



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.793

**В.А. КУКАРЕКО**, д-р физ.-мат. наук, проф.

начальник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»<sup>1</sup>  
E-mail: v\_kukareko@mail.ru

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, проф.

заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»<sup>1</sup>  
E-mail: mbelotser@gmail.com

**А.Н. ГРИГОРЧИК**, канд. техн. наук

заместитель начальника Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»<sup>1</sup>  
E-mail: GrigorchikAN@gmail.com

**А.В. СОСНОВСКИЙ**, канд. техн. наук

ведущий научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»<sup>1</sup>  
E-mail: sosnovskij@inbox.ru

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.01.2023.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

*Исследована структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из титанового сплава OT4 и псевдосплава «OT4 + 40X13», полученных методом высокоскоростной металлизации. Показано, что фазовый состав напыленных покрытий включает в себя большое количество нитрида титана (TiN) (до 70 об.%), образующегося в процессе металлизации. При этом повышение давления пропана при металлизации с 0,3 до 0,4 МПа приводит к небольшому снижению содержания TiN в напыленном покрытии, что связано с увеличением скорости полета расплавленных капель титана в атмосфере ионизированных газов и, соответственно, уменьшением времени их взаимодействия с ионизированными атомами азота воздуха. Пористость напыленных покрытий из титанового сплава OT4 составляет 30–35 об.%, а их твердость и микротвердость — 500–650 HV 1 и 1300–1600 HV 0,1 соответственно. Покрытия из псевдосплава «OT4 + 40X13» имеют пониженную пористость 10–15 об.%, а их твердость и микротвердость составляют 500–600 HV 1 и 900–1300 HV 0,1 соответственно. Показано, что покрытия из сплава OT4 и псевдосплава «OT4 + 40X13» характеризуются повышенной износостойкостью в условиях трения без смазочного материала. В частности, интенсивность массового изнашивания покрытий I<sub>д</sub> из титанового сплава OT4, полученных при давлениях пропана 0,3 и 0,4 МПа, составляет 2,5–2,6 × 10<sup>-3</sup> мг/м, а покрытий из псевдосплава «OT4 + 40X13» — 1,0–1,1 × 10<sup>-3</sup> мг/м. Пониженные значения интенсивностей массового изнашивания покрытий из псевдосплава «OT4 + 40X13» связаны с наличием в них TiN и относительно небольшой пористостью.*

**Ключевые слова:** высокоскоростная металлизация, титановый сплав, нитрид титана, пористость, микротвердость, износостойкость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-72-78>

**Введение.** Высокоскоростная металлизация является перспективной аддитивной технологией, имеющей ряд преимуществ перед другими способами получения защитных покрытий. В частности, метод высокоскоростной металлизации позволяет использовать проволоочные материалы для напыления, имеет высокую производительность, обеспечивает повышенную плотность и адгезию формируемых покрытий [1–2]. В работе [3] было показано, что высокоскоростная металлизация позволяет напылять одновременно несколько проволоочных материалов из различных сплавов для получения покрытий из псевдосплавов. Псевдосплавные покрытия обладают комплексом уникальных свойств, существенно расширяющих область использования методов газотермического напыления [3–5]. В частности, газотермические композиционные покрытия систем «Fe — Al», «Ni — Al» и «Fe — Cr — Ni — Al» имеют повышенную коррозионную стойкость, а после дополнительного отжига, позволяющего обеспечить выделение в них интерметаллидных фаз, характеризуются высокой износостойкостью [6–13]. В работе [14] показано, что холодное распыление порошка титана со скоростями 700–1300 м/с позволяет получать покрытия из титановых сплавов, имеющих повышенные механические и дюрометрические свойства. Вместе с тем систематические данные о структуре и свойствах покрытий из титановых

сплавов, полученных методом высокоскоростной электрометаллизации, в литературе отсутствуют. Таким образом, целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния и триботехических свойств газотермических покрытий из титанового сплава ОТ4, а также псевдосплавов «ОТ4 + 40Х13», полученных методом высокоскоростной металлизации.

**Получение образцов и методики исследований.** Напыление газотермического покрытия из титанового сплава ОТ4 и псевдосплав «ОТ4 + 40Х13» выполнялось методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [1]. При напылении образцов давление пропана варьировалось в диапазоне от 0,30 до 0,40 МПа. Покрытие напылялось на пластину (40×20×5 мм), изготовленную из стали 20. Толщина напыленных покрытий составляла ≈1 мм. Химический состав напыленных покрытий представлен в таблице 1.

