



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов



«ПРОМЕТЕЙ»

имени И. В. Горынина

Государственный научный центр

### Отзыв

на автореферат диссертации Кирюханцева-Корнеева Филиппа Владимировича  
на тему «Получение многофункциональных ионно-плазменных покрытий  
с использованием СВС- композиционных материалов»,  
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 2.6.5 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Методы физического осаждения из паровой фазы при нанесении нанокompозитных защитных покрытий на основе тугоплавких соединений переходных металлов, такие как магнетронное напыление (DC, DC pulsed, HIPIMS) и катодно-дуговое испарение (CAE), являются одними из наиболее перспективных способов повышения ресурса ответственных изделий, подверженных одновременному воздействию износа, повышенных температур, агрессивных сред. Особый интерес представляет применение композиционных катодов-мишеней, обеспечивающих возможность формирования заданного состава наноструктурных покрытий.

Актуальность диссертационной работы, целью которой являлась разработка защитных (жаростойких, коррозионностойких, износостойких) и функциональных (оптически прозрачных) наноструктурных покрытий, получаемых методами ионно-плазменного осаждения с использованием композиционных СВС-материалов, подтверждается тем, что она выполнялась в рамках государственных заданий Минобрнауки, Федеральных целевых программ, проектов Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований.

В работе Кирюханцева-Корнеева Ф.В. получены результаты, научная новизна которых состоит из ряда основополагающих заключений. Установлены закономерности влияния легирующих добавок (Si, Cr, Al, Ni) на структуру и свойства покрытий TiBN и TiCN, заключающиеся в формировании нанокompозиционных покрытий TiCrBN



НИИ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
191015, Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49  
Телефон (812) 274-37-96, Факс (812) 710-37-56, mail@crism.ru, www.crism-prometey.ru  
ОКПО 07516250, ОГРН 1037843061376, ИНН 7815021340/ КПП 784201001

и TiCrSiCN, состоящих из нанокристаллитов ГЦК-фазы nc-TiCr(C)N и аморфных фаз a-CrB/a-BN или a-SiCN/a-C, с содержанием Cr 11-14 ат. %, и обеспечивающих сочетание высокой твёрдости (до 30 ГПа), износостойкости (приведённый износ не более  $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \text{Н}^{-1} \text{м}^{-1}$ ), наличие диффузионно-барьерных свойств, термической стабильности и жаростойкости до 800-1000°C, что определяет защитные функции покрытий в условиях высокоскоростного сухого резания.

Установлено влияние азота и хрома на структуру и свойства покрытий, полученных магнетронным распылением СВС-катодов из МАХ-фаз  $\text{Ti}_x\text{Cr}_{2-x}\text{AlC}$ . Введение азота приводит к снижению размера кристаллитов карбидных фаз в 10-100 раз и повышению твёрдости на 13-82 %, упругого восстановления на 12-60 %. Жаростойкость покрытий возрастают с увеличением доли хрома, вследствие образования защитных слоев из оксидов хрома и алюминия. Найдены условия формирования покрытий со структурой МАХ-фаз при осаждении с последующей термообработкой.

В покрытиях Me-B-N (Me: Cr, Ti, Zr), полученных с использованием боридных СВС-мишеней, обнаружен положительный эффект легирования азотом, заключающийся в том, что азот подавляет столбчатый рост зерен, снижает размер кристаллитов боридной фазы, способствует выделению фазы h-BN, что увеличивает трещиностойкость, адгезионную прочность сцепления покрытия с подложкой (критическая нагрузка  $L_{c2}$  до 90 Н), снижает коэффициент трения до 0.3 и приведённый износ до  $1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \text{Н}^{-1} \text{м}^{-1}$ .

Разработаны жаростойкие кремнийсодержащие покрытия на основе  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$  и SiC, предназначенные для защиты ответственных узлов из жаропрочных материалов (углеродных композиционных материалов, никелевых и молибденовых сплавов). Благодаря нанокомпозитной/аморфной структуре и высокой концентрации кремнийсодержащих фаз, покрытия повышают рабочую температуру поверхности до 1000-1200°C, выдерживают кратковременное (до 10 мин) воздействие при 1400-1700°C.

