



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Влияние диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на работоспособность режущего твердосплавного инструмента типа ТК и ВК

Александр Соколов <sup>a</sup>, Эдуард Бобылёв <sup>b, \*</sup>

Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8105-1429>, [sag-51@bk.ru](mailto:sag-51@bk.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7754-1807>, [ebobylev@mail.ru](mailto:ebobylev@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.5

#### История статьи:

Поступила: 26 июня 2018  
Рецензирование: 04 июля 2018  
Принята к печати: 22 сентября 2018  
Доступно онлайн: 15 декабря 2018

#### Ключевые слова:

Режущий твердосплавный инструмент  
Диффузионные титановые покрытия  
Стойкость инструмента  
Карбид титана  
Качество внутреннего объема

#### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, номер договора 18-38-00382.

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Современным подходом к улучшению эксплуатационных свойств режущего инструмента является нанесение на его поверхность функциональных слоев на основе карбидов, нитридов, оксидов таких металлов, как титан, хром, алюминий, кремний и т.д. Несмотря на множество технологий нанесения покрытий на режущий инструмент, большинство из них обладают такими недостатками, как сложность оборудования, ограниченная геометрия покрываемых изделий, ограниченный элементный состав наносимых покрытий, низкие эксплуатационные свойства получаемых покрытий. Вышеуказанные недостатки отсутствуют у технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. **Цель работы:** анализ влияния диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на износостойкость твердосплавного инструмента и качество механической обработки резанием. **Методами исследования** являлись испытания на макро- и микротвердость, микроанализ, рентгенофазовый анализ, натурные испытания на стойкость инструмента и на качество обработанных деталей. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что функциональные диффузионные титановые слои, получаемые при помощи диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов, формируются на базе карбида титана TiC. При этом характерно наличие двух слоев – поверхностного, имеющего микротвердость порядка 30 000 МПа, и переходного, характеризующегося плавным снижением микротвердости и изменением концентрации титана. Было выявлено, что структура диффузионного слоя и переходной зоны зависит от температуры диффузионного насыщения, от длительности диффузионного насыщения, а также от режимов последующей термической обработки. Разработанная технология позволяет увеличить стойкость инструмента по сравнению с инструментом, не имеющим покрытие, до 7,4 раза, а также, имеющим PVD-покрытие, до 1,85 раза в зависимости от группы резания и скорости обработки. Наиболее эффективны покрытия при высоких скоростях резания – 190 м/мин. При этом параметр шероховатости  $R_a$  снижается до двух раз в зависимости от группы резания и режимов обработки.

**Для цитирования:** Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э. Влияние диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на работоспособность режущего твердосплавного инструмента типа ТК и ВК // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 46–59. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-46-59.

## Введение

Механическая обработка резанием является одним из наиболее распространенных способов получения деталей в машиностроении. Производительность процесса резания, как и качество

получаемой продукции, во многом зависят от выбора инструментального материала и свойств его поверхностных слоев. В настоящее время наиболее распространены сменные многогранные режущие пластины с механическим креплением, изготовленные из различных твердых сплавов. Применение твердых сплавов обусловлено их высокой твердостью, износостойкостью, теплостойкостью и другими физико-механическими свойствами. Однако эксплуатационные характеристики режущего инструмента могут

#### \*Адрес для переписки

Бобылёв Эдуард Эдуардович, старший преподаватель  
Кубанский государственный технологический университет,  
ул. Московская, 2,  
350072, г. Краснодар, Россия  
Тел: +7-918-975-8933; e-mail: [ebobylev@mail.ru](mailto:ebobylev@mail.ru)

быть существенно улучшены за счет нанесения на поверхность инструмента износостойких покрытий.

Как правило, износостойкие покрытия формируются на базе карбидов, нитридов и оксидов таких элементов, как титан, бор, кремний, алюминий и т. д. Соединения данных элементов обладают высокой микротвердостью, термической стабильностью, износостойкостью. Наибольший интерес представляют карбиды титана, позволяющие увеличить микротвердость поверхностных слоев инструментального материала до 30 000 МПа [1–6].

Основными методами нанесения износостойких покрытий являются: метод физического нанесения покрытий (PVD), метод химического нанесения покрытий (CVD), химико-термическая обработка [7–11].

Метод физического осаждения покрытий, PVD (Physical Vapor Deposition), основан на осаждении с предварительной ионизацией элементов покрытия в парообразном агрегатном состоянии на твердой подложке. Недостатками технологий формирования покрытий PVD по сравнению с рассматриваемой технологией являются: сложность технологического оборудования, ограничения по геометрии покрываемых изделий, малая толщина покрытий [7–11].

Метод химического осаждения покрытий, CVD (Chemical Vapor Deposition), основан на получении покрытий вследствие гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей покрываемый инструмент. Наибольшее распространение при использовании CVD нашли следующие соединения: TiC, TiCN, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Общими недостатками CVD-технологий являются сложность оборудования, необходимость использования ядовитых и взрывоопасных газов и соединений [7–11].

Одним из перспективных направлений при нанесении покрытий является химико-термическая обработка (ХТО). Сущность ХТО заключается в нагреве и выдержке при заданной температуре изделий в активных твердых, жидких или газовых средах, в результате чего вследствие диффузионных процессов, в поверхностных слоях изделий изменяется элементный и структурно-фазовый состав, а следовательно, и свойства этих поверхностных слоев [1–14].

Одной из эффективных технологий ХТО является технология диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов [15]. Технология диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов обладает мировой новизной и в настоящее время применяется исключительно в РФ. Преимущества данной технологии по сравнению с PVD и CVD: высокая степень адгезии покрытия с покрываемым материалом, возможность покрывать изделия любой формы, простота оборудования, возможность получения многокомпонентных покрытий.

Суть технологии заключается в том, что изделия погружаются в расплав легкоплавкого металлического элемента, в котором в определенной пропорции растворены элементы покрытий. Изделия выдерживаются в расплаве при заданных температурах от 10 мин до 5 ч. За это время элементы покрытий диффундируют в поверхностный слой изделия и образуют функциональный диффузионный слой [1, 7, 15].

**Целью** данной работы является анализ влияния диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на износостойкость твердосплавного инструмента и качество механической обработки резанием.

### Методика исследований

Диффузионное титанирование проводилось по технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Титанированию подвергались пятигранные пластины PNUM – 110408 из сплавов ВК8, Т15К6, исходно не имеющие покрытия.

