публикации 29.09.2025

Описано применение электролитно-плазменного полирования в качестве технологии постобработки изделий из титановых сплавов аддитивного изготовления, которая обеспечивает изменение микрорельефа поверхности в результате анодного растворения и действия импульсных искровых разрядов, удаление адгезионно связанных с субстратом нерасплавившихся частиц порошка с поверхности, снижение ее шероховатости и сопутствующее повышение износостойкости. Полирование проводили в условиях, эффективно показанных для обработки изделий из титановых сплавов, полученных традиционным способом. В качестве электролита использовался водный раствор температурой 80°C на основе фторида аммония с добавлением лимонной кислоты и пирокатехина в качестве комплексообразователей. Установлено, что обработка при напряжении 300 В в течение 20 мин на порядок снижает высотные параметры шероховатости R_a и R_z . Проведены трибологические испытания в режиме сухого трения по схеме «вал–колодка» при нагрузке 10 Н.

Ключевые слова: плазменно-электролитное полирование, селективное лазерное плавление, титановый сплав Ti6Al4V, шероховатость, износостойкость

УДК 544.558+66.088

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.5.01>

ВВЕДЕНИЕ

Технологии аддитивного производства, или 3D-печать, интенсивно развиваются продолжительное время. Данные технологии, в частности технология селективного лазерного плавления, открыли новые возможности для производства сложнопрофильных деталей, ремонта и восстановления дорогостоящих конструкционных компонентов [1–3].

Одним из наиболее часто применяемых материалов, используемых в селективном лазерном плавлении, является титановый сплав Ti6Al4V. Этот материал обладает высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и биосовместимостью [4–7], что позволяет использовать его в аэрокосмической, медицинской, машиностроительной и других отраслях [8–10].

Несмотря на перспективы аддитивных технологий, их существенным ограничением является высокая шероховатость поверхности готовых изделий, обусловленная слоистой структурой наплавления и эффектом прилипания частиц несплавленного порошка [11, 12]. Это ухудшает усталостные характеристики, износостойкость и функциональные свойства деталей, что особенно критично для ответственных применений и требует обязательной финишной обработки.

Среди применяемых методов постобработки изделий аддитивного производства наибольшее распространение получили традиционные механические методы: абразивная полировка [13–15], механическая дробеструйная обработка [16], лазерная дробеструйная обработка [17–19], ультразвуковая поверхностная прокатка [20] и т.п. Эффективность использования данных технологий ограничена при обработке изделий со сложной геометрией, внутренними полостями и мелкими элементами, где требуется не только высокая точность, но и равномерность обработки. Для решения таких проблем активно исследуются альтернативные методы постобработки, такие как химическое полирование [21] и травление [22], электрохимическое полирование [23–27], комбинированная ультразвуковая кавитация и абразивная обработка [28], комбинированное воздействие магнитного абразива и термообработки [29].

Среди методов физико-химического воздействия на поверхность значительный потенциал демонстрирует электролитно-плазменное полирование (ЭПП) [30–38], что связано с возможностью обработки труднодоступных зон и достижения низкой шероховатости без механического воздействия при использовании достаточно простого оборудования и малостадийности

технологического процесса. ЭПП относится к технологиям комбинированного воздействия на поверхность потоками высоких энергий. Парогазовая оболочка, которая формируется между обрабатываемой поверхностью и электролитом, оказывает физико-химическое воздействие на обрабатываемую деталь в зависимости от электрофизических параметров обработки и составов электролитов: нагрев, электрохимическое растворение, эрозия под действием микроразрядов и др. При ЭПП микроразряды в парогазовой оболочке оказывают разрушающее воздействие на выступы рельефа поверхности, постепенно слаживая ее вплоть до зеркального блеска. Преимуществом ЭПП перед химическим и электрохимическим полированием является использование более экологически безопасных растворов электролитов, а также снижение потери материала из-за отсутствия сплошного контакта электролита со всем профилем поверхности.

Целью данной работы является изучение возможности использования ЭПП для постобработки изделий из титанового сплава Ti6Al4V аддитивного производства. Будет изучено влияние полирования на морфологию и шероховатость поверхности, а также на ее триботехнические характеристики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опытные цилиндрические образцы высотой 10 мм и диаметром 11 мм для проведения исследований изготавливались методом селективного лазерного плавления из сферического порошка титанового сплава Ti6Al4V, размер частиц которого находился в интервале 20–63 мкм (производитель – ООО «Нормин», Боровичи, Россия). Для 3D-печати использовалась промышленная SLM-система Farsoon FS121M (Farsoon Technologies, Чанша, Китай). Образцы изготавливались при рекомендованных производителем параметрах: скорости сканирования 1100 мм/с и мощности лазера 200 Вт. Послойное плавление порошка в процессе печати в среде защитных газов обеспечивалось Nd:YAG-лазером мощностью 500 Вт с длиной волны 1064 нм и диаметром лазерного луча 50 мкм.

ЭПП проводилось в водном растворе электролита на основе фторида аммония (NH_4F), который положительно зарекомендовал себя для ЭПП титанового сплава Ti6Al4V [39], с добавлением лимонной кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) и пирокатехина ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$) в качестве комплексообразователей для связывания продуктов анодного растворения [40].

