

**Кубанский государственный технологический университет  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет**

*На правах рукописи*



**Мансиа Салахалдин**

**«Повышение эксплуатационного ресурса твердосплавных режущих  
пластин химико-термической обработкой»**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2011**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет» и в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент  
**Соколов Александр Григорьевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
**Атрошенко Светлана Алексеевна**

кандидат технических наук, ведущий  
научный сотрудник ЦНИИ КМ «Прометей»  
**Тимофеев Борис Тимофеевич**

**Ведущая организация:**

НПФ «ПЛАЗМАЦЕНТР», г. Санкт-Петербург

Защита состоится “ **18** ” **апреля** **2012** г. в **16** ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: **195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и обработка металлов давлением».**

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ **14** ” **марта** **2012** г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



Востров В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы** Высокопроизводительная обработка материалов резанием достигается использованием для обработки твердосплавного инструмента. Несмотря на то, что общее количество режущего инструмента из твердых сплавов не превышает 25%, этим режущим инструментом снимается до 65% стружки от общего объема стружки, снимаемого инструментом, изготовленным из всех применяемых инструментальных материалов. Однако интенсификация производства, применение в конструкциях новых труднообрабатываемых материалов и автоматизация процесса обработки предъявляют все более высокие требования к стойкости, надежности инструмента и качеству обработки резанием, вследствие этого проблема является весьма актуальной не только у нас в стране, но и во всем мире.

Наиболее перспективным направлением повышения эксплуатационного ресурса твердосплавного инструмента является направление нанесения на поверхность твердосплавного инструмента покрытий. Данное направление интенсивно развивается ведущими фирмами мира, такими как Sandvik Coromant (Швеция), Hertel (Германия), Kennametal (США), Mitsubishi (Япония) и др., а также российскими производителями: Кировоградский инструментальный завод, Sandvik МКТС, ЗАО "Холдинговая компания "Инструментальные заводы" и др., занимающимися производством твердосплавного инструмента.

Для нанесения покрытий на твердосплавный инструмент в настоящее время используются, в основном, два способа: первый - это метод химического осаждения CVD и его усовершенствованный метод низкотемпературного осаждения MT-CVD, и второй – метод физического осаждения PVD. Данные технологии широко используются ведущими мировыми компаниями, специализирующимися на выпуске твердосплавного инструмента, такими как: Sandvik Coromant, Hertel, Kennametal Hertel, Walter, и др.

Покрытия, получаемые данными методами, представляют собой слои из химически инертных и тугоплавких соединений, таких как карбид титана, нитрид титана, оксид алюминия, циркония и др. Нанесение покрытий на твердые сплавы позволяет значительно увеличить скорость резания, а, следовательно, и производительность процесса обработки, повысить стойкость инструмента, его геометрическую стабильность и качество обработки. Однако покрытия, нанесенные методами CVD и PVD, имеют ряд существенных эксплуатационных и технологических недостатков. К числу этих недостатков относятся, прежде всего: низкая адгезия, это особенно характерно для покрытий, получаемых методами CVD, высокая хрупкость, которая приводит к снижению прочностных свойств твердого сплава и накладывает ограничения на остроту режущей кромки инструмента, а затупленная режущая кромка – это возрастающие усилия в зоне резания и выделение тепла. Кроме этого, нитридные, карбидные,

оксидные покрытия обладают низкой теплопроводностью, что также способствует повышению температуры в зоне резания, а разогрев в зоне резания приводит к снижению стойкости инструмента и возникновению наростообразования на инструменте, что ведет к снижению качества обработки. При этом, способы химического и физического осаждения для их реализации требуют сложного, дорогого, энергозатратного оборудования, и технологические процессы связаны с использованием агрессивных, ядовитых сред.

Повышение эксплуатационных характеристик твердых сплавов может быть достигнуто также применением для нанесения покрытий технологии диффузионной металлизации твердых сплавов из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Соколовым А.Г., Артемьевым В.П., Соколовым Е.Г. предлагается наносить на поверхность твердосплавных пластин двухкомпонентные никель-медные покрытия, обладающие сочетанием уникальных свойств, таких как высокая вязкость и износостойкость.