Диффузионное титанирование осуществлялось по разработанной технологии [15]. Покрываемые изделия погружали в ампулу с легкоплавким расплавом эвтектического состава свинец-висмут-литий, в который вводился титан в количестве 3...5 %. Пластины выдерживались от 60 до 90 мин в расплаве при температурах от 950 до 1150 °С в изотермическом режиме в среде инертных газов.

Процесс титанирования проводился в разработанной, запатентованной и изготовленной установке для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических рас-

творов [16]. Данная установка обеспечивает возможность нанесения покрытий в открытой жидкометаллической ванне в циклическом режиме и совмещения процесса диффузионной металлизации с термической обработкой материала покрываемого изделия.

Перед титанированием пластины были подвергнуты кратковременной высокотемпературной цементации при температуре 1000 °С, длительностью 90 мин. Цементация служит для насыщения поверхности инструмента углеродом, за счет которого впоследствии формируются карбиды титана TiC. Цементация проводилась с применением технологии вакуумной цементации в среде пропан-бутановой смеси в вакуумной печи ВМІ ВМІСRO.

После титанирования пластины были подвергнуты старению в среде инертных газов при температуре от 500 до 800 °С. Старение проводилось с целью перераспределения углерода по покрытию и выделения второй дисперсной фазы в виде карбида титана.

Оценка стойкости, надежности резцов, а также качества получаемой после резания поверхности проводилась путем сравнительных испытаний при резании материалов, относящихся к различным группам резания. В качестве обрабатываемых материалов были выбраны: инструментальная сталь У10 после закалки и отпуска при 500 °С, при этом твердость составляла 43 HRCэ; коррозионностойкая сталь 30X13 после закалки и отпуска при температуре 750 °С, HB 240 МПа; серый чугун СЧ20, HB 240 МПа; алюминиевый сплав АМг6, HB 65 МПа; титановый сплав Вt1-00, HB 140 МПа; сталь У10 после закалки и отпуска при температуре 400 °С, 48 HRCэ.

Токарная обработка проводилась при скоростях резания 100 и 190 м/мин, подачей 0,8 мм/об, глубиной резания 1 мм. За период стойкости принималось время, за которое инструмент терял режущие свойства.

Твердость пластин проверялась по методу Роквелла и методу микроВиккерса. Твердость по Роквеллу определялась на твердомере ТК-2М по стандартной методике по шкале «А». Металлографические исследования проводились на косых микрошлифах. Исследования по определению структуры и микротвердости материала-основы проводились на микротвердомере

ПМТ-3. Микротвердость непосредственно диффузионного слоя и переходной зоны определялась на микротвердомере INCA Durascan при нагрузке 0,3 кгс.

Состав поверхностного слоя и переходной зоны исследовался методом рентгеноспектрального микроанализа. При этом использовался растровый электронный микроскоп JEOL JSM-7500F и спектрометр INCA x-sight oxford instruments. Спектрометр рентгеновский с энергетической дисперсией INCA x-sight предназначен для измерений зависимости интенсивности рентгеновского излучения от длины волны (энергии кванта) в составе растровых электронных микроскопов и электронно-зондовых микроанализаторов.

Фазовый состав покрытий определялся на многофункциональном рентгеновском дифрактометре ДРОН-7М. Съемка дифрактограмм велась на излучении CuK<sub>α</sub> при напряжении 30 кВ и силе тока 20 мА. Для идентификации фаз использовалась база данных ICDD PDF-2.

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований выявлено, что вследствие диффузионного титанирования режущего твердосплавного инструмента из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на его поверхности образуется диффузионный слой, содержащий частицы карбида титана TiC величиной 0,5 мкм (рис. 1, 2 и 4). Получаемые по данной технологии покрытия состоят из двух слоев – поверхностного и переходного. Поверхностный слой

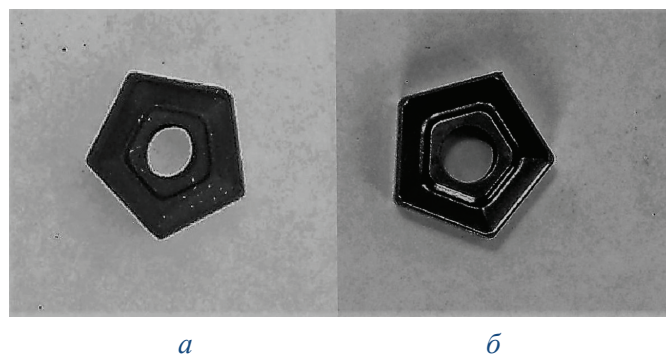


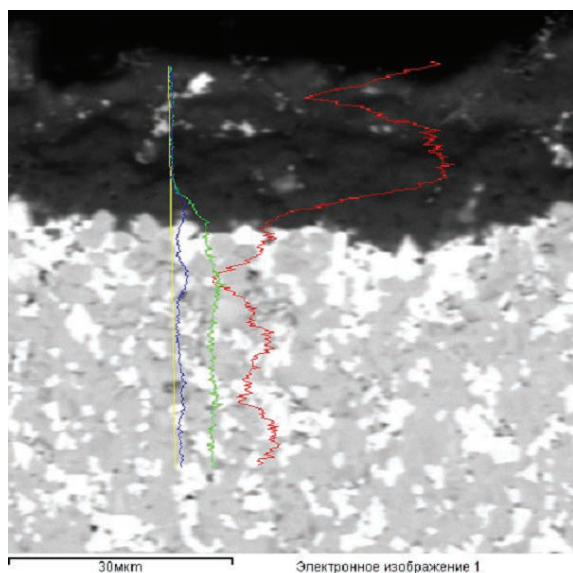
Рис. 1. Пятигранная пластина PNUM до диффузионного насыщения (а) и после диффузионного насыщения (б)

Fig. 1. Pentagonal plate PNUM before diffusion saturation (a) and after diffusion saturation (b)