Для реализации процесса использовалась лабораторная установка с циркуляцией электро-

лита [41, 42]. Свежеприготовленный раствор электролита заливался в установку и разогревался до температуры 80 °C. Электролит циркулировал в системе установки по замкнутому контуру через теплообменник со скоростью 1 л/мин, в котором подогревался до заданной температуры с помощью электрического нагревателя. Условия ЭПП выбраны с учетом ранее полученных результатов при полировании титановых сплавов, изготовленных традиционным способом, – при напряжении 300 В и варьировании продолжительности процесса от 5 до 20 мин [39, 43].

Для оценки величины изменения массы образцов после ЭПП и интенсивности анодного растворения использовались электронные аналитические весы CitizenCY224C (ACZET (Citizen Scale), Индия) с точностью $\pm 0,0001$ г. До и после полирования образцы промывались от загрязнений в дистиллированной воде и ацетоне с помощью ультразвуковой ванны, а затем сушились при температуре 50 °C в лабораторном сушильном шкафу (Altimax DO-1-65, Китай) до постоянного значения массы.

Морфологический анализ поверхности образцов и поверхности дорожек трения проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3 (Tescan, Чехия). Элементный анализ на поверхности дорожек трения осуществлялся с применением энергодисперсионного детектора X-Act (Oxford Instruments, Великобритания).

Для измерения шероховатости поверхностей и оценки потери объема материала при трении использовался профилометр Hommel Tester T8000 (Hommelwerke GmbH, Германия) с щупом TKU300 (радиус наконечника 2 мкм) чувствительностью 40 нм по оси Z. Скорость сканирования составляла 1 мм/с при шаге 30 мкм.

В испытаниях на трение использовалась схема трения «вал–втулка» [44, 45]. Контртело изготавливается из инструментальной легированной стали (мас.%: 0,9–1,2 Cr, 1,2–1,6 W, 0,8–1,1 Mn, 0,9–1,05 C) в виде пластины с полукруглой выемкой диаметром 11 мм, охватывающей поверхность образца. Испытуемый образец крепился на валу, приводимом в движение электродвигателем. Тензодатчик, измеряющий прижимающее усилие, устанавливался на платформе, скользящей по цилиндрическим направляющим. Перемещение платформы и нагружение пары трения обеспечивалось с помощью пневматического цилиндра. Испытания на трение проводились в режиме сухого трения при нагрузке 10 Н. Скорость скольжения образца по контролю равнялась 1,555 м/с. Путь трения составлял 1000 м.

Характер ЭПП и последующие трибологические испытания обусловливают формирование на поверхности образцов микронеровностей или шероховатостей. Кроме того, поверхность образцов обладает гетерогенной структурой и под действием нагрузки, прикладывающейся при проведении трибологических испытаний, различные структурные компоненты деформируются неодинаково. Структурная неоднородность также дает вклад в интегральную шероховатость поверхности. Все вышеперечисленное приводит к дискретности контакта образца с контролем. Площадь истинного, или фактического, соприкосновения составляет лишь часть от номинальной площади контакта. Фактическая площадь контакта определялась, опираясь на параметры микротопографии, снятые профилометром непосредственно с дорожек трения по методикам, подробно изложенным в [45, 46]. Кроме того, по данным профилометрии были рассчитаны радиусы закруглений верхушек выступов шероховатости и средняя шероховатость, определяемая безразмерным критерием Крагельского-Комбала [46].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхность образцов, полученных методом селективного лазерного плавления, характеризуется выраженной топографической неоднородностью (рис. 1а). На финальных стадиях аддитивного производства в верхних слоях изделия наблюдается неполное плавление сферических частиц мелкодисперсного металлического порошка. В процессе кристаллизации расплава, образованного под воздействием лазера высокой мощности, происходит прочное адгезионное связывание нерасплавленных частиц с субстратом, что приводит к формированию локальных возвышений в профиле шероховатости. Данные частицы оказывают негативное влияние на функциональные характеристики поверхности, параметры которой демонстрируют зависимость от гранулометрического состава металлического порошка и технологических режимов плавления. Профилометрические измерения на боковой поверхности цилиндрических образцов в пределах базовой длины величиной 2,5 мм показали, что среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля (параметр шероховатости Ra) достигает $6,4 \pm 0,8$ мкм, а среднее арифметическое абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля (параметр шероховатости Rz) составляет $34,2 \pm 3,9$ мкм.

В процессе ЭПП происходит анодное растворение адгезионно связанных с подложкой частиц на поверхности образцов. Взвешивание образцов до и после обработки позволило установить кинетические закономерности анодного растворения в процессе ЭПП при описанных режимных параметрах. Согласно экспериментальным данным средняя скорость анодного растворения образцов из сплава Ti6Al4V при плотности тока $0,15$ А/см² составляет $11,7 \pm 0,2$ мг/мин и не изменяется при проведении ЭПП продолжительностью до 20 мин (см. таблицу).

Анализ кинетики процесса показывает, что в начальный период (первые 5 мин) ЭПП характеризуется максимальной эффективностью с точки зрения интенсивного растворения нерасплавленных сферических частиц металлического порошка. Наблюдаемый эффект объясняется локализацией повышенной плотности тока на выступах профиля шероховатости, что согласуется с известными закономерностями электрохимического формообразования. Обработка в течение 5 мин позволяет уменьшить шероховатость поверхности образцов по параметрам Ra и Rz на 81 и 83% соответственно (см. таблицу). Однако СЭМ-анализ обработанной поверхности выявляет выраженную слоистую структуру, являющуюся следствием аддитивного характера формирования образца (рис. 1б). Данная структурная особенность сохраняется даже после значительного уменьшения шероховатости, что свидетельствует о преимущественном растворении неровностей поверхности без существенного изменения макроструктуры материала.

