

УДК 669.295

С.В. Путьрский¹, А.А. Арисланов¹, Н.И. Артеменко¹, А.Л. Яковлев¹

РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТИТАНОВОМУ СПЛАВУ VT23M

DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24

Описаны различные методы повышения износостойкости титановых сплавов, в том числе анодное окисление в импульсном режиме, детонационное напыление покрытия WC–Co, ионно-плазменное напыление покрытия TiN. Описанные методы были применены к образцам из высокопрочного титанового сплава VT23M. С целью сравнительного анализа эффективности методов повышения износостойкости, образцы после различной термической обработки и образцы с нанесенными покрытиями подвергали испытаниям на определение линейного износа.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.4. «Экономнолегированные титановые сплавы, совместимые с углепластиком» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1–3].

Ключевые слова: титановые сплавы, износостойкость, покрытия, термическая обработка, высокопрочные сплавы.

S.V. Putyrskiy¹, A.A. Arislanov¹, N.I. Artemenko¹, A.L. Yakovlev¹

DIFFERENT METHODS OF WEAR RESISTANCE INCREASE OF TITANIUM ALLOYS AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THEIR EFFICIENCY FOR VT23M TITANIUM ALLOY

In current article different methods for wear resistance increase of titanium alloys including anodic oxidation in the pulsed mode, detonation sputtering of WC–Co coating, ion-plasma sputtering of TiN coating are described. The described methods were applied to samples of the alloy VT23M. For the purpose of comparative analysis of the methods effectiveness for increasing wear resistance, samples after different heat treatment and samples with applied coatings were subjected to linear wear test.

The work has been performed within the framework of complex scientific direction 12.4. «Sparingly alloyed titanium alloys compatible with carbon fiber reinforced plastic» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1–3].

Keywords: titanium alloys, wear resistance, coatings, heat treatment, high strength alloys.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Уникальное сочетание свойств сплава VT23M делает его перспективным материалом для изготовления силовых элементов конструкции изделий авиационной техники [4, 5], а также иных транспортных средств, к надежности которых предъявляются повышенные требования [1–3]. Перспективным также является применением сплава VT23M в составе композиционного материала в сочетании с углепластиком [6, 7]. Способность титановых сплавов сопротивляться воздействию климатических факторов и высокая прочность в сочетании с низкой (в сравнении со сталями) плотностью делает привлекательным применение высокопрочного титанового сплава VT23M для изготовления деталей, рабо-

тающих в условиях трения, в том числе при непосредственном контакте с внешней средой и абразивным материалом – например, в таких деталях, как двигатели перспективных транспортных средств. Конкурентоспособными при работе в условиях трения титановые сплавы могут быть только при повышении износостойкости поверхности деталей, изготовленных на их основе.

В связи с наличием твердых абразивных частиц в процессе износа деталей, таких как двигатели, эксплуатируемые в экстремальных условиях, в том числе в арктическом и субарктическом климате, абразивное изнашивание является неотъемлемой частью износа этих изделий. Отличительной особенностью абразивного

изнашивания является участие в процессе твердых частиц, обладающих различной структурой, формой, размерами, твердостью и незначительной адгезией к трущимся поверхностям. Трение в присутствии абразивных частиц характеризуется нестационарностью контактов частиц с изнашивающейся поверхностью, широким спектром и высокой концентрацией напряжений, а также физико-химической активацией поверхностей твердых тел.