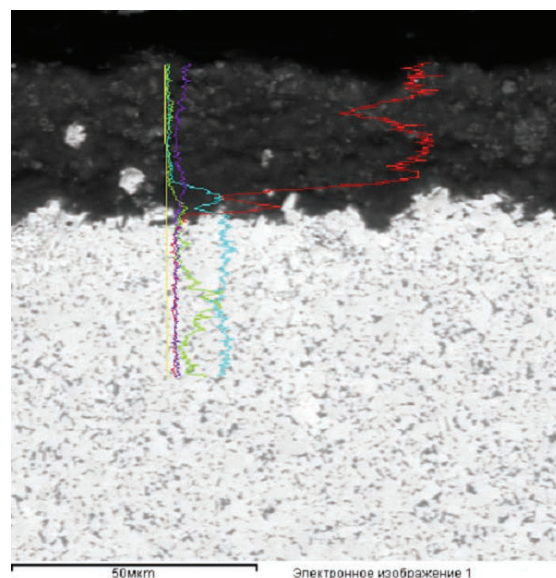
формируется вследствие диффузии углерода, полученного при предварительной высокотемпературной цементации, к титану (рис. 2 и 3). При этом диффузия углерода вследствие предварительной цементации идет по кобальтовой составляющей, как и диффузия титана при диффузионном насыщении. Поверхностный слой покрытых изделий представляет собой твердый раствор карбида титана  $TiC$  в  $\alpha-Ti$ . Кроме того, покрытия, полученные диффузионным титанированием, формирующиеся на сплаве ВК8, характеризуются наличием в поверхностном слое интерметаллидного соединения  $Ti_2Co$  и карбида вольфрама  $WC$  (рис. 3, а и 4, а).

Между поверхностным слоем и материалом основы формируется переходной слой толщиной 10 мкм. Переходный слой характеризуется плавным снижением микротвердости от значений, характерных для поверхностного слоя, до значений микротвердости материала-основы, а также наличием в нем карбидов титана и элементов покрываемого материала, что свидетельствует о том, что формирование данного слоя осуществляется за счет гетеродиффузии между элементами покрытия и элементами покрываемого материала, что подтверждается ранее проведенными исследованиями [1].

Механизмом формирования диффузионных слоев на базе титана на твердых сплавах типа ТК и ВК является его взаимодействие с углеродом, содержащимся в покрываемом материале, с последующим образованием карбида титана. При насыщении твердых сплавов титаном характерна интенсивная диффузия углерода из покрываемого материала к поверхностным слоям покрываемого изделия. Происходит обеднение углеродом покрываемого материала, находящегося под формирующимся слоем. Одновременно происходит торможение диффузии титана в глубь покрываемого материала, что приводит к торможению роста диффузионного слоя и диффузии элементов материала-основы в образовавшийся диффузионный слой. Важной особенностью процесса является то, что блокирующее действие углерода зависит от концентрации углерода в свободной форме и термической стабильности карбидов покрытия и покрываемого материала. Важной особенностью формирования покрытий на основе карбида титана в матрице  $\alpha-Ti$  на твердых сплавах является отеснение кобальта и вольфрама в переходную зону, что обусловлено их слабой взаимной растворимостью с диффундирующими элементами (рис. 3). Кроме того, при температурах проведения процесса ко-



а



б

Рис. 2. Функциональный диффузионный титановый слой на твердом сплаве:

а – ВК8; б – Т15К6

Fig. 2. Functional diffusion titanium layer on the alloy:

а – hard alloy 92%WC-8%Co; б – hard alloy T15K6

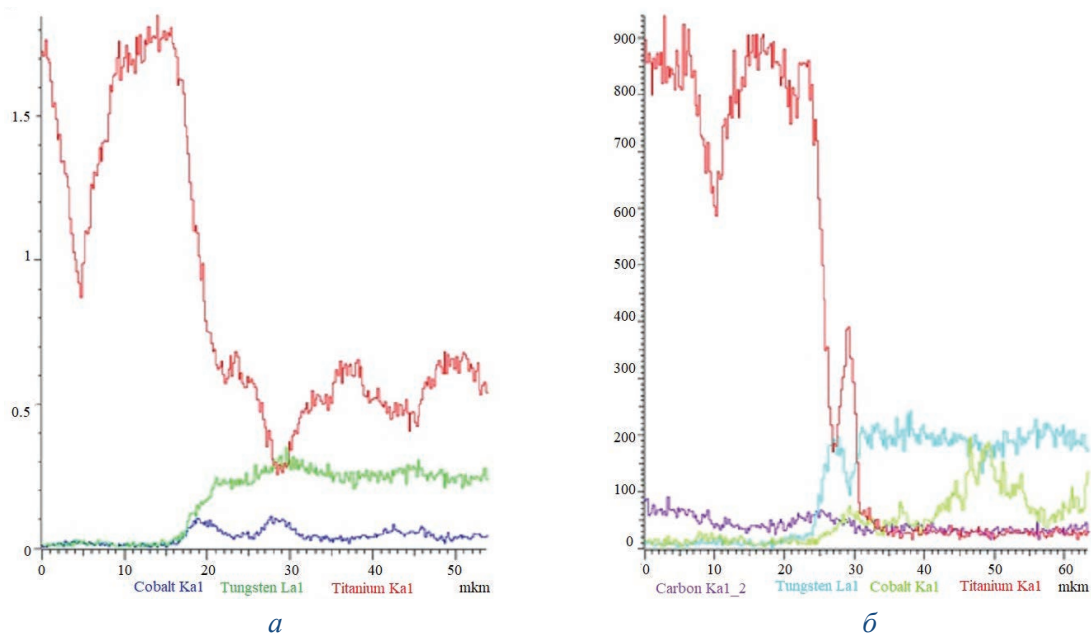


Рис. 3. Характер распределения элементов в функциональном диффузионном титановом слое и переходной зоне на сплавах:

*a* – T15K6; *б* – BK8

Fig. 3. Image of allocation of titanium layer on the alloy:

*a* – hard alloy T15K6; *б* – hard alloy 92%WC-8%Co

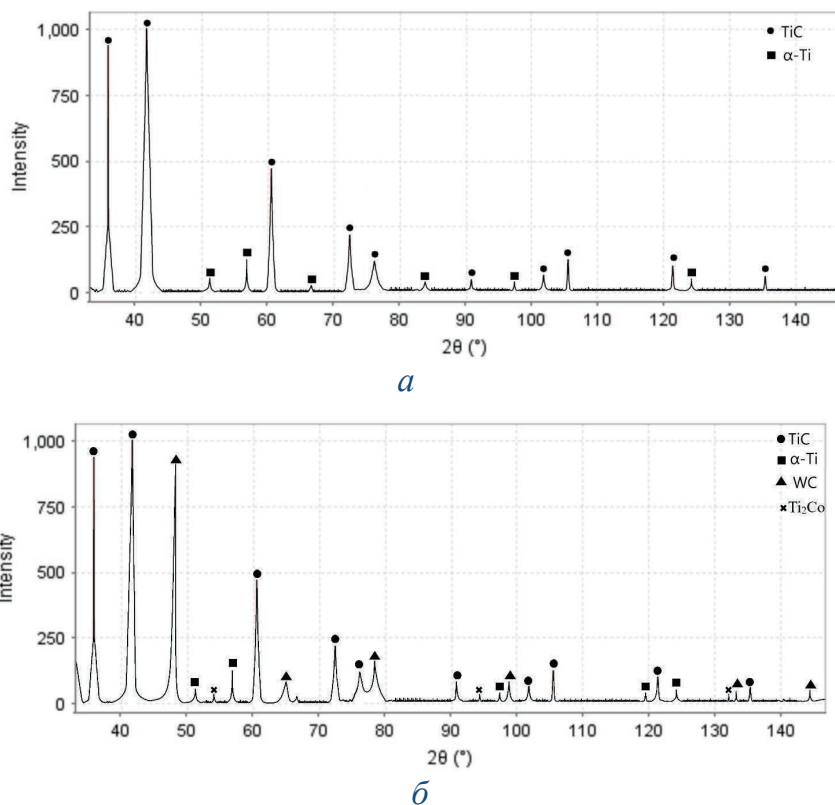


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы поверхностного слоя образцов с функциональным диффузионным титановым слоем:

*a* – T15K6; *б* – BK8

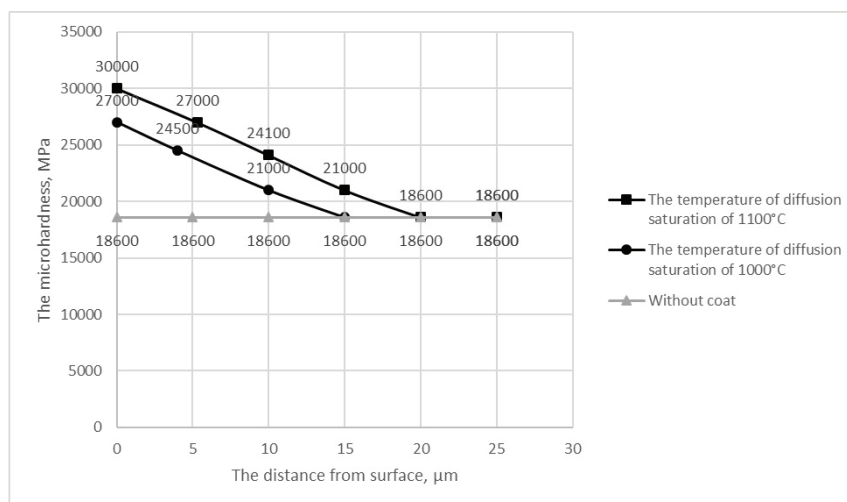
Fig. 4. X-ray diffraction patterns of sample surface with diffusion titanium coating:

*a* – hard alloy T15K6; *б* – hard alloy 92%WC-8%Co

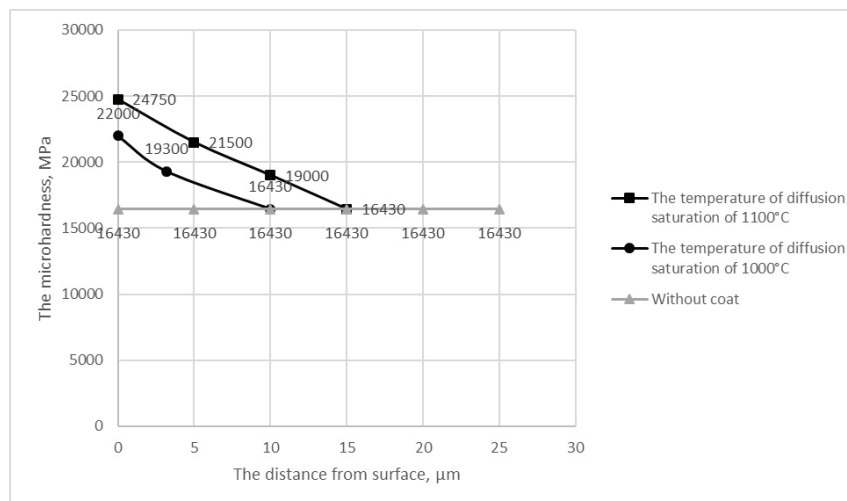
балът и титан образуют интерметаллид  $Ti_2Co$ , присутствующий в незначительном количестве в покрытиях сплавов типа ВК, а также в переходной зоне. В сплавах типа ВК наблюдается также незначительное присутствие карбида вольфрама в поверхностном слое. Карбид вольфрама успевает диффундировать в поверхностный слой до формирования карбидов титана, препятствующих дальнейшей диффузии элементов.

Толщина функционального диффузионного титанового слоя, состоящего из карбидов ти-

тана в матрице  $\alpha-Ti$ , может варьироваться от 3 до 6 мкм в зависимости от типа покрываемого твердого сплава и режимов нанесения покрытия. Общая же толщина диффузионного слоя с учетом переходной зоны составляет до 20 мкм. Толщина слоя, его микротвердость, хрупкость и другие параметры зависят от режимов нанесения покрытия: температуры и выдержки изделий в расплаве. Распределение микротвердости по поверхности покрытых пластин представлено на рис. 5. Анализ влияния режимов обработки



a



б

Рис. 5. Микротвердость поверхностного слоя и переходной зоны твердосплавных пластин, подвергнутых диффузионному насыщению титаном из среды легкоплавких жидкометаллических растворов:

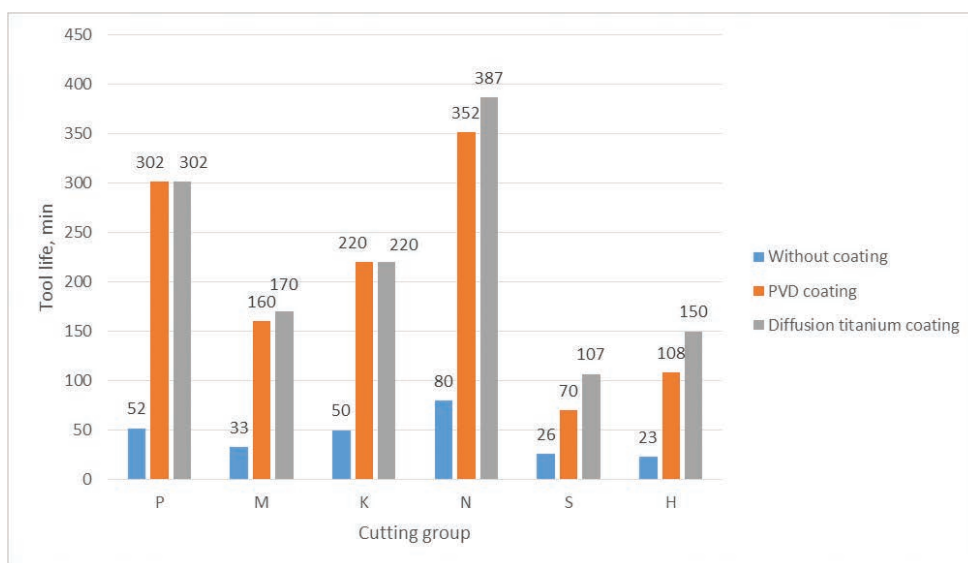
a – T15K6; б – BK8

Fig. 5. The microhardness of the surface and transition layers of carbide-tipped plates after diffusion saturation with titanium from the liquid metal medium solutions:

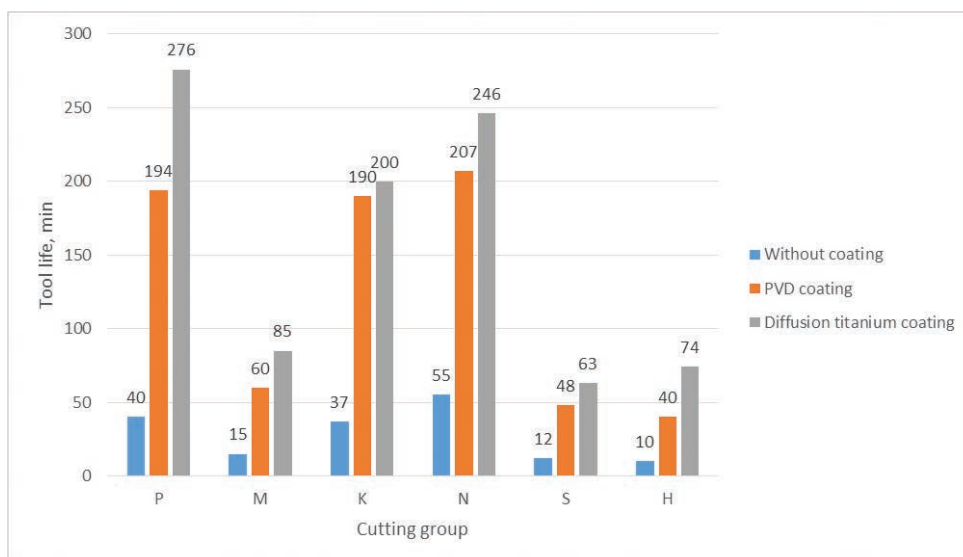
a – T15K6; б – hard alloy 92%WC-8%Co

инструмента на его эксплуатационные характеристики подробно описан в предыдущих работах [1]. В данном исследовании применялись инструменты, показавшие наибольшую износостойкость при лабораторных испытаниях. Инструмент из сплавов группы ТК имел функциональный диффузионный титановый слой, сформированный при достаточно низких для данной технологии температурах: от 950 до 1020 °С. Инструмент из сплавов группы ВК имел слой, сформированный при достаточно высоких температурах: от 1080 до 1120 °С.

Как показали исследования, использование режущего инструмента, имеющего функциональный диффузионный титановый слой, способно существенно увеличить стойкость инструмента, улучшить качество получаемых деталей и, как следствие, увеличить производительность процесса резания. На рис. 6 представлены данные о стойкости режущих пластин с функциональным диффузионным титановым слоем, с PVD-покрытием и пластинами без покрытия, полученные при токарной обработке различных групп материалов.



*a*



*б*

Рис. 6. Стойкость инструментов при обработке материалов, относящихся к различным группам резания:

*a* – скорость резания 100 м/мин; *б* – скорость резания 190 м/мин

Fig. 6. Tool life in the processing of materials of different cutting groups:

*a* – cutting speed 100 m/min; *б* – cutting speed 190 m/min

Увеличение износостойкости инструмента обусловлено формированием на его поверхности диффузионного титанового слоя микротвердостью до 30 000 МПа (см. рис. 5). Высокая микротвердость достигается благодаря присутствию в поверхностном слое карбидов титана TiC, имеющих микротвердость 31 500 МПа [20]. Однако для сплавов типа ТК наибольшая износостойкость выявлена для образцов, имеющих микротвердость 27 000 МПа. Образцы с максимальной микротвердостью показали низкую износостойкость вследствие высокой хрупкости формирующегося слоя, практически полностью состоящего из карбида титана TiC, а также формирования толстых покрытий. Несмотря на низкие антифрикционные свойства титана, формирование диффузионного слоя на основе твердого раствора карбида титана TiC в  $\alpha$ -Ti ведет к большему увеличению износостойкости, чем формирование диффузионного слоя исключительно на основе TiC. При температуре диффузионного насыщения 1000 °C формируется твердый раствор карбида титана TiC в  $\alpha$ -Ti, содержание  $\alpha$ -Ti находится на уровне 2...3 %. Благодаря диффузионному насыщению твердых сплавов титаном увеличивалась макротвердость инструмента. Пластина из сплава T15K6 с диффузионным титановым слоем имеет твердость по Роквеллу 91 HRA, пластина из сплава BK8 имела макротвердость 90 HRA.

В ходе анализа данных, полученных при испытаниях, выяснилось, что при скорости обработки 100 м/мин стойкость инструмента с PVD-покрытием и инструмента с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, оказалась равной в группах резания Р и К. Близкие результаты также получены в группе резания М. В группах резания N, S, H стойкость инструмента с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, превосходит стойкость инструмента с покрытием PVD. Однако при увеличении скорости резания до 190 м/мин инструмент с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, показал наибольшую износостойкость по отношению к инструменту с покрытием PVD. При этом снижение стойкости инструмента с диффузионным титановым покрытием, состоящим

из частиц карбида титана в титановой матрице, при увеличении скорости резания в группах резания Р и К составило не более 11 %.

При скорости 100 м/мин исследуемый инструмент способен увеличить стойкость инструмента по сравнению с инструментом без покрытия от 4,1 до 6,5 раз в зависимости от группы резания (рис. 6, а). Увеличение стойкости в 4,1 раза наблюдается в группе резания S при обработке титанового сплава BT1-00. Увеличение стойкости в 6,5 раза наблюдается в группе резания H при обработке закаленной стали. По сравнению с инструментом, имеющим PVD-покрытие, при скорости резания 100 м/мин максимальное увеличение стойкости резца составляет 1,5 раза. Такое увеличение стойкости наблюдается при обработке сплавов группы S. В сплавах групп Р, М, К, N износостойкость резца, имеющего покрытие PVD, незначительно отличается от стойкости инструмента с диффузионным титановым покрытием.

