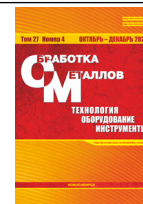




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Математический анализ профиля поверхности титанового сплава после различных режимов электромеханической обработки

Михаил Романенко^{1, a, *}, Игорь Захаров^{1, b}, Вячеслав Багмутов^{1, c}, Владислав Баринов^{1, d},
 Минь Нгуен^{2, e}

¹ Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В.И. Ленина 28, г. Волгоград, 400005, Россия

² Российский технологический университет МИРЭА, Проспект Вернадского 78, г. Москва, 119454, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4800-7151>, romanenko.mihail2009@yandex.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7177-7245>, 4zaxap@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0003-3648-8450>, sopromat@vstu.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-9400-7366>, barinov@vstu.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0004-7484-7009>, nguen_m@mirea.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.78 : 534.44

История статьи:

Поступила: 29 мая 2025

Рецензирование: 30 июня 2025

Принята к печати: 10 октября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Профилограмма

Микрогеометрия

Быстрое преобразование Фурье

(БПФ)

Гармоника

Электрохимическая обработка

Поверхностное пластическое

деформирование

Титановый сплав BT22

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФ (проект № 25-29-20241).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время существует множество математических подходов для аппроксимации кривой профиля поверхности. В большинстве из них заложены объемные математические выражения для описания параметров профиля поверхности после различных видов обработки. **Цель работы:** подобрать достаточно простой с инженерной точки зрения математический аппарат для аппроксимации профиля поверхности образцов из титанового сплава BT22 после поверхностного пластического деформирования (ППД) и различных режимов электрохимической обработки (ЭХО) с возможностью исключения случайных технологических погрешностей. **В работе исследовано** влияние режимов ЭХО переменным и постоянным током 100, 300 и 600 А/мм² с учетом усилия деформирующего электрода-инструмента (150 Н) и без него (10 Н) на геометрию поверхности образцов из титанового сплава BT22. Используемая в работе электрохимическая обработка металлических сплавов способна существенно изменять геометрический профиль, структуру и эксплуатационные свойства поверхности. Отличительной ее чертой является создание на поверхности как микроотклонений (шероховатость), так и макроотклонений и рельефа (волнистость, «масляные карманы», наплывы от наплавки металла под ремонтный размер). **Методы исследования:** профилометрический анализ, выполненный на приборе ПМ-7, и последующая обработка с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) результатов замера шероховатости поверхности предварительно подвергнутого полуставовой токарной обработке цилиндрического образца из титанового сплава BT22 диаметром 16 мм после электрохимической обработки электродом-инструментом. Оценка погрешности модельных кривых профиля поверхности проводилась по коэффициенту корреляции Пирсона (R). **Результаты и обсуждение.** Показано, что использование постоянного тока высокой плотности способствует получению поверхности с высокой относительной опорной длиной профиля (98,8 %), низким среднеарифметическим отклонением профиля (1,9 мкм) и средним шагом неровности профиля (56 мкм). На основе БПФ показано, что рассмотренные режимы электрохимической обработки способствуют образованию волнистости профиля с различным шагом и высотой. Наибольшая взаимосвязь наблюдается для режимов 2, 4, 9 ($R > 0,7$), наименьший коэффициент корреляции был отмечен для ЭХО постоянным током плотностью 100 и 300 А/мм² (режим 5 и 6, $R < 0,25$).

Для цитирования: Математический анализ профиля поверхности титанового сплава после различных режимов электрохимической обработки / М.Д. Романенко, И.Н. Захаров, В.П. Багмутов, В.В. Баринов, М.Т. Нгуен // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 80–95. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-80-95.

Введение

Возможность управлять макро- и микрогеометрией поверхности металлических сплавов после различных видов обработки является важной задачей для всех этапов жизненного цикла

деталей машин в машиностроении: от стадии изготовления и сборки до эксплуатации, – например, для обеспечения долговечного контактного взаимодействия поверхностей.

Теория технологической наследственности в машиностроении играет немалую роль при формировании требуемого качества поверхностного слоя деталей. В производстве для обеспечения заданного комплекса свойств поверхности учитываются все операции и их технологические переходы. В качестве количественной оцен-

*Адрес для переписки

Романенко Михаил Дмитриевич, к.т.н., ст. преподаватель
 Волгоградский государственный технический университет,
 пр. им. В.И. Ленина 28,
 400005, г. Волгоград, Россия
 Тел.: +7 977 064-06-19, e-mail: romanenko.mihail2009@yandex.ru

ки, как правило, используют эмпирические коэффициенты наследственности, в том числе учитывающие их взаимное влияние друг на друга [1–3].

В результате высокоэнергетического воздействия на поверхность металлических сплавов происходит существенная перестройка в кристаллической решетке, структуре, изменяется напряженно-деформированное состояние и меняется геометрия поверхности [4–6]. В частности, электромеханическая обработка переменным током стальных сплавов способствует снижению параметра среднеарифметического отклонения профиля на режиме сглаживания подвижным инструментом (роликом) до $Ra = 0,2 \dots 0,63$ мкм, постоянным током – в 2–3 раза от предшествующего значения Ra [7]. Применение постоянного тока в сравнении с переменным позволяет добиться высокой степени сглаживания микронеровностей (убрать «шум») [8]. По данным [9–14], существует целый ряд технологий поверхностного упрочнения, способных существенно улучшить параметры микрогеометрии поверхности за счет, например, высокоскоростного пластического деформирования (ультразвуковая обработка [12, 13]), локального расплавления (лазерная обработка [13, 14]) и благоприятно повлиять на статическую и усталостную прочность металлических сплавов.

Использование математических моделей и методик позволяет детально проанализировать профиль поверхности деталей, выявить закономерности в формировании ее геометрии, а также оценить вклад каждой технологической операции в конечное качество [15–22].

В большинстве статей авторы используют комбинированные модели на основе контактной механики и теории фракталов [15, 16], геометрии упрочняющего/режущего инструмента и теории Герца [17, 18], регрессионных, статистических моделей (линейная и пошаговая регрессия, матрица парной корреляции, метод «роя частиц»), дискретного преобразования Фурье и машинного обучения [19–22].

Целью работы было определить основные составляющие геометрии профиля поверхности и выявить закономерности образования микрогеометрии поверхности образца из сплава ВТ22 после различных режимов электромеханической обработки (ЭМО) с помощью математического

аппарата обработки дискретных данных сигнала (быстрого преобразования Фурье).

Для решения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи исследования**:

- 1) подготовить образец из титанового сплава ВТ22, упрочнить его по заданным режимам;
- 2) получить профили поверхностей на профилографе-профилометре «Абрис ПМ-7» и основные параметры шероховатости;
- 3) с помощью БПФ-анализа получить основные гармоники профиля поверхности каждого режима обработки;
- 4) построить модельные кривые профиля поверхности для каждого режима;
- 5) определить принадлежность модельных кривых и их гармоник виду отклонения продольного профиля поверхности;
- 6) с помощью коэффициента корреляции выявить режимы ЭМО и ППД, наиболее точно описывающие профиль поверхности образца.

Методика исследований

Токарная обработка цилиндрического образца с конечным диаметром 16 мм и дальнейшая электромеханическая обработка проводились на токарном станке типа 16К20 (рис. 1). Резание металла выполнялось с минимальной подачей 0,125 мм/об с последовательным двойным снятием слоя 0,2 мм с диаметра.

Процесс установки и настройки приспособлений для электромеханической обработки описывается следующим образом.

Титановый образец 1 зажимается в кулачках патрона 2. Далее к титановому образцу 1 подводится пиноль 3 с токоъемным приспособлением 4 и центрующим конусом на конце.

После этого болтами резцедержателя 5 зажимается через токоизолирующие прокладки пружинное приспособление для ЭМО 6, вручную подводится электрод-инструмент 7 к образцу с нужным усилием (пружина приспособления тарирована). Трубка подвода СОЖ 8 крепится на резцедержателе 5, притягиваются силовые провода с наконечниками 9 к приспособлению для токосяема 4 и ЭМО 6. В заключение под зону обработки устанавливается емкость 10 для слива СОЖ.