Однако на данный период остаются практически неисследованными кинетика и особенности процесса формирования никель-медных покрытий на твердых сплавах, влияние режимов металлизации и состава покрываемого сплава на толщину покрытий, их состав, строение, структуру и свойства. Не исследован механизм упрочнения покрытий, возникающего в процессе механического воздействия на них. Не изучено влияние данных покрытий на стойкость режущего инструмента, качество обработки, а также на его технологичность. Отсутствуют рекомендации по технологии нанесения никель-медных покрытий и по рациональному использованию режущего инструмента с диффузионными никель-медными покрытиями. В соответствии с этим исследования, касающиеся изучения процесса формирования никель-медных покрытий на твердых сплавах и оценки влияния данных покрытий на эксплуатационные свойства твердосплавного режущего инструмента, являются весьма актуальными.

**Цель работы и основные задачи исследования.** Цель настоящей работы – исследование, анализ процесса и механизма формирования диффузионных никель-медных покрытий на твердых сплавах из среды легкоплавких жидкометаллических растворов, а также оценка влияния данных покрытий на стойкость режущего инструмента и качество обработки труднообрабатываемых сплавов.

**Задачи исследований:**

1. Разработать технологии нанесения диффузионных никель-медных покрытий на твердые сплавы из среды легкоплавких жидкометаллических растворов и их деформационного упрочнения, а также произвести оценку влияния данной совокупности технологий и режимов этих технологий на работоспособность и технологичность твердосплавного режущего инструмента, производительность, качество обработки вязких труднообрабатываемых сплавов.

2. Установить влияние на состав, строение, структуру и свойства покрытий и переходного слоя, формирующихся под ними насыщающей среды, режимов металлизации, состава твердого сплава, а также выявить особенности и представить модель формирования диффузионных Ni+Cu покрытий на твердых сплавах.
3. Установить влияние на структуру, свойства никель-медных покрытий, и, конечном итоге, на эксплуатационные свойства твердосплавного инструмента деформационного воздействия, возникающего в процессе механической обработки резанием и предварительной приработки покрытого инструмента.
4. Провести анализ и оценку влияния диффузионной металлизации, путем нанесения никель-медных покрытий, на паяемость твердосплавных пластин.
5. Разработать рекомендации по оптимизации процесса металлизации, применению технологии приработки режущего инструмента, а также рациональному использованию диффузионной металлизации для повышения работоспособности, технологичности инструмента и качества обработки.

**Научная концепция.** Разработка технологического решения повышения эксплуатационных свойств твердосплавного инструмента, имеющего общепромышленное и специальное применение, за счет диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов, а также научное и экспериментальное обоснование этого решения.

**Научная новизна**

1. Установлено, что нанесение диффузионных никель-медных покрытий может эффективно использоваться для повышения стойкости твердосплавного инструмента и качества обработки труднообрабатываемых сплавов. При этом состав, строение, структура и свойства диффузионных никель-медных покрытий определяются составом насыщающей среды, режимом (температурой, длительностью) процесса и составом покрываемых твердых сплавов.
2. Установлено, что покрытие формируется в виде двух слоев. Поверхностный слой представляет собой твердый раствор Ni – Cu – Fe – Co и W. При этом Ni, Cu, Fe присутствуют в покрытии вследствие их изотермического переноса транспортным свинцово-литьевым расплавом на поверхность твердого сплава и последующей их диффузии, Co и W – вследствие диффузии этих элементов в покрытие из твердого сплава. Под поверхностным твердорастворным слоем формируется переходной слой, содержащий карбидные соединения для сплавов типа BK – WC, а для сплавов типа ТК – (W,Ti)C. Твердая связка этих карбидов представляет собой твердый раствор Ni – Cu – Fe – Co. Свойства этого слоя определяются составом покрываемого твердого сплава.
3. Обнаружено, что механизм формирования покрытий на твердых сплавах и протекающие при этом процессы имеют особенности, заключающиеся в наличии изотермического переноса железа из поверхностных слоев

стенок стальной ванны, в которой осуществляется процесс диффузионной металлизации, вследствие этого в покрытии содержится железо, а также в образовании переходного слоя значительной протяженности.

