

УДК: 621.787

**КОМБИНИРОВАННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ  
ВОЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН  
ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ ТИТАНОВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ**

**COMBINED SURFACE MODIFICATION OF PARTS  
OF MILITARY CATERPILLAR MACHINES MADE FROM TITANIUM ALLOYS**

*Канд. техн. наук В.Р. Эдигаров, канд. техн. наук Б.Ш. Алимбаева*

*PhD V.R. Edigarov, PhD B.Sh. Alimbaeva*

*Омский автобронетанковый инженерный институт*

В статье приведены результаты исследования комбинированной технологии поверхностного упрочнения деталей военных гусеничных машин изготовленных из титановых сплавов. Технология включает фрикционно-электрическое модифицирование с использованием поверхностно-активного модификатора — скрытокристаллического графита (ФЭМ) и ультразвуковую обработку (УЗО). Изучены микротвердость, износостойкость и шероховатость поверхностного слоя, а также особенности структурно-фазового состояния поверхностного слоя титанового деформируемого сплава после комбинированной обработки. Установлено увеличение микротвердости поверхности обработанного материала до 40% при обработке по предложенной технологии. Указанный эффект достигается интенсивным термомодеформационным воздействием, измельчением зерен в процессе фазовых превращений, формированием мелкодисперсных карбидов титана.

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, фрикционно-электрическое модифицирование, ультразвуковая обработка, микротвердость, титановый сплав.

The article presents the results of the study of the combined technology of surface hardening of parts of military tracked machines made of titanium alloys. The technology includes friction-electric modification using a surface-active modifier — hidden crystal graphite (FEM) and ultrasonic processing (ultrasound). Microhardness, wear resistance and roughness of surface layer, as well as peculiarities of structural-phase state of surface layer of titanium deformable alloy after combined treatment are studied. Increased microhardness of treated material surface up to 40% during treatment according to the proposed technology. Said effect is achieved by intense thermodeformation action, grain grinding during phase transformations, formation of fine titanium carbides.

**Keywords:** surface hardening, friction-electric modification, ultrasonic treatment, microhardness, titanium alloy.

В современном производстве деталей вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) эффективно используется в качестве конструкционного материала титан и его сплавы (табл. 1, 2).

Расширение номенклатуры деталей изготавливаемых из титана, а также совершенствование

методов производства и обработки этого металла имеет большое практическое и научное значение. Замена разнообразных конструкционных элементов, изготавливаемых из конструкционных сталей на титан и его сплавы в производстве, позволяет снизить расход топлива, увеличить полезную

Таблица 1

**Применение титана и его сплавов в производстве военных гусеничных и колесных машин**

Деталь, узел	Шифр изделия
Узлы и детали ходовой части	Объекты 915, 915К, 915П, 915ПК, 916, 916К, 925, 925А, 925 Г, 925Р, 925С, 926, 932
	Объекты 950, 950К, 952, 955, 956, 958
	Объекты 688, 685
Крыша моторно-трансмиссионного отделения (МТО)	Объект 219
Крышки и люки	Объект 195 (эксп.)
Детали	Объекты 685, 688
Бронешиты	Авиатехника

Таблица 2

**Титановые сплавы в производстве деталей ходовой части военных гусеничных машин (серийных образцов)**

Узлы и детали ходовой части	Об. 915, 916, 925 и др.	Об. 950, 955 и др.	Об. 688, 685 и др.
Балансиры подвески	+	+	+
Рычаги подвески	+	+	+
Опоры подвески	+	+	–
Кривошип механизма натяжения	+	+	+
Рычаги кривошипов натяжения	+	+	–
Штоки и опоры механизма натяжения	+	+	–
Корпуса гидропневморессор	+	+	–
Оси поддерживающих катков	+	+	+
Пальцы гусениц	–	+	+
Крепежные детали (болты, гайки, шайбы и др.)	–	+	+
Общее уменьшение массы объекта при применении титановых сплавов взамен стали составляет, кг:	280	420	400

грузоподъемность, повысить предел усталости изделий и улучшить множество других характеристик, что обеспечивает их существенное преимущество по сравнению с традиционными материалами на основе железа [1]. Замена стальных деталей в ходовой части военных гусеничных машин (ВГМ) существующих серийных образцов (приведенных в табл. 3) на детали из титановых сплавов может обеспечить снижение массы объекта в целом свыше 500 килограмм.