Особенностью титана и сплавов на его основе является наличие на поверхности относительно тонкой естественной оксидной пленки, которая легко разрушается при трении за счет высоких удельных нагрузок из-за значительно более высокой пластичности титана, чем у оксидной пленки [8, 9]. Наличие свободных от оксидной пленки, склонных к образованию связей участков поверхности титана, в случае его трения с другими металлами приводит к возможности возникновения схватывания на локальных участках контакта двух поверхностей. Этому также способствуют такие свойства титана, как относительно низкий модуль упругости и низкая теплопроводность. Титановые сплавы склонны к значительному упрочнению при пластической деформации, поэтому прочность металла в зоне контакта с контртелом в процессе трения становится выше, чем у основного металла. Кроме того, благодаря выделению теплоты в процессе трения интенсифицируется процесс обогащения газами из окружающей среды трущихся поверхностей металла, что также повышает прочность поверхностного слоя. Вследствие этого разрушение образовавшихся связей обычно происходит в глубине основного металла и повреждение на трущихся поверхностях из титана носят так называемый глубокий характер со значительным наволакиванием и вырывами металла.

В процессе трения оксидные пленки повреждаются и отслаиваются, а на их месте образуются новые. Поэтому материал, отличительной чертой которого является высокая коррозионная стойкость за счет пассивации поверхности, может оказаться при трении малостойким из-за непрерывного повреждения и удаления оксидной пленки. Материал, удовлетворительно работающий в паре трения с неупрочненным титаном, в настоящее время не найден. При работе титана в паре с другими металлами и сплавами происходит его налипание на поверхность более твердого металла и в дальнейшем трение происходит как в паре «титан–титан». При работе титана в паре с более мягким материалом наблюдается перенос мягкого материала на поверхность титана и трение развивается как в одноименной паре из мягкого материала. Так, при трении в паре «неупрочненный титан–сталь» поверхность стального контртела, как правило, оказывается покрытой частицами налипшего титана.

Повысить износостойкость поверхности образцов из титановых сплавов можно при помощи термической обработки и нанесения покрытий. Наносимые покрытия должны обладать высокой

адгезией к материалу основы и обеспечивать эффективную пассивацию поверхности образца.

В данной работе проведена сравнительная оценка с помощью испытаний на износостойкость эффективности различных методов повышения износостойкости поверхности образцов из титанового сплава VT23M.

Материалы и методы

Высокопрочный свариваемый титановый сплав VT23 – ($\alpha+\beta$)-сплав мартенситного класса системы Ti–Al–V–Mo–Cr–Fe, ввиду довольно большого содержания β -стабилизаторов отличается высокой технологической пластичностью при обработке давлением и значительным эффектом от термической обработки [10]. Сплав VT23M является модификацией сплава VT23, отличающейся суженным интервалом легирования и сниженным допустимым содержанием примесей (кислорода, азота и углерода). Благодаря этому достигнут повышенный уровень свойств, их большая стабильность [11–14].

Образцы для проведения испытаний вырезали из листа сплава VT23M толщиной 2 мм. Эскиз образца представлен на рис. 1. Образцы испытывали после трех вариантов термической обработки: отжиг (при 750°C); двойной отжиг (при 800°C (воздух)+при 600°C в течение 8 ч (воздух)); закалка+старение (закалка при 850°C+старение при 470°C в течение 8 ч (воздух)).

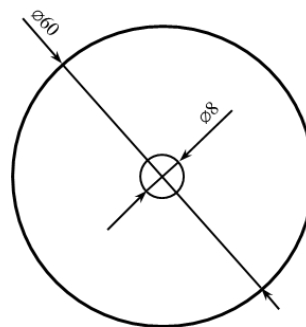


Рис. 1. Размеры дискового образца из сплава VT23M

Анализ микроструктуры образцов проводили на травленых микрошлифах на оптическом микроскопе Olympus JX51.

Для проведения сравнительных исследований на образцы листов из сплава VT23M в состоянии поставки наносили покрытия: анодно-оксидное, нанесенное в импульсном режиме; из карбида вольфрама (WC), нанесенное детонационным методом; из нитрида титана, нанесенное методом ионно-плазменного напыления.