4. Выявлено, что механическое воздействие на твердосплавные пластины с никель-медными покрытиями, возникающее в процессе обработки резанием, или вследствие проведения предварительной приработки инструмента, приводит к росту его твердости, уменьшению коэффициента трения и повышению износостойкости покрытия, что связано с их наноструктурированием.
5. Установлено, что диффузионные никель-медные покрытия улучшают механические характеристики твердого сплава. Возрастает предел прочности на изгиб, вязкость разрушения  $K_{IC}$ , сопротивление усталостному разрушению, а также обеспечивают повышение стойкости режущего инструмента, качества и производительности обработки не только относительно режущего инструмента без покрытий, но и относительно инструмента с PVD покрытиями.
6. Показано, что диффузионные никель-медные покрытия обеспечивают улучшение смачиваемости твердых сплавов припоем, увеличение адгезионной связи твердого сплава с припоем и компенсируют разность коэффициентов линейного расширения твердого сплава и материала корпуса инструмента. Это обеспечивает высокую прочность паяного соединения в паяном инструменте, и 100% выход годного инструмента при пайке труднопаяемых твердых сплавов.
7. В результате проведенных исследований получены новые технологические решения, подтвержденные заявкой на изобретение.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработаны технологии нанесения диффузионных никель-медных покрытий на твердые сплавы и технология приработки инструмента, обеспечивающие повышение его стойкости, точности, качества и производительности процесса обработки резанием, и рекомендуются для обработки вязких труднообрабатываемых сплавов, а также при прерывистом резании.
2. Определены режимы и технологические этапы нанесения диффузионных никель-медных покрытий на твердые сплавы типа ВК и ТК, обеспечивающие повышение стойкости режущего инструмента, изготовленного из этих сплавов, а также повышение качества и производительности процесса обработки.
3. Разработаны рекомендации по выбору твердого сплава и режимов диффузионной металлизации, обеспечивающих улучшение качества обработки резанием труднообрабатываемых сплавов.
4. Нанесение никель-медных покрытий позволяет значительно расширить область применения экономнолегированных твердых сплавов, а также

снизить стоимость и сократить номенклатуру применяемых твердых сплавов.

5. Результаты работы были использованы на предприятии ЗАО «Станкозавод Седин».

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием фундаментальных положений теории и практики химико-термической обработки сплавов, большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследований (электронной и оптической микроскопии, микрорентгеноструктурного, микрорентгено-спектрального анализов и др.) опытно-промышленными испытаниями.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на 3 международных конференциях:

- Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза: 2010;
- 13 международная научно-практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» 12-15 апреля 2011г. Санкт-Петербург;
- Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении и металлургии» 7-9 сентября 2011г. Ростов-на-Дону.

### **Публикации результатов работы**

Основное содержание работы отражено в 7 печатных работах, в том числе в 3-х статьях, из них 1 работа опубликована в издании, входящем в список ВАК РФ. Библиографический список основных работ приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, основных выводов, библиографического списка и приложений. Содержит 163 страниц основного текста, включая 33 рисунка и 11 таблиц. В приложениях помещены акты внедрения результатов работы и промышленных испытаний. Библиографический список включает 120 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрена актуальность и изученность проблемы использования технологий нанесения покрытий на твердые сплавы, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента. Проведен анализ достоинств и недостатков методов CVD и PVD, а также возможности применения для повышения эксплуатационных свойств твердосплавного инструмента технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких растворов, в частности,

технологии нанесения на твердый сплав диффузионных никель-медных покрытий. Сформулированы цель и задачи исследований. Приведены: перечень проведенных в работе исследований и работ, научная новизна, практические результаты исследований, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ применяемых в настоящее время способов повышения эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента. В частности, выявлены факторы, влияющие на эксплуатационные свойства режущего инструмента, причины потери режущим инструментом работоспособности. Проведен анализ состава и классов твердых сплавов, применяемых для режущего инструмента, современных технологий поверхностного упрочнения инструмента ХТО, физических и физико-химических методов осаждения химических элементов или соединений с выявлением достоинств и недостатков технологий легирования и поверхностного упрочнения твердосплавного инструмента. Осуществлен обзор имеющихся сведений о свойствах металлических покрытий, наносимых методом диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Поставлена цель и сформулированы задачи исследований.

**Во второй главе** описано технологическое оборудование, применяемое для диффузионной металлизации инструмента, методики определения состава покрытий переходных слоев, а также их строения, структуры и свойств. Дан перечень материалов, на которых проводились исследования. Описаны методики проведенных исследований эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента, опытно-промышленных испытаний.