Электромеханическая обработка заключается в пропускании тока высокой плотности через

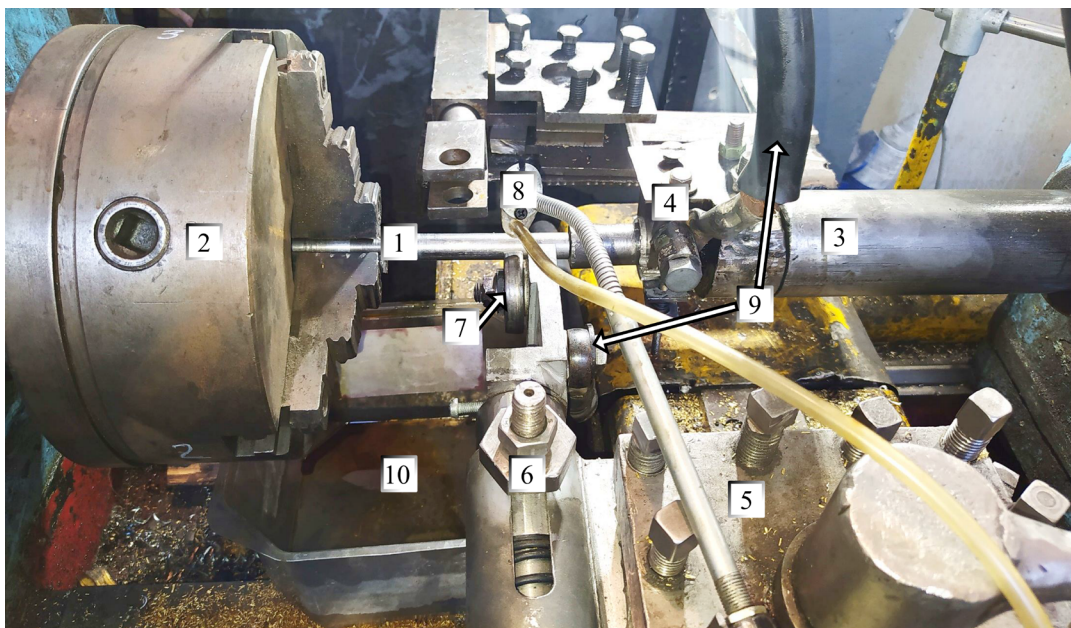


Рис. 1. Схема расположения приспособления для проведения ЭМО на токарном станке типа 16К20. Позиции:

1 – титановый образец; 2 – патрон; 3 – пиноль; 4 – приспособление для токосъема; 5 – резцедержатель; 6 – приспособление для ЭМО; 7 – электрод-инструмент (ролик); 8 – трубка подачи СОЖ; 9 – силовые провода с наконечниками; 10 – емкость

Fig. 1. Schematic of the experimental device for conducting EMP on an a 16K20 lathe.

Key components:

1 – titanium workpiece; 2 – chuck; 3 – tailstock quill; 4 – current collection device; 5 – toolholder; 6 – device for EMP; 7 – tool-electrode (roller); 8 – coolant supply tube; 9 – power cables with tips; 10 – container

малую зону контакта рабочего инструмента и поверхности детали (рис. 2) с непрерывной подачей СОЖ (технической воды). Для этой технологии характерны высокие локальные скорости нагрева и охлаждения ($10^5 \dots 10^6$ °C/c), высокая плотность тока (до 1500 A/mm^2) и низ-

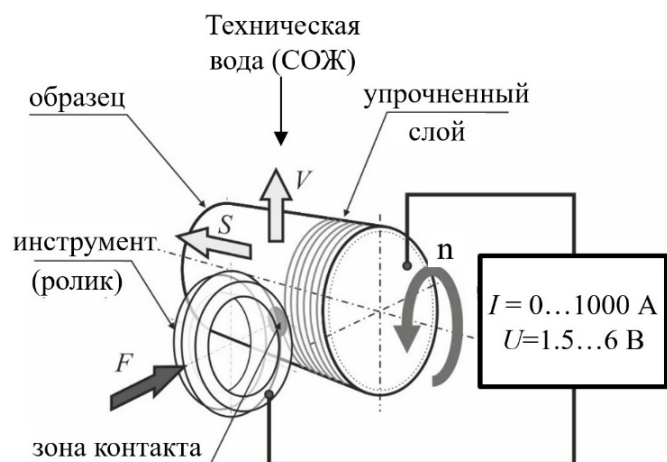


Рис. 2. Принципиальная схема проведения электро-механической обработки

Fig. 2. Schematic of electromechanical processing

кие (2...6 В) напряжения. В качестве СОЖ применяют машинное масло, специальные эмульсии, как при токарных и фрезерных работах, а также техническую воду для получения закалочных структур [23].

Постоянными параметрами для электро-механической обработки переменным и постоянным током были продольная подача (0,4 мм/об) и частота вращения (13 об/мин). Электродом-инструментом являлся тороидальный ролик из твердого сплава ВК6С диаметром 60 мм с профильным радиусом 5...6 мм. Остальные параметры режимов обработки для удобства сведены в табл. 1.

Для всех режимов исходной поверхностью являлась поверхность после получистовой обработки, так как при больших значениях начальной шероховатости дополнительные проходы электродом-инструментом при ЭМО не снижают ее качественно [23]. Плотность тока (независимо от его рода) свыше 600 A/mm^2 не рассматривалась в исследовании, так как при этом на поверхности образовывались пережоги и полости.

Режимы электромеханической обработки переменным и постоянным током
Electromechanical processing modes with alternating and direct current

№ режима / Mode No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметры ЭМО / EMP parameter										
Плотность тока, А/мм ² / Current density (A/mm ²)	—	—	$\overline{600}$	$\widetilde{600}$	$\overline{100}$	$\overline{300}$	$\overline{600}$	$\overline{100}$	$\overline{300}$	$\widetilde{600}$
Усилие прижатия инструмента, Н / Elec- trode contact force (N)	—	150	10	10	150	150	150	150	150	150

Примечание: надстрочный знак «~» – переменный ток, «—» – постоянный ток, 1 – исходный режим (после токарной обработки) / Note: “~” – alternating current, “—” – direct current, Mode 1 – initial state (after turning).

Режим электромеханической обработки токами малой плотности (100 А/мм²) рекомендован для выравнивания поверхности металла без изменения его структуры и твердости [23]. Усилие прижатия электрода-инструмента к образцу ниже 10 Н не было целесообразным, так как в этом случае не обеспечивался надежный контакт ролика с поверхностью и образовывались микродуги.

Замер параметров шероховатости проводился на профилометре-профилографе «Абрис ПМ-7» с повторяемостью 5 раз для каждого режима.

В качестве инструмента для определения продолжительности периодов и амплитудно-фазовых характеристик высот и шага неровностей использовалось быстрое преобразование Фурье. Данный математический аппарат позволяет разложить исходный дискретный сигнал на ряд гармонических (спектральных) составляющих, т. е. синусоид со своей амплитудой, фазой и частотой в порядке убывания величины [24].

При построении прогностических моделей различных величин используется уравнение общего вида для определения динамики исследуемой величины $D(t)$:

$$D(t) = T(t) + C(t) + R(t), \quad (1)$$

где $T(t)$ – основная тенденция (тренд); $C(t)$ – циклическая составляющая; $R(t)$ – случайная составляющая («шум»).

Основное уравнение для построения временного ряда $S(t)$ с учетом гармоник, полученных по методу БПФ, имеет следующий вид:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n a_i \left(\cos \frac{2\pi}{T_i} t + b_i \sin \frac{2\pi}{T_i} t \right) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n c_i \sin \left(\frac{2\pi}{T_i} t + \varphi_i \right), \quad (2)$$

где a_0 – постоянная составляющая (нулевая гармоника); $c_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$ – амплитуда i -й гармоники; $T_i = N / i$ – период i -го гармонического колебания; N – количество исходных данных временного ряда; a_i, b_i – коэффициенты временного ряда Фурье [24].

Быстрое преобразование Фурье и построение графиков выполнялось в программе MS Excel. Анализируемая выборка была ограничена до 2048 ввиду особенности метода (число данных ряда должно быть обязательно равным степени двойки, то есть $2^{11} = 2048$). Подбор субгармоник проводился по коэффициенту корреляции Пирсона до достижения максимального по модулю его значения, возможного для конкретного случая. Подобный подход использовался в работе [25]. Максимальное число гармоник в уравнениях, описывающих временные ряды, было равно 5.

По данным из литературы [26], условным фактором деления макро- и микроотклонений профиля поверхности деталей машин является соотношение длины шага к высоте выступа (l/H). Для макроотклонения продольного сечения $l/H \geq 1000$, для волнистости $50 \leq l/H \leq 1000$, а для шероховатости $l/H = 0 \dots 50$. Схема, поясня-

ющая разницу масштабных уровней отклонений профиля продольных сечений, представлена на рис. 3.

Указанные выше соотношения использовались для классификации модельных кривых по масштабу отклонений.