Анодное оксидирование в импульсном режиме применяется для титановых сплавов с целью повышения антифрикционных свойств деталей и для предотвращения контактной коррозии ответных деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, оцинкованных сталей и других более электроотрицательных металлов. Анодно-оксидное

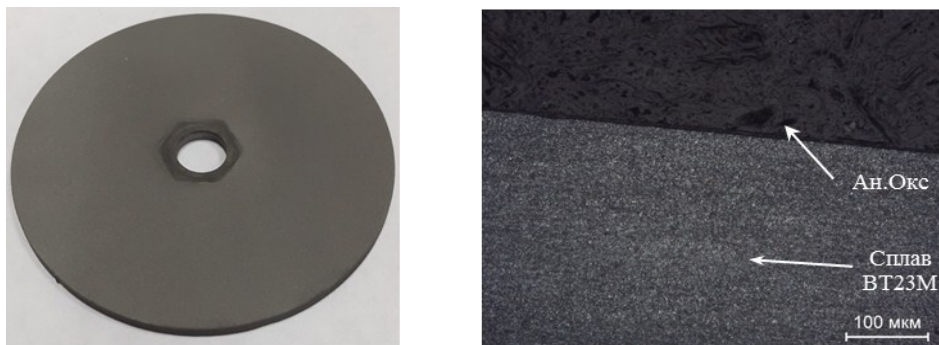


Рис. 2. Микроструктура ($\times 20$) образца из титанового сплава BT23M с анодно-оксидным покрытием

покрытие, полученное импульсным методом, повышает твердость поверхности и способствует удержанию смазки, в связи с чем может применяться в сочетании с покрытием ВАП-2, петролатумом, минеральными маслами и другими смазками. Анодно-оксидное покрытие, полученное импульсным методом, не снижает чистоту поверхности и не оказывает неблагоприятного влияния на механические свойства титановых сплавов. Анодному оксидированию могут подвергаться детали, выполненные электронно-лучевой и аргоно-дуговой сваркой встык. Для деталей, работающих на трение, применяется покрытие толщиной >3 мкм.

В данной работе анодно-оксидное покрытие толщиной 18–20 мкм наносили в импульсном режиме в течение 1 ч, при этом максимальное напряжение достигало 200 В. Общий вид образца с нанесенным покрытием и его микроструктура представлены на рис. 2.

Детонационное напыление представляет собой разновидность газотермического напыления. Ударная волна разогревает частицы до температур $\sim(1700\text{--}2000)^\circ\text{C}$ и разгоняет их до скоростей $\sim(600\text{--}800)$ м/с. При попадании на поверхность разогретые частицы напыляемого материала претерпевают интенсивную пластическую деформацию, за счет чего температура напыляемого порошка достигает 4000°C , а по окончании процесса деформации охлаждается до температуры изделия путем теплопередачи в основной объем материала. Процесс повторяется с периодичностью 3–4 выстрела в 1 с. Один цикл напыления позволяет наносить покрытия толщиной не более 5–6 мкм. Детонационное напыление предназначено в основном для получения твердых покрытий на базе высоко-

температурных соединений: карбидов, содержащих небольшие количества металлических связующих, различных оксидов и их смесей. В данной работе напыление покрытия WC-Co осуществляли на установке CCDS2000, представленной на рис. 3. Структура покрытия WC-Co, полученного методом детонационного напыления, представлена на рис. 4.



Рис. 3. Установка детонационного напыления CCDS2000

В настоящее время для защиты деталей от износа используют композиционные покрытия на основе карбидов W и Cr, содержащие в качестве пластификатора Co или Ni. Коррозионная стойкость покрытий обеспечивается сложными карбидами W, Cr, Co, прочность и вязкость разрушения – металлическими составляющими.

