

# Инструментальные покрытия на основе TiAlN, полученные среднечастотным импульсным магнетронным распылением

Т. О. Сошина

Рассмотрено влияние частоты импульсов в процессе импульсного магнетронного распыления покрытия TiAlN на изменения фазового и элементного составов покрытий, их микроструктуры, шероховатости поверхности и физико-механических свойств. Установлено оптимальное значение частоты импульсов, при котором формируется покрытие на основе высокодисперсной износостойкой фазы  $h\text{-Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$  с плотной нанокристаллической структурой, минимальной шероховатостью поверхности, высокими значениями микротвердости и упругого восстановления.

**Ключевые слова:**

покрытие TiAlN, импульсное магнетронное распыление, частота импульса, фазовый состав, микроструктура, физико-механические свойства

УДК 620.22 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.44.51

## Введение

Инструментальные покрытия относят к одному из векторов развития современной металлообрабатывающей промышленности. Обладающие высокой твердостью, износостойкостью, химической стойкостью и температурной стабильностью инструментальные покрытия обеспечивают стабильность и высокую производительность процесса металлообработки, повышая ресурс службы инструмента и снижая совокупные инструментальные затраты [1]. Однокомпонентные инструментальные покрытия, такие как TiN, CrN, ZrN и др., зачастую не могут удовлетворить все противоречивые требования, которые предъявляются к режущему инструменту современными потребителями. Значительно более широкие multifunctionальные возможности демонстрируют многокомпонентные покрытия на основе TiAlN, AlCrN, TiCN, ZrAlN и др. [2, 3]. Большое внимание среди

всех инструментальных покрытий для сверл, фрез, метчиков, сменных режущих пластин привлекает к себе покрытие на основе TiAlN, благодаря высоким физико-механическим свойствам, термостойкости и способности к образованию на поверхности в процессе работы тонкого защитного окисного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , препятствующего наростообразованию и увеличивающего работоспособность инструмента [4, 5].

Одной из современных технологий получения тонких инструментальных покрытий, получившей широкое распространение ввиду способности формировать заданную структуру и состав покрытия, является метод магнетронного распыления (МР) [6, 7]. Отличительным преимуществом метода МР в сравнении с другими методами осаждения покрытий является возможность поддержания низкой температуры инструмента (подложки) при хорошей адгезии покрытия [8].

**Таблица 1.** Технологические параметры процесса импульсного МР покрытий TiAlN

Наименование параметра режима осаждения	Значение параметра
<b>Постоянные параметры</b>	
Давление газа в вакуумной камере, Па	0,28
Напряжение смещения на подложке, В	-50
Скорость вращения образцов в вакуумной камере, об./мин	25
Соотношение Ar / N <sub>2</sub> в вакуумной камере, %	82 / 12
Температура нагрева подложки, °С	200–250
<b>Варьируемые параметры</b>	
Частота импульсов, кГц	20, 30

Формирование требуемых свойств у покрытия в условиях МР достигается за счет возможности управления параметрами металлической плазмы при направленном изменении параметров технологического процесса осаждения покрытия. Ключевыми параметрами, оказывающими влияние на характеристики металлической плазмы, являются мощность магнетронного разряда, разрядный ток, напряжение смещения и частота импульсов, как на магнетроне, так и на подложке [9–11].

Импульсное МР в среднечастотном диапазоне 10–100 кГц позволяет увеличить концентрацию металлической плазмы и усилить ионное воздействие на формируемое покрытие и подложку, существенно влияя на характеристики осажденного покрытия. Дополнительным преимуществом среднечастотного импульсного МР является снижение тепловой нагрузки на мишень магнетрона и подложку. Последнее позволяет проводить процессы упрочнения режущего и деформирующего инструмента из материалов с низкими температурами отпуска до 200 °С [12].

Большинство работ, рассматривающих метод импульсного МР для получения инструментальных покрытий, посвящено исследованию влияния на характеристики покрытий таких технологических параметров процесса, как давление газовой смеси, напряжение смещения, концентрация N<sub>2</sub> в вакуумной камере [9, 13, 14]. На стадии исследования находятся вопросы, отражающие влияние параметров работы импульсного источника питания: частоты импульсов и скважности на структуру и свойства формируемого покрытия [15, 16]. В связи с этим, целью данного исследования являлось установление влияния частоты импульсов подаваемых на подложку на фазовый, химический состав, микроструктуру и физико-механические свойства покрытий на основе TiAlN (далее – TiAlN).