Металлографические исследования газотермических покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Исследования фазового состояния покрытий выполнялись на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом ( $\text{CoK}_\alpha$ ) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Таблица 1 — Химический состав напыленных покрытий  
Table 1 — Chemical composition of sprayed coatings

Напыляемые материалы	Давление пропана при напылении, МПа	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	Ti
		Сплав ОТ4 (1,5 мм)	0,30	1,971	0,642	0,011	0,243	0,266	0,021	0,010
	0,40									
Сплав «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,2 мм)»	0,35	1,626	0,242	6,416	0,172	Остальное	0,209	0,028	—	57,142
Сплав «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,6 мм)»	0,35	1,613	0,315	7,588	0,322	Остальное	0,168	0,013	—	46,760

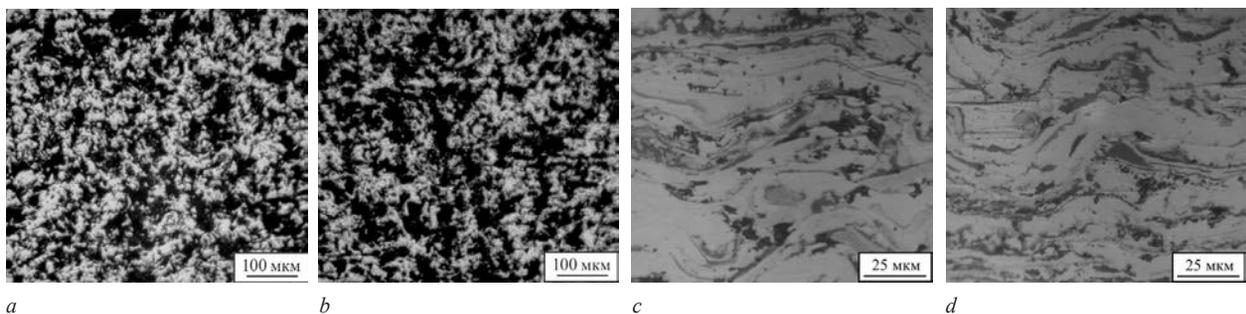


Рисунок 1 — Характерные микроструктуры газотермических покрытий из титанового сплава ОТ4 и псевдосплав «ОТ4 + 40Х13»: а — покрытие из ОТ4, напыленное при давлении пропана 0,30 МПа; б — покрытие из ОТ4, напыленное при давлении пропана 0,40 МПа; в — покрытие из «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,2 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа; д — покрытие из «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,6 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа  
Figure 1 — Characteristic microstructures of thermal sprayed coatings made of Ti4Al titanium alloy and “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy: а — coating made of Ti4Al, sprayed at a propane pressure of 0.30 MPa; б — coating made of Ti4Al, sprayed at a propane pressure of 0.40 MPa; в — coating made of “Ti4Al (1.5 mm) + AISI420 (1.2 mm)”, sprayed at a propane pressure of 0.35 MPa; д — coating made of “Ti4Al (1.5 mm) + AISI420 (1.6 mm)”, sprayed at the propane pressure of 0.35 MPa

Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов напыленных титановых покрытий проводились в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла  $p = 1,5$  МПа). В качестве контртела использовалась закаленная сталь У8 с твердостью 800 HV 10. Измерение величины износа призматических образцов осуществлялось весовым методом. Путь трения составлял  $\approx 1200$  м. Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan20 при нагрузке на индентор  $P$ , равный 1000 и 100 г соответственно.

#### Результаты исследований и их обсуждение.

В результате напыления титановой проволоки из сплава ОТ4 методом высокоскоростной металлизации формируется газотермическое покрытие, состоящее из титановых слоев и светлых пластинчатых включений из TiN (рисунок 1 *a, b*). Пористость покрытий из титанового сплава ОТ4 составляет 30–35 об.% (таблица 2). Фазовый состав газотермических покрытий включает в себя

фазы TiN и Ti (рисунок 2 *a, b*). В свою очередь, псевдосплав «ОТ4 + 40Х13» состоит из стальных и титановых прослоек, между которыми расположены пластинчатые включения TiN и оксида железа (см. рисунок 1 *c, d*). Пористость покрытий из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» составляет 10–15 об.% (см. таблицу 2). Фазовый состав покрытия из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» включает в себя  $\alpha$ -Fe, TiN,  $Fe_3O_4$  и Ti (см. рисунок 2 *c, d*).