**В третьей главе** проведен анализ процесса и особенностей формирования диффузионных никель-медных покрытий. Выявлены факторы, влияющие на процесс и кинетику формирования покрытий: температуры, длительности процесса металлизации, состава покрываемого твердого сплава, и определено влияние этих факторов на возможность формирования покрытий, а также на их состав, структуру, свойства и покрытого твердого сплава в целом. Выявлены особенности механизма, определена модель формирования покрытий на твердых сплавах. Проведены исследования и сделан анализ влияния пластического деформирования покрытий на их структуру и эксплуатационные свойства покрытий. Установлено, что Ni-Cu покрытия, образующиеся на твердых сплавах (рис.1,2), имеют поверхностный слой, представляющий собой твердый раствор Ni – Cu – Fe – Co и W (рис. 3.4). При этом Ni, Cu, Fe присутствуют в покрытии вследствие их изотермического переноса транспортным свинцово-литиевым расплавом на поверхность твердого сплава и последующей их диффузии, а Co и W – вследствие диффузии этих элементов в покрытие из твердого сплава.





Рис.1 – Твердосплавные шестигранные пластины WNUM-080404 с Ni-Cu покрытиями (светлые) и без покрытий (темные).

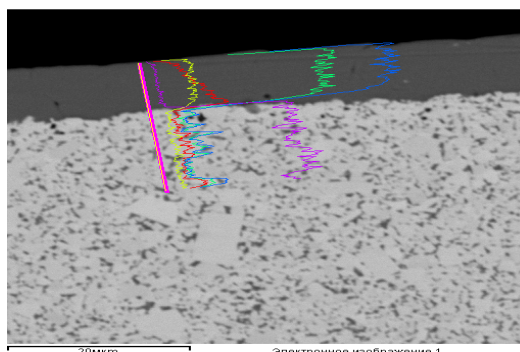


Рис.2 – Ni-Cu покрытие на сплаве BK8

Под поверхностным твердорастворным слоем формируется переходной слой, содержащий карбидные соединения для сплавов типа ВК – WC (рис.3), а для сплавов типа ТК – (W,Ti)C (рис.4). Твердая связка этих карбидов представляет собой твердый раствор Ni – Cu – Fe – Co.

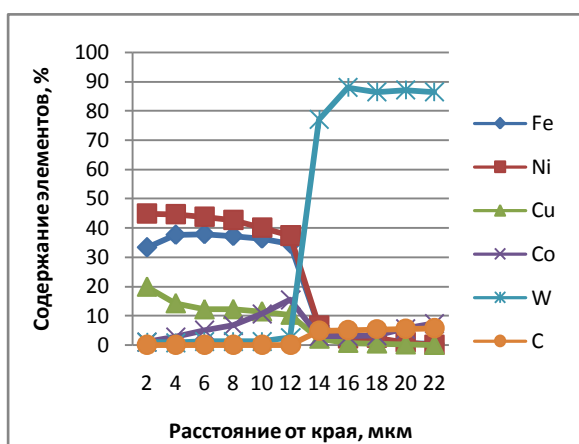


Рис.3 – Распределение элементов в покрытии. Сплав BK8.

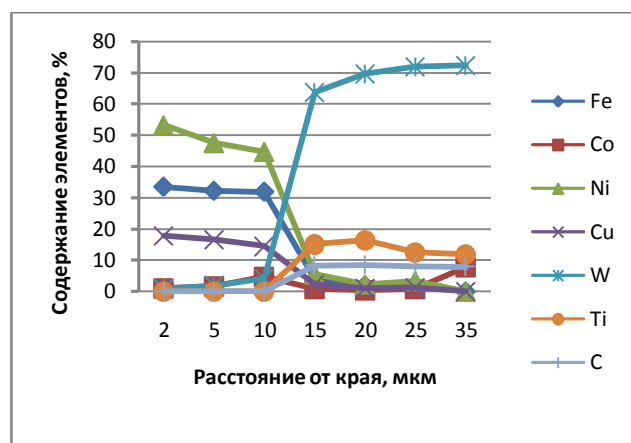


Рис.4 – Распределение элементов в покрытии. Сплав T15K6.

При формировании покрытий на сплавах типа ТК переходной слой имеет более высокую твердость (HV21000 МПа), чем основа (HV18660 МПа), что связано с большим содержанием титана в карбиде (W,Ti)C, чем в основном материале.