Метод ионно-плазменного напыления, реализованный посредством вакуумной плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ), получил

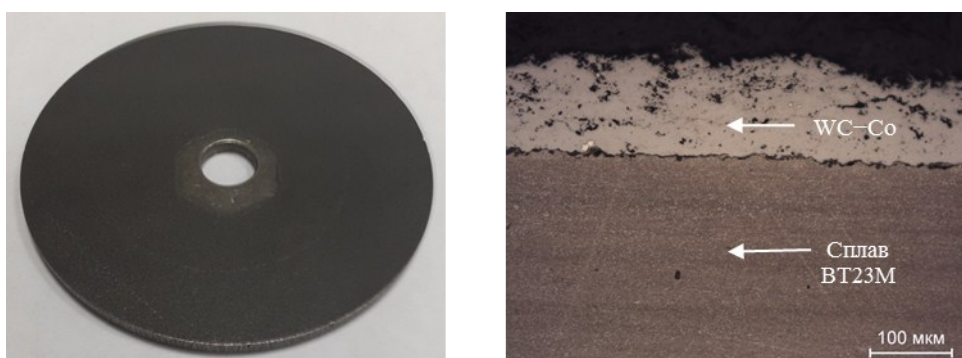


Рис. 4. Микроструктура ($\times 20$) образца из титанового сплава BT23M с покрытием WC-Co

распространение в связи с технологическими задачами микроэлектроники. Позже эту технологию начали использовать для поверхностного упрочнения деталей, работающих в условиях контактных взаимодействий при повышенных температурах [15, 16].

Технологический процесс протекает в вакуумных камерах, где металлический материал, используемый для формирования покрытия, превращается в плазму путем генерации дуги вакуумно-дугового разряда, а затем в атмосфере реакционного газа осаждается на поверхность основного материала. В зависимости от реакционного газа в вакуумной камере (азот или ацетилен) формируется нитридное или карбидное покрытие. Высокая и регулируемая в широких пределах энергия наносимых частиц при ВПТВЭ позволяет получать покрытия из различных материалов с высокой адгезией к основе.



Рис. 5. Установка ионно-плазменного напыления МАИ-3

Покрyтия наносили на установке ионно-плазменного напыления МАИ-3 (рис. 5). В качестве реактивного газа использовали азот (осаждение нитридов) при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Покрyтия наносили при токе дуги генератора плазмы 450 А, при напряжении смещения потенциала на подложке 100 В. Структура покрyтия TiN, полученного методом ионно-плазменного напыления, представлена на рис. 6.



Рис. 6. Микроструктура ($\times 20$) образца из титанового сплава BT23M с покрытием TiN

Методика проведения испытаний на износостойкость

С целью определения наиболее эффективно повышающей износостойкость термической обработки и оценки износостойкости образцов с покрытиями, во ФГУП «ВИАМ» проведены испытания на определение линейного износа. Испытания проводили на трибометре UMT-3 фирмы CETR (США) (рис. 7) по схеме «шар по диску» в соответствии с СТО 1-595-2-476–2015.

Метод «шар по диску» представляет собой испытание, в котором шар из карбида вольфрама или хромистой стали трется по вращающемуся образцу типа диск, изготовленному из испытываемого материала, либо с нанесенным на диск износостойким покрытием. Данный метод позволяет сравнить и оценить износостойкость различных металлов и покрытий относительно друг друга. Для получения экспериментальных результатов образец устанавливают на привод вращения трибометра и прикладывают к нему нормальную нагрузку (давящее усилие) с помощью шарика из заданного материала (карбид вольфрама или хромистая сталь). Схема проведения испытания представлена на рис. 8.

Стойкость к изнашиванию (линейный износ, м) определяют путем измерения глубины дорожки трения, оставленной шариком на диске. Глубина дорожки трения определяется при помощи профилометра. Условия испытания (скорость вращения, температура или величина приложенной нагрузки) устанавливаются в зависимости от условий моделирования реальной ситуации износа. Коэффициент трения определяется с помощью программы трибометра во время испытаний.