Формирование TiN в процессе напыления происходит за счет взаимодействия капель расплавленного в электрической дуге титанового сплава с ионизированными атомами азота, содержащимися в продуктах сгорания пропано-воздушной смеси после прохождения ими области электродугового разряда. В результате этого взаимодействия вследствие низкой энергии образования TiN ионизированные атомы азота интенсивно образуют соединение TiN (стандартная энтальпия  $\Delta H$  образования TiN при 298 К составляет  $-323$  кДж/моль [15]), формирующееся на поверхности расплав-

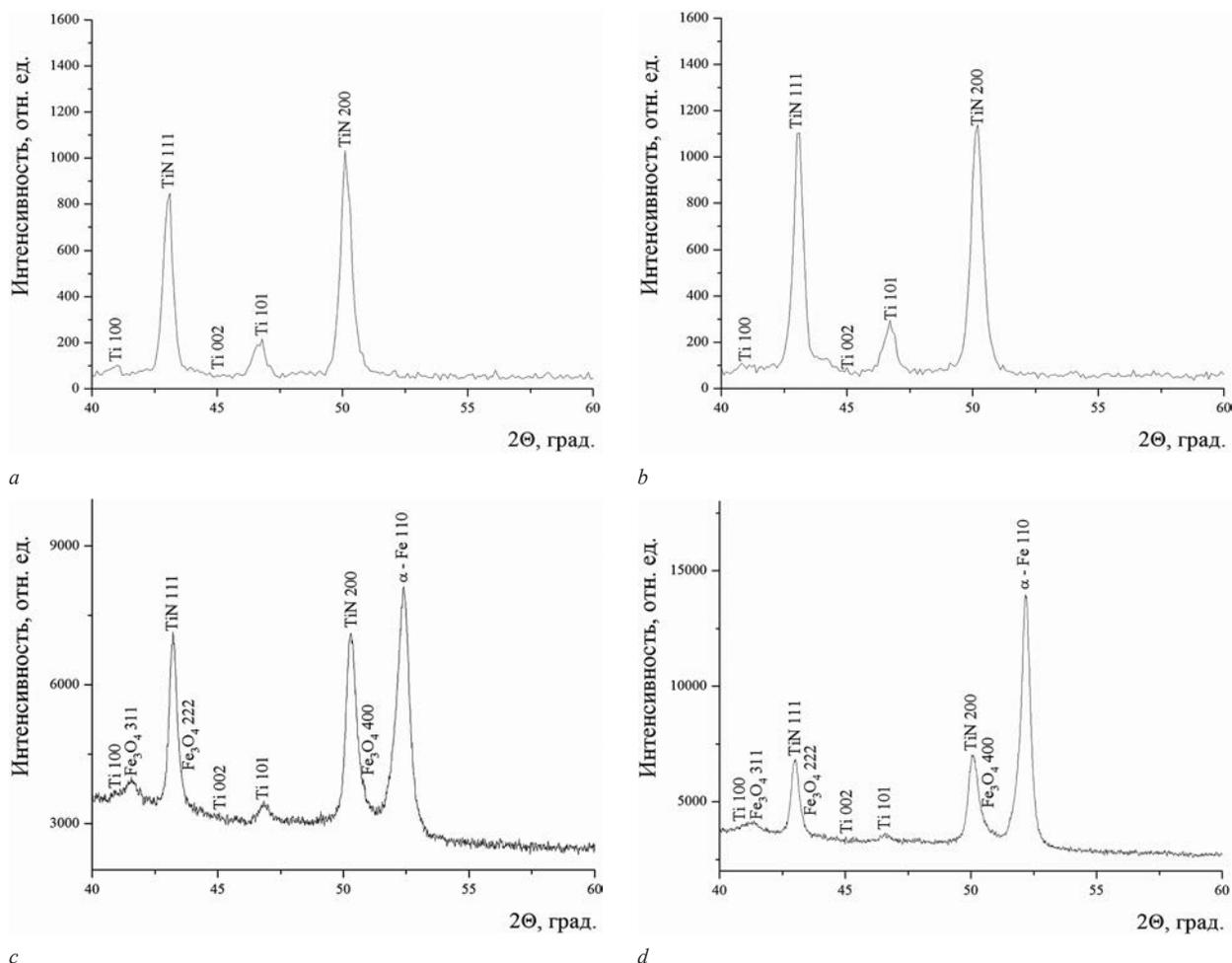


Рисунок 2 — Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $CoK_{\alpha}$ ) от поверхностных слоев газотермических покрытий из титанового сплава ОТ4 и псевдосплава «ОТ4 + 40Х13»: *a* — покрытие из ОТ4, напыленное при давлении пропана 0,30 МПа; *b* — покрытие из ОТ4, напыленное при давлении пропана 0,40 МПа; *c* — покрытие из «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,2 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа; *d* — покрытие из «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,6 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа  
 Figure 2 — Fragments of X-ray diffractograms ( $CoK_{\alpha}$ ) from the surface layers of thermal sprayed coatings made of Ti4Al titanium alloy and “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy: *a* — coating made of Ti4Al, sprayed at the propane pressure of 0.30 MPa; *b* — coating made of Ti4Al, sprayed at the propane pressure of 0.40 MPa; *c* — coating made of “Ti4Al (1.5 mm) + AISI420 (1.2 mm)”, sprayed at the propane pressure of 0.35 MPa; *d* — coating made of “Ti4Al (1.5 mm) + AISI420 (1.6 mm)”, sprayed at the propane pressure of 0.35 MPa

Таблица 2 — Свойства напыленных покрытий из титанового сплава ОТ4 и псевдосплава «ОТ4 + 40Х13»  
 Table 2 — Properties of sprayed coatings made of Ti4Al titanium alloy and “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy

Маркировка образцов	Пористость, об.%	Содержание TiN, об.%	Твердость, HV 1	Микротвердость, HV 0,1	Интенсивность массового изнашивания при сухом трении $I_g, \times 10^{-3}$ мг/м
ГТП ОТ4, пропан при 0,30 МПа	30–35	70	600–650	1400–1600	2,5
ГТП ОТ4, пропан при 0,40 МПа	30–35	65	500–550	1300–1450	2,6
ГТП «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,2 мм)», пропан при 0,35 МПа	10–15	40	550–600	1100–1300	1,0
ГТП «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,6 мм)», пропан при 0,35 МПа	10–15	30	500–550	900–1100	1,1
ГТП 40Х13	3–5	—	550	600	4,6

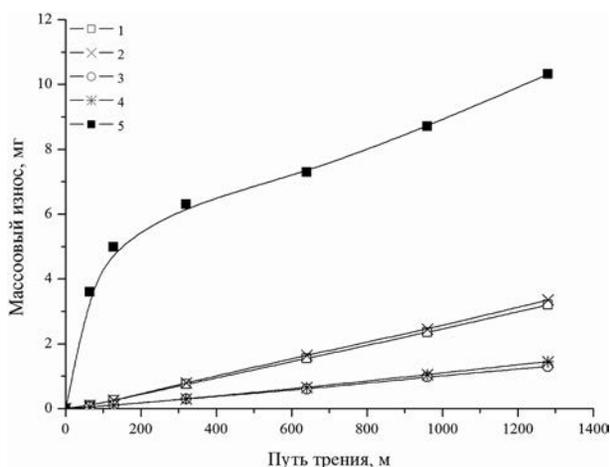
ленных капель и входящее в состав покрытий. В процессе высокоскоростного напыления жидкие капли титана, покрытые слоем TiN, бомбардируют подложку и расплющиваются, приобретая пластинчатую форму. При этом нитридные поверхностные слои растрескиваются, что приводит к микросвариванию смежных титановых частиц и формированию прочного покрытия. Глубина формирующейся нитридной пленки на поверхности частиц титана зависит от продолжительности контакта частиц с ионизированными атомами и от реакционно способной площади поверхности титановых частиц, которая увеличивается с уменьшением их размера. При этом в случае напыления покрытия из титанового сплава ОТ4 при давлении пропано-воздушной смеси (0,30 МПа) частицы имеют относительно небольшой размер (15–20 мкм) и невысокую скорость истечения продуктов сгорания из сопла Лавала металлатора [1], что, в свою очередь, приводит к поглощению большого количества атомов азота титановыми частицами. Повышение давления пропано-воздушной смеси до 0,40 МПа при напылении приводит к некоторому снижению количества TiN в покрытии (см. таблицу 2). При таком режиме напыления частицы титана сохраняют свой размер на уровне 15–20 мкм, но увеличение скорости полета расплавленных капель титана в атмосфере ионизированных газов и, соответственно, уменьшение времени их взаимодействия с ионизированными атомами азота воздуха приводит к некоторому снижению содержания TiN в покрытии (см. таблицу 2).