Увеличение времени ЭПП до 10–20 мин улучшает функциональные характеристики поверхности пропорционально продолжительности процесса, но с меньшим эффектом. Шероховатость поверхности по параметру Ra уменьшается на 88–91%, а по параметру Rz – на 86–91% по сравнению с исходными значениями до обработки (см. таблицу). В результате средняя Ra -шероховатость может быть снижена до $0,6 \pm 0,1$ мкм, а Rz -шероховатость – до $3,12 \pm 0,5$ мкм, что доказывает эффективность проведения процесса ЭПП в данном растворе электролита при выбранных режимных параметрах. При этих условиях полирования все же сохраняется слоистость материала (рис. 1в–д), проявляющаяся в виде чередующихся выступов и впадин в профиле шероховатости, которая выражена в меньшей степени по сравнению с образцами после ЭПП в течение 5 мин.

Результаты трибологических испытаний показали отсутствие на дорожках трения всех исследованных образцов аварийных повреждений,

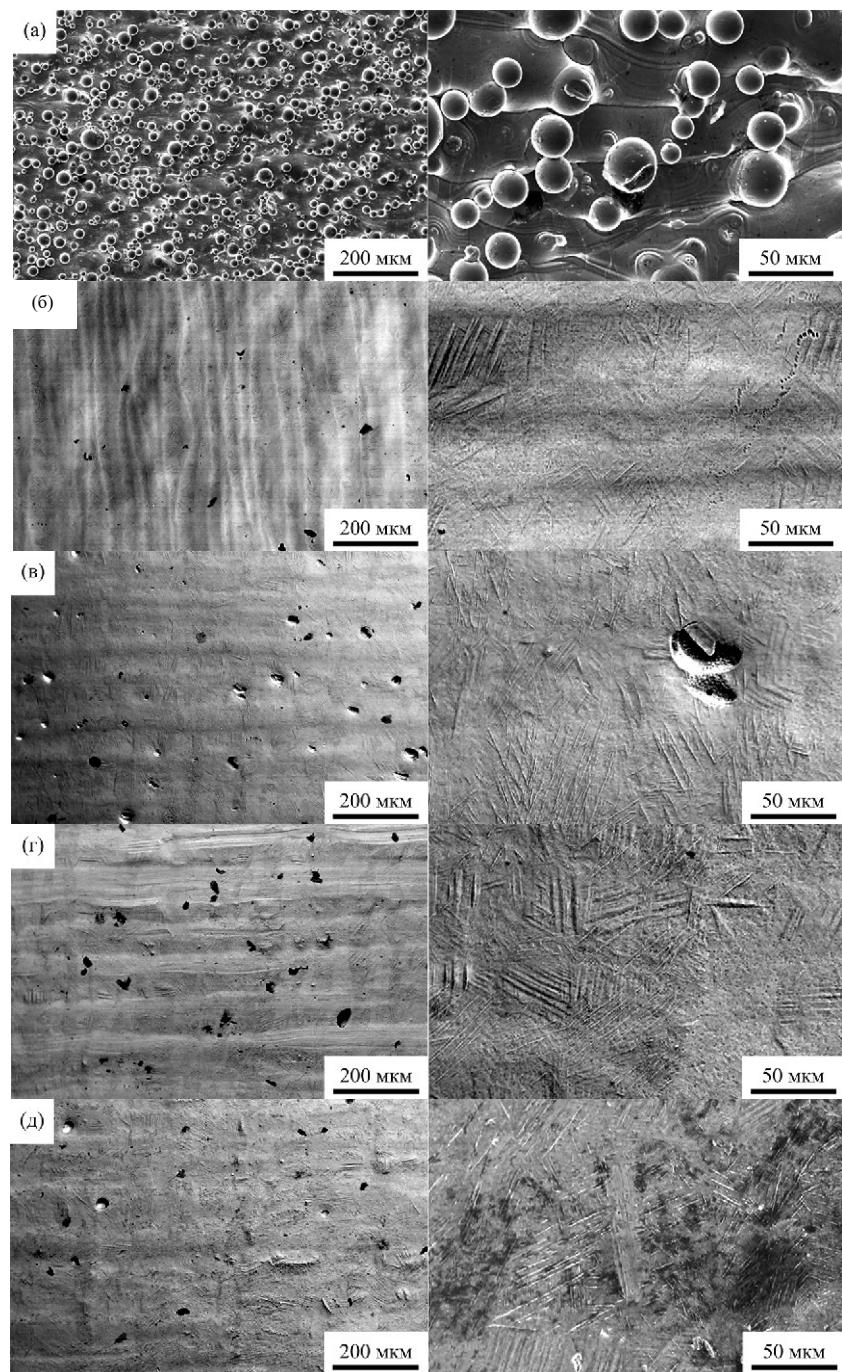


Рис. 1. Морфология поверхности образцов из титанового сплава Ti6Al4V до (а) и после ЭПП различной продолжительности: 5 мин (б), 10 мин (в), 15 мин (г), 20 мин (д).

