

На правах рукописи



СИЗОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПУТЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
ОБРАБОТКИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2019

Работа выполнена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: **ТАБАКОВ ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой
«Инновационные технологии в машиностроении»

Официальные оппоненты: **МИГРАНОВ МАРС ШАРИФУЛЛОВИЧ**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», заведующий кафедрой «Основы конструирования механизмов и машин»

ЗИНИНА ЕЛЕНА ПЕТРОВНА
доктор технических наук,
ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» РАН, г. Москва, старший научный сотрудник лаборатории «Теория механизмов и структуры машин»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»»

Защита состоится 19 декабря 2019 г., в 15 – 00 ч. на заседании объединенного диссертационного совета Д999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ»), почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»), почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14, по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, д. 3, первый учебный корпус УлГТУ, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта: www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Веткисов Н.И.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Как известно, работоспособность режущего инструмента (РИ) существенно возрастает при нанесении на его рабочие поверхности износостойких покрытий (ИП). Однако в ряде случаев работоспособность РИ с ИП не отвечает современным требованиям машиностроительного комплекса. К тому же технологический потенциал одно- и многоэлементных, одно- и многослойных покрытий, разработанных на основе нитрида титана и его модификаций, практически исчерпан. В связи с этим становится все более актуальной научно-техническая проблема поиска новых технологий и средств повышения работоспособности РИ с ИП.

Одним из радикальных путей решения указанной проблемы является упрочняющая обработка РИ с ИП, направленная на модификацию физико-механических свойств самого покрытия и повышение прочности адгезионных связей ИП и инструментальной основой. Из всех видов упрочняющей обработки следует выделить импульсную лазерную обработку (ИЛО), являющуюся универсальным средством повышения работоспособности РИ любых типоразмеров с покрытиями различных составов и конструкций. Большое распространение в настоящее время технологических лазеров и их высокие производственные возможности делают доступной ИЛО для упрочнения любого РИ с ИП, в том числе со сложной формой режущей кромки.

Для более широкого использования ИЛО в качестве упрочняющей обработки необходимо решить ряд научных и практических задач. Прежде всего следует разработать математическую модель процесса воздействия ИЛО на РИ с многослойными покрытиями (МП) (существующие математические модели разработаны для однослойных ИП), более эффективных по сравнению с однослойными ИП. Это позволит на основе результатов аналитических и экспериментальных исследований определить оптимальные параметры ИЛО, выявить механизм изменения механических свойств МП при воздействии ИЛО, определить связи параметров ИЛО с механическими свойствами МП и процессом изнашивания твердосплавного РИ. При моделировании и экспериментальных исследованиях процесса ИЛО следует учитывать теплофизические свойства твердых сплавов, ввиду опасности возникновения напряжений, приводящих к образованию трещин как в самом МП, так и в твердосплавной инструментальной основе. Немаловажное значение имеет также задача разработки новых МП, механические свойства и конструкция которых учитывают особенности ИЛО.

Решение приведенного выше комплекса актуальных задач откроет возможность создания технологического обеспечения производства высококачественных твердосплавных РИ с многослойными износостойкими покрытиями.

Таким образом, дальнейшие исследования, направленные на повышение эффективности износостойких покрытий являются актуальными в решении проблемы создания высокоэффективных РИ для механической обработки.

Автор защищает:

1. Результаты теоретико-экспериментальных исследований влияния ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа» («МП-ИО»), в

частности математическую модель и результаты численного моделирования теплового и напряженного состояния композиции «МП-ИО», режимы ИЛО.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния ИЛО на структурные параметры, механические свойства однослойных и многослойных покрытий и изнашивание РИ с покрытиями.

3. Новые конструкции МП, предназначенных для твердосплавных РИ.

4. Результаты экспериментальных исследований работоспособности РИ с разработанными МП после воздействия ИЛО при токарной обработке заготовок из различных материалов и результаты опытно-промышленных испытаний.

Цель работы:

Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель теплового состояния композиции «МП-ИО» при воздействии на нее ИЛО; 2. Проведено численное моделирование воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО», на основе которого определены технологические параметры ИЛО; 3. Разработаны конструкции МП и технологии их нанесения; 4. Исследовано тепловое и напряженное состояние композиции «МП-ИО» с целью выявления закономерностей влияния ИЛО на параметры структуры и механические свойства МП; 5. Исследованы контактные процессы, тепловое и напряженное состояние режущего клина РИ и изнашивание РИ с МП после ИЛО с целью выявления их взаимосвязи с механическими свойствами и структурными параметрами МП; 6. Экспериментально показана высокая работоспособность твердосплавного РИ с разработанными МП после ИЛО; 7. Оценена эффективность твердосплавного РИ с разработанными МП в условиях действующего производства.

Научную новизну имеют следующие разработки:

1. Математическая модель воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО».

2. Результаты численного моделирования воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО».

3. Взаимосвязи технологических параметров ИЛО с параметрами структуры и механическими свойствами МП и интенсивностью изнашивания твердосплавного РИ.

4. Математические модели периода стойкости твердосплавного РИ с МП, подвергнутого ИЛО.

5. Новые способы получения МП, включающие в себя нанесение МП и последующую ИЛО.

Практическую ценность имеют следующие разработки:

1. Рекомендации по расчету и назначению режимов ИЛО, обеспечивающих максимальную работоспособность твердосплавного РИ.

2. Новые конструкции МП, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

3. Технологии нанесения МП.

Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях заводов АО «УКБП» (г. Ульяновск) и ООО «УАЗ» (г. Ульяновск),

подтвердили высокую работоспособность твердосплавного РИ с разработанными МП, после ИЛО. Технологические рекомендации по нанесению МП с последующей ИЛО переданы АО «УКБП» для использования в производственных условиях. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на 12 республиканских и международных научно-технических конференциях.

Диссертационные исследования проводились в рамках выполнения государственного задания № 2014/232 от 13.03.2014 г. Министерства образования и науки РФ «Разработка функциональных многослойно-композиционных износостойких покрытий на основе установления закономерностей формирования их механических свойств для повышения работоспособности режущего инструмента», грантов РФФИ «Разработка высокопрочных многослойных композиционных износостойких покрытий с функциональными наноструктурными слоями на основе многоэлементных нитридов с заданными механическими свойствами (проект № 15-08-03256), «Разработка и исследование износостойких наноструктурных покрытий на основе нитрида ниобия для повышения эффективности операций механической обработки (проект № 16-48-730246), «Исследование закономерностей формирования структуры и физико-механических свойств модифицированных нитридов ниобия и разработка на их основе многослойных композиционных износостойких покрытий (проект № 18-48-730011).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях из перечня ВАК, 4 статьи в изданиях из базы цитирования Skopus, получено 5 патентов на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (182 наименования) и приложений (10 страниц), включает 156 страниц машинописного текста, 43 рисунка и 34 таблицы.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, её практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе работ российских и зарубежных исследователей рассмотрены пути повышения работоспособности РИ, в том числе и с ИП. Проанализированы направления повышения работоспособности РИ с ИП, связанные с разработкой оборудования для нанесения ИП, новых составов и конструкций ИП, в том числе с нанокристаллической структурой. Показано, что в ряде случаев работоспособность РИ с ИП не отвечает современным требованиям машиностроительного комплекса, а технологический потенциал однослойных ИП и МП, разработанных на основе нитрида титана и его модификаций, практически исчерпан. В связи с этим становится все более актуальной научно-техническая проблема поиска новых технологий и средств повышения работоспособности РИ с ИП. Эффективным направлением повышения работоспо-

способности РИ с ИП является упрочняющая обработка, к которой относится ИЛО. Отмечены нерешенные вопросы, обусловленные отсутствием сведений о применении ИЛО для РИ с МП, отсутствием математических моделей для определения технологических параметров ИЛО твердосплавных РИ с МП. При этом существующие модели позволяют оценивать только тепловое состояние РИ с ИП, чего недостаточно для твердосплавного РИ. Закономерности связи технологических параметров ИЛО с механическими свойствами МП, интенсивностью изнашивания и механизм изменения свойств МП после ИЛО не выявлены и не изучены. В заключение сформулированы цель и задачи работы, приведенные выше.

Во второй главе представлена общая методика проведения экспериментальных исследований структурных параметров, механических свойств покрытий и работоспособности РИ. ИП наносили на установке «Булат – 6». ИЛО покрытий и инструментальной основы проводили на импульсной лазерной установке «Квант-15». Структурные параметры ИП исследовали методами рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-3М, микротвердость H_μ и модуль Юнга E ИП - с использованием пирамиды Кнуппа на микротвердомере *Mitutoyo NH-125* (Япония). Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} оценивали методом вдавливания алмазного индентора Виккерса с использованием твердомера ТК-2М при нагрузке 600 Н. Прочность адгезионных связей ИП с инструментальной основой оценивали методом вдавливания алмазного конического индентора Роквелла с использованием твердомера ТК-2М.

Экспериментальные исследования контактных характеристик процесса резания и стойкостные испытания проводили при продольном точении на токарно-винторезном станке 16К20, оснащенном приводом бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя. Использовали державку с механическим креплением режущих пластин из сплава МК8, НТi10 и МС146 ($\gamma = -5^\circ$, $\alpha = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\lambda = 5^\circ$, $r = 1,0$ мм). При выявлении рациональных конструкций МП работоспособность твердосплавного РИ оценивали по интенсивности износа, а при стойкостных исследованиях – по периоду стойкости твердосплавного РИ путем измерения фаски износа по задней поверхности на микроскопе БМИ-1Ц.

В третьей главе представлены результаты разработки математической модели и численного моделирования воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО».

При разработке математической модели ИЛО исходили из положения, что на ограниченную пластину с МП в момент времени $t=0$ действует единичный импульс ИЛО распределением плотности мощности $q(x)$, в результате чего на поверхности пластины в точке с координатой ξ выделяется Q единиц тепла (рис. 1).

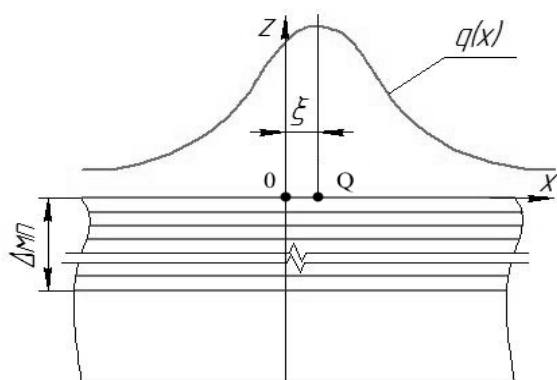


Рис. 1. Схема распределения плотности мощности ИЛО на поверхности пластины с МП

Тогда начальная температура на поверхности пластины будет равна

$$T(x, 0) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < \xi - \delta; \\ \frac{Q}{2\delta c_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}}}; & \xi - \delta < x < \xi + \delta; \\ 0; & \xi + \delta < x < \infty, \end{cases} \quad (1)$$

где $c_{\text{пр}}, \rho_{\text{пр}}$ – приведенные значения теплоемкости (Дж/К) и плотности (кг/м³) инструментальной композиции; δ – элементарная малая величина приращения координаты x , м.