Из данных, представленных в таблице 2, можно видеть, что покрытия из титанового сплава ОТ4 имеют высокую пористость, которая составляет 30–35 об.%. Высокая пористость покрытий обусловлена образованием на поверхности распыляемых капель титана прочной нитридной корки в процессе металлизации. В свою очередь, нитридная корка на поверхности частиц препят-

ствует растеканию капель на поверхности подложки и напыленным частицам при металлизации. В результате этого между напыленными частицами титана остаются незаполненные полости (поры). Напыленные покрытия из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» имеют сравнительно пониженную пористость, которая составляет 10–15 об.%. (см. таблицу 2, рисунок 1 *c, d*). Относительно невысокая пористость покрытий из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» связана с заполнением пустот между напыляемыми частицами титана стальными каплями и оксидами железа.

Микротвердость покрытия из сплава ОТ4, напыленного при давлении пропана 0,30 МПа, составляет 1400–1600 HV 0,1, а его твердость — 600–650 HV 1 (см. таблицу 2). Увеличение давления пропана при напылении до 0,40 МПа приводит к понижению микротвердости до значений 1300–1450 HV 0,1, а твердости — до 500–550 HV 1 (см. таблицу 2). Снижение диаметрических свойств покрытий при увеличении давления пропана связано с уменьшением содержания в покрытии TiN (см. таблицу 2). Покрытие из «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,2 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа, имеет микротвердость 1100–1200 HV 0,1 и твердость 550–600 HV 1 (см. таблицу 2). Увеличение содержания стали 40Х13 в покрытии «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,6 мм)» приводит к некоторому снижению микротвердости до 900–1100 HV 0,1 и твердости до 500–550 HV 1 (см. таблицу 2). Относительно пониженные значения твердости и микротвердости покрытий из псевдосплавов «ОТ4 + 40Х13» связаны со снижением в них количества TiN (см. таблицу 2), а также с наличием в нем более мягких стальных и оксидных прослоек (см. рисунки 1 и 2).

Результаты триботехнических испытаний покрытий представлены на рисунке 3 и в таблице 2. Из результатов можно видеть, что содержащие TiN покрытия имеют относительно более высокую износостойкость по сравнению с покрытием из мар-



**Рисунок 3 — Зависимости массового износа образцов газотермических покрытий:** 1 — покрытие из сплава ОТ4, напыленное при давлении пропана 0,30 МПа; 2 — покрытие из сплава ОТ4, напыленное при давлении пропана 0,40 МПа; 3 — покрытие из псевдосплава «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,2 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа; 4 — покрытие из псевдосплава «ОТ4 (1,5 мм) + 40Х13 (1,6 мм)», напыленное при давлении пропана 0,35 МПа; 5 — покрытие из стали 40Х13, напыленное при давлении пропана 0,30 МПа

**Figure 3 — Dependences of mass wear of samples of thermal sprayed coatings:** 1 — coating made of alloy Ti4Al, sprayed at the propane pressure of 0.30 MPa; 2 — coating made of alloy Ti4Al, sprayed at the propane pressure of 0.40 MPa; 3 — coating made of “Ti4Al (1.5 mm) + AISI420 (1.2 mm)” pseudoalloy, sprayed at the propane pressure of 0.35 MPa; 4 — coating made of “Ti4Al (1.5 mm) + AISI420 (1.6 mm)” pseudoalloy, sprayed at the propane pressure of 0.35 MPa; 5 — coating made of AISI420 steel, sprayed at the propane pressure of 0.30 MPa