Результаты испытаний на износостойкость титанового сплава BT23M с определением линейного износа

Испытания на определение линейного износа проводили по описанной методике при следующих условиях: продолжительность 500 с, температура 20°C, шарик из карбида вольфрама

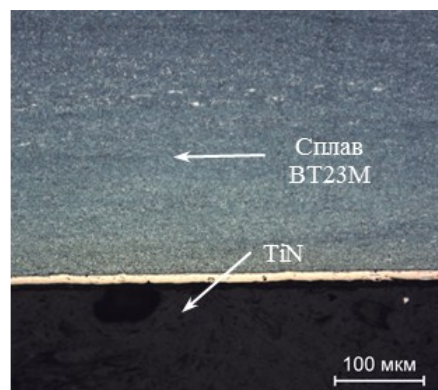




Рис. 7. Трибометр UMT-3 фирмы CETR (США)

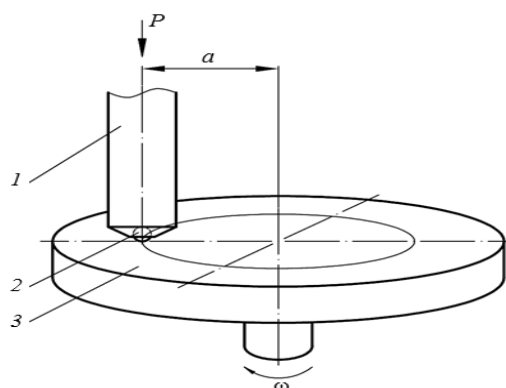


Рис. 8. Схема установки для определения износостойкости по методу «шар по диску»:

1 – устройство-держатель для шарика; 2 – шарик из карбида вольфрама $\varnothing 4$ мм; 3 – испытуемый образец; P – нагрузка, Н; a – межосевое расстояние, м; ω – угловая скорость вращения, c^{-1}

$\varnothing 4$ мм, нагрузка 2,72 Н, скорость 1 м/с. Результаты испытаний представлены в таблице.

Обсуждение и заключения

Как видно из результатов испытаний, среди образцов без покрытий, прошедших различную термическую обработку, наилучшие результаты показал образец после двойного отжига. Видимо, данный режим термической обработки обеспечивает наиболее подходящее для работы в условиях трения количественное сочетание фаз в материале, а следовательно, и сочетание прочности и пластичности. Микроструктура образца, прошедшего двойной отжиг, представлена на рис. 9.

Микроструктура образца после отжига обеспечивает прочность на уровне $\sigma_b=1030$ МПа при пластичности $\delta=11\%$. Проведение на листах из сплава ВТ23М двойного отжига позволяет достичь $\sigma_b=1170$ МПа при пластичности $\delta=12\%$.

Наиболее высокие результаты получены на образцах с покрытиями TiN и WC-Co. Относительно низкая износостойкость анодно-оксидного покрытия, вероятно, связана с его пористостью, которая возрастает с увеличением толщины покрытия. Очевидно, для повышения износостойкости следует применять смазку или пропитку петролатумом, что обеспечит повышение антифрикционных свойств титановых деталей, а возможно, и несколько снизит толщину покрытия.

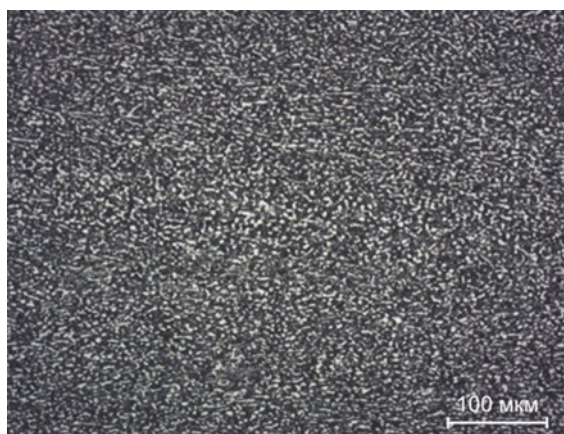


Рис. 9. Микроструктура образца из сплава ВТ23М после термообработки по режиму двойного отжига: 800°C (воздух)+600°C в течение 8 ч (воздух)