При увеличении скорости до 190 м/мин инструмент с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, способен увеличить стойкость покрытого инструмента от 4,5 до 7,4 раз. Минимальное повышение стойкости наблюдается при обработке алюминиевых сплавов, максимальное – при обработке закаленных сталей. С увеличением скорости происходит снижение стойкости инструмента с PVD-покрытием относительно инструмента с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице. Так, увеличение стойкости пластины составляет до 1,85 в зависимости от группы резания. Исключение составляет группа резания К. При обработке чугунов стойкость инструмента с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, и инструмента с PVD-покрытием примерно равны. Максимальная износостойкость резца с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, наблюдается при обработке закаленных сталей.

Увеличение износостойкости резцов с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, объясняется свойствами карбида титана, составляющего основу данных покрытий, – высокой

твердостью, износостойкостью, теплопроводностью, термической стабильностью, а также высокой адгезией диффузионного титанового покрытия, состоящего из частиц карбида титана в титановой матрице, с поверхностью пластин и наличием переходного слоя от материала покрытия к материалу-основе. С увеличением скорости резания увеличивается стойкость резцов, имеющих диффузионное титановое покрытие, состоящее из частиц карбида титана в титановой матрице, по сравнению с резцами, имеющими PVD-покрытие. При скоростном резании многократно увеличивается температура в зоне резания, что влечет за собой увеличение термической нагрузки на режущую кромку инструмента и уменьшению его стойкости. Так как карбид титана имеет высокую термическую стабильность, процессы разупрочнения режущей кромки протекают медленнее, чем в инструментах с PVD-покрытиями.

В результате испытаний было выяснено, что диффузионное насыщение инструмента типа ТК- и ВК-титаном из среды легкоплавких жидкометаллических растворов способствует увеличению стойкости инструмента, а также уменьшению адгезионного схватывания обрабатываемого материала с инструментальным и уменьшению образования наростов (рис. 7). Так, после 10 мин обработки нержавеющей стали 30Х13 у образца, не имеющего покрытие, появляется нарост высотой 24 мкм (рис. 7, б), при этом износ передней поверхности составляет 126 мкм. У образца, имеющего PVD-покрытие, происходит образование нароста высотой 34 мкм, при этом наблюдался меньший износ передней поверхности, его величина составила 94,5 мкм (рис. 7, а). У образца, имеющего диффузионное титановое покрытие, состоящее из частиц карбида титана в титановой матрице, налипания обрабатываемого материала на режущую кромку инструмента не выявлено, при этом износ передней поверхности инструмента составил 27 мкм (рис. 7, в).

Кроме существенного влияния на стойкостные характеристики, диффузионные титановые покрытия, состоящие из частиц карбида титана в титановой матрице, влияют и на качество обрабатываемой поверхности (рис. 8).

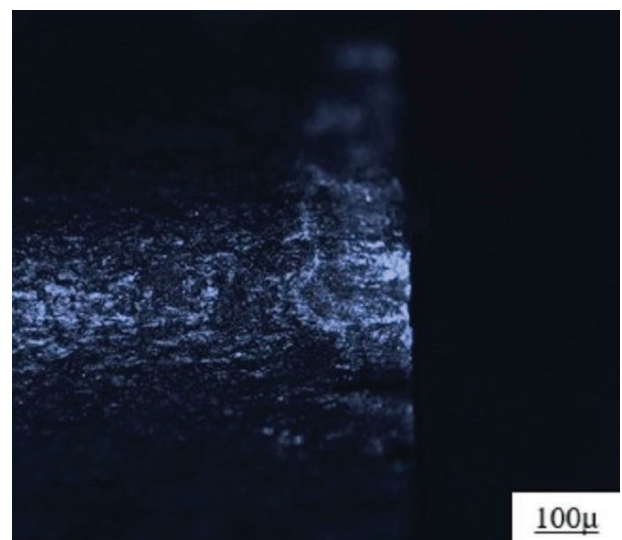
Как показал анализ данных (рис. 8), полученных в ходе испытаний, инструмент с диффузионным титановым покрытием, состоящим из



а



б



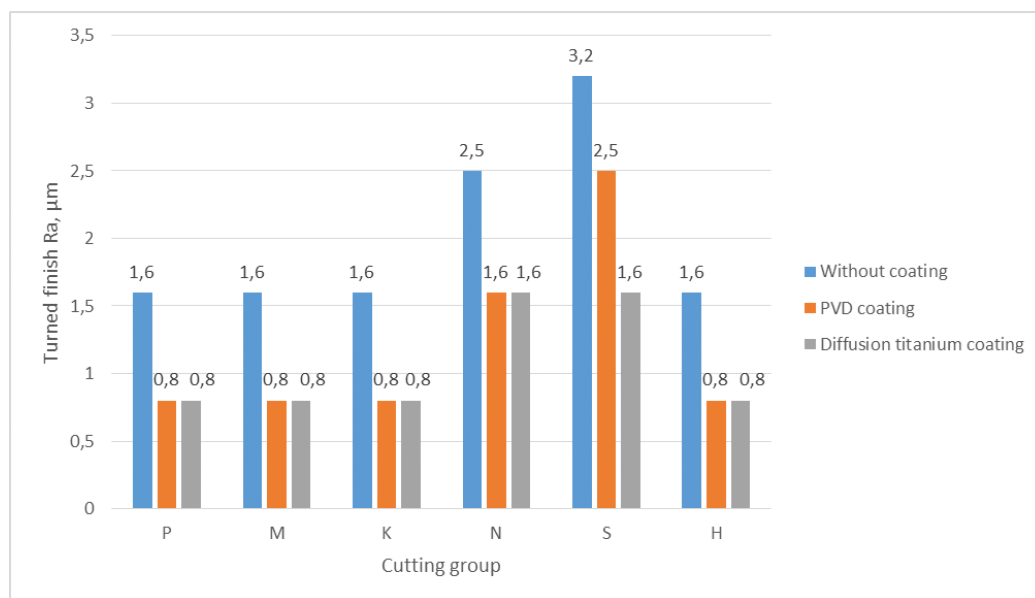
в

Рис. 7. Состояние передней поверхности резцов после обработки нержавеющей стали в течение 10 мин,  $V = 190$  м/мин,  $S = 0,05$  мм/об:

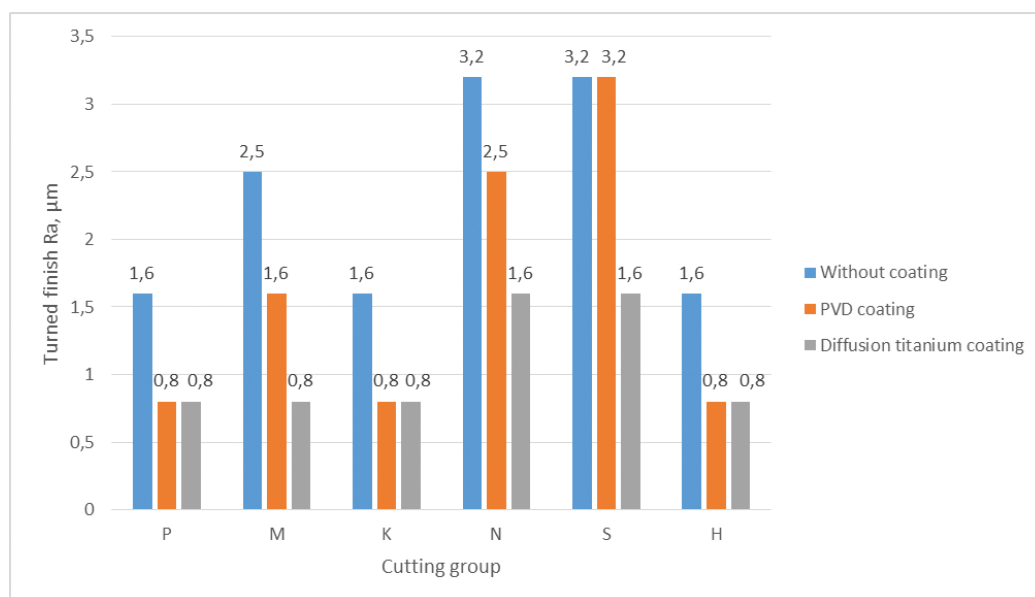
а – резец с покрытием PVD; б – резец без покрытия; в – резец с диффузионным титановым покрытием

Fig. 7. Condition of active part of cutting tool after processing of stainless steel during 10 minutes,  $V = 190$  m/min,  $S = 0.05$  mm/Rev:

а – cutting tool with PVD coating; б – cutting tool without coating; в – cutting tool with diffusion titanium coating



а



б

Рис. 8. Качество поверхности материалов после обработки, относящихся к различным группам резания:

а – скорость резания 100 м/мин; б – скорость резания 190 м/мин

Fig. 8. Surface quality after processing of materials of different cutting groups:

а – cutting speed 100 m/min; б – cutting speed 190 m/min

частиц карбида титана в титановой матрице, и инструмент с покрытием PVD способны давать одинаковое качество поверхности детали при обработке сталей, чугунов, закаленных сталей. Однако при обработке цветных металлов, титановых сплавов, нержавеющей сталей качество обработки инструментом с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, выше, чем у

инструмента с покрытием PVD. При увеличении скорости резания в некоторых группах происходит увеличение шероховатости обработанной поверхности. При этом инструмент с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, дает лучшее качество поверхности, чем инструмент с PVD-покрытием и инструмент без покрытия. На резце с диффузионным титановым покрытием

ем, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, наблюдается менее интенсивное наростообразование, что ведет к увеличению качества обработанной поверхности.

На рис. 9 представлен вид обработанной поверхности стали У10 пластинами PNUM – 110408. На первом участке (рис. 9, а), обработанном пластинами без покрытия, отчетливо видны следы адгезионного схватывания обрабатываемого материала с инструментом (вырыв и налипание частиц обрабатываемого материала). На участке, обработанном инструментом с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице (рис. 9, б), признаки адгезионного схватывания отсутствуют.

Кроме лабораторных испытаний были проведены промышленные испытания на ОАО «АОМЗ», г. Армавир.

В ходе испытаний пластины из сплава ВК8, имеющие диффузионное титановое покрытие, состоящее из частиц карбида титана в титановой матрице, нанесенное при температуре 1100 °С, были использованы при фрезерной обработке изделий из стали 60С2А и изделий из чугуна СЧ18. В результате испытаний было выявлено увеличение производительности механической обработки на 15...20 %, при этом определено увеличение стойкости в шесть раз по сравнению с резцами с PVD-покрытием в 1,4 раза. Экономический эффект составил 600 тыс. руб.

Таким образом, нанесение диффузионных титановых покрытий, состоящих из частиц карбида титана в титановой матрице, на режущий

твердосплавной инструмент способствует увеличению периода стойкости инструмента. В ходе лабораторных и промышленных испытаний выявлено, что инструмент с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, может эффективно применяться при обработке труднообрабатываемых материалов и при скоростном резании.

## Выводы

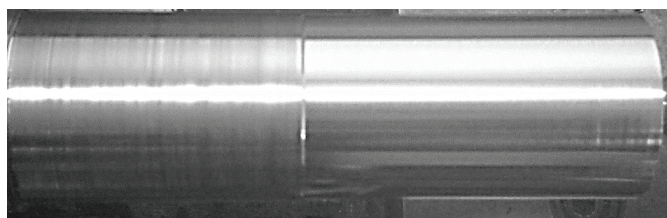
1. Нанесение диффузионных титановых покрытий, состоящих из частиц карбида титана в титановой матрице, на твердосплавной инструмент, приводит к формированию на его поверхности износостойких покрытий твердостью до 30 000 МПа и толщиной от 3 до 6 мкм. При этом стойкость покрытого инструмента увеличивается до 7,4 раза.

2. Диффузионные титановые покрытия, состоящие из частиц карбида титана в титановой матрице, влияют не только на стойкость покрытого инструмента, но и на качество получаемой при обработке поверхности. Так, параметр шероховатости  $R_a$  снижается до двух раз по сравнению с инструментами без покрытия и с инструментами, имеющими PVD-покрытие.

3. Твердосплавной инструмент, имеющий диффузионное титановое покрытие, состоящее из частиц карбида титана в титановой матрице, наиболее оптимально применять при скоростном резании труднообрабатываемых материалов. При этом производительность операций механической обработки в производственных условиях увеличивается до 20 %.