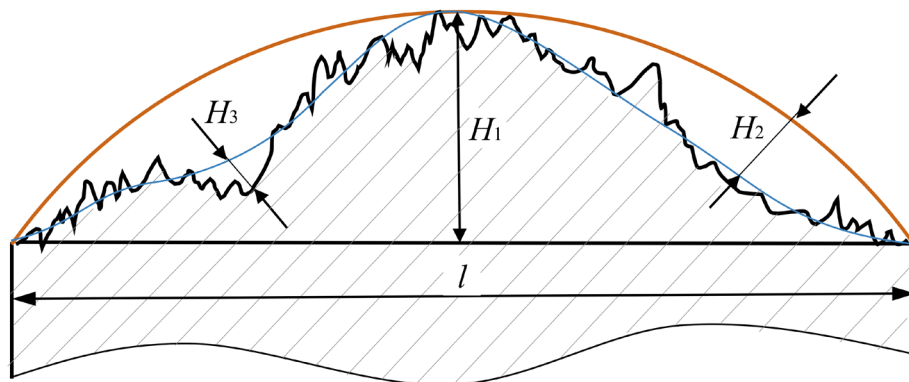


Рис. 3. Схема обозначения отклонений профиля поверхности деталей:
 H_1 – отклонение формы (бочкообразность); H_2 – волнистость поверхности (отклонение формы второго порядка); H_3 – шероховатость поверхности (отклонение формы третьего порядка, микронеровности); l – базовая длина

Fig. 3. Scheme of differentiation of surface quality parameters of parts:
 H_1 – shape deviation (barrel shape); H_2 – surface waviness (second-order shape deviation); H_3 – surface roughness (third-order shape deviation, microroughness); l – base length

Результаты и их обсуждение

В результате электромеханической обработки образца из титанового сплава ВТ22 по восьми режимам были получены профили с различными параметрами макро- и микрогеометрии, а также цветами побежалости (рис. 4).

Режимом для сравнения являлась исходная поверхность после полустачечной токарной обработки со следующими показателями шероховатости: $Ra = 12,42$ мкм; $S_m = 128$ мкм; $t_{60} = 44,7$ %. Уровень сечения опорной длины профиля был выбран 60 %. В качестве основного высотного параметра использовалось среднеарифметическое отклонение профиля Ra из-за его информативности. Обработка поверхности образца из титанового сплава ВТ22 по различным режимам показала, что оптимальными с точки зрения высотных, шаговых и структурных показателей поверхностного слоя являются режимы 3, 7 и 9 (рис. 5). Режим электромеханического сглаживания (ЭМС) постоянным током высокой плотности (600 А/мм², режим 3) снизил показатели Ra – в 6,52 раза, S_m – в 1,27 раза, а t_{60} повысился в 2,21 раза. ЭМО постоянным током той же плотности

с усилием прижатия 150 Н (режим 7) уменьшила Ra и S_m соответственно в 4,43 и 2,28 раза и практически в 2 раза увеличила показатель t_{60} . Переменный ток плотностью 600 А/мм² при ЭМО (режим 10) привел к появлению вторичной шероховатости от большей амплитуды переменного тока, нежели чем у режима 9 [8], при этом шаговый параметр для этих режимов снизился на 6 %, а параметр t_{60} возрос до 1,58 раза (рис. 5).

Обкатка роликовым инструментом без пропуска через зону контакта тока не приводит к качественному изменению профиля, как и подача при ЭМО переменного и постоянного тока плотностью 100 А/мм² (рис. 5, режимы 2, 5, 8).

Несмотря на низкую скорость обработки титанового образца и малое усилие деформирования (10 Н), для режимов 3 и 4 значительно снизился основной высотный показатель Ra (до 1,9 мкм) и увеличилась относительная опорная длина поверхности t_{60} до 98,8 % (рис. 5 и 6, режим 3). Подобный эффект наблюдался в работе [27].

Анализ профилограмм (рис. 6) показал, что упрочнение переменным током способствует формированию выраженной волнистости с об-

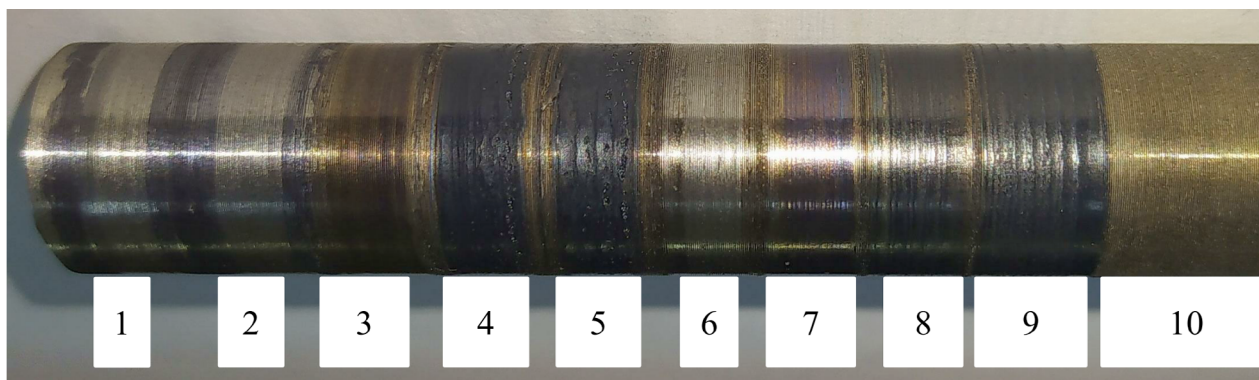


Рис. 4. Фото поверхности образца из титанового сплава ВТ22 после различных режимов электрохимической обработки. Позиции (режимы):

1 – 150 Н; 2 – $\overline{100}$ А/мм², 150 Н; 3 – $\overline{300}$ А/мм², 150 Н; 4 – $\overline{600}$ А/мм², 10 Н; 5 – $\overline{600}$ А/мм², 150 Н; 6 – $\overline{100}$ А/мм², 150 Н; 7 – $\overline{300}$ А/мм², 150 Н; 8 – $\overline{600}$ А/мм², 10 Н; 9 – $\overline{600}$ А/мм², 150 Н; 10 – исходный (точение, подача 0,125 мм/об)

Fig. 4. Micrographs showing the surface morphology of VT22 titanium alloy sample following different electromechanical processing (EMP) modes. Modes:

1 – 150 Н; 2 – $\overline{100}$ А/мм², 150 Н; 3 – $\overline{300}$ А/мм², 150 Н; 4 – $\overline{600}$ А/мм², 10 Н; 5 – $\overline{600}$ А/мм², 150 Н; 6 – $\overline{100}$ А/мм², 150 Н; 7 – $\overline{300}$ А/мм², 150 Н; 8 – $\overline{600}$ А/мм², 10 Н; 9 – $\overline{600}$ А/мм², 150 Н; 10 – initial (conventional turning, feed: 0.125 mm/rev)

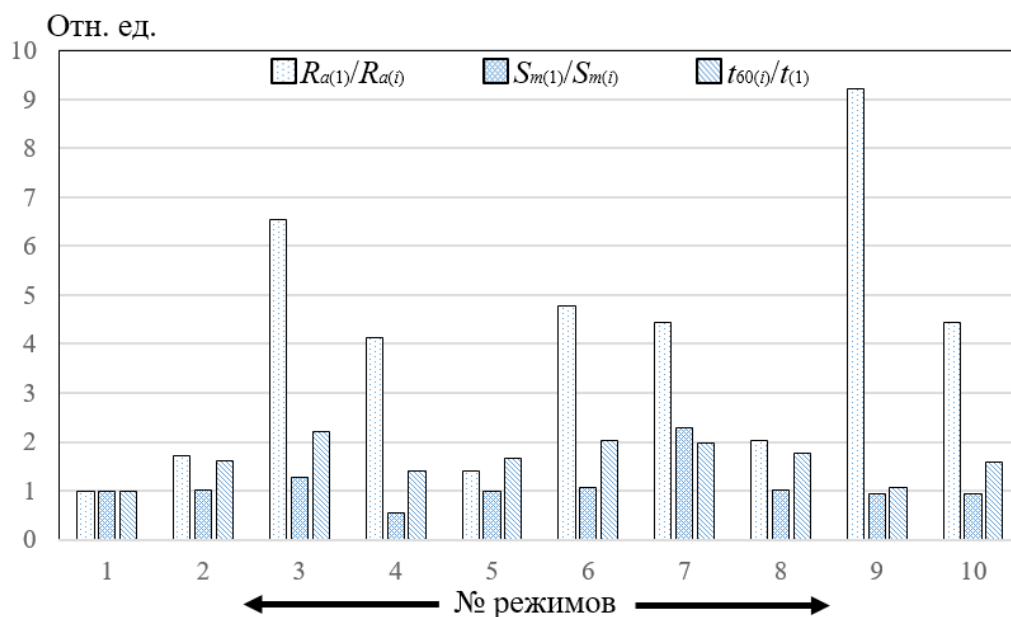


Рис. 5. Сравнение различных режимов (1–10) обработки по трем видам параметров шероховатости (Ra , S_m , t_{60})

Fig. 5. Comparison of different processing modes (1–10) for three types of roughness parameters (Ra , S_m , t_{60})

разованием профиля высокой жесткости (рис. 6, режим 10). Постоянный ток вызывает больший прогрев начальных микровыступов после токарной обработки, уменьшение сопротивляемости их деформированию, а также снижение вибрации при сглаживании постоянным током (рис. 6, режим 7) [8]. При ЭМО постоянным током

плотностью 300 А/мм² наблюдается частичное технологическое наследование выступов и впадин с шагом полуступовой токарной обработки (рис. 6, режим 6).

