

В диссертационный совет 24.2.332.01  
на базе ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»»  
Ученому секретарю совета Сотовой Е.С.  
127055, г. Москва, ГСП-4, Вадковский переулок,  
д.1

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Барановой Натальи Сергеевны: «Повышение производительности обработки точением деталей из титанового сплава путем применения износостойких покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

**Актуальность темы исследования.** Изделия из титановых сплавов традиционно являются сложными для обработки резанием в связи с высоким соотношением предела текучести и временного сопротивления разрыву, низкой теплопроводности и высокой склонности к поглощению газов при высоких температурах, характерных для зоны резания. Для титанового сплава ВТ6, точение которого рассматривается в диссертационной работе, коэффициент обрабатываемости составляет 0,22-0,26, а доминирующим механизмом износа является адгезионно-усталостный. Существующая производительность точения деталей из титановых сплавов относительно низкая, что объясняется приведенными выше причинами. В тоже время объем такой обработки растет с каждым годом в связи с рядом полезных свойств титановых сплавов и расширением их использования в различных отраслях промышленности (например, в Китае производство титановых сплавов выросло с 58 тыс. тонн в 2010 до 120 тыс. тонн в 2021 году, в России рост составил от 25 тыс. тонн в 2010 до 31 тыс. тонн в 2020 г.). Таким образом, задача повышения производительности токарной обработки деталей из титановых сплавов является

важной и актуальной. В рамках решения данной задачи важное значение имеет интенсификация режимов резания (в частности – скорости резания), а также - стабилизация качества обработки за счёт повышения ресурса работы инструмента.

В свою очередь, перспективным путей повышения ресурса инструмента является нанесение на его рабочие поверхности износостойких покрытий с рациональной структурой и композицией. Такие покрытия за счёт повышенной твёрдости и низкой адгезии с обрабатываемым материалом способны существенно повысить производительность обработки и период стойкости инструмента. Учитывая специфику обработки изделий из титана, широко применяемые коммерческие покрытия, предлагаемые производителями металлорежущего инструмента, не в полной мере удовлетворяет указанным требованиям. Перечисленные выше факторы делают задачу повышения производительности обработки при точении изделий из титанового сплава ВТ6 за счёт применения многокомпонентных композиционных наноструктурированных покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**

на основании выполненных соискателем исследований:

**Установлена** функциональная связь между скоростью вращения поворотного стола в процессе осаждения и параметрами формируемой наноструктуры (величиной периода модуляции) износостойких покрытий различного состава.

**Исследована** зависимость эксплуатационных свойств покрытия (прочность адгезионной связи с субстратом, микротвердость, модуль упругости и др.) от параметров его нанослойной структуры.

**Определен** характер изменения периода модуляции, обеспечивающий наилучшие эксплуатационные свойства покрытия.

С целью предварительного изучения работоспособности покрытий с изменяющейся величиной периода модуляции **исследовано** влияние характера изменения нанослойной структуры (периода модуляции) покрытия на режущие

свойства, характер изнашивания инструмента и механизм разрушения покрытий при точении стали 45.

**Исследовано** влияние характера изменения нанослойной структуры (периода модуляции) покрытия на режущие свойства и характер изнашивания инструмента при точении титанового сплава с различными скоростями резания.

**Экспериментально установлена** зависимость эксплуатационных свойств покрытия (прочность адгезионной связи с субстратом, микротвердость, модуль упругости и др.) от характера изменения периода модуляции. Определен характер изменения периода модуляции (увеличение по мере осаждения покрытия), обеспечивающий наилучшие эксплуатационные свойства покрытия.

**Установлено**, что покрытия с увеличивающимся периодом модуляции лучше сопротивляются окислительному изнашиванию. В поверхностных слоях покрытия с постоянным или уменьшающимся периодом модуляции при точении титанового сплава на увеличенной скорости резания (100 м/мин) наблюдается активное окислительное изнашивание, а у покрытия с увеличивающимся периодом модуляции признаки такого изнашивания не наблюдаются. Границы между нанослоями покрытия могут тормозить развитие области окисления и, таким образом, повышать стойкость покрытия к окислению.

**Установлено**, что у покрытий, включающих внутренние (прилегающие к субстрату) слои с большим периодом модуляции, при резании титанового сплава на скорости 100 м/мин наблюдаются расслоения между данными нанослоями, а у покрытий, включающих внутренние слои с малым периодом модуляции, подобных расслоений не наблюдается.

**Установлено**, что при точении титанового сплава ВТ6 со скоростью резания 50 м/мин доминируют адгезионно-усталостные механизмы изнашивания, а при скорости резания 100 м/мин ключевыми становятся механизмы окислительного изнашивания.

На основе установленных закономерностей **разработано** покрытие с рационально подобранным характером изменения параметров наноструктуры (периодом модуляции), обеспечивающее повышение скорости резания при

сохранении периода стойкости и, таким образом, позволяющее повысить производительность процесса резания.