В результате решения системы уравнений, включающей дифференциальные уравнения теплопроводности в слоях МП и инструментальной основе, начальные и граничные условия, для случая обработки единичным лазерным импульсом получено выражение для определения температуры в композиции «МП-ИО»:

$$T(x, t) = \frac{e^{-ht}}{2\sqrt{\pi\alpha_{\text{пр}}t} c_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}}} \frac{Q}{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha_{\text{пр}}t}}}; \quad (2)$$

$$Q = \frac{4k \int q(x) dx}{\pi d^2}, \quad (3)$$

где h – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С); $\alpha_{\text{пр}}, \lambda_{\text{пр}}$ – приведенные коэффициенты инструментальной композиции: температуропроводность, м²/с, теплопроводность, Вт/(м·К); $q(x)$ – распределение плотности мощности по сечению луча, Вт/м²; k – коэффициент поглощения поверхности; ξ – координата, м.

Уравнения (2) и (3) позволяют получить технологические режимы лазерной обработки МП, в частности значения $q(x)$, исходя из выбранного критерия потери работоспособного состояния РИ.

Используя разработанную математическую модель, были выявлены зависимости влияния плотности мощности ИЛО на температуру в твердосплавной основе МК8 и на ее границе с МП (рис. 2), анализ которых позволил определить значения критической плотности мощности для композиций с различными МП. В качестве критерия выбора критической плотности мощности использовали температуру, при которой начинается разрушение материала связующей фазы. Установлено, что значения критической плотности мощности ИЛО для различных композиций как с однослойными, так и с многослойными покрытиями отличаются не более чем на 5,3 %, что связано с малым различием их коэффициентов теплопроводности.

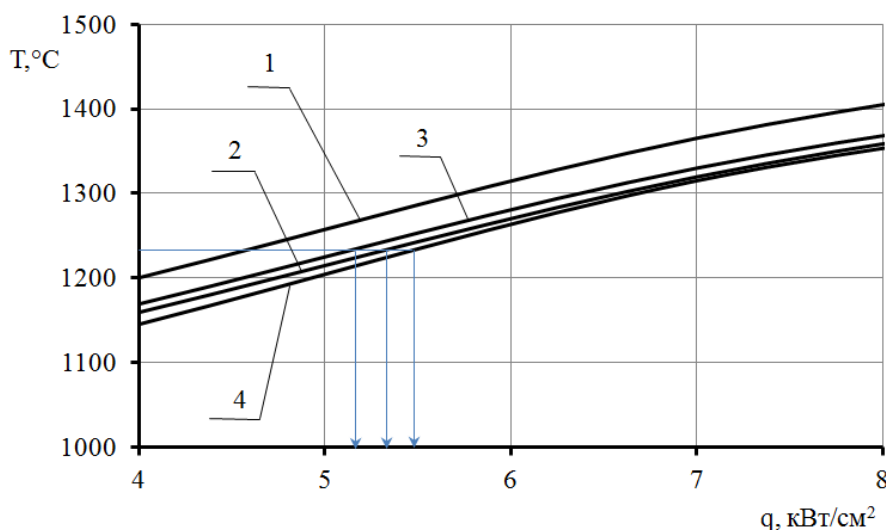


Рис. 2. Влияние плотности мощности ИЛО на температуру в твердосплавной основе и на ее границе с МП:
 1 – основа (на глубине 6 мкм);
 2 – TiN-TiZrN;
 3 – TiZrN-TiN;
 4 – TiCN-TiN

При определении критической плотности мощности важным представляется вопрос о возникающих при ИЛО напряжениях в твердосплавной основе на границе с МП. Эти напряжения могут оказать существенное влияние на величину критической плотности мощности, определенную на основе только теплового состояния композиции «МП-ИО». Аналитическое решение определения напряжений представляет собой достаточно сложную задачу, для решения которой провели численное моделирование воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО» с использованием пакета прикладных программ ANSYS. Моделировали нагрев режущих пластин с покрытиями лазерным излучением круговой формы диаметром 1 мм в виде импульса длительностью 4 мс и с шагом счета 0,01 мс. Для сокращения объема вычислений рассматривали осесимметричную задачу. В ходе моделирования решали уравнения теплопроводности и напряженного состояния с учетом изменения геометрических размеров вследствие теплового расширения. Для обеспечения достаточно высокой точности моделирования быстропротекающего процесса ИЛО была построена параметрическая модель РИ с покрытием. Модель разбивали на регулярную сетку со сгущением к зоне воздействия ИЛО с использованием конечных элементов PLANE 223, позволяющих решать сопряженную задачу теплопроводности и напряженного состояния.

В качестве критериев ИЛО твердосплавной основы были выбраны - температура, при которой начинается разрушение материала связующей фазы (критерий K_T) и напряжения, вызывающие образование трещин в твердосплавной основе на границе с МП (критерий K_H). В результате численного моделирования были получены критические плотности мощности для различных композиций (табл. 1). Результаты численного моделирования показали, что значения критической плотности мощности, полученные по температурному критерию K_T , отличаются для различных композиций не более 3,8%, как это имело место при использовании математической модели, в то время как значения критической плотности мощности ИЛО, определенной по критерию K_H , отличаются для различных композиций более существенно. Исходя из этого, в качестве крите-

рия выбора критической плотности мощности ИЛО следует принимать критерий K_H в большей степени отражающий влияние ИЛО на композицию «МП-ИО».