Таблица. Значения шероховатости поверхности Ra и Rz , убыли массы образцов при ЭПП Δm , средней температуры в зоне трибологического контакта за последние 100 м пути T_{fr} , убыли массы образцов при трении Δm_{fr} , фактической площади контакта S , среднего радиуса закруглений микровыступов r , критерия Крагельского–Комбалова Δ , среднего коэффициента трения за последние 100 м пути μ до и после ЭПП различной продолжительности

t , мин	Ra , мкм	Rz , мкм	Δm , мг	T_{fr} , °С	Δm_{fr} , мг	S , мм^2	r , мкм	Δ	μ
до ЭПП	$6,4 \pm 0,8$	$34,2 \pm 3,9$	–	66,5	2,5	0,067	43	0,481	0,60
5	$1,2 \pm 0,3$	$5,7 \pm 1,2$	57,4	49,9	3,0	0,058	33	0,450	0,45
10	$0,8 \pm 0,2$	$4,7 \pm 2,5$	119,1	46,8	2,8	0,054	38	0,427	0,38
15	$0,7 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,6$	176,0	50,5	1,4	0,029	64	0,304	0,36
20	$0,6 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,5$	234,9	47,9	1,4	0,026	65	0,220	0,35

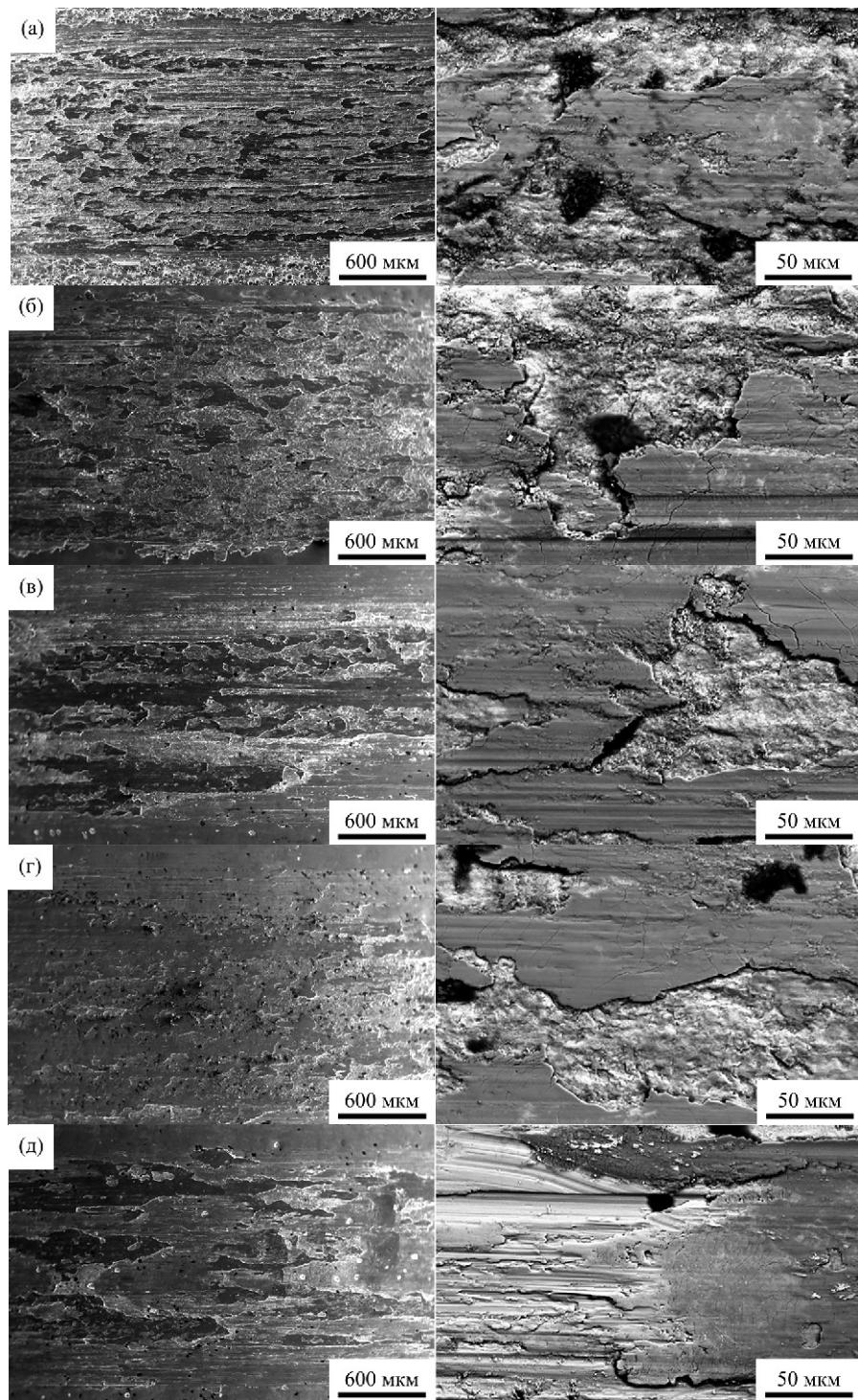


Рис. 2. Морфология дорожек трения на поверхности образцов из титанового сплава Ti6Al4V до (а) и после ЭПП различной продолжительности: 5 мин (б), 10 мин (в), 15 мин (г), 20 мин (д).