Однако титану и титановым сплавам присущ и ряд недостатков, препятствующих широкому использованию его в производстве деталей специальных транспортных средств работающих в тяжелых условиях эксплуатации. Прежде всего, недостаточная износостойкость и низкие триботехнические свойства поверхностных слоев деталей изготовленных из титана и его сплавов, работающих в условиях фрикционного

контакта, низкая выносливость титановых деталей при знакопеременном циклическом нагружении, высокая чувствительность к концентраторам напряжений, неудовлетворительная контактная прочность при статических и циклических воздействиях [2].

С целью устранения отмеченных выше недостатков титана и его сплавов, обеспечения эффективного применения его в производстве ответственных деталей специальных транспортных средств рекомендуется применение термической, деформационно-термической, химико-термической и других способов обработки, а также различных методов упрочнения, в основе которых лежит использование высококонцентрированных потоков энергии (токов высокой частоты (ТВЧ), электронных пучков, магнитных полей, излучений оптических квантовых генераторов, низковольтных и высоковольтных элек-

**Возможность замены стальных деталей на детали из титановых сплавов в ходовой части ВГМ**

Детали ходовой части	Количество деталей в изделии	Марка стали из которой изготовлены детали	Предлагаемые замены стали на титановый сплав
Кронштейны	8	40Х	BT3-1 штамповка
Рычаги	8	40Х	BT3-1 штамповка
Рычаги нижние	8	40Х	BT3-1 штамповка
Рычаги верхние	8	40Х	BT3-1 штамповка
Оси верхних рычагов	24	40Х	BT3-1 пруток
Оси нижних рычагов	8	30ХГСА	BT3-1 пруток
Картеры редукторов	8	35Л	BT5-1 отливка
Крышки редукторов	8	35Л	BT5-1 отливка
Масса деталей, кг		1316	758
Уменьшение массы, кг			558

трических разрядов, энергии взрыва, трения и др.) [2].

Авторами работ [2–4] отмечается эффективность способов поверхностного легирования и модифицирования титана и его сплавов с изменением структуры и свойств за счет третьей фазы на основе химических соединений, при этом они должны иметь низкий коэффициент диффузии и быть достаточно термодинамически стабильными. Наиболее полно вышеуказанным требованиям отвечают бор и углерод, которые при определенных условиях образуют с титаном химические соединения (карбиды, бориды) [5, 6]. Упрочняющие частицы могут формироваться в поверхностном слое в виде соединений или внедряться в него в готовом виде [7, 8].

В работе представлены результаты проведенных исследований свойств поверхностных слоев титановых сплавов, подвергнутых комбинированной обработке фрикционно-электрическим модифицированием (ФЭМ) [9–11] и ультразвуковой обработке (УЗО) [12], включающей высокоэнергетическое воздействие через промежуточную среду — модификатор, смесь упрочняющих частиц с поверхностно-активным веществом (ПАВ), на исходную структуру поверхностного слоя с последующей ультразвуковой обработкой, позволяющие формировать у обрабатываемой поверхности заданные физико-механические свойства и высокие эксплуатационные характеристики.

Технология комбинированной обработки фрикционно-электрическим модифицированием и ультразвуковой обработкой (ФЭМ + УЗО) реализована на установке, основными элементами

которой являются: токарно-винторезный станок модели ИТ-1М с источником постоянного тока типа ВАКГ-12/6-630-4, твердосплавный инструмент пластины и ролики, токопроводящие щетки с прижимными пружинами и изолирующими пластинами, установка для ультразвуковой обработки.