1. Значения критической плотности мощности ИЛО для различных композиций

Твердо- сплавная основа	Критическая плотность мощности $q_{кр}$, кВт/см ² : в числителе и знаменателе по критериям K_T и K_H соответственно						
	Без покры- тия	TiN	TiZrN	TiZrCrN	NbN	TiN- TiZrN	TiN- TiZrN- TiZrCrN
МК8	<u>5,54</u> 4,59	<u>5,48</u> 4,38	<u>5,42</u> 3,8	<u>5,33</u> 3,75	-	<u>5,53</u> 3,8	<u>5,33</u> 3,75
НТi10	<u>15,6</u> 14,9	<u>15,0</u> 13,9	<u>15,01</u> 11,8	<u>15,06</u> 11,49	<u>12,91</u> 12,44	<u>15,01</u> 11,8	<u>15,06</u> 11,49

Для подтверждения достоверности результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования критической плотности мощности. Экспериментальные значения критической плотности мощности ИЛО определяли по моменту начала снижения микротвердости твердосплавной основы и покрытия и образования в них трещин (рис. 3 - значения плотности мощности, при которой начиналось снижение микротвердости указаны стрелками) Полученные экспериментальные значения критической плотности мощности отличаются от значений, полученных при численном моделировании, на 5,7-15,2 %.

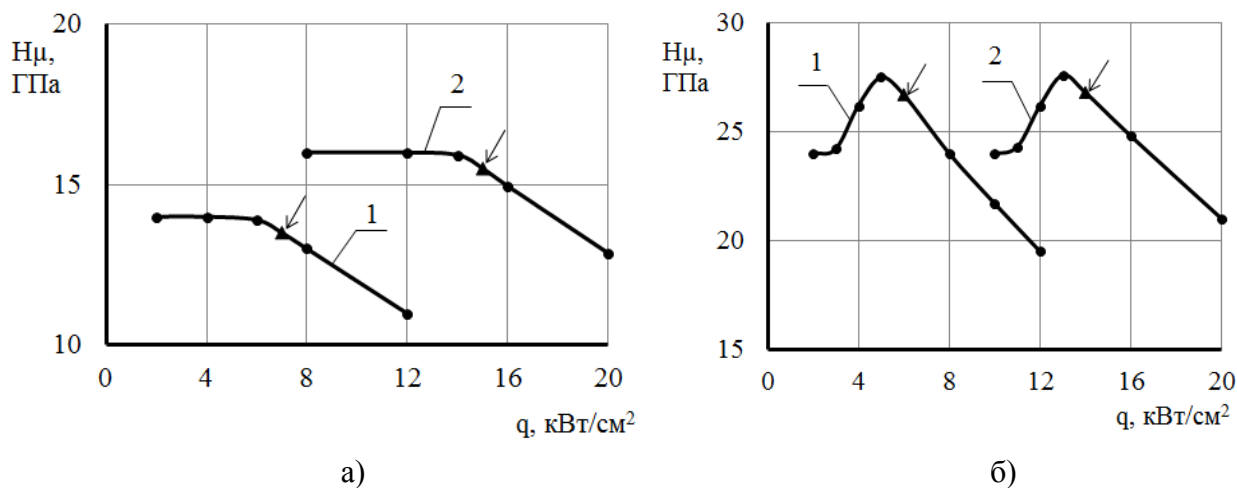


Рис. 3. Влияние плотности мощности ИЛО на микротвердость H_μ твердого сплава без покрытия (а) и с покрытием TiN (б):
1- МК8, 2-НТi10

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность результатов моделирования и полученных значений критической плотности мощности ИЛО.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния ИЛО на структурные параметры, механические свойства покрытий и интенсивность изнашивания твердосплавных пластин с МП, прошедших ИЛО.

На основе известного принципа формирования МП, предназначенных для работы в условиях непрерывного резания, были выбраны и обоснованы составы покрытий ($TiZrAlN$, $TiNbAlN$, $TiZrNbAlN$), которые использовали в качестве функциональных слоев МП, определены технологические параметры их осаждения. Исследовали влияние компоновочной схемы установки и конструкции катодов на параметры структуры, механические свойства и химический состав покрытий, по результатам которых выбраны соответствующие компоновочные схемы и конструкции катодов, обеспечивающие требуемые механические свойства отдельных функциональных слоев МП.

Исследовали влияние ИЛО на структурные параметры и механические свойства покрытий $TiZrAlN$, $TiNbAlN$, $TiZrNbAlN$, выбранных в качестве функциональных слоев МП. Установлено, что ИЛО приводит к снижению сжимающих остаточных напряжений в покрытиях, повышению полуширины рентгеновской линии и уменьшению размеров кристаллитов (рис. 4). Это в свою очередь ведет к повышению микротвёрдости (10-12,8 %), модуля упругости (10-13,7 %), трещиностойкости (2,6-3,1 %) и прочности адгезии (46,2-59 %).

