



УТВЕРЖДАЮ

Директор Института сильноточной
электроники СО РАН
Академик РАН

Н.А. Ратахин

Н.А. Ратахин

«29» *ноября* 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Назарова Алмаза Юнировича **«Разработка композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al, синтезированных в среде реакционных газов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы.

Актуальность работы.

Для улучшения эксплуатационных свойств и долговечности деталей и узлов авиационной техники, включая авиационные двигатели, всё шире используются высоколегированные труднообрабатываемые материалы. Этим определяются возрастающие требования к износостойкости металлорежущего инструмента, обрабатывающего эти материалы. Для решения этой проблемы проводится разработка новых инструментальных материалов, и более всего используется упрочнение поверхности инструмента различными методами. Наиболее прогрессивными являются ионно-плазменные методы модификации поверхности, к которым относится и напыление покрытий электродуговым методом. Всё возрастающее количество исследований, посвященных разработке новых покрытий, направлены на решение задач повышения физико-механических свойств покрытий. На сегодняшний день относительно хорошо изучены покрытия на основе системы Ti-Al, сохраняющие свои свойства вплоть до температуры плавления, и системы Ti-Al-N, обладающие одними из лучших показателей по соотношению цена/износостойкость при работе по широкой номенклатуре материалов. Но кроме этого, интерметаллидные фазы системы Ti-Al могут выступать основным компонентом многослойных композиционных покрытий, включающих один или сразу несколько типов твердых фаз на основе нитридов, карбидов и оксидов. Такой подход позволяет уменьшить интенсивность изнашивания поверхности инструмента при обработке высоколегированных материалов.

Целью работы Назарова А.Ю. являлась разработка и исследование композиционных покрытий на основе интерметаллидных соединений системы Ti-Al, осажденных в среде реакционных газов азота, ацетилен, кислорода, а так же разработка технологии их нанесения из плазмы вакуумно-дугового разряда на конические твердосплавные фрезы.

В ходе выполнения диссертационной работы для достижения поставленной цели **автором был решён ряд задач:**

1. Была разработана математическая модель для прогнозирования элементного состава композиционного покрытия на основе интерметаллидов системы Ti-Al,

осажденных в среде реакционных газов азота, ацетилена, кислорода из плазмы вакуумно-дугового разряда;

2. Было проведено исследование механизма формирования интерметаллидных фаз системы Ti-Al при нанесении покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда в среде реакционных газов (N_2 , O_2 , C_2H_2);

3. Был разработан способ нанесения композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al, осажденных в среде реакционных газов азота, ацетилена, кислорода;

4. Было проведено исследование структурно-фазовых и физико-механических свойств композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al, осажденных в среде реакционных газов азота, ацетилена, кислорода из плазмы вакуумно-дугового разряда;

5. Была разработана технология нанесения композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al, осажденных в среде реакционных газов, на твердосплавные концевые фрезы из сплава H10F и проведены производственные испытания с композиционными покрытиями.

В ходе решения каждой из задач получены новые, научно-значимые или важные для практики результаты.

Диссертация представлена на 129 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы (109 наименований), содержащего обширную и достаточную библиографию по всем вопросам, рассмотренным в диссертации. Текст диссертационной работы достаточно иллюстрирован и содержит 79 рисунков.

Объем полученных результатов и их количество вполне достаточен для диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы.

Следует отметить, что автору удалось провести полный цикл исследовательской работы, включая разработку математической модели прогнозирования элементного состава покрытия и её расчетную и практическую проверку на действующей установке.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются применением современных методов исследований, теоретическими расчетами и моделированием, а также результатами многочисленных экспериментов.

Достоинством работы является то, что её результаты были использованы на практике для серийной обработки производственного режущего инструмента различной номенклатуры, что подтверждается актом внедрения результатов диссертационной работы, а также тем, что по теме диссертационной работы были получены 4 патента РФ.

Тема диссертации соответствует специальности 05.16.06 – «порошковая металлургия и композиционные материалы». Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах. Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации.

Новизна результатов, полученных Назаровым А.Ю., заключается в том, что:

1. Установлено, что при послойном нанесении покрытия с двух электродуговых испарителей с однокомпонентными катодами из Ti и Al в среде реакционных газов (азота, кислорода и ацетилена) и при нагреве подложки до температуры $450^\circ C$, в покрытии кроме соединений Ti и Al с азотом, углеродом, кислородом, образуются интерметаллиды системы Ti-Al, а именно фазы TiAl, Ti_3Al .

2. Разработана математическая модель формирования элементного состава композиционного покрытия в зависимости от реакционного газа (N_2 , O_2 , C_2H_2) и технологических параметров процесса нанесения покрытий (давление рабочего газа,

величина тока разряда электродуговых испарителей, величина напряжения смещения и расстояние от оси стола до напыляемой подложки).

3. Установлена зависимость влияния толщин слоев на микротвердость покрытий. Уменьшение толщины слоев с ~50 до ~5 нм приводит к увеличению микротвердости покрытий, синтезированных в среде азота с 1500–1800 до 2200–2700 HV_{0,05}, синтезированных в среде кислорода с 1200–1500 до 1500–2100 HV_{0,05}, синтезированных в среде ацетилена с 1900–2400 до 2500–3400 HV_{0,05}, что происходит вследствие увеличения содержания твердых фаз AlN, TiC, Al₂O₃ в составе покрытий.