## Методика эксперимента

Осаждение покрытий TiAlN проведено на установке периодического действия Unicoat-600 методом импульсного МР. Для распыления использованы мишени из Ti (BT-1-00) и Al (A999). Тип магнетронной распылительной системы – дуальная. Тип магнетронов – несбалансированные. Импульсное питание магнетронов и подложки осуществлялось импульсным источником питания ИВЭ-263. Покрытия TiAlN осаждены на тестовые образцы из быстрорежущей стали P6M5. Технологический процесс осаждения покрытий TiAlN включал операции:

- ионную очистку поверхности подложки с подачей на нее высокого импульсного напряжения;
- осаждение адгезионного подслоя Ti;
- осаждение промежуточных слоев TiN;
- осаждение рабочих слоев TiAlN.

Технологические режимы осаждения приведены в табл. 1. Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ покрытий TiAlN проводили на дифрактометре ДРОН-4 в Cu Kα излучении. Параметры структуры рассчитаны для преобладающей фазы покрытия пика наибольшей интенсивности. Режимы съемки:

- излучение – Cu Kα;
- напряжение и ток на рентгеновской трубке – 30 кВ и 20 мА соответственно.

Элементный состав и микроструктура покрытий TiAlN изучены на растровом электронном микроскопе ULTRA 55 с приставкой для микроанализа EDAX Genesis 2000 методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Для получения высокой четкости изображения поперечных изломов покрытий TiAlN съемка проведена в условиях высокого вакуума при давлении  $6,6 \cdot 10^{-5}$  мбар и ускоряющем напряжении 20 кэВ в режиме отраженных электронов. Физико-механические свойства покрытий TiAlN определяли методом кинетического индентирования с использованием прибора Micro-combi tester с измерительной системой Fischerscope H100. Индентирование выполнено пирамидой Виккерса при нагрузке 0,05 Н. Адгезионная прочность покрытий TiAlN определена методом индентирования алмазного конуса при нагрузке 100 кгс по отношению площади скола покрытия к площади отпечатка и по VDI-3198 согласно шкале HF1–HF6.

## Результаты эксперимента и обсуждение

### Фазовый и элементный состав покрытий TiAlN

Проведенный рентгенофазовый анализ покрытий TiAlN позволил установить фазовый состав и объемные доли фаз, формируемые при увеличении частоты импульсов от 20 до 30 кГц (рис. 1, табл. 2).

Покрытия TiAlN, осажденные импульсным МР при минимальной частоте импульсов 20 кГц, состоят из четырех фаз:

- кубических c-TiN;
- c-AlN;

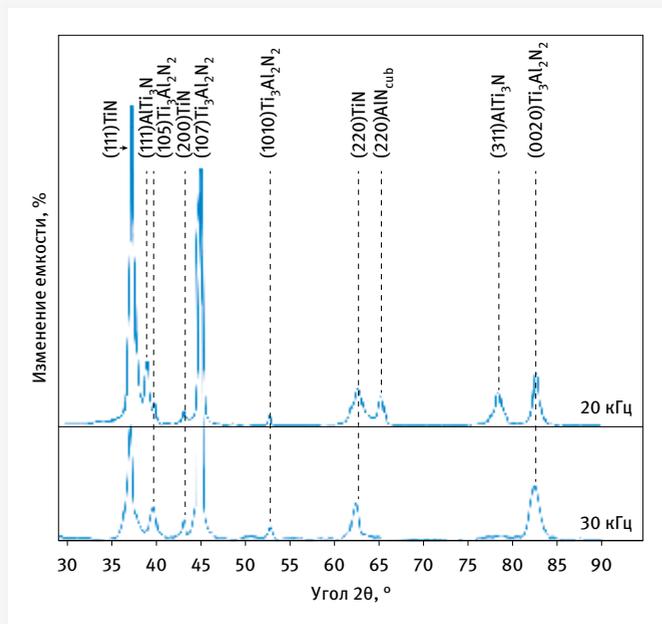


Рис. 1. Дифрактограммы покрытий TiAlN, сформированных при различной частоте импульсов

- c-AlTi<sub>3</sub>N;
- гексагональной h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub>.