Фрикционно-электрическое модифицирование (ФЭМ) осуществляли на режимах [9–16]: плотность тока  $j = 400 \text{ А/мм}^2$ ; скорость обработки  $V = 0,5–0,7 \text{ м/мин}$ ; подача  $S = 0,3–0,5 \text{ мм/об}$ ; усилие прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности  $P = 800–1400 \text{ Н}$ ; рабочий инструмент — пластина из твердого сплава Т15К6 и ролики из твердого сплава ВК6С диаметром 60 мм. В качестве модификатора поверхности использовали мелкодисперсный порошок скрытокристаллического графита (СКГ) в комбинации с поверхностно активным веществом (ПАВ) глицерином, полученную смесь равномерно наносили на обрабатываемую поверхность непосредственно перед обработкой.

ФЭМ проводили в два прохода, первый проход осуществлялся инструментом — пластиной, второй проход роликом, при этом режимы обработки незначительно изменялись в сторону увеличения силы тока при обработке роликом.

УЗО выполняли на режимах: частота колебаний излучателя 22 кГц; скорость обработки  $V = 4,71 \text{ м/мин}$ ; подача  $S = 0,07 \text{ мм/об}$ ; деформирующее усилие  $F = 100 \text{ Н}$  [12, 15].

В качестве образцов для исследования использовались цилиндрические заготовки диаметром 50 мм и длиной 12 мм из титанового деформируемого сплава. Все исследования

проводили на образцах, изготовленных из одной партии материала.

Исследуемые поверхности экспериментальных образцов подвергали следующим способам обработки: электромеханическая обработка (ЭМО), фрикционно-электрическое модифицирование (ФЭМ), ультразвуковая обработка (УЗО), комбинированная электромеханическая и ультразвуковая обработка (ЭМО + УЗО), комбинированная обработка фрикционно-электрическим модифицированием и ультразвуковой обработкой (ФЭМ + УЗО).

Для исследования микротвердости поверхностного слоя по глубине зондируемого слоя, а также с целью изучения образовавшейся структуры, делали плоский срез на цилиндрической поверхности образца и производили внедрение индентора прибора ПМТ-3М через равные расстояния. Получали отпечатки пирамиды различной величины и по диагонали отпечатка рассчитывали глубину внедрения индентора. При этом учитывалось, что полученные значения микротвердости дают интегральную оценку механических свойств модифицированного слоя. По полученным значениям строили зависимости микротвердости от глубины поверхностного слоя для каждого образца.

Методика исследования шероховатости поверхностного слоя включала изучение влияния режимов обработки на шероховатость образцов.

Для оценки параметра шероховатости  $Ra$  снимали профилограммы поверхностей до и после обработки на профилометре-профилографе модели 201 «Калибр». При этом фиксировали значения  $Ra$ . Съёмку проводили на трех участках каждого образца и определяли среднюю величину параметра шероховатости  $Ra$ .

На рисунке представлены результаты исследования микротвердости поверхностного слоя образцов из титанового деформируемого сплава после электромеханической обработки (ЭМО), фрикционно-электрического модифицирования с использованием поверхностно-активного модификатора — скрытокристаллического графита (ФЭМ), ультразвуковой обработки (УЗО), комбинированной электромеханической обработки и ультразвуковой обработки (ЭМО + УЗО), комбинированной фрикционно-электрической обработки с использованием поверхностно-активного модификатора — скрытокристаллического графита и ультразвуковой обработки (ФЭМ + УЗО) в сравнении с необработанным образцом в исходном состоянии ( $H_{\mu} = 3600$  МПа).

В результате горячей пластической деформации поверхностного слоя в процессе «классической» электромеханической обработки в один проход происходит увеличение микротвердости поверхностного слоя примерно на 20% от исходного значения ( $H_{\mu} = 4200$ – $4300$  МПа).