Механическое воздействие на твердосплавные пластины с никель-медными покрытиями, возникающее в процессе обработки резанием, приводит к значительному изменению свойств твердорастворного слоя, в частности, возрастает его твердость, уменьшается коэффициент трения (0,04) и повышается износостойкость покрытия. Изменение свойств покрытия связано с их наноструктурированием – дроблением зерен с образованием субзерен размером от 14 до 50 нм.

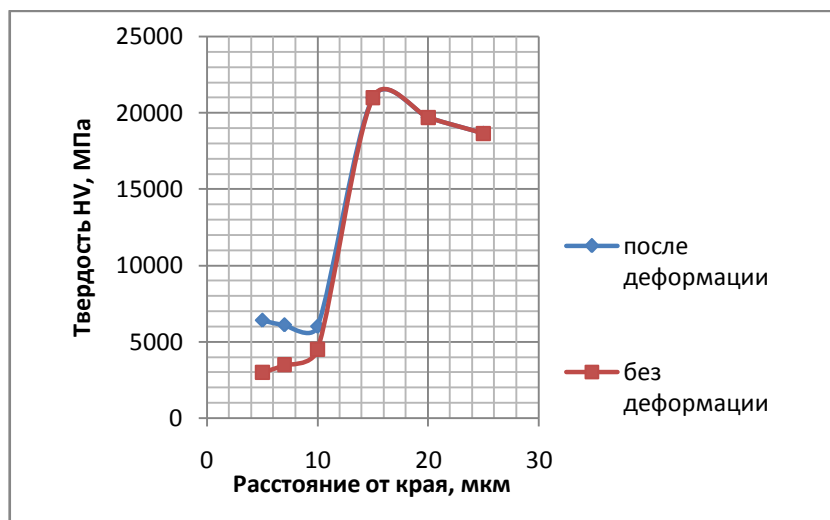
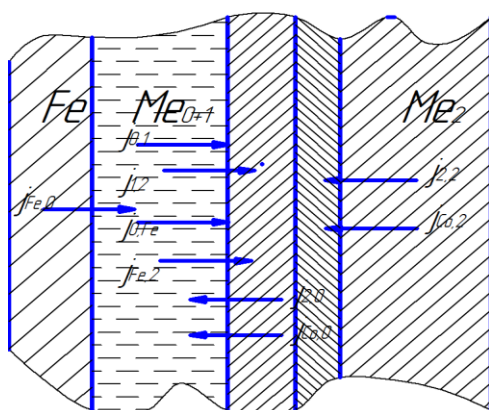


Рис.5 – Изменение микротвердости в приповерхностных слоях после пластического деформирования диффузионных никель-медных покрытий. Сплав Т15К6.

Диффузионные никель-медные покрытия улучшают механические характеристики твердого сплава. Возрастает предел прочности на изгиб в 1,2 раза, вязкость разрушения  $K_{IC}$ , сопротивление усталостному разрушению.

Нанесение никель-медных покрытий увеличивает теплопроводность поверхностных слоев сплава, что обеспечивает снижение температуры



режущей кромки твердого сплава до  $150^{\circ}\text{C}$ , при этом также снижается возможность адгезионного схватывания твердого сплава с обрабатываемым материалом, что обусловлено наличием в покрытии меди.

Механизм формирования покрытий на твердых сплавах и протекающие при этом процессы, в отличие от механизма формирования покрытий на сталях, имеют особенности (рис.6):

Рис. 6 – Схема процесса формирования диффузионных покрытий из среды легкоплавких растворов на твердых сплавах - наличие изотермического переноса железа из поверхностных слоев стенок стальной ванны (диффузионные потоки  $j_{\text{Fe},0}$ ;  $j_{0,\text{Fe}}$ ;  $j_{\text{Fe},0}$ ), в которой осуществляется процесс диффузионной металлизации, вследствие этого в покрытии содержится железо. Причиной этого переноса является отсутствие железа в твердом сплаве;

- наличие значительного по протяженности переходного слоя, характеризующегося достаточно плавным (для переходного слоя) изменением концентрации элементов, находящихся в этом слое.