Применение разработанных покрытий при токарной обработке деталей из титанового сплава в условиях реального производства **позволяет увеличить производительность** процесса с 7 до 10 деталей в час за счет увеличения скорости резания в 1,5 раза и, соответственно, уменьшения времени токарной обработки.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

На основе проведенных исследований установлены функциональные связи между скоростью вращения поворотного стола вакуумно-дуговой установки при нанесении покрытия и величиной периода модуляции (параметром наноструктуры) покрытий различного состава, описан механизм разрушения (изнашивания) наноструктурированных покрытий с различным характером изменения периода модуляции наноструктуры покрытий.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**Разработаны и внедрены** практические рекомендации по повышению периода стойкости твердосплавных режущих пластин и повышения производительности обработки за счет повышения скорости резания при обработке деталей из титановых сплавов на основе применения разработанных многокомпонентных композиционных покрытий наноразмерной структуры.

**Разработана** архитектура износостойких покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев, а также способ и режимы получения данной архитектуры.

**Разработаны** рекомендации для выбора параметров наноструктуры покрытий, обеспечивающие повышение износостойкости твердосплавного инструмента и производительности процесса точения титановых сплавов.

**Опытно-промышленные испытания**, проведенные в производственных условиях, подтвердили высокую работоспособность твердосплавных инструментов с разработанными покрытиями.

Результаты исследований **приняты к внедрению** в ООО «Нацпромальянс» и ООО «Промобработка».

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** результаты получены на аттестованных приборах и оборудовании, работы проводились в лабораторных условиях, максимально приближенных к производству с обработкой полученных данных на персональном компьютере,

**теория** основана на общепринятых положениях проектирования режущего инструмента, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации,

**идея базируется** на том, что применение режущего инструмента с износостойкими покрытиями рационально подобранного состава и архитектуры может позволить повысить производительность процесса точения деталей из титановых сплавов,

**использованы** данные из трудов отечественных и зарубежных ученых в таких областях, как методы проектирования инструмента, механизмы изнашивания и разрушения рабочих поверхностей режущего инструмента, применение износостойких покрытий, методы нанесения покрытий.

**установлено** качественное совпадение полученных автором результатов с данными, представленными в авторитетных источниках по данной тематике, а именно: закономерности влияния параметров обработки на период стойкости инструмента,

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации и проведения экспериментальных исследований.

**Личный вклад** соискателя состоит в формулировании цели и задач исследования, в выборе и обосновании использованных методов и средств исследования, в проведении аналитического обзора научно-технической информации по теме исследования в российской и зарубежной литературе, в проведении экспериментальных исследований, в обработке экспериментальных данных и анализе результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, а также в апробации теоретических и практических исследований и

существенном участии в подготовке публикаций по результатам проведенных исследований.

### **Замечания по диссертационной работе**

Формулировка первого пункта научной новизны не раскрывает выявленной в работе научной составляющей взаимосвязи между обрабатываемым материалом и параметрами наноструктуры покрытия с учётом режимов нанесения и условий работы.

При том, что автором установлены функциональные связи между скоростью вращения поворотного стола вакуумно-дуговой установки при нанесении покрытия и величиной периода модуляции (параметром наноструктуры) покрытий различного состава, автор не представил модели, связывающей параметры планетарного вращения поворотного стола с параметрами роста нанослоев покрытия в процессе его осаждения в зависимости от состава покрытия.

В работе в качестве аналога не рассмотрена возможность повышения теплостойкости и микротвердости твердосплавных пластин за счёт борирования и, в частности, использования диборида титана  $TiB_2$ .

Сравнения износостойкости при точении титановых сплавов даны только с покрытиями  $ZrN$  и  $TiAlN$ , в то же время целесообразно было бы рассмотреть также покрытия, содержащие  $Si$  и  $B$ . В последние годы такие покрытия активно разрабатываются.

В работе не рассмотрена применимость данной композиции, режимов нанесения и структуры покрытия для нанесения на криволинейные поверхности.

В работе не оценено влияние износа инструмента на качество поверхности деталей из титана и фактическая размерная стойкость для разных композиций покрытий.

В Таблица 3.1. твердость приведена в единицах HV, а модуль упругости – а ГПа. Правильнее было бы использовать единые единицы измерения (ГПа).

На графиках (Рис. 3.2) отсутствуют данные о разбросе значений величины периода модуляции.

На графиках (Рис. 3.2) отсутствуют данные о разбросе значений величины периода модуляции.

В работе подробно исследовался характер изнашивания передней поверхности режущей пластины, однако практически не изучался характер изнашивания задней поверхности.

В содержательной части работы (2 и 3 главы) присутствует достаточно большой объём обзорного материала.

В тексте диссертационной работы имеются опечатки.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

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

Диссертация Барановой Натальи Сергеевны является законченной научно-квалифицированной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технологические решения и разработки в области технологии и оборудования механической и физико-технической обработки и заключающиеся в повышении стойкости режущего инструмента и производительности обработки при точении деталей из титанового сплава ВТ6 за счет применения многокомпонентных композиционных наноструктурированных покрытий с переменной величиной периода модуляции нанослоев.

Диссертация соответствует требованиям п. 9–11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Официальный оппонент:

Профессор, д.т.н., профессор

/Каменева Анна Львовна/

Подпись заверяю:

Учёный секретарь  
Учёного совета ПНИПУ

В.И. Макаревич

«6» 12 2024 г.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.