Профили режимов 4 и 7, несмотря на вогнутую форму, малую жесткость и несущую способность, обладают достаточной маслоемкостью

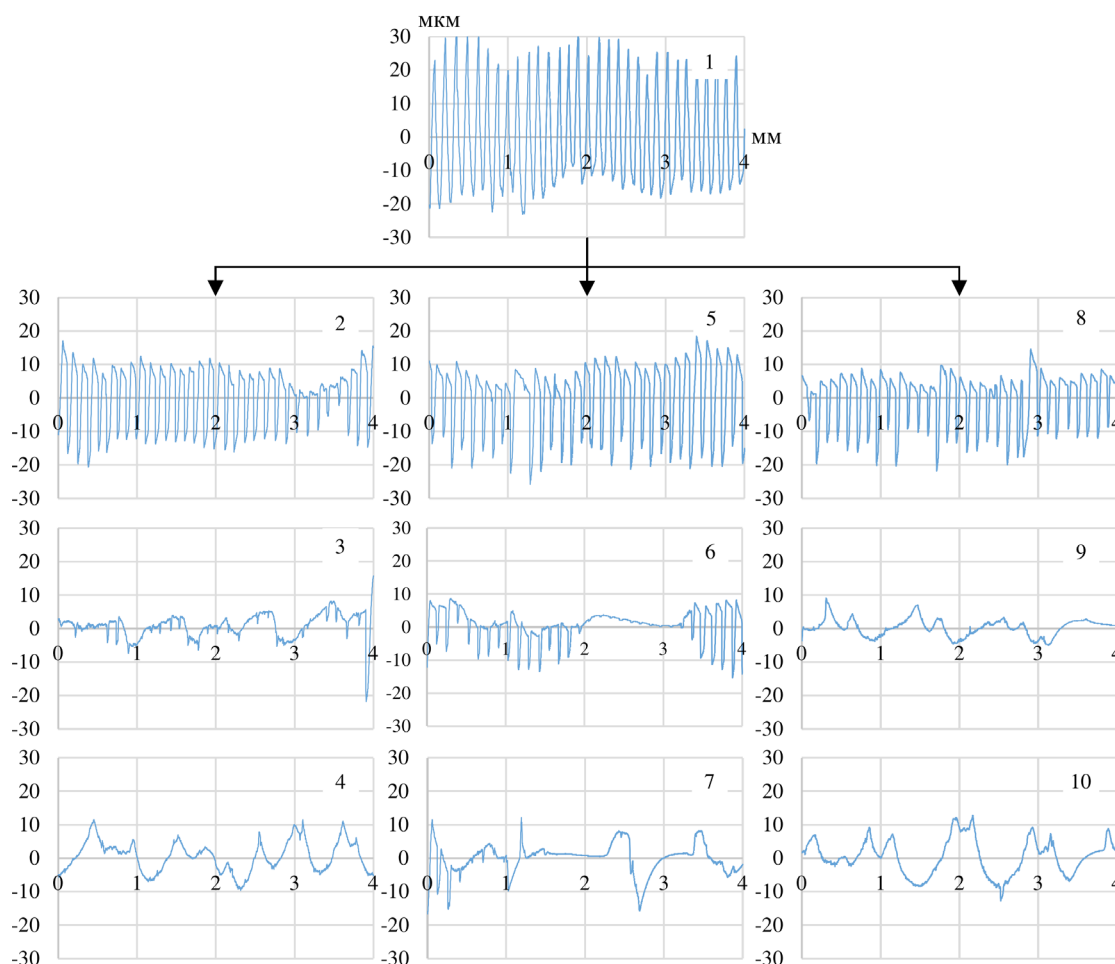


Рис. 6. Профилограммы поверхностного слоя титанового сплава после различных режимов обработки (1–10)

Fig. 6. The surface layer profilograms of titanium alloy after different processing modes (1–10)

и могут быть использованы при определенных режимах эксплуатации в парах трения [7, 8].

В результате БПФ были получены характерные профилограммы, учитывающие главные амплитудно-частотные параметры дискретного сигнала (рис. 7, режимы 1–10) без учета «шума», т. е. субгармоник.

Для исходного состояния, а также режимов с ППД-обкаткой и применением тока плотностью 100 А/мм^2 главной является гармоника, согласующаяся с получистовой токарной обработкой (рис. 7, режимы 1, 2, 5, 8).

Электромеханическая обработка током высокой плотности (рис. 7, режимы 3–4, 6–7, 9–10) формирует профиль с низкочастотной составляющей и более гладкими неровностями (снижением параметра Ra в 9,2 раза, шагового параметра S_m – в 2,28 раза). Из рис. 7 видно, что с увеличением плотности тока при ЭМО высокочастотные составляющие профиля поверхно-

сти нивелируются и появляется доминирующая («несущая») частота.

На рис. 8 представлены кривые относительных опорных поверхностей для различных уровней P режимов 1–10.

Согласно рис. 8 микропрофиль для режимов 1–6 является маложестким, для режимов 8 и 9 – среднежестким, а для режимов 7 и 10 – жестким. Для деталей, требующих надежного соединения с натягом без эффекта преждевременного ослабления соединения за счет смятия местных выступов, а также низкого износа пар трения, можно рекомендовать ЭМО постоянным током плотностью 300 и 600 А/мм^2 как в режиме сглаживания (10 Н), так и с пластической деформацией при 150 Н). Эффект снижения износа, повышения прочности посадки с натягом и герметичности соединений достигается за счет больших опорных фактических площадок контакта [26].

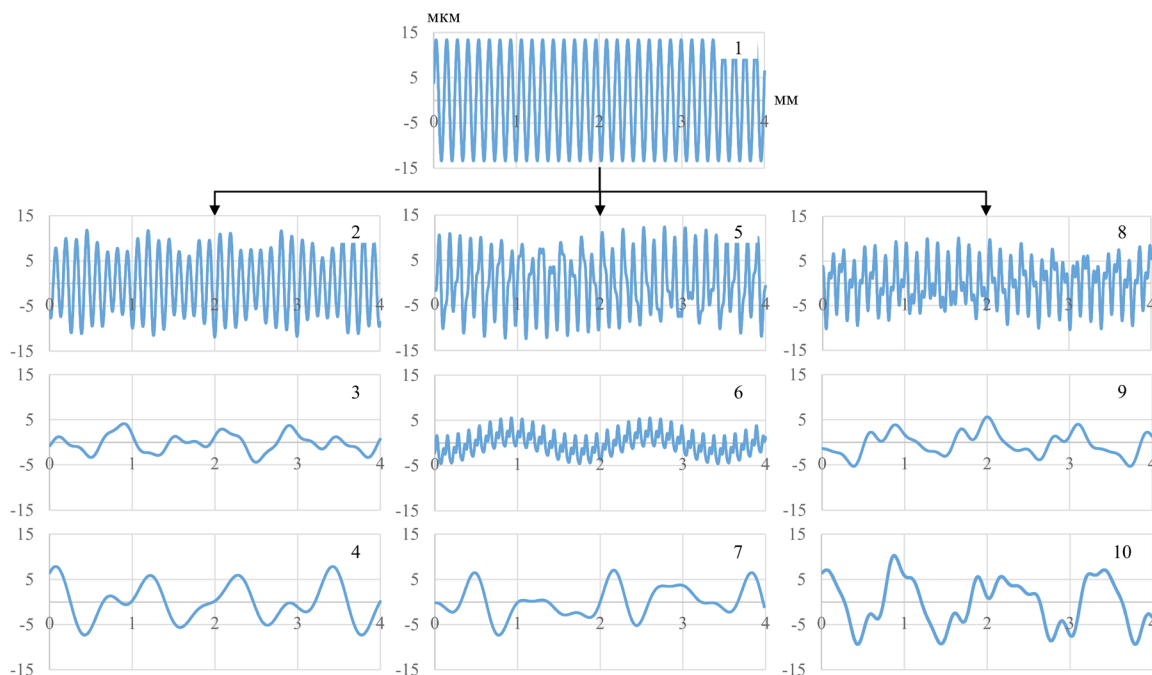


Рис. 7. Модельные профилограммы поверхности титанового сплава VT22 после БПФ по основным гармоникам

Fig. 7. The surface model profilograms of titanium alloy VT22 after FFT by fundamental harmonics

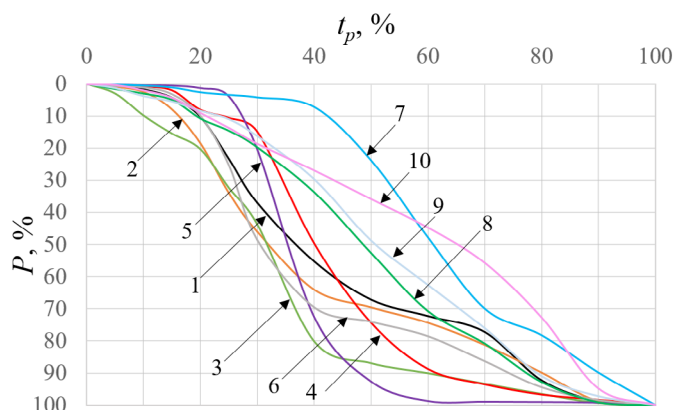


Рис. 8. Кривые опорных линий профилей для режимов 1–10

Fig. 8. Profile reference line curves for modes 1–10

Для примера, модельные кривые профиля поверхности для режимов 2, 4 и 5 разложены на гармоники (рис. 9, а–е).