**В четвертой главе** проведен анализ влияния диффузионных никель-медных покрытий на эксплуатационные свойства твердосплавного режущего инструмента. Проведена сравнительная оценка качества обработки вязких и твердых труднообрабатываемых сплавов непокрытым режущим

инструментом, режущим инструментом с PVD покрытием и с диффузионным никель-медным покрытием, нанесенным на режущий инструмент по исследуемой технологии. Кроме этого, оценено влияние диффузионных никель-медных покрытий на паяемость твердосплавных пластин и прочность паяных соединений. В частности, установлено, что нанесение диффузионных никель-медных покрытий на твердые сплавы обеспечивает повышение качества обработки труднообрабатываемых сплавов групп резания М и К, что связано со снижением склонности твердых сплавов с никель-медными покрытиями к адгезионному схватыванию - наростообразованию, механическому и коррозионно-механическому износам. При этом шероховатость поверхности (параметр Ra) (рис.7) может снижаться в 4,3 раза относительно поверхности, обработанной пластинами без покрытий, и в 1,8 раза - относительно поверхности, обработанной пластинами с PVD покрытиями.

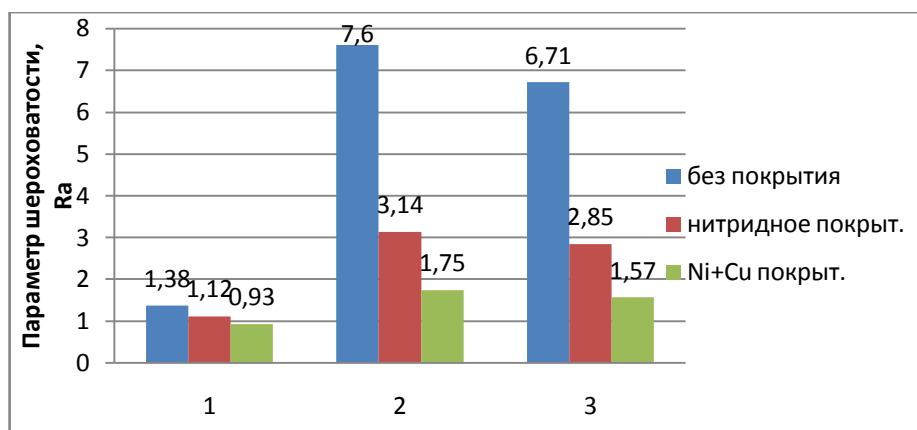


Рис. 7 – Зависимость параметра  $R_a$  шероховатости поверхности алюминиевого сплава АМц от наличия на твердом сплаве покрытия и скорости резания. Режим 1 –  $V_{рез}=60$  м/мин; Режим 2 –  $V_{рез}=80$  м/мин; Режим 3 –  $V_{рез}=100$  м/мин.

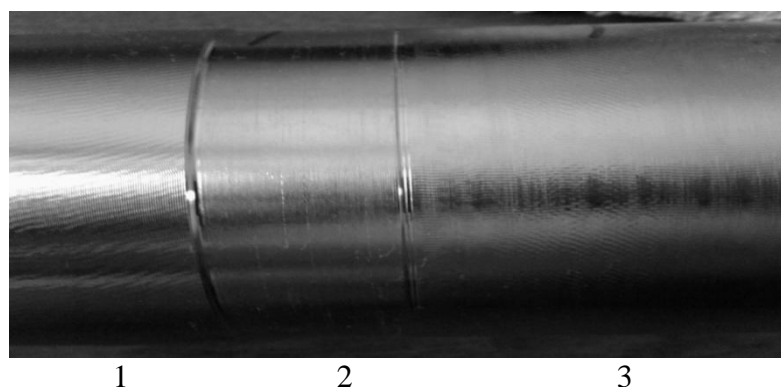


Рис.8 – Состояние поверхности трубы из стали 12X18H10T после обработки твердосплавными PNUM - 110408 пластинами из сплава Т15К6. Скорость резания 140м/мин. 1 – обработка пластиной без покрытия; 2- обработка пластиной с никель-медным покрытием; 3 – обработка пластиной с PVD покрытием.

При обработке тонкостенных изделий исключается образование на обработанной поверхности шагрени (рис.8).

