

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора Смыслова Анатолия Михайловича на диссертационную работу Иванова Николая Андреевича «Исследование и разработка многослойных композитных покрытий Ta/W, напыленных системой инвертированных магнетронов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

### Актуальность работы.

Многослойные композитные покрытия из тугоплавких металлов, прежде всего на основе W, являются перспективными для энергоемких отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая и атомная отрасли, изделия которых (например, ITER) работают в экстремальных тепловых и механических нагрузках и радиации. Покрытия на основе W способны устранить часть имеющихся проблем. При этом в первую очередь, необходимо повысить их термомеханическую стабильность в отношении расслоения и механические характеристики этих покрытий, учитывая высокую хрупкость W. Добавление в W покрытие Ta представляет особый интерес, поскольку обеспечивает его качественную связь с подложкой при большой разнице у них коэффициентов термического расширения и повышает пластичность покрытия. Широкий спектр возможных областей применений Ta/W покрытий, а также получения их толщин – от толстых до наноразмерных, с использованием различных структурных композиций, позволяет формировать на поверхности деталей как однослойные, так и многослойные покрытия. Именно это и демонстрирует автор в диссертации, исследуя однослойные Ta и W и многослойные Ta/W покрытия с большой толщиной слоев, а также многослойные композитные мультискалярные покрытия сложной конструкции. Мультискалярные покрытия, представляющие собой композиционно-модулированные многослойные материалы, обычно состоят из пакетов чередующихся нанослоев двух материалов и слоев микронного масштаба одного из этих же материалов. Мультискалярные покрытия имеют значительные перспективы существенного повышения их механических характеристик.

При нанесении мультискалярных покрытий обычно используют импульсное лазерное осаждение, электро-осаждение и распыление планарными магнетронами постоянного тока. Для промышленности необходимо обеспечить нанесение с высокой скоростью мультискалярных покрытий на детали сложной формы. Данная задача может быть решена напылением покрытий инвертированными магнетронами. Исходя из

вышеизложенного следует, что исследования и разработка многослойных композитных покрытий Ta/W, напыленных системой инвертированных магнетронов весьма актуальны.

**Научная новизна.** Научная новизна диссертационной работы Иванова Н.А. заключается в разработке методик формирования многослойных покрытий системы Ta-W различной конструкций (однослойных, четырехслойных с толстыми слоями и мультискалярных) напылением инвертированными магнетронами.

Установлены закономерности текстурообразования в четырехслойном толстом Ta/W/Ta/W покрытии и обнаружено образование на плоской подложке псевдомонотекстуры (111) текстуры с шириной текстурного максимума 12°-14°. Показано, что наличие монокристаллической (111) текстуры Ta соответствует максимальной величине модуля Юнга и, соответственно, сил межатомной связи нормально плоскости покрытия, что предполагает в многослойных покрытиях с внешним Ta слоем высоких трибологических характеристик.

Впервые с помощью системы инвертированных магнетронов получено опытное мультискалярное многослойное покрытие Ta-Ta/W, исследована его текстура и обнаружены новые закономерности её формирования при напылении на плоскую и цилиндрическую подложки.

Показано, что микротвердость мультискалярных покрытий, полученных с помощью системы инвертированных магнетронов, существенно выше микротвердости обычных аналогичных по составу многослойных покрытий.

### **Практическая значимость работы**

Наиболее значимым для практики результатом работы является разработка толстого четырехслойного Ta/W/Ta/W покрытия и найдены технологические варианты получения покрытий с контролируемой кристаллографической ориентацией.

Важно также для практики, что методика применения систем инвертированных магнетронов для формирования мультискалярных многослойных металлокомпозитных покрытий может быть распространена на покрытия сложного состава – нитриды, оксиды и др..

Разработано модернизированное оборудование для получения многослойных покрытий различных конструкций с помощью системы инвертированных магнетронов.

Результаты работы использованы на практике при нанесении защитных покрытий на оснастку сложной формы для изготовления высокотемпературных фильтроэлементов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается необходимым объёмом экспериментальных исследований, применением комплекса современных методов исследования поверхности материалов, использованием сертифицированного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений.

Публикации. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 6 научно-технических конференциях, опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и 4 статьях, индексируемых в международной системе цитирования Scopus.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 137 наименований и приложений. Работа содержит 126 страниц машинописного текста, 48 рисунков, 18 таблиц.

**По работе можно сделать следующие замечания.**

1. В работе не указаны толщины однокомпонентных покрытий  $T_a$  и  $W$  при разных значениях напряжения смещения – глава 3.
2. Не ясна схема измерения температуры. Какой принцип работы прибора Iprас-140? – рис. 28, стр. 65
3. По тексту диссертации стр. 105: «Из таблицы 17 видно, что при  $U_n = 0$  В и  $U_n = -200$ В микротвердость мультискалярных покрытий существенно выше микротвердости обычных многослойных покрытий». Однако из таблицы следует, что это верно только для  $U_n = -200$  В.
4. Отсутствует обоснование смены материала подложек – меди на сплав Х20Н80 – стр. 99.
5. В главе 5 нет расчета снижения скорости проходов образцов через магнетроны, при увеличении напряжения смещения на подложке, для обеспечения компенсации снижения скорости роста толщины покрытий из-за увеличения ионного распыления осаждаемых слоев.
6. В качестве научной новизны указано, что  $T_a$  покрытия с сильной текстурой (111) должны обладать повышенными трибологическими характеристиками, однако в диссертации отсутствуют экспериментальные подтверждения этого предположения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Тема диссертации соответствует заявленной специальности, а полученные результаты соответствуют поставленной цели и задачам работы. Диссертация выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной,

практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно - исследовательской работой. В диссертации решена важная задача по формированию нового научного подхода к исследованию и разработке композитных покрытий с повышенными прочностными свойствами на основе системы Та-W, имеющая существенное значение в технологиях обработки материалов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической и других отраслях промышленности.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Иванов Николай Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Официальный оппонент доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Института технологий и материалов, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,



Смыслов Анатолий Михайлович

Адрес организации: Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.  
Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (Институт технологий и материалов).  
Электронный адрес: [smyslovam@yandex.ru](mailto:smyslovam@yandex.ru). Телефон: +7-908-350-21-83; +7-917-342-51-55.



Подпись, *Семеева В. В.*  
достоверяю «*07*» *11* 20*13*.  
Заместитель общего отдела УИИТ  
*Семеева В. В.*