Из рис. 9, г видно, что, несмотря на пластическую деформацию поверхности роликом, превалирующим периодом осталось значение подачи резца при полуступенчатой обработке, т. е. 0,125 мм.

Для ЭМО постоянным током плотностью 600 А/мм² (рис. 9, д, рис. 6, 9, режим 7) происходит сдвиг главной гармоники влево, в сторону больших периодов, характеризующих волнистость профиля. Из-за большого профильного радиу-

са ролика происходило наложение треков ЭМО друг на друга, что привело к размытию на спектрограмме основного пика (рис. 9, д). Подобное явление наблюдается и для режима 10 (рис. 9, е), причем для визуального корректного сходства с оригинальной профилограммой и наибольшего значения коэффициента корреляции потребовалось минимум 5 гармоник (рис. 9, в).

Для выявления вида отклонения профиля продольного сечения по масштабу для модельных кривых (рис. 10) было посчитано отношение длины шага к высоте выступа (l/H) для каждого режима и гармоники.

На рис. 10 показана схема для определения соотношения l/H и масштаба отклонения профиля продольного сечения по пяти синусоидам (гармоникам) на примере режима 10.

Отношения l/H для всех режимов обработки образца из титанового сплава VT22 представлены на рис. 11.

Гармоники, отвечающие за шероховатость, наблюдаются для режимов 1, 2, 5, 6, 8 (рис. 11), наследуются от предшествующей токарной полуступенчатой обработки (подача 0,125 мм/об) и сохраняются на профилограммах (рис. 6) вследствие слабого термомеханического воздействия

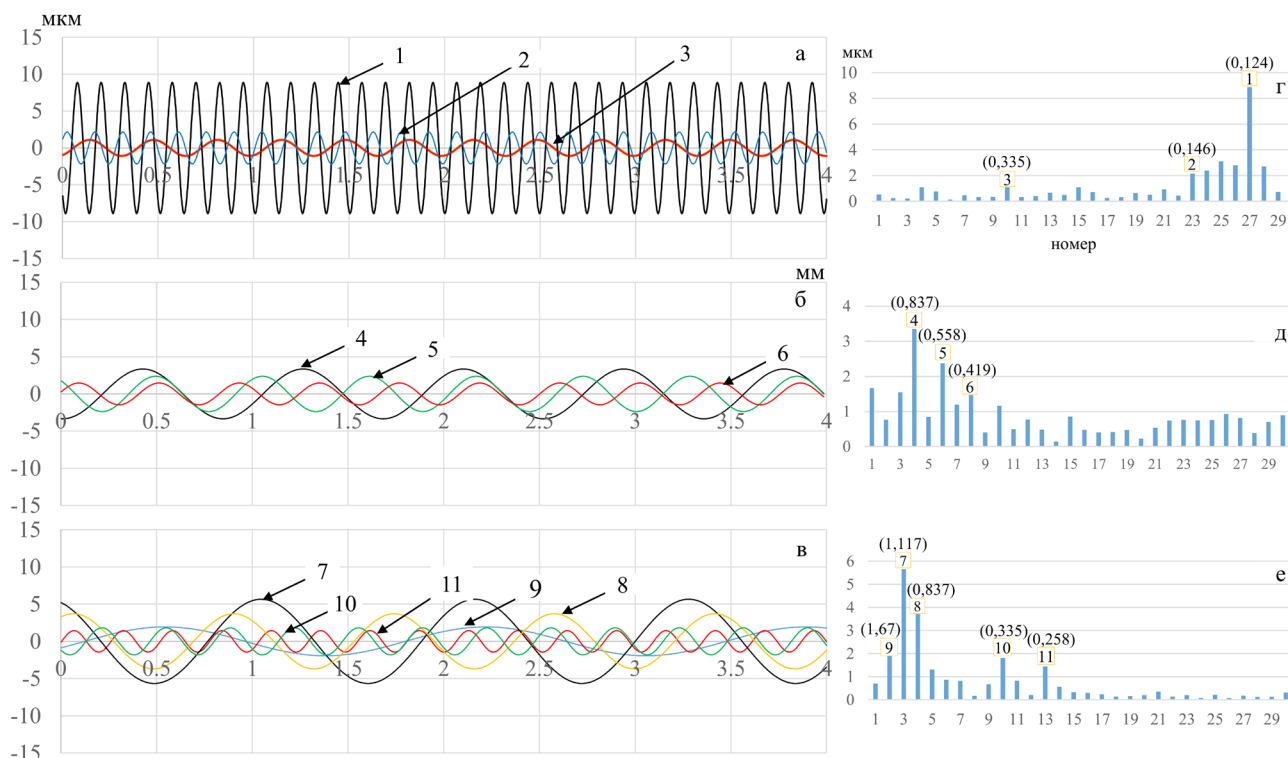


Рис. 9. Пример разложения на гармоники модельных кривых профиля поверхности для режимов 2, 7 и 10 (а–в). Цифрами на а–в указаны гармоники (в порядке убывания амплитуд), г–е – спектрограммы (в скобках указаны периоды)

Fig. 9. Example of harmonic decomposition of model surface profile curves for modes 2, 7, and 10 (a–в). Numbers in a–в indicate harmonics (in order of decreasing amplitudes), г–е – spectrograms (periods are indicated in brackets)

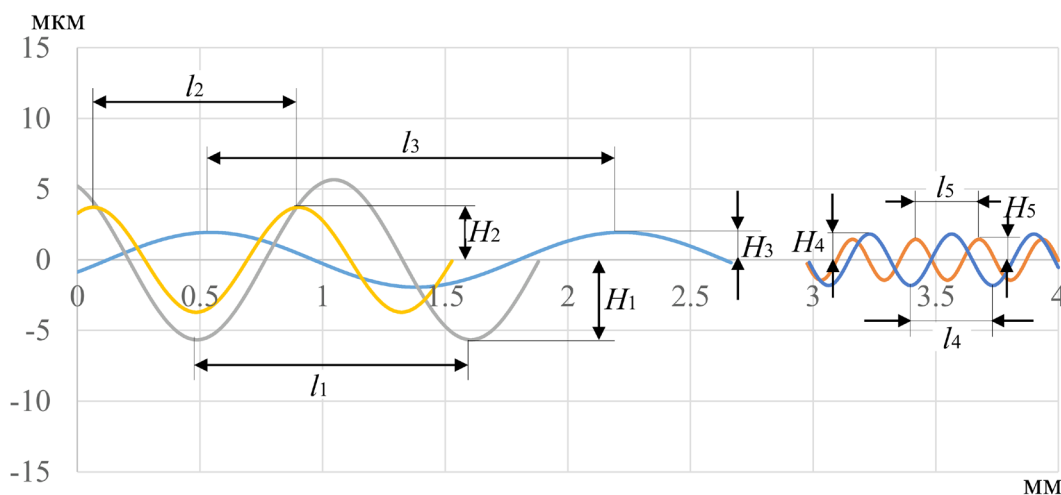


Рис. 10. Пример схемы по определению вида отклонения продольного профиля

Fig. 10. Example of a diagram for determining the type of deviation of the longitudinal profile

от рабочего инструмента, так как, например, при больших плотностях тока, независимо от его рода, они полностью отсутствуют (рис. 11, режимы 3, 4, 7, 9, 10). Минимальные соотношения l/H отмечены для режимов 5 и 8.