тенситной стали 40Х13 (см. таблицу 2, рисунок 3). В частности, покрытия из титанового сплава ОТ4, напыленные при 0,30 и 0,40 МПа, имеют износостойкость приблизительно в 1,8 раза выше, чем покрытие из стали 40Х13 (см. таблицу 2). Высокая износостойкость покрытий из сплава ОТ4 связана с наличием в них большого количества прочного и твердого TiN (см. таблицу 2). Покрытия из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» характеризуются самой высокой износостойкостью среди исследованных образцов (см. рисунок 3, таблицу 2). В частности, их износостойкость приблизительно в 4,5 раза выше, чем у покрытий из стали 40Х13, и в 2,5 раза выше, чем у покрытий из сплава ОТ4 (см. таблицу 2). Высокая износостойкость покрытий из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» связана с наличием в них TiN и относительно небольшой пористостью (см. таблицу 2).

Таким образом, метод высокоскоростной металлизации позволяет формировать покрытия из титановых сплавов с образованием твердого и прочного TiN, способствующего существенному повышению дюрометрических свойств и износостойкости напыленных покрытий. Совместное напыление проволочных материалов из сплава ОТ4 и мартенситной стали 40Х13 позволяет получать более экономичные покрытия, характеризующиеся повышенной износостойкостью.

**Заключение.** Исследована структура, фазовый состав, дюрометрические свойства и износостойкость газотермических покрытий из титанового сплава ОТ4 и псевдосплава «ОТ4 + 40Х13», полученных методом высокоскоростной металлизации.

Показано, что напыление титанового сплава ОТ4 приводит к формированию покрытий с высоким содержанием в них твердого TiN (65–70 об.%). Пористость напыленных покрытий составляет 30–35 об.%, а твердость и микротвердость достигают значений 500–650 HV 1 и 1300–1600 HV 0,1 соответственно. Напыление покрытий из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» приводит к формированию более плотных покрытий (пористость 10–15 об.%), содержащих 30–40 об.% TiN. Твердость и микротвердость напыленных покрытий из псевдосплава «ОТ4 + 40Х13» составляют 500–600 HV 1 и 900–1300 HV 0,1 соответственно. Установлено, что покрытия из сплава ОТ4 и «ОТ4 + 40Х13» характеризуются высокой износостойкостью в условиях сухого трения. В частности, их износостойкость в 1,8–4,5 раза выше, чем у покрытия из мартенситной стали 40Х13. Сделан вывод, что метод высокоскоростной металлизации позволяет напылять покрытия из титановых сплавов с образованием большого количества TiN в процессе металлизации.

Сделан вывод, что метод высокоскоростной металлизации позволяет напылять покрытия из титановых сплавов с образованием большого количества TiN в процессе металлизации.

## Список литературы

1. Выбор технологических параметров процесса нанесения стальных покрытий методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 3(32). — С. 52–58.
2. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2011. — 357 с.
3. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов / В.А. Кукарко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2019. — Т. 15, № 8(176). — С. 355–359.
4. Сороков, И.О. Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением: моногр. / И.О. Сороков, Н.В. Спиридонов, М.В. Нерода. — Барановичи: РИО БарГУ, 2012. — 184 с.
5. Особенности структуры покрытий из порошковой проволоки системы Fe-Cr-Al, полученных в условиях сверхзвуковой электродуговой металлизации / В.Н. Коржик [и др.] // Автоматическая сварка. — 2014. — № 2(729). — С. 33–38.
6. Влияние температуры и времени отжига на износостойкость покрытий из псевдосплава на основе Ni-Cr-Al, напыленных методом высокоскоростной металлизации / Е.В. Астрабаб [и др.] // Трение и износ. — 2020. — Т. 41, № 5. — С. 538–544.
7. Термически индуцированные фазовые преобразования в слоистой системе Fe-Al / В.С. Русаков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2004. — № 12. — С. 22–30.
8. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки; пер. с япон. В.Н. Попова; под. ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.
9. Cold spraying of Fe/Al powder mixture: coating characteristics and influence of heat treatment on the phase structure / Wang H.-T. [et al.] // Applied Surface Science. — 2008. — Vol. 255, iss. 5, part 1. — Pp. 2538–2544. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.127>.
10. Microstructure characterization of D-gun sprayed Fe-Al intermetallic coatings / C. Senderowski [et al.] // Intermetallics. — 2010. — Vol. 18, iss. 7. — Pp. 1405–1409. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.01.015>.