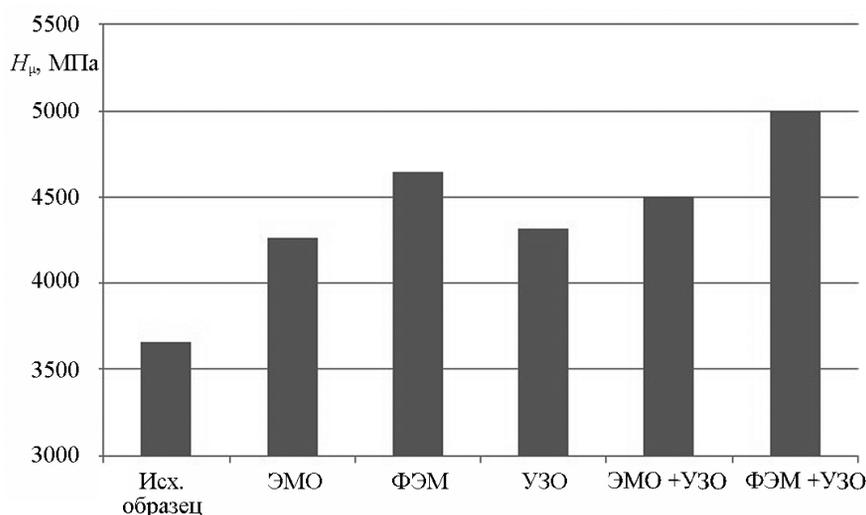


Рис. Изменение средней микротвердости поверхностного слоя образцов титанового деформируемого сплава в зависимости от способа обработки:

ЭМО, ФЭМ, УЗО, комбинированная обработка ЭМО + УЗО, комбинированная обработка ФЭМ+УЗО, исходный необработанный образец

Фрикционно-электрическое модифицирование поверхностного слоя, сочетающее фрикционно-динамическое нагружение в условиях трения скольжения инструмента с высокоточной электрической нагрузкой в зоне контакта инструмента с деталью, через промежуточную среду — модификатор, содержащий поверхностно-активное вещество и скрытокристаллический графит за счет горячей пластической деформации позволяет сформировать поверхностный слой с увеличенной микротвердостью поверхностного слоя, примерно на 28–32% больше исходного значения (примерно  $H_{\mu} = 4650$  МПа).

Ультразвуковая обработка титанового деформируемого сплава приводит к росту микротвердости его поверхностного слоя на величину сопоставимую с соответствующими значениями после ЭМО и ФЭМ (примерно 20–25%,  $H_{\mu} = 4320$  МПа), это достигается за счет поверхностной пластической деформации, без локального нагрева (в отличие от ЭМО и ФЭМ). Для структуры упрочненного поверхностного слоя всех образцов характерна высокая степень дисперсности, при этом размер зерен снижается в 5–10 раз в сравнении с исходными значениями.

Ультразвуковая обработка проведенная после ЭМО способствует дальнейшему увеличению микротвердости примерно на 5–10% в сравнении с микротвердостью поверхности после ЭМО или ФЭМ. Столь незначительное увеличение микротвердости можно объяснить достижением предела возможностей упрочнения материала поверхностным пластическим упрочнением в процессе ЭМО (ФЭМ). Последующая УЗО не позволяет достичь большего эффекта, так как полученный на предыдущем этапе высокопрочный поверхностный слой не поддается или слабо поддается поверхностному деформированию, т.е. механическому упрочнению при последующих нагружениях в процессе УЗО.

Комбинированная обработка поверхностного слоя фрикционно-электрическим модифицированием (модификатор — скрытокристаллический графит) и последующей ультразвуковой обработкой позволяет сформировать на поверхности титановых образцов упрочненный слой с повышенной микротвердостью, превышающей исходную на 35–40% (примерно  $H_{\mu} = 5000$  МПа).