В работах [7, 8, 28] упоминается, что такие технологии, как вибронакатка и электрохимическая обработка, способны создавать на поверхности детали специальный микрорельеф для обеспечения эффективного смазывания

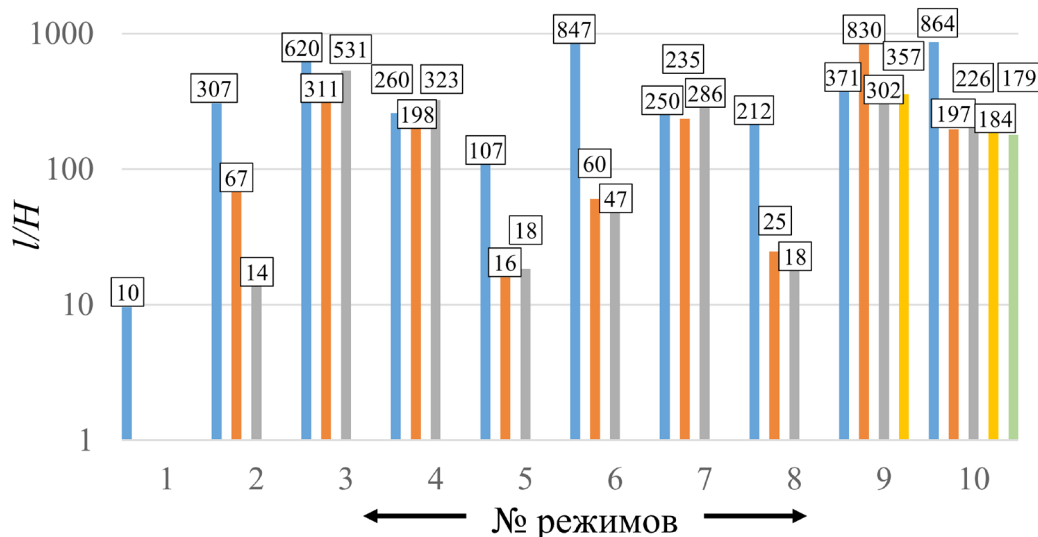


Рис. 11. Диаграммы отношения I/H режимов 1–10 (цифры над столбцами – значения I/H гармоник). Примечание: ось ординат дана в логарифмическом масштабе

Fig. 11. Diagrams of the I/H ratio of modes 1–10 (the numbers above the columns are the I/H harmonic values). Note: the ordinate axis is given on a logarithmic scale

поверхностей трения, создания между парами трения искусственных микроклиньев и иницирования гидродинамического эффекта смазки. Например, ранее авторами работ [29, 30] было показано, что электромеханическая обработка позволила повысить износостойкость стали 45 и титанового сплава BT22 до 5 и 100 раз по отношению к исходной структуре за счет создания на поверхности масляных карманов и высокопрочной структуры.

По приведенным в табл. 2 коэффициентам корреляции видно, что сильная взаимосвязь наблюдается для наклепанного роликовым инструментом слоя – режима 2, и для электромеханического сглаживания и обработки переменным током (режим 4 и 9, $R \geq 0,7$). Для режимов 1, 3 отмечена средняя связь ($0,5 \leq R \leq 0,7$). Слабая связь между модельной кривой и экспериментальными данными отмечена для ЭМО постоянным током и усилием прижатия 150 Н, плотностью 100, 300 и 600 А/мм² а также переменным током плотностью 100 и 600 А/мм²

с тем же усилием прижатия (табл. 2, режимы 5, 6, 7, 8, 10).

Низкий коэффициент корреляции для пятого режима может быть вызван попаданием амплитуд (высот) спектра в соседние частоты, что потенциально вызывает искажение или скрытие пиков с более низкой амплитудой [31]. Факт малой величины R для режима 6, по предположению авторов, обусловлен отсутствием циклической составляющей на более чем 1/3 участка профиля, т. е. отсутствием чувствительности данного математического аппарата к локальному изменению сигнала на участке.

Согласно данным работы [32], для формирования подвижных соединений важно обеспечить оптимальную посадку с натягом, так как профиль с низкими высотными показателями дорог в получении, а большие значения высоты профиля вызывают преждевременное ослабление посадки и износ из-за пластической деформации выступов, что, в свою очередь, может вызвать низкую герметичность соединений деталей

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и модельными кривыми профиля
Correlation coefficients between experimental data and model profile curves

Номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент корреляции $ R $	0,57	0,71	0,51	0,73	0,20	0,23	0,37	0,26	0,74	0,40

и увеличение скорости коррозии металлических сплавов. Известно также, что увеличение параметров t_p и S_m приводит к снижению коэффициента трения и увеличению износостойкости, а увеличение S_m с одновременным снижением Ra значительно уменьшает влияние неровностей (концентраторов напряжений) на усталостную прочность и долговечность [33]. Правильный подбор режимов ЭМО и ППД, технический и технологический контроль за процессом упрочнения, а также использование математических алгоритмов, например БПФ, позволяет получить качественный профиль поверхности без погрешности на биение образца в патроне, колебание усилия прижатия контакта образца к токоъемному приспособлению и по другим причинам.

Выводы

1. Анализ профилограмм поверхности титанового сплава BT22 показал, что все технологические режимы обработки способствуют снижению высотных параметров (Ra до 1,35 мкм) и повышению класса чистоты поверхности с 3 по 6. Электромеханическая обработка постоянным током высокой плотности способствует качественному снижению «вибрации» профиля от предшествующей получистой токарной обработки.

2. Электромеханическая обработка и сглаживание (режимы 3, 6, 7) способствуют снижению шагового параметра профиля поверхности до 2,28 раза и увеличению относительной опорной длины до 98,8 % с приданием профилю формы «масляных карманов» как малой, так и большой жесткости, а также волнистости с различными шаговыми и высотными параметрами.

3. Применение быстрого преобразования Фурье позволило установить главные составляющие комплексной многопереходной обработки, выделить циклическую составляющую профиля, получить графики распределения неровностей профиля на основе аппроксимационных моделей и исключить случайные составляющие от технологических обработок (возможной вибрации, малой жесткости в системе «СПИД» и биения образца в патроне) для правильной интерпретации полученных результатов. Наибольший коэффициент корреляции ($R > 0,7$) был отмечен

для ППД и ЭМО переменным током ввиду преобладания тенденции от предшествующей получистой обточки и волнистости от ЭМО (режимы 2, 4, 9).

4. Быстрое преобразование Фурье может быть использовано в качестве экспресс-оценки и классификации по масштабному фактору продольных отклонений профиля поверхности деталей машин после различных видов обработки.

5. В качестве оптимального по параметрам микрогеометрии поверхности режима обработки для технолога машиностроительного производства можно рекомендовать режим 3, позволивший эффективно снизить высотные и шаговые параметры, а также значительно повысить структурный параметр, ответственный за несущую способность сопрягаемых деталей.

Список литературы

1. Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Премент Г.Б. Технологическое наследование эксплуатационных параметров качества в жизненном цикле деталей двигателя внутреннего сгорания // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 7 (97). – С. 35–42. – DOI: 10.30987/article_5cf7bd2fec77a9.13115279.
2. Аверченков В.И., Васильев А.С., Хейфец М.Л. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 10 (88). – С. 27–32.
3. Optimization of subtractive-transformative hybrid processes supported by the technological heredity concept / W. Grzesik, K. Żak, R. Chudy, M. Prażmowski, J. Małacka // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68 (1). – P. 101–104. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.03.005.
4. Влияние фазового состава титановых сплавов на параметры шероховатости, получаемые в процессе проволоочной электроэрозионной обработки / А.А. Федоров, Ю.Е. Жданова, А.В. Ливновский, Н.В. Бобков, Ю.О. Бредгауэр // Омский научный вестник. – 2021. – № 4 (178). – С. 18–24. – DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-18-24.
5. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Влияние технологической наследственности напряженно-деформированного состояния на точность нежестких деталей // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2020. – № 1. – С. 56–64. – DOI: 10.31857/S0235711920010095.
6. Microstructure evolution and electroplasticity in Ti64 subjected to electropulsing-assisted laser shock peening / H. Zhang, Z. Ren, J. Liu, J. Zhao, Z. Liu, D. Lin, R. Zhang, M.J. Graber, N.K. Thomas, Z.D. Kerek, G.-X. Wang, Y. Dong, C. Ye // Journal of



Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 802. – P. 573–582. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.156.

7. Электромеханическое упрочнение металлов и сплавов / В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина, И.Н. Захаров, А.Н. Савкин, Д.С. Денисевич. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 460 с.

8. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.

9. Sensitivity of material failure to surface roughness: A study on titanium alloys Ti64 and Ti407 / S. Sneddon, Y. Xu, M. Dixon, D. Rugg, P. Li, D.M. Mulvihill // Materials & Design. – 2021. – Vol. 200. – P. 109438. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109438.

10. Overview of surface modification techniques for titanium alloys in modern material science: A comprehensive analysis / K. Gao, Y. Zhang, J. Yi, F. Dong, P. Chen // Coatings. – 2024. – Vol. 14 (1). – P. 148. – DOI: 10.3390/coatings14010148.

11. Enhancement of the microstructure and fatigue crack growth performance of additive manufactured titanium alloy parts by laser-assisted ultrasonic vibration processing / S.A. Ojo, K. Manigandan, G.N. Morscher, A.L. Gyekenyesi // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2024. – Vol. 33. – P. 10345–10359. – DOI: 10.1007/s11665-024-09323-8.