11. High temperature erosion properties of arc-sprayed coatings using various cored wires containing Ti–Al intermetallics / S.-G. Liu [et al.] // *Wear*. — 2007. — Vol. 262, iss. 5–6. — Pp. 555–561. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.021>.
12. Panas, A.J. Thermophysical properties of multiphase Fe–Al intermetallic-oxide ceramic coatings deposited by gas detonation spraying / A.J. Panas, C. Senderowski, B. Fikus // *Thermochimica Acta*. — 2019. — Vol. 676. — Pp. 164–171. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.04.009>.
13. Зарождение и рост алюминидов титана в слоистом композите, сваренном взрывом / И.А. Батаев [и др.] // *Физика металлов и материаловедение*. — 2012. — Т. 113, № 10. — С. 998–1007.
14. Cold Spray Repair of Engine Components. pat. US 20210017651 A1 / M.D. Pezzutti, L. Ajdelsztajn. — Publ. date: 21.01.2021.
15. Самсонов, Г.В. Получение и методы анализа нитридов / Г.В. Самсонов, О.П. Кулик, В.С. Полищук; Акад. наук УССР, Ин-т проблем материаловедения. — Киев: Наук. думка, 1978. — 317 с.

**KUKAREKO Vladimir A., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.**

Chief of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of Collective Use of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”<sup>1</sup>  
E-mail: [v\\_kukareko@mail.ru](mailto:v_kukareko@mail.ru)

**BELOTSERKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Prof.**

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”<sup>1</sup>  
E-mail: [mbelotser@gmail.com](mailto:mbelotser@gmail.com)

**GRIGORCHIK Alexander N., Ph. D. in Eng.**

Deputy Head of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of Collective Use of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”<sup>1</sup>  
E-mail: [GrigorchikAN@gmail.com](mailto:GrigorchikAN@gmail.com)

**SOSNOVSKIY Aleksey V., Ph. D. in Eng.**

Leading Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”<sup>1</sup>  
E-mail: [sosnovskij@inbox.ru](mailto:sosnovskij@inbox.ru)

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

*Received 26 January 2023.*

## **INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF IRON-TITANIUM THERMAL SPRAYED COATINGS ON THEIR WEAR RESISTANCE**

*The paper studies the structure, phase composition and properties of thermal sprayed coatings made of Ti4Al titanium alloy and “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy obtained by hypersonic metallization. It is shown that the deposited coatings include in the phase composition a large amount of titanium nitride TiN (up to 70 vol.%), which is formed during the metallization process. At the same time, an increase in propane pressure during metallization from 0.3 to 0.4 MPa leads to a slight decrease in the titanium nitride content in the sprayed coating. It is associated with an increase in the flight velocity of molten titanium droplets in an atmosphere of ionized gases and, accordingly, a decrease in the time of their interaction with ionized air nitrogen atoms. The porosity of the sprayed coatings made of titanium alloy Ti4Al is 30–35 vol.%, and their hardness and microhardness are 500–650 HV 1 and 1,300–1,600 HV 0.1, respectively. Coatings made of “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy have a reduced porosity of 10–15 vol.%, and their hardness and microhardness are 500–600 HV 1 and 900–1,300 HV 0.1, respectively. It is shown that coatings made of Ti4Al alloy and “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy are characterized by increased wear resistance under friction without lubricant. In particular, the intensity of mass wear of coatings  $I_q$  made of Ti4Al titanium alloy, obtained at propane pressures of 0.3 and 0.4 MPa, is  $2.5–2.6 \times 10^{-3}$  mg/m, and  $I_q$  for coatings made of “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy is  $1.0–1.1 \times 10^{-3}$  mg/m. The reduced values of mass wear intensities of coatings made of “Ti4Al + AISI420” pseudoalloy are associated with the presence of TiN in them and relatively low porosity.*