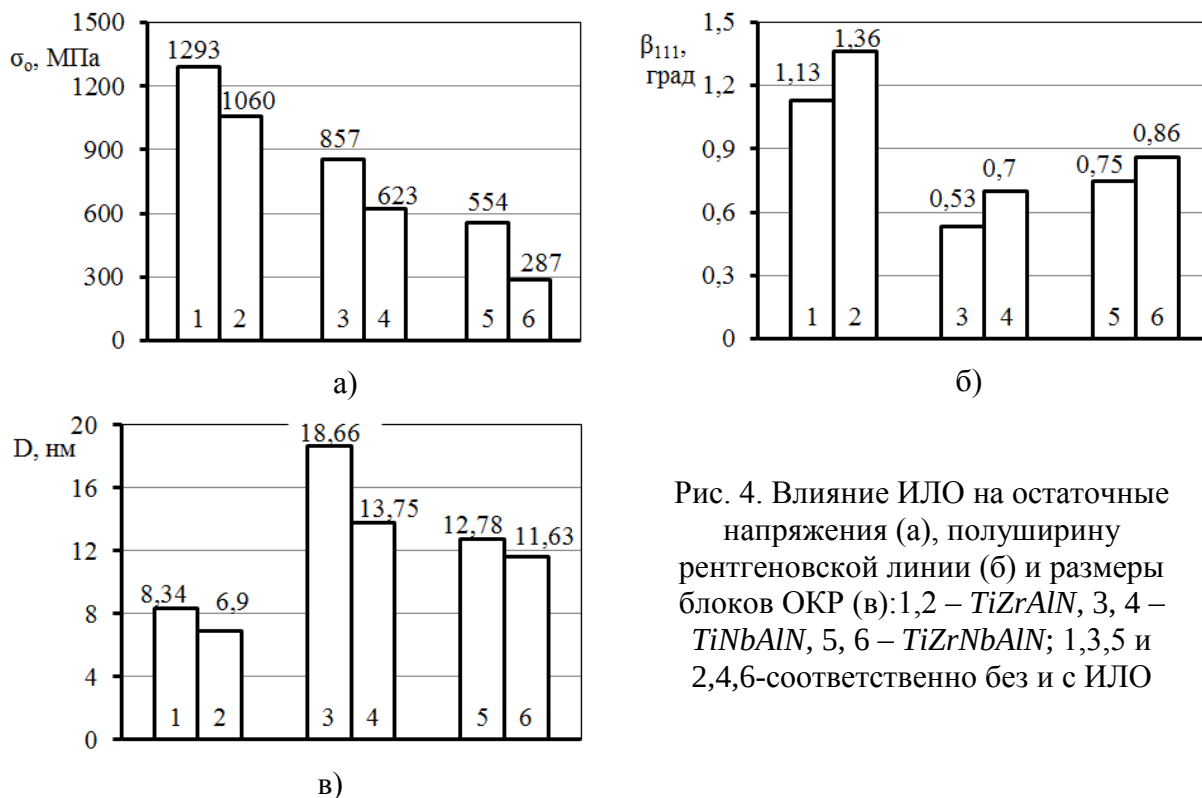
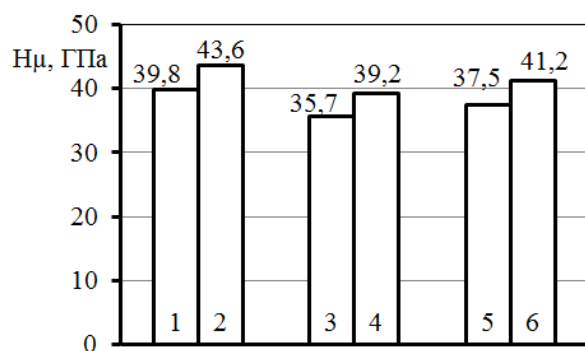
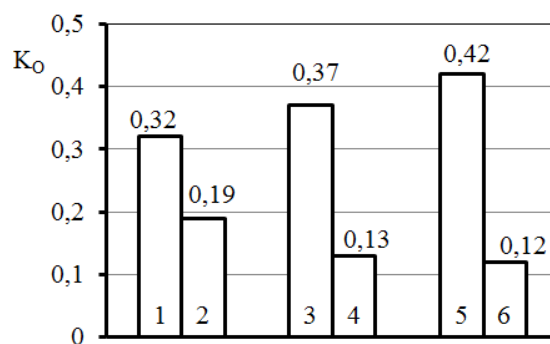


Рис. 4. Влияние ИЛО на остаточные напряжения (а), полуширину рентгеновской линии (б) и размеры блоков ОКР (в): 1,2 – $TiZrAlN$, 3, 4 – $TiNbAlN$, 5, 6 – $TiZrNbAlN$; 1,3,5 и 2,4,6-соответственно без и с ИЛО

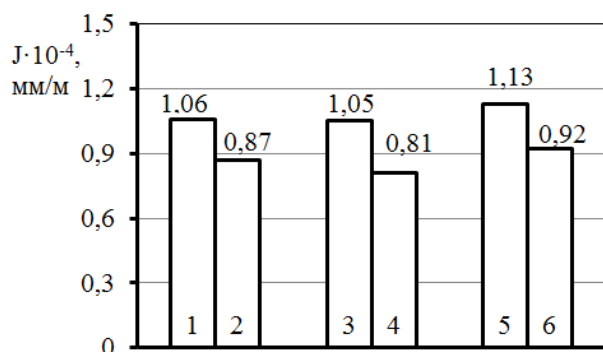
На основе полученных данных разработаны конструкции двухслойных и трехслойных МП, исследовано влияние ИЛО на их механические свойства. Установлено, что ИЛО вызывает аналогичное изменение механических свойств МП, как это имело место для однослойных ИП. При этом наибольшее влияние ИЛО оказывает на прочность адгезионных связей МП с твердосплавной основой, о чем свидетельствует снижение коэффициента отслоения в 1,7-3,5 раза в зависимости от конструкции многослойного покрытия (рис. 5, а,б).