Основной фазой покрытия, полученного при минимальной частоте импульсов, является c-TiN с преимущественной ориентацией зерен в направлении (111). Образование фазы c-AlN может быть связано с малой частотой импульсного разряда при выбранной длительности паузы.

С увеличением частоты импульсов до 30 кГц исчезают фазы покрытия c-AlN и c-AlTi<sub>3</sub>N, формируется двухфазное

покрытие TiAlN со сменой основной фазы на гексагональную фазу h-Ti<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, преимущественной ориентацией зерен в направлении (107) и максимальной текстурованностью. Увеличение частоты импульсов способствует снижению степени деформации кристаллической решетки (КР) основной фазы покрытия Δα и величины внутренних напряжений в покрытии. Подтверждением изменения напряженного состояния покрытия является уменьшение полуширины пика основной фазы β<sup>0</sup> и отклонения положения дифракционных максимумов Δ2θ от табличных значений. Размер областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения (ОКР) показал, что сформированные в диапазоне частоты импульсов покрытия TiAlN имеют нанокристаллическое строение, при этом с повышением частоты импульсов размер ОКР снижается (табл. 3).

Увеличение частоты импульсов приводит к изменению элементного состава покрытий TiAlN, заключающемуся в увеличении концентрации Ti от 21,14 до 30,34 ат. % и снижении концентрации Al от 28,24 ат. % (Ti<sub>0,42</sub>Al<sub>0,58</sub>N) до 19,43 ат. % (Ti<sub>0,61</sub>Al<sub>0,39</sub>N) (табл. 2). Изменение элементного состава, сопровождающееся уменьшением содержания Al в покрытии, связано с разницей коэффициентов распыления и степени ионизации Ti и Al, большим притяжением наиболее ионизированных ионов Ti к подложке и преимущественным обратным рассеянием атомов Al. Увеличение частоты импульсов и снижение содержания Al в покрытии приводит к уменьшению параметров КР основных фаз покрытия (табл. 3). Полученные при частоте импульсов 20 кГц покрытия TiAlN имеют достехиометрические значения параметра КР, что подтверждает недостаточную энергетическую стимуляцию покрытия в процессе его формообразования.

Таблица 2. Фазовый и элементный состав покрытий TiAlN

Частота импульсов, кГц	Элементный состав	Содержание элементов, ат. %			Объемная доля фаз			
		N	Al	Ti	c-TiN	c-AlN	c-AlTi <sub>3</sub> N	h-Ti <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> N <sub>2</sub>
20	Ti <sub>0,42</sub> Al <sub>0,58</sub> N	50,62	28,24	21,14	52	4	12	32
30	Ti <sub>0,61</sub> Al <sub>0,39</sub> N	50,23	19,43	30,34	28	–	–	72

Таблица 3. Параметры структуры покрытий TiAlN

Частота импульсов, кГц	Размер ОКР, нм		T <sub>(111)TiN</sub> / T <sub>(107)Ti3Al2N2</sub>	Δ2θ, %	Δα, %	β <sup>0</sup> <sub>111</sub> / β <sup>0</sup> <sub>107</sub>
	TiN	Ti <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> N <sub>2</sub>				
20	20	12	0,76/0,56	-1,30	-0,4	0,6
30	15	8	0,45/0,80	-0,85	0,2	0,5



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГИ:



Лукашкин В.Г., Булатов М.Ф.

## Эталонные образцы в измерительной технике. Электрорадиоизмерения

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 402 с.  
ISBN: 978-5-94836-512-1

**Цена 840 руб.**

Рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны методы воспроизведения единиц физических величин на основе современных научно-технических достижений с использованием квантовых эффектов и фундаментальных физических констант. Рассмотрены структурные схемы и техническая реализация современных первичных, вторичных и рабочих эталонов с описанием их метрологических характеристик. Приведены способы передачи размера единиц физических величин от первичных эталонов и структурные схемы поверочных установок на базе государственных и локальных поверочных схем. Даются оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.



Лукашкин В.Г., Булатов М.Ф.