12. Amanov A., Yeo I.K., Jeong S.H. Advanced post-processing of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting: A study of laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 35. – P. 4020–4031. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.02.038.

13. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: A mini review / R. Liu, S. Yuan, N. Lin, Q. Zeng, Z. Wang, Y. Wu // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 11. – P. 351–377. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.013.

14. Effect of surface roughness on fatigue strength of Ti-6Al-4V alloy manufactured by additive manufacturing / M. Nakatani, H. Masuo, Y. Tanaka, Y. Murakami // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 19. – P. 294–301. – DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.032.

15. Civiero R., Perez-Rafols F., Nicola L. Modeling contact deformation of bare and coated rough metal bodies // Mechanics of Materials. – 2023. – Vol. 179. – P. 104583. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2023.104583.

16. Han T., Fan J. Ultrasonic measurement of contact stress at metal-to-metal interface based on a real rough profile through modeling and experiment // Measurement. – 2023. – Vol. 217. – P. 113046. – DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113046.

17. A novel comprehensive framework for surface roughness prediction of integrated robotic belt grin-

ding and burnishing of Inconel 718 / B. Qi, X. Huang, W. Guo, X. Ren, H. Chen, X. Chen // Tribology International. – 2024. – Vol. 195. – P. 109574. – DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109574.

18. Influence factors and prediction model of surface roughness in single-point diamond turning of polycrystalline soft metal / Z. Xue, M. Lai, F. Xu, F. Fang // Journal of Materials Processing Technology. – 2024. – Vol. 324. – P. 118256. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118256.

19. Modeling of surface hardening and roughness induced by turning AISI 4140 QT under different machining conditions / B. Stampfer, J. Bachmann, D. Gauder, D. Böttger, M. Gerstenmeyer, G. Lanza, B. Wolter, V. Schulze // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 108. – P. 293–298. – DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.050.

20. Roughness prediction model of milling noise-vibration-surface texture multi-dimensional feature fusion for N6 nickel metal / S. Li, S. Li, Z. Liu, A.V. Petrov // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 79. – P. 166–176. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.04.055.

21. An acoustic dataset for surface roughness estimation in milling process / N.R. Sakthivel, J. Cherian, B.B. Nair, A. Sahasransu, L.N.V.P. Aratipamula, S.A. Gupta // Data in Brief. – 2024. – Vol. 57. – P. 111108. – DOI: 10.1016/j.dib.2024.111108.

22. Surface roughness prediction based on fusion of dynamic-static data / J. Wang, X. Wu, Q. Huang, Q. Mu, W. Yang, H. Yang, Z. Li // Measurement. – 2025. – Vol. 243. – P. 116351. – DOI: 10.1016/j.measurement.2024.116351.

23. Features of changes in the surface structure and phase composition of the of $\alpha + \beta$ titanium alloy after electromechanical and thermal treatment / V.P. Bagmu- tof, V.I. Vodopyanov, I.N. Zakharov, A.Y. Ivannikov, A.I. Bogdanov, M.D. Romanenko, V.V. Barinov // Metals. – 2022. – Vol. 12 (9). – P. 1535. – DOI: 10.3390/ met12091535.

24. The improved fault location method based on natural frequency in MMC-HVDC grid by combining FFT and MUSIC algorithms / J. He, B. Li, Q. Sun, Y. Li, H. Lyu, W. Wang, Z. Xie // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – Vol. 137. – P. 107816. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107816.

25. Федоров В.Л. Критерий определения числа гармоник рядов Фурье, аппроксимирующих напряжения и токи трансформатора // Омский научный вестник. – 2018. – № 5 (161). – С. 82–89. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-82-89.

26. Конспект лекций по дисциплине «Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей» / сост. Г.В. Мураткин. – Тольятти: ТГУ, 2008. – 120 с.

27. *Мальшико С.Б., Тарасов В.В.* Влияние технологических параметров электромеханической обработки на шероховатость поверхности // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады тринадцатой научно-практической конференции с международным участием. – Владивосток, 2019. – С. 63–65. – EDN TJDMDB.

28. *Учкин П.Г.* Применение вибронакатывания гильз цилиндров двигателя внутреннего сгорания с целью увеличения их ресурса // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2 (100). – С. 99–105. – DOI: 10.37670/2073-0853-2023-100-2-99-105.

29. Влияние импульсного электромеханического упрочнения на износостойкость подвижных сопряжений / С.Н. Паршев, И.М. Серов, А.В. Зубков, А.В. Коробов // Молодой ученый. – 2015. – № 23 (103), ч. 2. – С. 200–204.

30. Influence of technological modes of combined high-energy treatment on wear resistance of transition class titanium alloy / V.P. Bagmutov, I.N. Zakharov, M.D. Romanenko, V.V. Barinov, V.V. Tikhayeva // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67 (10). – P. 1647–1653. – DOI: 10.1007/s11182-024-03294-y.

31. *Manus H.* An ultra-precise fast Fourier transform // Science Talks. – 2022. – Vol. 4. – P. 100097. – DOI: 10.1016/j.sctalk.2022.100097.

32. *Леонов О.А., Вергазова Ю.Г.* Относительная опорная длина профиля поверхности и долговечность деталей // Инновационная наука. – 2016. – № 1-2 (13). – С. 81–83.

33. *Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С.* Качество поверхности и свойства деталей машин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2004. – № 1 (20). – С. 8–12.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov











Mathematical analysis of the titanium alloy surface profile under various modes of electromechanical treatment



Mikhail Romanenko^{1,a,*}, Igor Zakharov^{1,b}, Vyacheslav Bagmutov^{1,c}, Vladislav Barinov^{1,d},
 Minh Tuong Nguyen^{2,e}

¹ Volgograd State Technical University, 28 Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation

² Russian Technological University MIREA, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4800-7151>,  romanenko.mihail2009@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-7177-7245>,  4zaxap@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-3648-8450>,  sopromat@vstu.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-9400-7366>,  barinov@vstu.ru;

^e  <https://orcid.org/0009-0004-7484-7009>,  nguen_m@mirea.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 May 2025

Revised: 30 June 2025

Accepted: 10 October 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Profilogram

Microgeometry

Fast Fourier transformation (FFT)

Harmonic

Electromechanical treatment

Surface plastic deformation

Titanium alloy VT22

Funding

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 25-29-20241).

ABSTRACT

Introduction. Currently, many mathematical approaches exist for approximating surface profile curves. Most employ volumetric mathematical expressions to describe surface profile parameters after various types of processing. **Purpose of the work** is to select a mathematical apparatus that is simple enough from an engineering perspective to approximate the surface profile of VT22 titanium alloy samples after surface plastic deformation (SPD) and various electromechanical processing (EMP) modes, with the possibility of eliminating random technological errors. **The paper investigates** the effect of EMP modes using alternating and direct current at densities of 100, 300, and 600 A/mm², considering both the application of force by the deforming tool-electrode (150 N) and its absence (10 N), on the surface geometry of VT22 titanium alloy samples. The electromechanical processing of metal alloys used in this work can significantly change the geometric profile, structure, and operational properties of the surface. Its distinctive feature is the creation of both microdeviations (roughness) and macrodeviations and relief (waviness, “oil pockets”, build-ups from metal surfacing to the repair size) on the surface. **Research methods.** Profilometric analysis was performed using a PM-7 device, followed by processing of the roughness measurement results using the fast Fourier transform (FFT) on the surface of a cylindrical sample made of VT22 titanium alloy with a diameter of 16 mm after electromechanical rolling with an tool-electrode, previously subjected to semi-finish turning. The error of the model curves of the surface profile was estimated using the Pearson correlation coefficient (*R*). **Results and discussion.** The use of high-density direct current helps to obtain a surface with a high relative support length of the profile (98.8%), a low arithmetic mean deviation of the profile (1.9 μm), and an average step of profile irregularities (56 μm). Based on the FFT, the considered modes of electromechanical processing contribute to the formation of profile waviness with different pitch and height. The greatest correlation is observed for modes 2, 4, and 9 (*R* > 0.7), while the lowest correlation coefficient was noted for EMP with a direct current density of 100 and 300 A/mm² (modes 5 and 6, *R* < 0.25).

For citation: Romanenko M.D., Zakharov I.N., Bagmutov V.P., Barinov V.V., Nguyen M.T. Mathematical analysis of the titanium alloy surface profile under various modes of electromechanical treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 80–95. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-80-95. (In Russian).

References

1. Heifetz M.L., Gretskey N.L., Prement G.B. Technological inheritance of operational quality parameters in the life cycle of internal combustion engine parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, no. 7 (97), pp. 35–42. DOI: 10.30987/article_5cf7bd2fec77a9.13115279. (In Russian).