Металлографический анализ поверхностного слоя титанового деформируемого сплава после комбинированного упрочнения ФЭМ+УЗО показал идентичность полученной структуры результатам ранее проведенных исследований [9, 11, 12], при этом поверхностный слой с максимальной твердостью имеет толщину примерно 50 мкм с ультрадисперсной структурой, в котором зерна имеют сферическую форму и достаточно равномерно распределены с ориентацией в направлении движения деформирующего инструмента в процессе комбинированной обработки. Дефектов в виде пор и трещин зафиксировано не было, однако вблизи зоны максимального термического воздействия обнаружены частицы TiC распределенные в титановой матрице, с размером частиц до 10 мкм. Нижележащий слой, находящийся на глубине от 50 до 100 мкм имеет пластинчатую структуру с ориентацией сопоставимой с исходной структурой сплава и размером пластин до 50 мкм. При этом необходимо отметить, что ЭМО позволяет получить несколько больший по глубине упрочненный слой в сравнении с обработкой УЗО.

Поверхности обработанные ЭМО, ФЭМ с скрытокристаллическим графитом, УЗО, комбинированной ЭМО + УЗО, комбинированной ФЭМ с скрытокристаллическим графитом + УЗО подвергались исследованиям электронно-зондовым методом с целью установления изменений элементного состава титанового сплава в сравнении с необработанным образцом в исходном состоянии (результаты приведены в табл. 4).

После комбинированной обработки ФЭМ + УЗО наблюдается увеличение концентрации углерода до  $1,92 \pm 0,15\%$  (см. табл. 4) в тонком приповерхностном слое, что значительно выше растворимости этого элемента в  $\alpha$ -твердом растворе титана (около 0,1%) [15]. Проведенные ранее металлографические исследования не позволили установить наличие карбидной фазы в структуре сплава, однако рентгеноспектральным микроанализом косвенно подтверждается наличие свободных карбидов. Количество углерода в тонком приповерхностном слое на глубине около 150 мкм составляет примерно  $0,87 \pm 0,05\%$  с последующим снижением его концентрации по мере углубления в основной металл.

При ЭМО происходит интенсивный процесс пластической деформации с высокоскоростными

Состав основных элементов титанового сплава

Элемент	Содержание, % элемента			
	исходный образец	образец подвергнутый ЭМО	образец подвергнутый ФЭМ	образец подвергнутый ФЭМ+УЗО
Ti	92,26 ±1,25	89,41 ±1,20	88,40 ±1,10	88,37 ±1,11
Al	4,89 ±0,30	5,10 ±0,33	5,50 ±0,32	5,49 ±0,34
Mo	1,92 ±0,08	1,25 ±0,05	0,50 ±0,02	0,49 ±0,02
C	0,11 ±0,05	0,61 ±0,09	1,90 ±0,19	1,92 ±0,21

ми электронагревом и последующим отводом тепла во внутрь детали, что создает условия для формирования  $\alpha'$ -фазы. При этом значительного увеличения микротвердости в сравнении с исходным образцом не происходит (прирост составляет не более 20–23 %) ввиду скоротечности процесса термического воздействия на поверхностный слой, а также небольшой разницы удельных объемов образующихся фаз ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha'$ ) [11, 12].

Комбинация технологий ЭМО и УЗО позволяет несколько повысить микротвердость, в сравнении с «классической» ЭМО, однако это увеличение не превышает 5–10 %, что связано прежде всего с достижением предельных возможностей деформационных механизмов упрочнения [11, 12].

Комбинация ФЭМ + УЗО способствует дополнительному повышению микротвердости поверхностного слоя на 10–15 %. В итоге повышение микротвердости достигает до 40 % по сравнению с исходным значением, что связано с образованием в поверхностном слое ультрадисперсных карбидов титана, наличие которых объясняется избыточным содержанием углерода в составе модификатора при ФЭМ.