## Эталонные образцы в измерениях неэлектрических величин. Справочное пособие

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 672 с.  
ISBN: 978-5-94836-556-5

**Цена 1300 руб.**

В справочном пособии рассмотрены современные методы измерений и контроля широкого ряда неэлектрических величин, включая физико-химические преобразователи и аналитические приборы. С учетом переопределения основных величин через фундаментальные физические константы (ФФК) рассматривались только вторичные и рабочие эталоны, для которых приведены метрологические характеристики, расчетные соотношения и методы технической реализации. Даны нормативные документы и порядок разработки стандартных образцов. Проанализированы вопросы автоматизации измерений для систем удаленного сбора информации с интеллектуальных преобразователей с использованием AS-интерфейса и HART-протокола. Представлены автоматизированные поверочные установки и методы расчета погрешностей измерений.

Пособие будет интересно для специалистов, занимающихся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний, а также для студентов и аспирантов вузов метрологических и приборостроительных специальностей.

### Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По телефону: (495) 234-01-10  
E-mail: [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru)  
[sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)

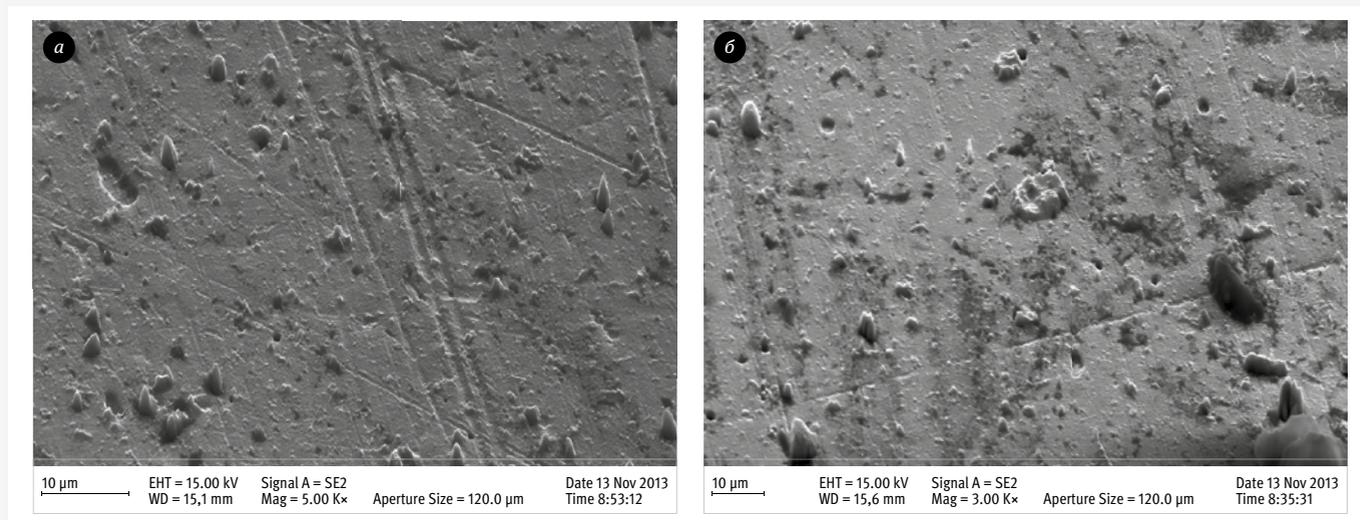


Рис. 2. Морфология поверхности покрытий TiAlN, сформированных при частоте импульсов: а – 20 кГц; б – 30 кГц

### Микроструктура, морфология и топография поверхности покрытий TiAlN

Морфология поверхности покрытий TiAlN, сформированных в диапазоне частоты импульсов, не имеет существенных различий. На поверхности сформированных покрытий наблюдаются объемные образования с зернистой структурой, рост которых протекает в направлении роста покрытия, перпендикулярно поверхности подложки. С увеличением частоты импульсов до 30 кГц происходит снижение размеров объемных образований поверхности с 10 до 1,8 мкм и их количества.

Анализ микроструктуры покрытий показал, что сформированные покрытия TiAlN имеют столбчатое строение с разным размером столбцов и их относительной плотностью.

Покрытие, сформированное при минимальной частоте импульсов 20 кГц, имеет меньшую плотность структуры и размер столбцов 20–70 нм (рис. 3а). При повышении частоты импульсов до 30 кГц наблюдается непрерывность роста зерен, повышение плотности структуры, увеличение когезионной прочности зерен и уменьшение их размера до 10–50 нм, что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа и расчета ОКР (рис. 3б).