Нанесение диффузионных никель-медных покрытий на твердые сплавы приводит к повышению стойкости режущего инструмента с твердосплавными пластинами при обработке даже твердых, имеющих карбидные включения сталей (Х12МФ), при высоких скоростях резания, что обеспечивает повышение производительности процесса обработки. Так, при точении твердосплавными пластинами из сплава Т15К6 период стойкости пластин с никель-медными покрытиями относительно непокрытых пластин выше в 3,6 раза, относительно пластин с PVD покрытиями – в 1,64 раза.

Диффузионные никель-медные покрытия повышают технологичность твердого сплава, в частности, обеспечивает высокую прочность паяного соединения в паяном инструменте, при этом одновременно упрощается и удешевляется технологический процесс пайки за счет исключения необходимости применения никельсодержащих компенсационных прокладок. Прочность паяного соединения возрастает в 3,5 раза.

Кроме этого, диффузионные никель-медные покрытия, нанесенные на твердый сплав, устраняют явление растрескивания твердосплавных пластин, возникающего при пайке инструмента. При пайке даже без применения компенсирующих прокладок выход годного инструмента достигает 100%.

**В пятой главе** приведены рекомендации по выбору твердого сплава и режимов диффузионной металлизации с целью повышения качества обработки резанием труднообрабатываемых сплавов, а также рекомендации по использованию разработанного в данной работе способа повышения износостойкости никель-медных покрытий путем проведения приработки инструмента на легкообрабатываемых сплавах. В частности, установлено, что нанесение никель-медных покрытий позволяет значительно расширить область применения экономно-легированных твердых сплавов, а также снизить стоимость и сократить номенклатуру применяемых твердых сплавов.

Для повышения работоспособности никель-медных покрытий в диссертационной работе был разработан и запатентован способ обработки инструмента, упрочненного никель-медными покрытиями. Для повышения работоспособности никель-медных покрытий предлагается в технологический цикл вводить этап упрочняющей приработки покрытого инструмента на материале пониженной твердости (10...18 HRC<sub>3</sub>), при величине контактных напряжений от 2000 до 5000 МПа, в течение 2...5 минут. При такой обработке диффузионное никель-медное покрытие самоупрочняется, его микротвердость повышается до 6000...7000 МПа, и при этом не наблюдается уноса материала покрытия вследствие образования задиров. Сформировавшееся в результате приработки покрытие обладает высокой стойкостью к адгезионному схватыванию, механическому истиранию и деформированию при сохранении тех положительных эксплуатационных свойств, какими обладают никель-медные покрытия.

С целью оценки эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента с диффузионными никель-медными покрытиями в условиях промышленного производства на станкостроительном предприятии ООО «СП Седин-Шисс» проводились опытно-промышленные испытания. Оценка стойкости режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности проводилась путем точения на карусельном станке 1А516МФ4 железнодорожных колес.

Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что нанесение диффузионных никель-медных покрытий на режущие твердосплавные пластины при чистовой обработке железнодорожных колес, изготовленных из стали 65Г, обеспечивает повышение стойкости режущих пластин в 2,1 раза, при этом параметр шероховатости обработанной поверхности Ra снижается в 1,76 раза.

**В заключении** работы осуществлен анализ проведенных исследований и сформулированы основные выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что нанесение диффузионных никель-медных покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов может быть эффективно использовано для повышения работоспособности твердосплавного режущего инструмента, производительности и качества обработки. Так, шероховатость поверхности (параметр Ra) может снижаться в 4,3 раза относительно поверхности, обработанной пластинами без покрытий, и в 1,8 раза - относительно поверхности, обработанной пластинами с PVD покрытиями. При точении твердосплавными пластинами из сплава Т15К6 период стойкости пластин с никель-медными покрытиями относительно непокрытых пластин выше в 3,6 раза, относительно пластин с PVD покрытиями – в 1,64 раза.
2. Установлено, что возможность формирования Ni-Cu покрытий на твердых сплавах, кинетика их формирования, а также состав, строение, структура и свойства покрытий зависят от состава транспортного расплава, условий процесса, режимов диффузионной металлизации. При этом покрытия рационально наносить из Pb-Li транспортного расплава при температуре 1150°C. Ni-Cu покрытие после диффузионной металлизации твердого сплава состоит из поверхностного и переходного слоев. Поверхностный слой представляет собой твердый раствор Ni – Cu – Fe – Co и W. При этом Ni, Cu, Fe присутствуют в покрытии вследствие их изотермического переноса транспортным свинцово-литиевым расплавом на поверхность твердого сплава и последующей их диффузии, Co и W – вследствие диффузии этих элементов в покрытие из твердого сплава. Переходной слой содержит карбидные соединения для сплавов типа ВК – WC, а