следов схватывания металлических поверхностей образца и контртела, задиров, микрорезания, прижогов поверхности (рис. 2). На дорожке трения необработанного образца (рис. 2а) видны полосы в направлении скольжения с ровными краями, без резких границ, представляющие собой следы деформации металлической поверхности образца выступами шероховатости контртела. В процессе испытаний на трение внешний слой необработанного образца подвергается множественным знакопеременным нормальным и сдвиговым деформациям, вызванным внедрением и переме-

щением выступов шероховатости контртела. Это вызывает образование повреждений в структуре материала, включая упругие искажения кристаллической решетки и дислокации. С увеличением продолжительности испытаний на трение количество дефектов в приповерхностном слое испытуемого образца возрастает и начинается образование микротрещин. Рост числа проходов выступов шероховатости контртела по поверхности образца приводит к развитию и слиянию микротрещин и последующему отделению интенсивно деформи-

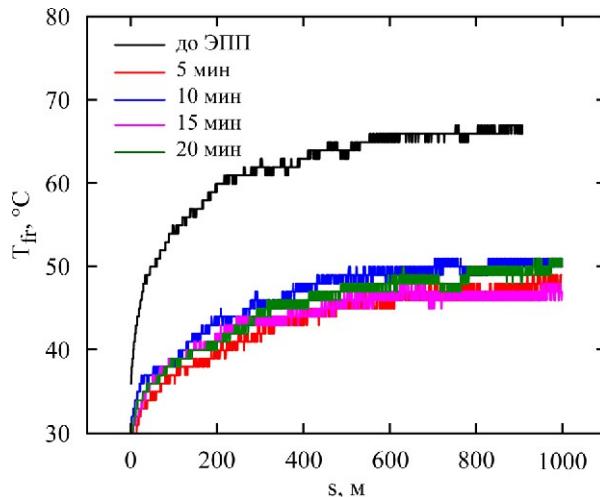


Рис. 3. Зависимость температуры в зоне трибологического контакта образцов из титанового сплава Ti6Al4V до и после ЭПП различной продолжительности от пути трения.

руемого материала от основной его части в виде частиц износа.

На дорожках трения образцов после ЭПП полосы в направлении скольжения видны не на металлической подложке, как на необработанном образце, а на покрывающих поверхность темных оксидных пленках (рис. 2б–д). Результаты EDX-анализа показали присутствие кислорода на дорожках трения всех исследуемых образцов. В процессе трибологических испытаний в атмосфере поверхность титановых образцов взаимодействует с кислородом и, как следствие, обрастают оксидной пленкой. Расстояние между атомами титана в кристаллической решетке меньше, чем в решетке оксида, поэтому в объемах титана и оксида возникают напряжения разных знаков и на границе раздела «титан–оксид» появляются касательные напряжения. Пленки оксида имеют низкое сопротивление к растяжению. В процессе испытаний на трение в пленках оксидов накапливаются внутренние напряжения и дефекты структуры. Трибологические испытания под нагрузкой 10 Н способствуют образованию и росту микротрещин в пленках оксидов. Срез материала оксидных пленок между их поверхностью и образовавшимися трещинами приводит к формированию частиц износа, которые постепенно уходят из зоны трения. Оксидные пленки, разрушаясь и вновь нарастаая на поверхности полированного титана в трибоконтакте, оказывают защитное действие, так как износ идет преимущественно по материалу пленок, а не по металлической матрице.

Толщина оксидной пленки зависит от температуры на поверхности титанового образца в процессе испытаний. Температура в трибосопротяжении с необработанным образцом выше, чем у образцов после ЭПП (рис. 3, таблица). Более высокая температура трибоконтакта может приводить к формированию оксидных пленок

большей толщины. С увеличением толщины оксидных пленок их склонность к хрупкому разрушению возрастает. Они разрушаются, отслаиваясь на значительной площади, и изнашивание идет непосредственно по металлической матрице, что видно по полосам деформации на материале подложки для необработанного образца (рис. 2а).

На рис. 4 показаны профили дорожек трения испытуемых образцов. Интегрирование профиля позволяет вычислить объемный износ каждого образца и затем пересчитать его в массовый. Коэффициент корреляции массового износа, полученного взвешиванием на аналитических весах (см. таблицу) и вычисленного интегрированием профиля дорожки трения, не менее $R^2 = 0,94$.

Процессы трения и износа в значительной степени зависят от характеристик трибоконтакта. Из-за дискретного характера контакта соприкосновение сопрягаемых поверхностей происходит лишь на вершинах выступов шероховатости, то есть на ограниченных участках, которые и формируют фактическую площадь контакта. Износ происходит на фактической площади контакта и зависит от ее размера. Для образцов после ЭПП в течение 15 и 20 мин фактическая площадь контакта снижается относительно необработанного образца в 2,3 и 2,6 раза соответственно (см. таблицу). Убыль фактической площади контакта, на которой непосредственно реализуются процессы износа, коррелирует с меньшими массовыми потерями при износе после 15 и 20 мин ЭПП.

Средний радиус закругления выступов шероховатости растет с увеличением продолжительности ЭПП (см. таблицу). Кроме того, выглаживанию поверхности при трении способствует и ведущий механизм изнашивания для образцов после ЭПП – окислительное изнашивание. Суммарным результатом ЭПП и последующей

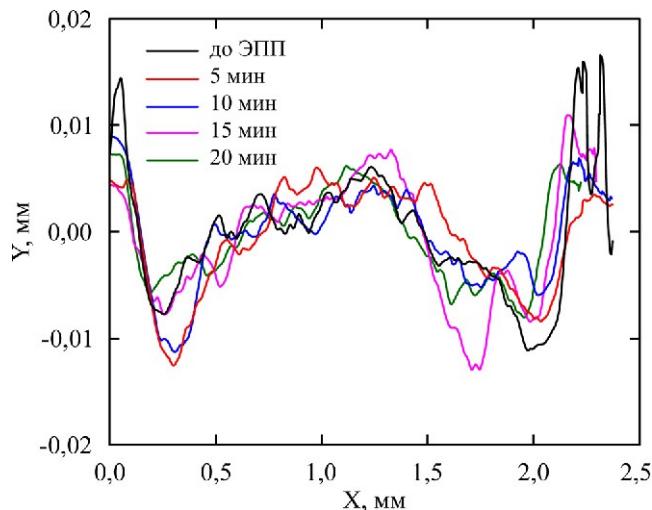


Рис. 4. Профили дорожек трения образцов из титанового сплава Ti6Al4V до и после ЭПП различной продолжительности от пути трения.