а)



б)



в)

Рис. 5. Влияние ИЛО на микротвердость (а), коэффициент отслоения (б) и интенсивность изнашивания твердосплавных пластин МК8 с МП:

1,2-TiN-TiZrN-TiZrAlN, 3,4-TiN-TiZrN-TiNbAlN, 5,6-TiN-TiZrN-TiZrNbAlN;
1,3,5 и 2,4,6-соответственно без и с ИЛО
 $V = 180$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об,
 $t = 0,5$ мм

Повышение механических свойств МП и прочности адгезионных связей в результате воздействия ИЛО приводит к снижению интенсивности изнашивания твердосплавного РИ на 16-23 % в зависимости от конструкции МП и режима обработки (рис. 5, в).

В пятой главе представлены результаты исследований контактных характеристик процесса резания, теплового и напряженного состояния режущего клина, периода стойкости твердосплавного РИ с МП, прошедших ИЛО, опытно-промышленных испытаний и технико-экономического обоснования применения РИ с МП после ИЛО.

Установлено, что ИЛО способствует снижению полной длины контакта стружки с передней поверхностью (до 12%), коэффициента укорочения стружки (до 9%), составляющих силы резания P_z , P_y и P_x (3-8%) (табл. 2).

Проведение ИЛО оказывает влияние на температурные поля и поля напряжений в режущем клине РИ с МП. Снижение общего количества теплоты и теплового потока в режущий клин твердосплавного РИ с МП после ИЛО ведет к снижению контактных температур, температуры и напряжений в режущем клине, смещению изотерм температур и изобар напряжений в сторону задней поверхности и уменьшению глубины их залегания.

2. Контактные характеристики процесса резания твердосплавными пластинами МК8 с МП после ИЛО

№	Покрытие	C_γ , мм	K_L	μ	N , Н	F , Н	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
1	TiN	0,65	1,92	0,506	508	257	497	278	145
2	TiN+ИЛО	0,58	1,76	0,490	492	241	482	264	134
3	TiN-TiZrN-TiZrAlN	0,71	1,98	0,450	517	233	508	272	101
4	TiN-TiZrN-TiZrAlN+ИЛО	0,63	1,8	0,486	500	218	492	258	93
5	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN	0,69	2,09	0,477	528	252	517	289	112
6	TiN-TiZrN-TiZrNbAlN+ИЛО	0,61	1,85	0,475	506	239	496	277	101

Таким образом, ИЛО твердосплавного РИ с МП обеспечивает более благоприятные контактные характеристики процесса резания, улучшает тепловое и напряженное состояние режущего клина РИ.

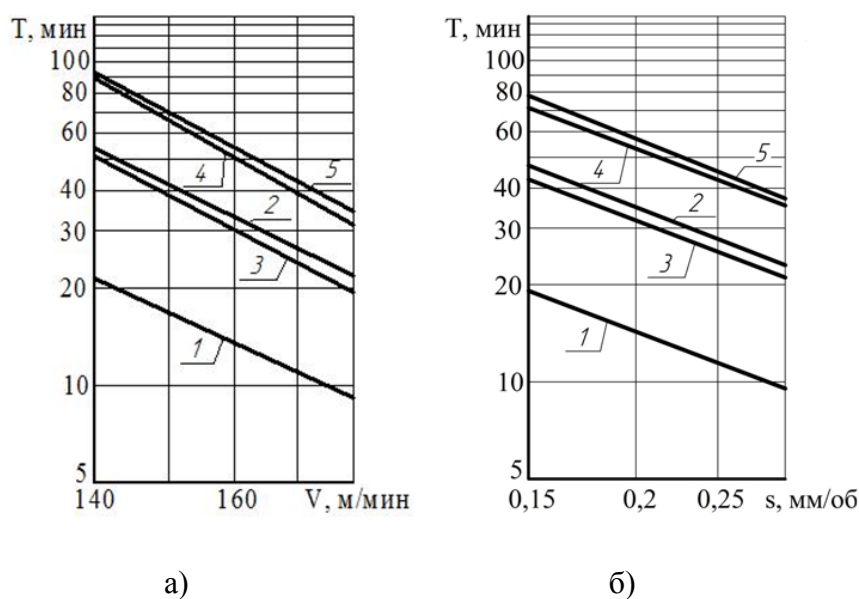


Рис. 6. Влияние скорости резания (а) и подачи (б) на период стойкости пластин МК8 при точении заготовок из стали 38ХГН:
 $s=0,21$ мм/об, $t=0,5$ мм (а);
 $V=160$ м/мин, $t=0,5$ мм (б);
 1–TiN; 2, 5–TiN-TiZrN-TiNbAlN; 3, 4–TiN-TiZrN-TiZrAlN;
 1,2,3 и 4,5-соответственно без и с ИЛО

Для оценки эффективности РИ с разработанными МП, прошедших ИЛО провели стойкостные испытания при токарной обработке заготовок из сталей 38ХГН и 12Х18Н10Т (рис. 6, 7). Установлено, что применение ИЛО повышает период стойкости твердосплавных пластин МК8 с МП в 1,48-1,7 раза в зависимости от их конструкции, а по сравнению с покрытием TiN - в 2,7-4,2 раза. Наибольший период стойкости имеют пластины МК8 с МП TiN-TiZrN-TiNbAlN.