Величина частоты импульсов оказывает влияние на шероховатость сформированных покрытий TiAlN. Статистическое распределение высот зерен покрытий показало, что при увеличении частоты импульсов до 30 кГц происходит уменьшение среднеквадратичной шероховатости поверхности покрытий от 67 до 36 нм (рис. 4а, б).

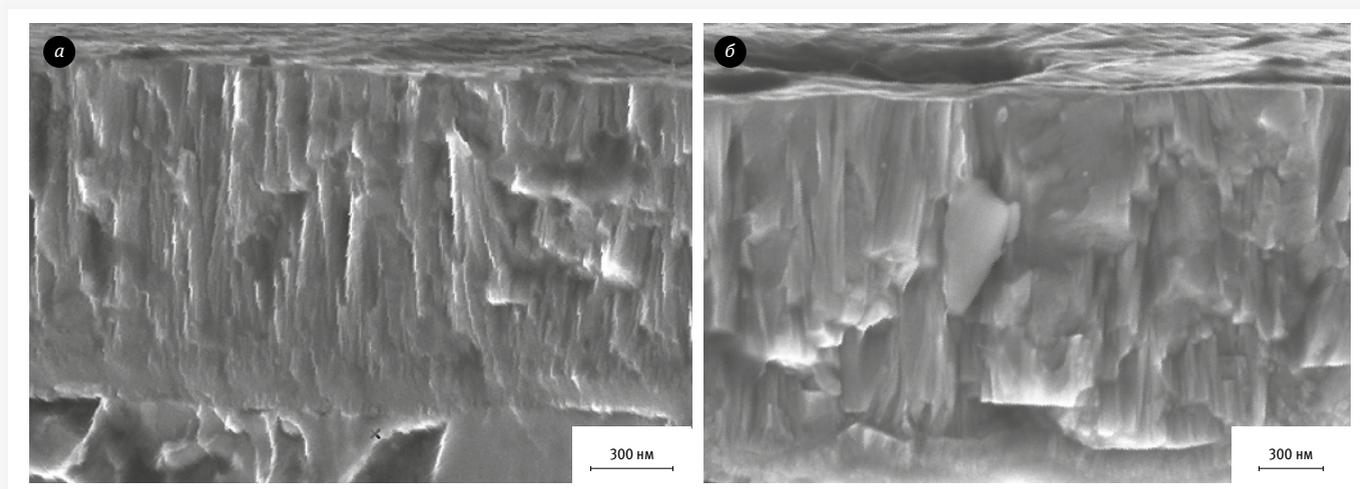


Рис. 3. Микроструктура покрытий TiAlN, сформированных при частоте импульсов: а – 20 кГц; б – 30 кГц

Промышленно-энергетический форум  
и специализированная выставка предприятий

# ПРОМ-ЭНЕРГО VOLGA' 2023

22-24 ноября  
Волгоград Арена



[www.promenergovolga.ru](http://www.promenergovolga.ru)

ВЦ ЦАРИЦЫНСКАЯ ЯРМАРКА

тел./факс: (8442) 26-50-34

[www.zarexpo.ru](http://www.zarexpo.ru)

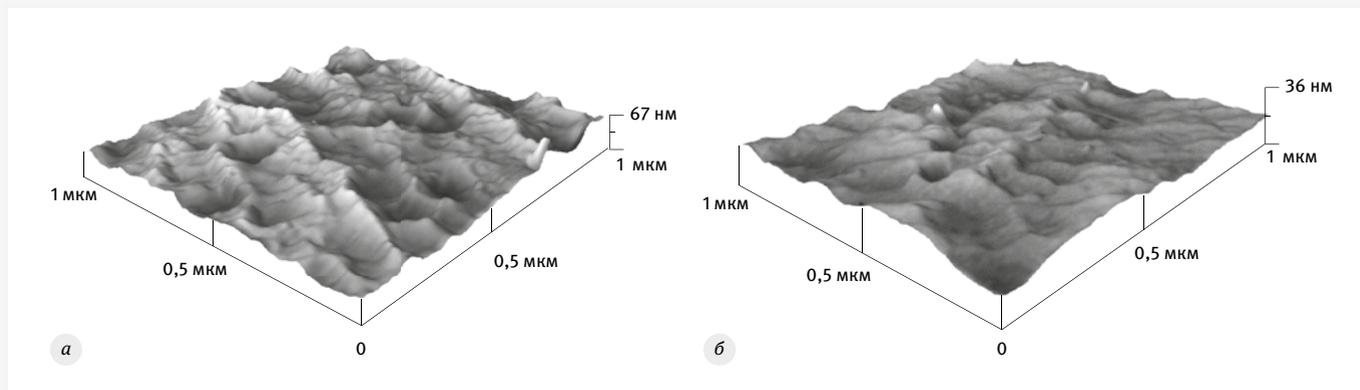


Рис. 4. Топография поверхности покрытий TiAlN, сформированных при частоте импульсов: а – 20 кГц; б – 30 кГц