для сплавов типа ТК – (W, Ti)C. При этом твердая связка этих карбидов представляет собой твердый раствор Ni – Cu – Fe – Co. В механизме формирования покрытий на твердых сплавах имеются особенности, это:

- наличие изотермического переноса железа из поверхностных слоев стенок стальной ванны, вследствие этого в покрытии содержится железо, оказывающее положительное влияние на прочностные свойства покрытий;
- наличие значительного по протяженности переходного слоя, характеризующегося достаточно плавным (для переходного слоя) изменением концентрации элементов, находящихся в этом слое.

3. Установлено, что на структуру, свойства никель-медных покрытий, и, конечном итоге, на эксплуатационные свойства твердосплавного инструмента оказывают влияние пластические сдвиговые деформации, возникающие в покрытии в процессе обработки резанием, или вследствие проведения предварительной приработки инструмента улучшают механические и эксплуатационные характеристики твердосплавного инструмента. Возрастает предел прочности на изгиб в 1,2 раза, вязкость разрушения  $K_{IC}$ , сопротивление усталостному разрушению. Растет твердость покрытий, уменьшается коэффициент трения, повышается износостойкость покрытий. Такие изменения свойств покрытий связаны с их наноструктурированием – дроблением зерен с образованием субзерен размером от 14 до 50 нм.
4. Нанесение диффузионных Ni-Cu покрытий обеспечивает высокую прочность паяного соединения в паяном инструменте, при этом одновременно упрощается и удешевляется технологический процесс пайки за счет исключения необходимости применения никель-содержащих компенсационных прокладок. Прочность паяного соединения возрастает до 3,5 раз. При пайке труднопаяемых твердых сплавов выход годного инструмента составляет 100%.
5. Рекомендуется проводить нанесение Ni-Cu покрытий на экономно-легированные твердые сплавы по оптимизированным в работе режимам и условиям диффузионной металлизации, а также использовать разработанную в работе технологию приработки твердосплавного режущего инструмента с Ni-Cu покрытиями. Это позволяет значительно расширить область применения экономно-легированных твердых сплавов, а также снизить стоимость и сократить номенклатуру применяемых твердых сплавов при одновременном повышении качества и производительности процесса обработки.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В  
СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

1. **Соколов А.Г., Мансиа Салахалдин.** Диффузионная металлизация твердых сплавов как способ повышения работоспособности режущего инструмента и качества обработки труднообрабатываемых сплавов // *Технологии металлов.* – 2011. - №7. С. 40 – 46. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).
2. Заявка №20101400572, МПК С23 С 10/20 (2009.01) . Способ обработки инструмента из стали или твердосплавного инструмента / А.Г. Соколов РФ, **Мансиа Салахалдин** РФ от 4.10.10. – заявлено 04.10.10; решение о выдаче патента от 11.01.12.
3. **Мансиа С.,** Артемьев В.П. Формирование диффузионных никель-медных покрытий на твердых сплавах // В сб. «Машиностроение» - Краснодар, 2007.- С.110-112.
4. Артемьев В.П., Соколов Е.Г., **Мансиа С.** Влияние насыщающей среды на формирование диффузионных покрытий на твердых сплавах // *Современные технологии в машиностроении: сб. статей XI Международной научно.-практ. конф.* – Пенза, 2007. – 2007. – С.9-11.
5. Соколов А.Г., Артемьев В.П., **Мансиа Салахалдин.** Диффузионная металлизация твердых сплавов как способ повышения их работоспособности и качества обработки // *Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сборник статей Международной научно-технической конференции.* – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. С.154-157.
6. Соколов А.Г., Артемьев В.П., **Мансиа Салахалдин.** Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента и качества обработки труднообрабатываемых сплавов путем его диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов // 13 международная научно-практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» 12-15 апреля 2011г. Часть I С. 305-311.
7. Соколов А.Г., **Мансиа Салахалдин.** Влияние диффузионных никель-медных покрытий на свойства твердых сплавов и работоспособность режущего инструмента // *Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении и металлургии»* 7-9 сентября 2011г. Ростов-на-Дону, С. 289-293.