**Keywords:** hypersonic metallization, titanium alloy, titanium nitride, porosity, microhardness, wear resistance

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-72-78>

## References

- Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V., Pryadko A.S., Yalovik A.P., Trusov D.I. Vybor tekhnologicheskikh parametrov protsessa nanoseniya stalnykh pokrytiy metodom giperzvukovoy metallizatsii [Selecting the technological parameters of steel coatings formation by hypersonic metallization]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2015, no. 3(32), pp. 52–57 (in Russ.).
- Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovityy V.A., Gromyko G.F. *Protssesy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytiy i ikh modelirovaniye* [Processes of formation of thermal sprayed coatings and their modeling]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2011. 357 p. (in Russ.).
- Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A., Grigorchik A.N., Astrashab E.V., Sosnovsky A.V. Strukturno-fazovoye sostoyanie i tribotekhnicheskie svoystva psevdospлавov, napylenykh iz vysokokhromistykh staley i tsvetnykh metallov [Structural-phase state and tribological properties of pseudoalloys deposited from high-chromium steels and non-ferrous metals]. *Strengthening technologies and coatings*, 2019, vol. 15, no. 8(176), pp. 355–359 (in Russ.).
- Sorokov I.O., Spiridonov N.V., Neroda M.V. *Tekhnologiya uprochneniya tyazhelonagruzhenykh detaley gazotermicheskimi napyleniem* [Technology of hardening of heavy-loaded parts by gas-thermal spraying]. Baranovichi, RIO BarGU Publ., 2012. 183 p. (in Russ.).
- Korzhih V.N., Borisova A.L., Gordan G.N., Liutik N.P., Chaika A.A., Kajda T.V. Osobennosti struktury pokrytiy iz poroshkovoy provoloki sistemy Fe-Cr-Al, poluchennykh v usloviyakh sverkhzvukovoy elektrodugovoy metallizatsii [Peculiarities of structure of coatings of Fe-Cr-Al system flux-cored wire produced under the conditions of supersonic electric arc metallization]. *Automatic welding*, 2014, no. 2(729), pp. 33–38 (in Russ.).
- Astrashab E.V., Grigorchik A.N., Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A. Vliyaniye temperatury i vremeni otzhiga na iznosostoykost pokrytiy iz psevdospлава na osnove Ni-Cr-Al, napylenykh metodom vysokoskorostnoy metallizatsii [Effect of temperature and time of annealing on the wear resistance of Ni-Cr-Al-based pseudo-alloy coatings deposited by high-speed metallization]. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 5, pp. 538–544 (in Russ.).
- Rusakov V.S., Kadyrzhyanov K.K., Suslov E.E., Plaksin D.A., Turkebaev T.E. Termicheski indutsirovannyye fazovyye preobrazovaniya v sloistoy sisteme Fe-Al [Thermally induced phase transformations in layered Fe-Al system]. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya*, 2004, no. 12, pp. 22–30 (in Russ.).
- Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 240 p. (in Russ.).
- Wang H.-T., Li C.-J., Yang G.-J., Li C.-X. Cold spraying of Fe/Al powder mixture: Coating characteristics and influence of heat treatment on the phase structure. *Applied surface science*, 2008, vol. 255, iss. 5, part 1, pp. 2538–2544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.127>.
- Senderowski C., Bojar Z., Wołczyński W., Pawłowski A. Microstructure characterization of D-gun sprayed Fe-Al intermetallic coatings. *Intermetallics*, 2010, vol. 18, iss. 7, pp. 1405–1409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.01.015>.
- Liu S.-G., Wu J.-M., Zhang S.-C., Rong S.-J., Li Z.-Z. High temperature erosion properties of arc-sprayed coatings using various cored wires containing Ti-Al intermetallics. *Wear*, 2007, vol. 262, iss. 5–6, pp. 555–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.021>.
- Panas A.J., Senderowski C., Fikus B. Thermophysical properties of multiphase Fe-Al intermetallic-oxide ceramic coatings deposited by gas detonation spraying. *Thermochimica acta*, 2019, vol. 676, pp. 164–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.04.009>.
- Bataev I.A., Bataev A.A., Pavlyukova D.V., Yartsev P.S., Golovin E.D., Mali V.I. Zarozhdenie i rost alyuminida titana v sloistom kompozite, svarennom vzryvom [Nucleation and growth of titanium aluminide in an explosion welded laminate composite]. *Fizika metallov i materialovedenie*, 2012, vol. 113, no. 10, pp. 998–1007 (in Russ.).
- Pezzutti M.D., Ajdelsztajn L. *Cold spray repair of engine components*. Patent US, no. 20210017651 A1, 2021.
- Samsonov G.V., Kulik O.P., Polishchuk V.S. *Poluchenie i metody analiza nitridov* [Production and methods of analysis of nitrides]. Kiev, Nauchnaya mysl Pybl., 1978. 320 p. (in Russ.).