### Физико-механические свойства покрытий TiAlN

Изменение фазового и элементного состава, повышение плотности структуры и уменьшение размера зерна покрытий TiAlN оказывает влияние на их физико-механические свойства. Фазовый переход  $(111) \text{TiN} \rightarrow (107) \text{Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$ , при котором в покрытии преобладает высокодисперсная износостойкая фаза  $h\text{-Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$ , и увеличение содержания Ti в покрытии, происходящее при достижении частоты импульсов 30 кГц, приводит к увеличению микротвердости  $H_\mu$ , упругого восстановления  $W_e$  и стойкости покрытия к упругой  $H/E$  и пластической  $H^3/E^2$  деформациям. Модуль упругости  $E$  изменяется незначительно и принимает значения, близкие к материалу подложки. Адгезионная прочность сформированных покрытий вне зависимости от частоты импульсов остается высокой (табл. 4). Увеличение микротвердости покрытия TiAlN может быть вызвано рядом причин:

- нанокристаллической структурой покрытия с размером зерен до 10–50 нм;
- дисперсионным упрочнением вследствие выделения фазы  $\text{Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$ ;
- достижением структурой покрытия параметров КР, близких к стехиометрическим значениям.

### Выводы

Изменение частоты импульсов, подаваемых на подложку в процессе импульсного МР покрытий TiAlN, оказывает наибольшее влияние на фазовый и элементный состав покрытия, плотность формируемой структуры покрытия

и шероховатость его поверхности. При малом значении частоты импульса в покрытии формируются дополнительные фазы:  $c\text{-AlN}$  и  $c\text{-AlTi}_3\text{N}$ . Установлен фазовый переход со сменой преимущественной кристаллографической ориентацией  $(111) \text{TiN} \rightarrow (107) \text{Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$  и повышением степени текстурированности покрытия при повышении частоты импульсов до 30 кГц.

Увеличение частоты импульсов способствует изменению напряженного состояния покрытия TiAlN, проявляющегося в снижении степени деформации КР основной фазы покрытия  $\Delta\alpha$ , уменьшении полуширины пика основной фазы  $\beta^0$  и отклонения положения дифракционных максимумов  $\Delta 2\theta$  от табличных значений. Элементный состав покрытий TiAlN изменяется в сторону увеличения концентрации Ti от 21,14 до 30,34 ат. % с формированием покрытия  $\text{Ti}_{0,61}\text{Al}_{0,39}\text{N}$  при максимальной частоте импульсов.

Микроструктура покрытия с увеличением частоты импульсов остается столбчатой, однако происходит увеличение ее плотности и снижение размеров столбцов до 10–50 нм. Шероховатость поверхности уменьшается с увеличением частоты импульсов до 36 нм.

Анализ результатов физико-механических свойств и сопоставление их с полученными результатами рентгеноструктурных исследований показал, что наибольшим значением микротвердости, упругого восстановления и стойкости к упругой и пластической деформациям обладает покрытие  $\text{Ti}_{0,61}\text{Al}_{0,39}\text{N}$  на основе высокодисперсной износостойкой фазы  $h\text{-Ti}_3\text{Al}_2\text{N}_2$  с плотной нанокристаллической

Таблица 4. Физико-механические свойства покрытий TiAlN

Частота импульса, кГц	$H_\mu$ , ГПа	$E$ , ГПа	$H/E$	$H^3/E^2$	$W_e$ , %	SRC, %
20	21,4	232,5	0,092	0,18	52,8	0
30	32,6	288,1	0,113	0,42	65,2	0

структурой, минимальными искажениями параметров КР, сформированная при частоте импульсов 30 кГц.