Проведенными металлографическими исследованиями поверхностных слоев образцов из титанового деформируемого сплава подвергнутых ЭМО, ФЭМ, УЗО, комбинированной ЭМО + УЗО, комбинированной ФЭМ + УЗО установлено измельчение зерен характерное для всех перечисленных способов обработки в различной степени. Комбинированная ФЭМ + УЗО максимально способствует данному процессу и позволяет достичь измельчения зерен с 50 до 5–10 мкм. В процессе модифицирования поверхностного слоя комбинированной ФЭМ + УЗО происходит насыщение угле-

родом с зарождением дополнительных центров кристаллизации и стабилизацией ультрадисперсных карбидов.

### Выводы

Исследован комбинированный способ поверхностного модифицирования титановых сплавов, включающий технологические операции фрикционно-электрического модифицирования поверхности поверхностно-активным модификатором, в состав которого входит скрытокристаллический графит и поверхностно-активное вещество, и последующей ультразвуковой обработки способствующие накоплению свободных частиц излишествующего углерода в дефектах поверхностного слоя и максимальному увеличению микротвердости поверхностного слоя детали до 40 % в сравнении с исходными значениями, а также увеличению износостойкости в 2 раз и снижению шероховатости в 5 раз.

### Литература

1. Купрюнин Д.Г., Гавзе А.Л., Чусов С.Ю. Использование титановых сплавов для конструкционных и броневых деталей изделий автотанковой военной техники и средств индивидуальной бронезащиты (СИБ) // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 7–8. С. 121–122.
2. Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Денисевич Д.С., Захаров И.Н., Захарова Е.Б. Структура и микротвердость титановых сплавов после электромеханической обработки и ультразвукового поверхностного легирования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Том 58. № 4. С. 272–276.

3. Шаркеев Ю.П., Кукареко В.А., Ерошенко Ю.А. и др. Ионная имплантация как метод повышения циклической долговечности титана в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 136–142.

4. Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Формирование нанокompозитных слоев на поверхности титана VT1-0 при электровзрывном науглероживании и электронно-пучковой обработке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 6. С. 67–70.

5. Петровская Т.С. Комплексная обработка поверхности титана // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2009. Т. 11. № 3. 71–73.

6. Панин А.В., Казаченок М.С., Шугуров А.Р. и др. Ультразвуковая обработка наводороженного технического титана VT1-0 // Тяжелое машиностроение. 2010. № 2. С. 36–39.

7. Башенко Л.П., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А. Модификация структуры поверхностных слоев титана VT1-0 при электровзрывном карбоборировании и электронно-пучковой обработке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 68–70.

8. Бровер Г.И., Бровер А.В., Дьяченко Л.Д. Некоторые особенности структуры и свойств поверхностных слоев титана после лазерных закалки и легирования // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2005. № 6. С. 51–55.

9. Машков Ю.К., Эдигаров В.Р., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения // Трение и износ. 2006. Том 27. № 1. С. 89–92.

10. Эдигаров В.Р. Поверхностная фрикционно-электрическая обработка алюминиевых сплавов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 10 (727). С. 25–30.

11. Эдигаров В.Р. Фрикционно-электрическое модифицирование поверхностей деталей машин наноразмерными углеродными материалами // Технология Машиностроения. 2020. № 4. С. 22–28.

12. Эдигаров В.Р. Технология комбинированной электромеханоультразвуковой обработки поверхностных слоев деталей машин // Фунда-

ментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 2 (340). С. 26–34.

13. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация. — Новосибирск: Наука. 2003. 318 с.

14. Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Захаров И.Н., Горунов А.И. Влияние интенсивной термосиловой обработки на структуру и свойства титановых псевдо- $\alpha$ -сплавов в условиях ЭМО // Металлы. 2013. № 5. С. 93–97.

15. Zwicker Ulrich. Titan und Titan-Legierungen. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1974. (Russ. ed.: Zwicker U. Titan i ego splavy. — Moscow: Metallurgiya. 1979. 512 p.).