Покрытие TiN, полученное на ионно-плазменной установке МАП-3, имеет толщину 10 мкм и величину линейного износа ≤ 1 мкм. Данное покрытие характеризуется высокой твердостью (~ 2500 HV₅₀), низким значением шероховатости ($R_a < 1$ мкм), высокими инертностью соединения и значением адгезионной прочности к подложке (> 100 МПа). Механизм, по которому происходит увеличение износостойкости, соответствует критерию, разработанному М.М. Хрущовым для

Линейный износ дисковых образцов из сплава ВТ23М

Вид обработки сплава ВТ23М	Коэффициент трения	Средний линейный износ (по пяти измерениям профилометра), мкм, на дорожке			Среднее значение износа
		№1	№2	№3	
Двойной отжиг	0,16	11	9	10	10
Закалка+старение	0,14	13	11	15	13
Отжиг	0,15	12	10	12	11
Покрытие Ан.Окс.	0,68	9	10	11	10
Покрытие TiN	0,36	1	1	1	1
Покрытие WC-Co	0,6	1	0,5	1,5	1

износостойких покрытий, устойчивых к абразивному износу, – интенсивность изнашивания покрытий обратно пропорциональна их микротвердости. Проведенные ранее при аналогичных условиях испытания сплава ВТ8 с нанесенным таким же способом покрытием TiN показали аналогичный результат, несмотря на более низкие прочностные свойства данного сплава в сравнении со сплавом ВТ23М. Недостатком покрытия из нитрида титана является технологическое ограничение по размеру обрабатываемой детали.

Покрытие WC-Co, полученное методом детонационного напыления, толщиной 80–100 мкм имеет величину линейного износа ≤ 1 мкм. Твердость покрытия составляет 1400 HV₅₀. Повышение износостойкости покрытия WC-Co достигается путем формирования оптимальной структуры покрытия, которая соответствует правилу Шарпи, – мягкая матрица из Co и твердые включения из карбида вольфрама. Однако недостатком металлокерамического покрытия WC-Co является необходимость механиче-

ской обработки изделия после нанесения покрытия, так как после нанесения величина шероховатости составляет $R_a=2,5-6,3$ мкм, что приводит к повышенному износу, по сравнению с гладкой ($R_a < 1$ мкм) поверхностью.

В заключение отметим, что при выборе метода повышения износостойкости деталей из титановых сплавов необходимо учитывать прочность сцепления покрытия с поверхностью, технологичность метода, его влияние на изменение размеров деталей. Заметными преимуществами при подобной комплексной оценке обладают методы диффузионного упрочнения – в частности, оксидирования. Поэтому в дальнейшем представляет интерес сравнение полученных результатов с результатами аналогичных испытаний образцов из сплава ВТ23М после проведения других обработок, повышающих износостойкость. Проведение подобного анализа на основе научно-технических литературных данных является весьма затруднительным ввиду применения различных методик проведения испытаний на износостойкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
4. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 5–6.
5. Яковлев А.Л., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А., Ночовная Н.А. Эффективность применения титанового сплава ВТ23 в новых изделиях «ОКБ Сухого» // *Титан*. №2 (40). 2013. С. 39–42.
6. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
7. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путьрский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №S2 (44). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
8. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваев И.Н. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 248 с.
9. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИАМ-МАТИ, 2009. 520 с.
10. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23М // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4 (29). С. 8–13.
11. Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №5. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 15.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2.
12. Хорев А.И. Разработка теоретических и практических основ повышения конструкционной прочности титановых сплавов путем комплексного легирования и микролегирования // *Сб. Тi–2007 в СНГ*. Ялта, 2007. С. 226–234.
13. Мубоджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 71–81.
14. Хорев А.И. Титановый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами // *Титан*. 2006. №1 (18). С. 47–52.
15. Мубоджян С.А. Особенности осаждения потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. №2. С. 20–34.
16. Хорев А.И. Основные научные и практические направления повышения стабильности механических свойств ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности // *Сб. Тi–2010 в СНГ*. Екатеринбург, 2010. С. 227–235.