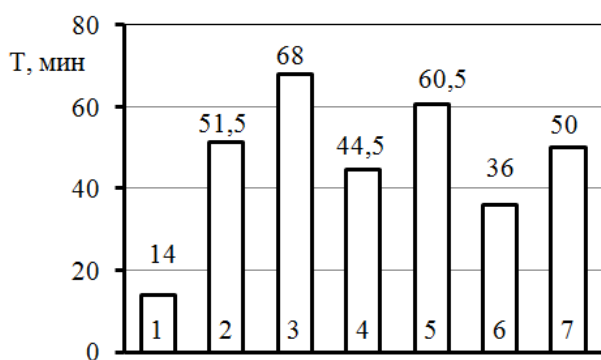


Рис. 7. Период стойкости пластин МК8 с МП при точении заготовок из стали 12Х18Н10Т: $V=140$ м/мин, $s=0,3$ мм/об, $t=0,5$ мм; 1 – TiN; 2,3–TiZrN-TiNbAlN-TiZrNbAlN; 4,5–TiN-TiZrN-TiNbAlN; 6,7–TiN-TiZrN-TiZrAlN; 1,2,4,6 и 3,5,7-соответственно без и с ИЛО

На основании экспериментальных данных получены математические модели периода стойкости токарных резцов с МП, прошедшими ИЛО (табл. 3).

3. Математические модели периода стойкости режущего инструмента

Инструментальный материал	Обрабатываемый материал
	38ХГН
МК8+TiN	$T = \frac{173,46 \cdot 10^6}{V^{3,53} \cdot S^{1,02}}$
МК8+ TiN-TiZrN-TiNbAlN	$T = \frac{599,86 \cdot 10^6}{V^{3,6} \cdot S^{1,02}}$
МК8+ TiN-TiZrN-TiNbAlN+ИЛО	$T = \frac{4450,06 \cdot 10^6}{V^{3,91} \cdot S^{1,06}}$
МК8+ TiN-TiZrN-TiZrAlN	$T = \frac{2141,35 \cdot 10^6}{V^{3,87} \cdot S^{1,02}}$
МК8+ TiN-TiZrN-TiZrAlN+ИЛО	$T = \frac{18507,09 \cdot 10^6}{V^{4,19} \cdot S^{1,01}}$

Опытно-промышленные испытания, проведенные в производственных условиях завода АО «УКБП» (г. Ульяновск) и ООО «УАЗ» (г. Ульяновск), показали повышение периода стойкости РИ с МП, прошедшем ИЛО, в 1,39 - 1,56 раза по сравнению с РИ без ИЛО и в 2,47 - 4,27 раза по сравнению с РИ с покрытием TiN в зависимости от материала заготовок и режима обработки.

Технико-экономическими расчетами показано, что ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения РИ с МП прошедшими ИЛО составил 66300 рублей на один станок.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель воздействия ИЛО на композицию «многослойное покрытие-инструментальная основа», позволяющая оценить ее тепловое состояние и выявить связь характеристик ИЛО с параметрами структуры и механическими свойствами поверхностного слоя композиции.

2. Проведено численное моделирование воздействия ИЛО на композицию «МП-ИО» с использованием программного комплекса Ansys Mechanical APDL. Результаты исследований, полученные численным моделированием, хорошо согласуются с данными, полученными по разработанной математической модели.

3. На основе результатов, полученных аналитическим путем и численным моделированием, определены критические плотности мощности ИЛО. Показано, что в качестве критерия выбора критической плотности мощности ИЛО следует принимать критерий, учитывающий величину напряжений, возникающих в твердосплавной основе на границе с МП, в большей степени отражающий влияние ИЛО на композицию «МП-ИО» по сравнению с температурным критерием. Полученные значения критической плотности мощности ИЛО подтверждены экспериментальными исследованиями.

4. Выбраны и обоснованы составы функциональных слоев МП. Показано влияние компоновочной схемы и конструкции катодов на параметры структуры, механические свойства и химический состав покрытий, выбранных в качестве функциональных слоев МП. Разработаны способы получения МП для твердосплавного РИ, включающие нанесение МП и последующую ИЛО, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

5. Выявлено влияние ИЛО на механические свойства МП. Проведение ИЛО вызывает рост микротвердости покрытий на 10-12,8 %, повышение модуля Юнга на 10-13,7 %, снижение величины коэффициента отслоения (повышение прочности адгезии с твердосплавной основой) на 46,2-59 %. Повышение механических свойств и прочности адгезии при ИЛО МП способствует снижению интенсивности износа твердосплавных пластин на 16-23 % в зависимости от условий резания и конструкции покрытий.

6. Установлено влияние ИЛО на контактные характеристики процесса резания, тепловое и напряженное состояние режущего клина РИ с МП. Выявлено снижение полной длины контакта стружки с передней поверхностью, коэффициента укорочения стружки, коэффициента трения на передней поверхности. Показано, что применение ИЛО приводит к снижению контактных температур на 5,6-14,2% как на передней, так и на задней поверхностях режущего клина РИ.

7. Установлено, что применение ИЛО позволяет повысить период стойкости твердосплавных пластин МК8 с МП в 1,48-1,7 раза в зависимости от их конструкции, а по сравнению с покрытием TiN - в 2,7-4,2 раза. Наибольший период стойкости имеют пластины МК8 с МП $TiN-TiZrN-TiNbAlN$. Наибольшее повышение периода стойкости режущего инструмента имеет место при обработке заготовок из стали 38ХГН, несколько меньшее - из стали 12Х18Н10Т.