16. Багмутов В.П., Захаров И.Н., Горунов А.И. и др. Комбинированное поверхностное упрочнение стальных и титановых сплавов на основе электромеханической и ультразвуковой обработок // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2013. Т. 7. № 6 (109). С. 68–71.

## References

1. Kupryunin D.G., Gavze A.L., Chusov S.Yu. Use of titanium alloys for structural and armored parts of items of armored military equipment and personal armor protection equipment (SIB) // Defense equipment issues. Series 16: Technical means of countering terrorism. 2018. № 7–8. P. 121–122.

2. Bagmutov V.P., Vodopyanov V.I., Denisovich D.S., Zakharov I.N., Zakharova E.B. Structure and microhardness of titanium alloys after electromechanical treatment and ultrasonic surface doping // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. 2015. Volume 58. № 4. P. 272–276.

3. Sharkeev Yu.P., Kukareko V.A., Eroshenko Yu.A. et al. Ion implantation as a method of increasing the cyclic durability of titanium in coarse-grained and ultrafine states // Promising materials. 2011. № 12. P. 136–142.

4. Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E. et al. Formation of nanocomposite layers on the surface of titanium VT1-0 during electric explosion carburization and electron beam processing //

Izv. higher education institution. Ferrous metallurgy. 2012. № 6. P. 67–70.

5. Petrovskaya T.S. Complex Titanium Surface Treatment // Izvestia Volga State Technical University. It is gray. Problems of materials science, welding and strength in mechanical engineering. 2009. T. 11. № 3. P. 71–73.

6. Panin A.V., Kazachenok M.S., Shugurov A.R. et al. Ultrasonic treatment of flooded technical titanium BT1-0 // Heavy machine building. 2010. № 2. P. 36–39.

7. Bashchenko L.P., Ivanov Yu.F., Budovskii E.A. Modification of the structure of surface layers of titanium BT1-0 during electric blasting carboboring and electron beam processing // Izv. higher education institution. Ferrous metallurgy. 2013. № 3. P. 68–70.

8. Brover G.I., Brover A.V., Dyachenko L.D. Some features of the structure and properties of surface layers of titanium after laser hardening and alloying // Izv. higher education institution. Non-ferrous metallurgy. 2005. № 6. P. 51–55.

9. Mashkov Y.K., Edigarov V.R., Ovchar Z.N., Baybaratskaya M.Yu. Combined friction-electric modification of steel friction surfaces // Friction and wear. 2006. Volume 27. № 1. P. 89–92.

10. Edigarov V.R. Surface friction-electric treatment of aluminum alloys // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2020. № 10 (727). P. 25–30.

11. Edigarov V.R. Friction-electric modification of machine parts surfaces with nanoscale carbon materials // Engineering Technology. 2020. № 4. P. 22–28.

12. Edigarov V.R. Technology of combined electromechanoaltrasonic processing of surface layers of machine parts // Fundamental and applied problems of technology and technologies. 2020. № 2 (340). P. 26–34.

13. Bagmutov V.P. Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N. Electromechanical processing: technological and physical foundations, properties, implementation. — Novosibirsk: Science. 2003. 318 p.

14. Bagmutov V.P., Vodopyanov V.I., Zakharov I.N., Gorunov A.I. Influence of intensive thermosilicon treatment on the structure and properties of titanium pseudo- $\alpha$ -alloys in EMO // Metals. 2013. № 5. P. 93–97.

15. Zwicker Ulrich. Titan und Titan-Legierungen. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1974. (Russ. ed.: Zwicker U. Titan i ego splavy. — Moscow: Metallurgiya. 1979. 512 p.).

16. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Gorunov A.I., et al. Combined surface hardening of steel and titanium alloys on the basis of electromechanical and ultrasonic treatments // Izvestia Volga State Technical University. It is gray. Problems of materials science, welding and strength in mechanical engineering. 2013. T. 7. № 6 (109). P. 68–71.