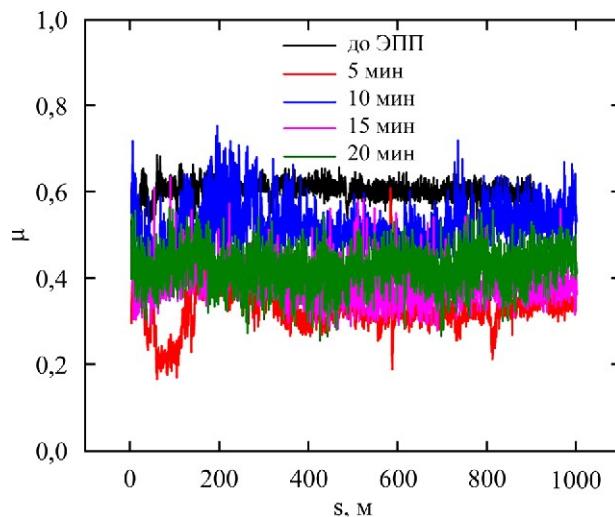


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения образцов из титанового сплава Ti6Al4V до и после ЭПП различной продолжительности от пути трения.

работы оксидных пленок в трибосопряжении является снижение комплексного критерия шероховатости Крагельского–Комбалова на дорожках трения модифицированных образцов (см. таблицу). Более низкие значения этого критерия свидетельствуют о более высокой несущей способности профиля шероховатости. Новый микрорельеф, образовавшийся в результате трения и характеризующийся значениями критерия Крагельского–Комбалова, обеспечивает меньшие значения коэффициента трения образцов после ЭПП относительно необработанного образца (рис. 5, таблица).

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность применения электролитно-плазменного полирования в качестве технологии постобработки изделий из титановых сплавов аддитивного изготовления, которая обеспечивает изменение микрорельефа поверхности в результате анодного растворения и действия импульсных искровых разрядов, удаление нерасплавившихся частиц порошка с

поверхности, снижение ее шероховатости и сопутствующее повышение износостойкости.

2. Электролитно-плазменное полирование в электролите на основе фторида аммония с добавлением лимонной кислоты и пирокатехина температурой 80 °С при напряжении 300 В в течение 20 мин на порядок снижает высотные параметры шероховатости.

3. Улучшение качества поверхности после полирования в течение 15 и 20 мин приводит к снижению массового износа в 1,8 раза, а коэффициента трения – в 1,7 раза. Улучшение антифрикционных характеристик обеспечивается формированием самовоспроизводящегося при трении устойчивого микрорельефа с высокой несущей способностью шероховатого профиля при ведущей роли окислительного механизма изнашивания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-79-30058-П) с использованием оборудования

Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kanishka, K. and Achterjee, B., A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration, *J. Manuf. Process.*, 2023, vol. 89, p. 220.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034>
2. Leino, M., Pekkarinen, J. and Soukka, R., The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing – enabling circular economy, *Physics Procedia*, 2016, vol. 83, p. 752.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.077>
3. Rahito, D.A. Wahab, Azman, A.H., Additive manufacturing for repair and restoration in remanufacturing: An overview from object design and systems perspectives, *Processes*, 2019, vol. 7, no. 11, art. ID 802.
<https://doi.org/10.3390/pr7110802>
4. *Titanium and Titanium alloys: Fundamentals and Applications*. Leyens, C., Peters, M., Eds. Weinheim: Wiley-vch, 2003.
<https://doi.org/10.1002/3527602119>
5. Shrestha, S., Panakarajupally, R.P., Kannan, M., Morscher, G., et al., Analysis of microstructure and mechanical properties of additive repaired Ti-6Al-4V by direct energy deposition, *Mater. Sci. Eng. A*, 2021, vol. 806, art. ID 140604.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140604>
6. Rack, H.J. and Qazi, J.I., Titanium alloys for biomedical applications, *Mater. Sci. Eng. C*, 2006, vol. 26, no. 8, p. 1269.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.08.032>
7. Ochonogor, O.F., Akinlabi, E.T. and Nyembwe, D., A review on the effect of creep and microstructural change under elevated temperature of Ti6Al4V alloy for turbine engine application, *Mater. Today: Proc.*, 2017, vol. 4, no. 2, Part A, p. 250.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.019>
8. Liu, S. and Shin, Y.C., Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, *Materials & Design*, 2019, vol. 164, art. ID 107552.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
9. Samuel, M.P., Mishra, A.K. and Mishra, R.K., Additive manufacturing of Ti-6Al-4V aero engine parts: Qualification for reliability, *J. Fail. Anal. Prev.*, 2018, vol. 18, no. 1, p. 136.
<https://doi.org/10.1007/s11668-018-0393-9>
10. Li, C., Pisignano, D., Zhao, Y. and Xue, J., Advances in medical applications of additive manufacturing, *Engineering*, 2020, vol. 6, no. 11, p. 1222.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.02.018>
11. Galati, M., Minetola, P. and Rizza, G., Surface roughness characterisation and analysis of the electron beam melting (EBM) process, *Materials*, 2019, vol. 12, art. ID 2211.
<https://doi.org/10.3390/ma12132211>
12. Wang, P., Sin, W., Nai, M. and Wei, J., Effects of processing parameters on surface roughness of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting, *Materials*, 2017, vol. 10, art. ID 1121.
<https://doi.org/10.3390/ma10101121>
13. Han, S., Salvatore, F., Rech, J. and Bajolet, J., Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM), *Precis. Eng.*, 2020, vol. 64, p. 20.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.006>
14. Guo, J., Au, K.H., Sun, C.N., Goh, M.H., et al., Novel rotating-vibrating magnetic abrasive polishing method for double layered internal surface finishing, *J. Mater. Process. Technol.*, 2019, vol. 264, p. 422.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.024>
15. Nagalingam, A.P., Yuvaraj, H.K. and Yeo, S.H., Synergistic effects in hydrodynamic cavitation abrasive finishing for internal surface-finish enhancement of additive-manufactured components, *Addit. Manuf.*, 2020, vol. 33, art. ID 101110.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101110>
16. Guo, C., Wang, J., Lu, H., Wang, Y., et al., Enhanced oxidation resistance of additively manufactured Inconel 718 superalloy by surface mechanical attrition treatment, *Corrosion Sci.*, 2025, vol. 246, art. ID 112719.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112719>
17. Lv, J., Luo, K., Lu, H., Wang, Z., et al., Achieving high strength and ductility in selective laser melting Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening, *J. Alloys Compd.*, 2022, vol. 899, art. ID 163335.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163335>
18. Yeo, I., Bae, S., Amanov, A. and Jeong, S., Effect of laser shock peening on properties of heat-treated Ti-6Al-4V manufactured by laser powder bed fusion, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, 2021, vol. 8, no. 4, p. 1137.
<https://doi.org/10.1007/s40684-020-00234-2>
19. Lu, H., Wang, Z., Cai, J., Xu, X., et al., Effects of laser shock peening on the hot corrosion behaviour of the selective laser melted Ti6Al4V titanium alloy, *Corrosion Sci.*, 2021, vol. 188, art. ID 109558.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109558>
20. Zhou, C., Yan, X., Liu, D., Xu, X., et al., Simultaneously achieving strength-ductility in additive-manufactured Ti6Al4V alloy via ultrasonic surface rolling process, *Mat. Sci. Eng. A*, 2025, vol. 920, art. ID 147555.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147555>
21. Tyagi, P., Goulet, T., Riso, C., Stephenson, R., et al., Reducing the roughness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component