8. Эффективность ИЛО твердосплавных пластин МК8 с МП подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях АО «УКБП» и ООО «УАЗ». Установлено повышение периода стойкости инструмента в 1,39 - 1,56 раза по сравнению с РИ без ИЛО и в 2,47 - 4,27 раза по сравнению с РИ с покрытием TiN в зависимости от материала заготовок и режима обработки. Технологические рекомендации по нанесению МП с последующей ИЛО переданы АО «УКБП» для использования в производственных условиях. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

9. Техничко-экономическими расчетами показано, что применение РИ с разработанными МП прошедшими ИЛО позволяет снизить себестоимость обработки за счет уменьшения расходов на РИ. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения данных РИ с МП прошедших ИЛО составил 66300 рублей на один станок.

Основные положения диссертации отражены в нижеследующих публикациях:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и патенты:

1. Власов С.Н., Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсного лазерного излучения на многослойное покрытие//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 12. – С. 15-19.

2. Табаков В.П., Власов С.Н., Сизов С.В., Чихранов А.В. Работоспособность режущего инструмента с покрытиями при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015, – № 7, –С. 5-9.

3. Табаков В.П., Сизов С.В. Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий на основе нитрида титана, циркония и ниобия// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 2. – С. 70-73.

4. Табаков В.П., Сизов С.В., Чихранов А.В. Новые износостойкие покрытия на основе нитрида ниобия//Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2. – 235-240.

5. Сизов С.В., Табаков В.П. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия//Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2. – 240-245.

6. Табаков В.П., Сизов С.В. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем направленного выбора механических свойств функциональных слоев многослойного покрытия//Вестник СТАНКИ-НА. 2017, № 4 (43), С. 16-21.

7. Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «твердосплавная основа – износостойкое покрытие»//Вестник машиностроения. – 2019. – №6. – 80-84.

8. Пат. № 2596530 Российская Федерация, МПК⁷ C23C 14/06 C23C 14/24 C23C 14/58 B23B 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109053/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

9. Пат. № 2596531 Российская Федерация, МПК⁷ C23C 14/06 C23C 14/24 C23C 14/58 B23B 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109054/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

10. Пат. № 2598712 Российская Федерация, МПК⁷ C23C 14/06 C23C 14/24 C23C 14/58 B23B 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109052/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27. – 6 с.

11. Пат. № 2596525 Российская Федерация, МПК⁷ C23C 14/06 C23C 14/24 C23C 14/58 B23B 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109051/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

12. Пат. № 2596520 Российская Федерация, МПК⁷ C23C 14/06 C23C 14/24 B23B 27/14. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента/ Табаков В.П., Чихранов А.В., Власов С.Н., Сизов С.В.; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун-т. - № 2015109006/02; заявл. 13.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 6 с.

Публикации в журналах, цитируемых в Scopus

13. Tabakov V.P., Shirmanov N.A., Sizov S.V., Chikhranov A.V. Influence of cathode structure and configuration on complex nitride coatings//Russian engineering research. – 2017. - Т.37. - №12. – 1048-1051.

14. V. Tabakov, A. Chikhranov, S.Sizov. Increasing of the carbide cutting tool life by developing multilayer coatings // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) - MATEC Web Conf. Volume 129, 2017. doi: 10.1051/matecconf/201712901038.

15. S.Sizov, V. Tabakov, A. Chikhranov. Functional parameters of the cutting process of the cutting tool with multilayer coatings after pulsed laser treatment // International Conference on Current trends in technology and equipment (ICMTMTE 2018) - MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. doi:10.1051/matecconf/201822401087.

16. S.V. Sizov, V.P. Tabakov, A.V. Chikhranov, I.N. Bobrovskij and V.A. Adakin. Study of the additional strengthening treatment impact on structural parameters and mechanical properties of coatings based on nitrides of niobium, titanium, zirconium and aluminium//14th International Conference on Films and Coatings/ Volume 1281, 2019. doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012074

Публикации в других изданиях:

17. Власов С.Н., Сизов С.В. Моделирование воздействия высоких энергий на многослойное тело//Материалы всероссийской молодежной конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)». Второй том. Сборник докладов. – М.: МГТУ «Станкин», 2012. – 321-326.

18. Сизов С.В. Влияние плотности мощности лазерного излучения на параметры структуры и микротвердость многослойных износостойких покрытий режущего инструмента//Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 48-й научно-технической конференции. В 3 ч. Ч.1. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 143-146.

19. Сагитов Д.И., Сизов С.В. Исследование работоспособности твердосплавных пластин с многослойным покрытием после комбинированной упрочняющей обработки//Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 49-й научно-технической конференции. В 3 ч. Ч.1. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 184-186.

20. Табаков В.П., Сизов С.В. Формирование многослойных покрытий с учетом взаимосвязи состава покрытия с функциональными параметрами процесса резания//Механики XXI века. - 2016. - №15. – 111-115.

21. Сизов С.В., Табаков В.П. Разработка многослойных покрытий на основе модифицированного нитрида титана// Научные технологии на современном этапе развития машиностроения: Материалы VIII международной научно-технической конференции. – Москва, МАДИ, 2016. – 207-210.

22. Сизов С.В., Табаков В.П. Исследование структурных параметров и механических свойств покрытий TiZrNbAlN// Высокие технологии в машиностроении: материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции А.Ф. Денисенко. – Самара: СГТУ, 2016. – 129-131

23. Сизов С.В., Галаутдинов Р.Р. Исследование работоспособности твердосплавного режущего инструмента с многослойными покрытиями// Инновационные технологии в металлообработке: Всероссийская научно-практическая заочная конференция. - Ульяновск, УлГТУ, 2018. – 202-207.

Автореферат

СИЗОВ Сергей Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПУТЕМ ИМПУЛЬСНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ**

Подписано в печать . . . 2019. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 Экз. Заказ 000.

Типография УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.