4. Установлено влияние чередования последовательности слоев Ti-Al-N, Ti-Al-O, Ti-Al-C в композиционном многослойном покрытии на коэффициент упругого восстановления материала (We). При этом покрытие с чередованием слоев Ti-Al-O/Ti-Al-N/Ti-Al-C обладает большим значением коэффициента We=58,4% при критической нагрузке (порядка 25 Н), что обусловлено плавным переходом свойств слоев с высокой твердостью на поверхности к менее твердым ближе к подложке.

Практическая значимость полученных автором результатов.

Полученные в диссертационной работе Назаровым А.Ю. результаты позволили:

1. Доказать целесообразность нанесения многослойных композиционных покрытий на основе системы Ti-Al в среде реакционных газов (N₂, O₂, C₂H₂), из плазмы вакуумно-дугового разряда на металлорежущий инструмент из твердого сплава.

2. Разработать математическую модель формирования элементного состава покрытия, которая позволяет предсказывать с высокой достоверностью химический состав покрытия в зависимости от величины тока дуговых испарителей, величины напряжения смещения, рабочего давления и геометрического расположения подложки в вакуумной камере.

3. Разработать технологические режимы формирования композиционных покрытий на основе системы Ti-Al, синтезированных в среде реакционных газов. Разработанные режимы позволили увеличить стойкость металлорежущего инструмента до 10 раз по сравнению с инструментом без покрытия и в 2 раза по сравнению с инструментом фирмы «Starrag» с покрытием TiAlN. Это подтверждается актами производственных испытаний и мелкосерийной обработкой инструмента в количестве более 1000 штук.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Диссертация является завершенным научным исследованием и содержит решение всех поставленных задач. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы». Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 12 работах, из них 5 статей опубликовано в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК РФ, кроме того получены 4 патента. О необходимом уровне освещения полученных научных результатов в печати свидетельствует список публикаций. Опубликованные работы соответствуют тематике, основным положениям и выводам диссертационной работы.

В диссертации по каждой главе сформулированы содержательные выводы, что облегчает понимание и анализ материала. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1) В названии диссертации звучат слова «покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al...». Как правило основа синтезируемого материала должна составлять большую часть или, по крайней мере, более 50 % от общей массы. В таблице 1 автореферата приведен фазовый состав нитридных, карбидных и оксидных покрытий на основе системы

Ti-Al. Содержание интерметаллидных фаз составляет в этих покрытиях от 10 до 30 %. Чем обосновывается присутствие в названии слов «на основе интерметаллидов»?

2) В работе приводятся относительно подробные исследования «композиционных покрытий» на основе нитридов, карбидов и оксидов системы Ti-Al, при этом исследуются двухслойные и трёхслойные покрытия. В работе не объясняется, согласно какой логике было выбрано чередование многокомпонентных слоёв и на какие свойства покрытий влияет каждый из факторов (многокомпонентность, многослойность, наличие определенных фаз)? Было бы интересно понять подход в выборе порядка чередования слоев и влиянии этого фактора на эксплуатационные характеристики покрытий.

3) В работе предложена модель, описывающая процесс ионного осаждения покрытий на поверхность подложки и предсказывающая химический состав формируемого покрытия. Осталось неясным, можно ли и каким образом с использованием предложенной модели осуществлять оценочные расчеты содержания определенной фазы в формируемом покрытии?

4) Одним из результатов диссертации является то, что установлена зависимость влияния толщин слоев на микротвердость покрытий. Сказано, что уменьшение толщины слоев с ~50 нм до ~5 нм приводит к увеличению микротвердости покрытий при напуске разных рабочих газов (азот, кислород, ацетилен). Какой характерный вид этих зависимостей (линейный, с экстремумом и т.д.) при формировании покрытий на основе карбидов, нитридов и оксидов системы Ti-Al?

5) Не лишена диссертация грамматических ошибок, пропусков слов, неправильных окончаний, отсутствия пояснений и т.п., например: «В работах А.Ф. Федотова, А.П. Амосова. Используя катоды...» (стр. 4 автореферата); «осаждалось с помощью магнетронного распыления тремя мишенями...», «на подложку при температура 800–900 °С и 300 °С» (стр. 4 автореферата); «..повышение стойкости фрезы достигается за счет **осаждения нанесения** композиционных..» (с. 102 диссертации). В некоторых местах пропущены пояснения, например, в диссертации в подписях к рисункам 4.8 – 4.10 не даны разъяснения по поводу условий получения графиков А-Г, а на рисунках 4.29 – 4.32 не указано, какого типа шлифы – поперечные или косые шлифы с плоскостью, выполненной под углом к исследуемому слою.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация А.Ю. Назарова является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение в области теоретических и экспериментальных исследований физических и химических процессов нанесения покрытий в контролируемой среде и вакууме для разработки технологий упрочнения поверхности инструментальных и конструкционных изделий.

Таким образом, считаем, что диссертация А.Ю. Назарова соответствует всем требованиям ВАК и требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор А.Ю. Назаров заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Отзыв на диссертацию Назарова А.Ю. обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности Института

сильноточной электроники СО РАН в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 1/11 от 20 ноября 2019 г.).

Кандидат технических наук _____



Денисов В.В.

Денисов Владимир Викторович,

кандидат технических наук, заведующий лабораторией пучково-плазменной инженерии поверхности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Почтовый адрес: г. Томск, 634055, проспект Академический, д. 2/3.

Телефон: 8 (3822) 49-26-83, адрес электронной почты: denisov@opee.hcei.tsc.ru.