* Corresponding author

Romanenko Mikhail D., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer

Volgograd State Technical University,

28 Lenin Avenue,

400005, Volgograd, Russian Federation

Tel.: +7 977 064-06-19, e-mail: romanenko.mihail2009@yandex.ru

2. Averchenkov V.I., Vasiliev A.S., Heifetz M.L. Technological heredity in the formation of the quality of manufactured parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, no. 10 (88), pp. 27–32. (In Russian).
3. Grzesik W., Żak K., Chudy R., Prażmowski M., Małecka J. Optimization of subtractive-transformative hybrid processes supported by the technological heredity concept. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68 (1), pp. 101–104. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.03.005.
4. Fedorov A.A., Zhdanova Yu.E., Linovskii A.V., Bobkov N.V., Bredgauer Yu.O. Vliyanie fazovogo sostava titanovykh splavov na parametry sherokhovatosti, poluchaemye v protsesse provolochnoi elektroerozionnoi obrabotki [Influence of the phase composition of titanium alloys on the roughness parameters obtained during wire electrical discharge machining]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 4 (178), pp. 18–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-18-24. (In Russian).
5. Muratkin G.V., Sarafanova V.A. Vliyanie tekhnologicheskoi nasledstvennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na tochnost' nezhestkikh detalei [Influence of technological heredity of the stress-strain state on the accuracy of non-rigid parts]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin = Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2020, no. 1, pp. 56–64. DOI: 10.31857/S0235711920010095.
6. Zhang H., Ren Z., Liu J., Zhao J., Liu Z., Lin D., Zhang R., Graber M.J., Thomas N.K., Kerek Z. D., Wang G.-X., Dong Y., Ye C. Microstructure evolution and electroplasticity in Ti64 subjected to electropulsing-assisted laser shock peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 802, pp. 573–582. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.156.
7. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N., Savkin A.N., Denisevich D.S. *Elektromekhanicheskoe uprochnenie metallov i splavov* [Electromechanical hardening of metals and alloys]. Volgograd, Volg-STU Publ., 2016. 460 p.
8. Askinazi B.M. *Uprochnenie i vosstanovlenie detalei mashin elektromekhanicheskoi obrabotkoi* [Strengthening and restoration of machine parts by electromechanical treatment]. 3rd ed., rev. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 200 p.
9. Sneddon S., Xu Y., Dixon M., Rugg D., Li P., Mulvihill D.M. Sensitivity of material failure to surface roughness: A study on titanium alloys Ti64 and Ti407. *Materials & Design*, 2021, vol. 200, p. 109438. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109438.
10. Gao K., Zhang Y., Yi J., Dong F., Chen P. Overview of surface modification techniques for titanium alloys in modern material science: A comprehensive analysis. *Coatings*, 2024, vol. 14 (1), p. 148. DOI: 10.3390/coatings14010148.
11. Ojo S.A., Manigandan K., Morscher G.N., Gyekenyesi A.L. Enhancement of the microstructure and fatigue crack growth performance of additive manufactured titanium alloy parts by laser-assisted ultrasonic vibration processing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 33, pp. 10345–10359. DOI: 10.1007/s11665-024-09323-8.
12. Amanov A., Yeo I.K., Jeong S.H. Advanced post-processing of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting: A study of laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, vol. 35, pp. 4020–4031. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.02.038.
13. Liu R., Yuan S., Lin N., Zeng Q., Wang Z., Wu Y. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: A mini review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 11, pp. 351–377. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.013.
14. Nakatani M., Masuo H., Tanaka Y., Murakami Y. Effect of surface roughness on fatigue strength of Ti-6Al-4V alloy manufactured by additive manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 19, pp. 294–301. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.032.
15. Civiero R., Perez-Rafols F., Nicola L. Modeling contact deformation of bare and coated rough metal bodies. *Mechanics of Materials*, 2023, vol. 179, p. 104583. DOI: 10.1016/j.mechmat.2023.104583.
16. Han T., Fan J. Ultrasonic measurement of contact stress at metal-to-metal interface based on a real rough profile through modeling and experiment. *Measurement*, 2023, vol. 217, p. 113046. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113046.
17. Qi B., Huang X., Guo W., Ren X., Chen H., Chen X. A novel comprehensive framework for surface roughness prediction of integrated robotic belt grinding and burnishing of Inconel 718. *Tribology International*, 2024, vol. 195, p. 109574. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109574.
18. Xue Z., Lai M., Xu F., Fang F. Influence factors and prediction model of surface roughness in single-point diamond turning of polycrystalline soft metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, vol. 324, p. 118256. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118256.

19. Stampfer B., Bachmann J., Gauder D., Böttger D., Gerstenmeyer M., Lanza G., Wolter B., Schulze V. Modeling of surface hardening and roughness induced by turning AISI 4140 QT under different machining conditions. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 108, pp. 293–298. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.050.
20. Li S., Li S., Liu Z., Petrov A.V. Roughness prediction model of milling noise-vibration-surface texture multi-dimensional feature fusion for N6 nickel metal. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 79, pp. 166–176. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.04.055.
21. Sakthivel N.R., Cherian J., Nair B.B., Sahasransu A., Aratipamula L.N.V.P., Gupta S.A. An acoustic dataset for surface roughness estimation in milling process. *Data in Brief*, 2024, vol. 57, p. 111108. DOI: 10.1016/j.dib.2024.111108.
22. Wang J., Wu X., Huang Q., Mu Q., Yang W., Yang H., Li Z. Surface roughness prediction based on fusion of dynamic-static data. *Measurement*, 2025, vol. 243, p. 116351. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.116351.
23. Bagmutov V.P., Vodopyanov V.I., Zakharov I.N., Ivannikov A.Y., Bogdanov A.I., Romanenko M.D., Barinov V.V. Features of changes in the surface structure and phase composition of the of $\alpha + \beta$ titanium alloy after electromechanical and thermal treatment. *Metals*, 2022, vol. 12 (9), p. 1535. DOI: 10.3390/met12091535.
24. He J., Li B., Sun Q., Li Y., Lyu H., Wang W., Xie Z. The improved fault location method based on natural frequency in MMC-HVDC grid by combining FFT and MUSIC algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, vol. 137, p. 107816. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107816.
25. Fedorov V.L. Kriterii opredeleniya chisla garmonik ryadov Fur'e, approksimiruyushchikh napryazheniya i toki transformatora [Criterion for determining the number of harmonics of Fourier series approximating transformer voltages and currents]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 5 (161), pp. 82–89. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-82-89.
26. Muratkin G.V., comp. *Konspekt lektsii po distsipline «Osnovy vosstanovleniya detalei i remont avtomobilei»* [Lecture notes on the discipline “Fundamentals of Parts Restoration and Car Repair”]. Tolyatti, TSU Publ., 2008. 120 p.
27. Malyshko S.B., Tarasov V.V. [The influence of the technological parameters of the electromechanical treatment on the surface roughness]. *Problemy transporta Dal'nego Vostoka* [Problems of Transport in the Far East]. Proceedings from 13th Scientific and Practical Conference. Vladivostok, 2019, pp. 63–65. (In Russian).
28. Uchkin P.G. Primenenie vibronakatyvaniya gil'z tsilindrov dvigatelya vnutrennego sgoraniya s tsel'yu uvelicheniya ikh resursa [The use of vibration rolling of cylinder liners of an internal combustion engine in order to increase their resource]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2023, no. 2 (100), pp. 99–105. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-100-2-99-105.
29. Parshev S.N., Serov I.M., Zubkov A.V., Korobov A.V. Vliyanie impul'snogo elektromekhanicheskogo uprochneniya na iznosostoičnost' podvizhnykh sopryazhenii [Influence of pulsed electromechanical hardening on the wear resistance of movable joints]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2015, no. 23 (103), pt. 2, pp. 200–204.
30. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Romanenko M.D., Barinov V.V., Tikhaeva V.V. Influence of technological modes of combined high-energy treatment on wear resistance of transition class titanium alloy. *Russian Physics Journal*, 2024, vol. 67 (10), pp. 1647–1653. DOI: 10.1007/s11182-024-03294-y.
31. Manus H. An ultra-precise fast Fourier transform. *Science Talks*, 2022, vol. 4, p. 100097. DOI: 10.1016/j.sctalk.2022.100097.
32. Leonov O.A., Vergazova Yu.G. Otnositel'naya opornaya dlina profilya poverkhnosti i dolgovechnost' detalei [Relative bearing length of the surface profile and durability of parts]. *Innovatsionnaya nauka = Innovative Science*, 2016, no. 1-2 (13), pp. 81–83.
33. Aliev A.A., Bulgakov V.P., Prikhod'ko B.S. Kachestvo poverkhnosti i svoistva detalei mashin [Surface quality and properties of machine parts]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2004, no. 1 (20), pp. 8–12.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.