Впервые установлена линейная зависимость жаростойкости покрытий Mo-Si-B от концентрации кремния, что связано с формированием защитного слоя Si:B:O, а легирование покрытий гафнием и цирконием повышает высокотемпературную трещиностойкость покрытий за счёт подавления роста кристаллитов h-MoSi<sub>2</sub>.

Получены двух- и трехслойные покрытия TiAlCNi и CrAlCNi, высокая коррозионная стойкость которых в жидких и газовых средах обусловлена эффектом залечивания/герметизации поверхностных дефектов (микротрещин, частиц капельной фазы) в результате нанесения слоев методами ионно-плазменного осаждения, тогда как нижний электроискровой подслои обеспечивает высокую износостойкость в условиях



трения-скольжения и циклического ударно-динамического нагружения. Получены жаростойкие покрытия MoSiB и CrAlSiB с ЭИЛ-подслоем ZrSiB, позволившие уменьшить глубину окисления никелевого сплава в 12 и 40 раз при 900°C.

Разработаны оптически-прозрачные высокотемпературные покрытия ZrBN и ZrSiBN с твёрдостью 10-15 ГПа, коэффициентом пропускания 60-90 % и показателем преломления 1.97-2.68 при длинах волн 500-2500 нм. Эффект оптической прозрачности покрытий обусловлен образованием аморфных фаз переменного состава BN и SiN<sub>x</sub> с температурной начала процесса кристаллизации 1000°C, подтвержденного методом *in situ* при нагреве фольг в колонне просвечивающего электронного микроскопа.

Научная значимость работы подтверждается большим количеством статей в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах, таких как: Физика металлов и металловедение, Физика твёрдого тела, Физикохимия поверхности и защита материалов, Surface and Coatings Technology, Applied Surface Science, Thin Solid Films, Coatings, Materials и т.д.

Результаты диссертационной работы имеют важное практическое значение. Предложен новый подход - магнетронное напыление на постоянном токе с одновременной ионной имплантацией, а также - импульсное катодно-дуговое испарение, которые обеспечивают высокий уровень адгезионной прочности покрытий (от 90 до 120 Н). Методами электроискрового легирования, катодно-дугового испарения и магнетронного напыления получены двух- и трёхслойные покрытия с 5-7 кратным повышением стойкости к газовой и электрохимической коррозии. Композиционные СВС-мишени успешно применены в различных технологиях ионно-плазменного напыления, таких как высокоомощное импульсное магнетронное напыление. Разработанные защитные покрытия могут быть успешно нанесены на опытно-промышленных установках магнетронного напыления с применением планарно-протяжённых композиционных мишеней.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее:

1. По установившейся классификации тонких плёнок и наноструктурированных покрытий они могут быть многослойными с нанометровой толщиной отдельных слоев или композиционными с размером отдельных фаз или структурных элементов в нанометровой области. В многослойной структуре необходимо чередование твердых и вязких слоёв для торможения трещин, неизбежно возникающих в твердых слоях при деформировании покрытия. В композиционных покрытиях тоже должны быть вязкие и

прочные составляющие. К сожалению, в автореферате эти подходы и представления не раскрыты в полной мере.

2. В автореферате отмечается, что по результатам высокотемпературных испытаний установлено, что при нанесении на СЛС никелевые сплавы покрытий MoSiB и ZrSiBN происходит увеличение предела прочности. Однако ничего не сказано о механизме такого упрочнения.

Однако указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор Кирюханцев-Корнеев Ф.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 - Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Доктор технических наук



П.А. Кузнецов

Кузнецов Павел Алексеевич, доктор технических наук, специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение), начальник Научно-исследовательского отделения «Наноматериалы и нанотехнологии» Центрального Научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»).

Адрес: 191015, г. Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49

Тел: +7 (812) 274-12-01

E-mail: npk3@crism.ru, Web-сайт: www.crism.ru

«Подпись П.А. Кузнецова заверяю»

Начальник отдела кадров



Я, нижеподписавшийся, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы Кирюханцева-Корнеева Ф.В., и их дальнейшую обработку



П.А. Кузнецов