## Литература

1. **Александров В.А., Вдовин В.М., Сергеева А.С.** Создание износостойких покрытий для режущего инструмента // International journal of humanities and sciences. 2017. № 11. С. 85–89.
2. **Кавалейро А., де Хоссон Д.** Наноструктурные покрытия / Пер. с англ. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. 752 с.
3. **Danisman S., Odabas D., Teber M.** The Effect of TiN, TiAlN, TiCN thin films obtained by reactive magnetron sputtering method on the wear behavior of Ti6Al4V alloy: a comparative study // Coatings. 2022. No. 12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/coatings12091238> (дата обращения 27.01.2023).
4. **Афанасьева Ю.Д., Шехтман С.Р.** Технология нанесения покрытий Ti-TiN на режущий инструмент // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 4(81). С. 3–9.
5. **Sheng N.I., Sun Z., Zhao Q.** Deposition of TiAlN film by reactive magnetron co-sputtering and related mechanical properties // Functional materials. 2005. Vol. 12, no. 36. PP. 1842–1848.
6. **Берлин Е.Б., Сейдман Л.А.** Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. 256 с.
7. **Danisman S., Bendes O.** The effects of coating obtained by DC reactive magnetron sputtering technique on the wear performance of engine parts // Gazi University Journal of Science. 2014. Vol. 27, iss. 2. PP. 871–881.
8. **Santana A.E., Karimi A., Derflinger V.H., Schütze A.** Thermal treatment effects on microstructure and mechanical properties of TiAlN thin films // Tribology Letters. 2004. Vol. 17, no. 4. PP. 689–696.
9. **Keuncke M., Stein C., Bewilogua K., Koelker W., Kassel D., H. van den Berg** Modified TiAlN coatings prepared by d.c. pulsed magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205, no. 5. PP. 1273–1278.
10. **Du M., Hao L., Liu X., Jiang L., Wang S., Lv F., Li Z., Mi J.** Microstructure and thermal stability of  $Ti_{1-x}Al_xN$  coatings deposited by reactive magnetron co-sputtering // Physics Procedia. 2011. Vol. 18. PP. 222–226.
11. **Каменева А.Л., Сошина Т.О.** Технологические параметры процесса импульсного магнетронного осаждения // Главный механик. 2014. № 12. С. 38–42.
12. **Кирюханцев-Корнеев Ф.В.** Импульсное магнетронное распыление (pulsed magnetron sputtering) керамических СВС-мишеней как перспективная технология получения многофункциональных покрытий // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2020. Т. 56, № 2. С. 165–180.
13. **Сергеев В.П., Федорищева М.В., Воронов А.В., Сергеев О.В., Яновский В.П., Псахье С.Г.** Трибомеханические свойства и структура нанокompозитных покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$  // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 2. С. 149–153.
14. **Chakrabarti K., Jeong J.J., Hwang S.K., Yoo Y.C., Lee C.M.** Effects of nitrogen flow rates on the growth morphology of TiAlN films prepared by an rf-reactive sputtering technique // Thin Solid Films. 2002. Vol. 406. PP. 159–163.
15. **Obrosov A., Naveed M., Volinsky A.A., Weiss S.** Substrate frequency effects on  $Cr_xN$  coatings deposited by DC magnetron sputtering // Journal of Materials Engineering and Performance. 2017. Vol. 26(1). PP. 366–373.
16. **Hubička Z., Gudmundsson J.T., Larsson P., Lundin D.** Hardware and power management for high power impulse magnetron sputtering // High Power Impulse Magnetron Sputtering. 2020. PP. 49–80.

## Автор

**Сошина Татьяна Олеговна** – кандидат технических наук, доцент Пермского национального исследовательского политехнического университета (Лысьвенский филиал)

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1210 руб.

### ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ СТАЛЕЙ, ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

**Райхельсон В. А.**

В книге освещены основные виды механической обработки резанием современных конструкционных сталей, жаропрочных и титановых сплавов лезвийными инструментами: точение, строгание, сверление, фрезерование, протягивание, разрезка заготовок и прорезка пазов.

Книга содержит большой научно-практический и справочный материал, рассчитана на инженерно-технических работников предприятий машиностроения, авиакосмической отрасли, энерго- и автостроения, оборонной промышленности. Она также послужит учебным пособием для студентов и преподавателей высших и средних учебных заведений машиностроительных специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2020. – 508 с.,  
ISBN 978-5-94836-476-6

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)