- by chempolishing and electropolishing, *Addit. Manuf.*, 2019, vol. 25, p. 32.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.001>
22. Pyka, G., Burakowski, A., Kerckhofs, G., Moesen, M., et al., Surface modification of Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing, *Adv. Eng. Mater.*, 2012, vol. 14, p. 363.
<https://doi.org/10.1002/adem.201100344>
23. Cao, W., Ghiootti, A. and Bruschi, S., Enhancing the surface quality of additively manufactured 316 stainless steel revolving parts through electrochemical polishing, *Procedia CIRP*, 2025, vol. 133, p. 615.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.105>
24. Zhao, C.H., Qu, N.S. and Tang, X.C., Removal of adhesive powders from additive-manufactured internal surface via electrochemical machining with flexible cathode, *Precis. Eng.*, 2021, vol. 67, p. 438.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.11.003>
25. Che, J.W., Shi, G.F. and Xu, Y., Experimental study on ultrasonic-assisted electrochemical polishing of NiTi alloy, *Phys. Scripta*, 2024, vol. 99, no. 4, art. ID 045973.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad348a>
26. Mu, J.R., Sun, T.T., Leung, C.L.A., Oliveira, J.P., et al., Application of electrochemical polishing in surface treatment of additively manufactured structures: a review, *Prog. Mater. Sci.*, 2023, vol. 136, art. ID 101109.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101109>
27. Wang, Q., Chang, Sh., Ding, H., Yin, Z., et al., Electrochemical polishing process of additively manufactured IN738LC fine channels, *Vacuum*, 2025, vol. 240, art. ID 114564.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114564>
28. Tan, K.L. and Yeo, S.H., Surface finishing on IN625 additively manufactured surfaces by combined ultrasonic cavitation and abrasion, *Addit. Manuf.*, 2020, vol. 31, art. ID 100938.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100938>
29. Li, K., Ma, R., Zhang, M., Chen, W., et al., Hybrid post-processing effects of magnetic abrasive finishing and heat treatment on surface integrity and mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 superalloys, *J. Mat. Sci. Technol.*, 2022, vol. 128, p. 10. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.03.026>
30. Witzke, K., Kensbok, R., Willsch, C.U., Fricke, K., et al., Mechanical and plasma electrolytic polishing of dental alloys, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 6222.
<https://doi.org/10.3390/ma16186222>
31. Xiang, Y., Sun, H., Yang, D., Ji, G., et al., Material removal model for describing the plasma discharge effect in magnetic-electrolytic plasma polishing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, vol. 131, art. ID 5023.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13328-x>
32. Kusmanov, S.A., Tambovskiy, I.V., Korableva, S.S., Dyakov, I.G., et al., Enhancement of wear and corrosion resistance in medium carbon steel by plasma electrolytic nitriding and polishing, *J. Mat. Eng. Perform.*, 2019, vol. 28, no. 9, p. 5425.
<https://doi.org/10.1007/s11665-019-04342-2>
33. Yang, D., Sun, H., Wang, J., Ji, G., et al., The formation and stripping mechanism of oxide film on Ti6Al4V alloy surface during electrolytic plasma polishing, *Surf. Coat. Technol.*, 2024, vol. 478, art. ID 130469.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130469>
34. Apelfeld, A., Borisov, A., Dyakov, I., Grigoriev, S., et al., Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing, *Metals*, 2021, vol. 11, art. ID 1599.
<https://doi.org/10.3390/met11101599>
35. An, S., Hansen, L., Wolff, T., Foest, R., et al., Energetic characterization during plasma electrolytic polishing of cemented tungsten carbide, *J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 134, art. ID 033305.
<https://doi.org/10.1063/5.0155581>
36. Danilov, I., Hackert-Oschatzchen, M., Zinecker, M., Meichsner, G., et al., Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation and inline metrology, *Micromachines*, 2019, vol. 10, p. 214.
<https://doi.org/10.3390/mi10030214>
37. Parfenov, E.V., Farrakhov, R.G., Mukaeva, V.R., Gusarov, A.V., et al., Electric field effect on surface layer removal during electrolytic plasma polishing, *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 307, p. 1329.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.066>
38. Navickaité, K., Ianniciello, L., Tušek, J., Engelbrecht, K., et al., Plasma electrolytic polishing of nitinol: Investigation of functional properties, *Materials*, 2021, vol. 14, art. ID 6450.
<https://doi.org/10.3390/ma14216450>
39. Kusmanov, S., Mukhacheva, T., Tambovskiy, I., Kusmanova, I., et al., Possibilities of duplex plasma electrolytic treatment for increasing the hardness and wear resistance of a commercially pure titanium surface, *Coatings*, 2023, vol. 13, art. ID 1363.
<https://doi.org/10.3390/coatings13081363>
40. Багаев С.И., Сергеева Е.К., Смягликов И.П., Разработка состава электролитов для электролитно-плазменного полирования металлов и сплавов, *Современные методы и технологии создания и обработки материалов*, Сборник научн. трудов. Минск, 2019, с. 135.
41. Smirnov, A.A., Kusmanov, S.A., Kusmanova, I.A. and Belkin, P.N., Effect of electrolyte depletion on the characteristics of the anodic plasma electrolytic nitriding of a VT22 titanium alloy, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2017, vol. 53, no. 5, p. 413.
<https://doi.org/10.3103/S106837551705012X>
42. Shadrin, S.Yu., Belkin, P.N., Tambovskiy, I.V. and Kusmanov, S.A., Physical features of anodic plasma electrolytic carburising of low-carbon steels, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2020, vol. 40, no. 2, p. 549.
<https://doi.org/10.1007/s11090-020-10062-6>

43. Kusmanov, S.A., Tambovskiy, I.V., Mukhacheva, T.L., Belov, R.D., et al., Plasma electrolytic modification of the steel and titanium surfaces by combined cathodic nitriding and anodic polishing, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 5, p. 572.
<https://doi.org/10.1134/S003602952305004X>
44. Mukhacheva, T.L., Belkin, P.N., Dyakov, I.G. and Kusmanov, S.A., Wear mechanism of medium carbon steel after its plasma electrolytic nitrocarburising, *Wear*, 2020, vols. 462–463, art. ID 203516.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203516>
45. Kusmanov, S., Mukhacheva, T., Tambovskiy, I., Naumov, A., et al., Increasing hardness and wear resistance of austenitic stainless steel surface by anodic plasma electrolytic treatment, *Metals*, 2023, vol. 13, art. ID 872.
<https://doi.org/10.3390/met13050872>
46. Mukhacheva, T., Kusmanov, S., Suminov, I., Podrabinnik, P., et al., Increasing wear resistance of low-carbon steel by anodic plasma electrolytic sulfiding, *Metals*, 2022, vol. 12, art. ID 1641.
<https://doi.org/10.3390/met12101641>

Summary

A possibility of using plasma electrolytic polishing as a technology for post-processing of additively manufactured alloy products is shown, which ensures a change in

the surface microrelief as a result of anodic dissolution and the action of pulsed spark discharges, removal of unmelted powder particles adhesively bound to the substrate from the surface, a decrease in its roughness and an accompanying increase in wear resistance. Polishing was carried out under conditions effectively shown for treatment products made of titanium alloys obtained by the traditional method. An aqueous solution at a temperature of 80 °C based on ammonium fluoride with the addition of citric acid and pyrocatechol as complexing agents was used as an electrolyte. It was found that treatment at a voltage of 300 V for 20 min reduces the height roughness parameters R_a and R_z by an order of magnitude. Tribological tests were conducted in the dry friction mode using the "shaft-bushing" scheme under a load of 10 N. It was shown that at a sliding speed of the sample on a counter body made of hardened tool steel of 1.555 m/s per 1000 m of friction path, there is a decrease in weight wear by 1.8 and 1.9 times, and the friction coefficient by 10 and 42%, respectively. Improvement of antifriction characteristics is ensured after polishing for 15 and 20 min by the formation of a self-reproducing stable microrelief with high load-bearing capacity of a rough profile under friction, with the leading role of the oxidative wear mechanism.

Keywords: plasma electrolytic polishing, selective laser melting, Ti6Al4V titanium alloy, roughness, wear resistance