## Список литературы

1. Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э. Элементно-фазовый состав и свойства диффузионных титановых покрытий на режущем твердосплавном инструменте типа ТК и ВК // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 222–228. – doi: 10.22226/2410-3535-2017-3-222-228.
2. Effect of titanium carbide coating on the osseointegration response in vitro and in vivo / M. Brama, N. Rhodes, J. Hunt, A. Ricci, R. Teghil, S. Migliaccio, C. Della Rocca, S. Leccisotti, A. Lioi, M. Scandurra, G. De Maria, D. Ferro, F. Pu, G. Panzini, L. Politi, R. Scandurra // Biomaterials. – 2007. – Vol. 28, iss. 4. – P. 595–608. – doi: 10.1016/j.biomaterials.2006.08.018.



а

б

Рис. 9. Пример обработки поверхности прутка из стали У10 пластинами PNUM – 110408:

а – без покрытия; б – с диффузионным титановым покрытием

Fig. 9. An example of processing of the carbon steel rod by PNUM-110408 plates:

а – without coating; б – with diffusion titanium coating

3. On the effect of the substrate to target position on the properties of titanium carbide/carbon coatings / J. Daniel, P. Souček, L. Zábranský, V. Buršíková, M. Stupavská, P. Vašina // *Surface And Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 328. – P. 462–468. – doi: 10.1060/j.surfcoat.2017.06.076.

4. Formation of titanium carbide (TiC) and TiC@C core-shell nanostructures by ultra-short laser ablation of titanium carbide and metallic titanium in liquid / A. De Bonis, A. Santagata, A. Galasso, A. Laurita, R. Teghil // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2017. – Vol. 489. – P. 76–84. – doi: 10.1016/j.jcis.2016.08.078.

5. Titanium carbide coating with enhanced tribological properties obtained by EDC using partially sintered titanium electrodes and graphite powder mixed dielectric / Z.J. Xie, Y.J. Mai, W.Q. Lian, S.L. He, X.H. Jie // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 300. – P. 50–57. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.080.

6. Understanding the diffusion wear mechanisms of WC-10%Co carbide tools during dry machining of titanium alloys / C. Ramirez, A. Idhil Ismail, C. Gendarme, M. Dehmas, E. Aebly-Gautier, G. Poulachon, F. Rossi // *Wear*. – 2017. – Vol. 390–391. – P. 61–70. – doi: 10.1016/j.wear.2017.07.003.

7. Ильин А.А., Строганов Г.Б., Скворцова С.В. Покрытия различного назначения для металлических материалов: учебное пособие. – М.: Альфа-М: Инфра-М, 2013. – 144 с. – (Современные технологии: Магистратура). – ISBN 978-5-98281-355-8.

8. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-94275-591-1.

9. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2017. – Vol. 18. – P. 1–9. – doi: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.

10. Caliskan H., Panjan P., Curbanoglu C. Hard coatings on cutting tools and surface finish // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Comprehensive Materials Finishing*. – 2017. – Vol. 3. – P. 230–242. – doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5.

11. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools / R. Haubner, M. Lessiak, R. Pitonak, A. Köpf, R. Weissenbacher // *International*

*Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2017. – Vol. 62, part B. – P. 210–218. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009.

12. High temperature oxidation and cutting performance of AlCrN, TiVN and multilayered AlCrN/TiVN hard coatings / Y.-Y. Chang, S.-Y. Weng, C.-H. Chen, F.-X. Fu // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 332. – P. 494–503. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.080.

13. Balogh Z., Schmitz G. Diffusion in metals and alloys // *Physical Metallurgy*. – 5th ed. – Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014. – Vol. 1. – P. 387–559. – doi: 10.1016/b978-0-444-53770-6.00005-8.

14. Cardarelli F, Taxil P., Savall A. Tantalum protective thin coating techniques for the Chemical Process Industry: molten salts electrocoating as a new alternative // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 1996. – Vol. 14, iss. 5–6. – P. 365–381.

15. Патент 2451108 Российская Федерация, МПК С 23 С 10/26 (2006.01). Способ обработки инструмента из стали или твердого сплава / А.Г. Соколов, Мансиа Салахалдин. – Оpubл. 20.05.2012, Бюл. № 14. – 5 с.

16. Патент 2521187 Российская Федерация, МПК С 23 С 10/18; С 23 С 2/04 (2006.01). Устройство для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов / А.Г. Соколов. – Оpubл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 8 с.

17. Chaevsky M. Comparison of methods of formation of protective coating from high-temperature liquid media // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2001. – Vol. 43, N 11–12. – P. 446.

18. Платонов Г.Л., Аникин В.Н., Аникеев А.И. Изучение роста износостойких слоев из карбида титана на твердых сплавах // *Порошковая металлургия*. – 1980. – № 8 (212). – С. 48–52.

19. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук. – Киев: Техника, 1991. – 168 с. – ISBN 5-335-00501-7.

20. Sokolov E.G., Artem'ev V.P. Effect of pores in powder materials on the formation of titanium and chromium diffusion coatings // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2002. – Vol. 44, N 9–10. – P. 459. – doi: 10.1023/A:1021981401891.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Influence of the Diffusion Titanizing from Low-Melting Liquid Metal medium on the Performance of Ti-WC-Co and WC-Co Cutting Carbide-Tipped Tool

Aleksandr Sokolov<sup>a</sup>, Eduard Bobylev<sup>b, \*</sup>

Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8105-1429>, [sag-51@bk.ru](mailto:sag-51@bk.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7754-1807>, [ebobylev@mail.ru](mailto:ebobylev@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 26 June 2018

Revised: 04 July 2018

Accepted: 22 September 2018

Available online: 15 December 2018

##### Keywords:

Carbide-tipped tool

Diffusion titanium coatings

Tool life

##### Funding

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, the contract number is 18-38-00382.

#### ABSTRACT

**Introduction.** A modern approach to improving the operational properties of cutting tools is covering its surface with functional coatings based on carbides, nitrides, oxides of metals such as titanium, chromium, aluminum, silicon, etc. In spite of a number of cutting tool coating technologies, most of it has such drawbacks as the complexity of the equipment, the limited geometry of the coated products, the limited elemental composition of the coatings, and the low operating properties of the coatings formed. The above drawbacks are absent in the technology of diffusion metallization from the medium of low-melting liquid metal solutions. **The purpose of the work:** to analyze the effect of diffusion titanizing from low-melting liquid metal medium on the wear resistance of carbide-tipped tool and the quality of machined parts. **The methods of investigation.** Tests for macro- and microhardness, X-ray spectral analysis, X-ray diffraction analysis, in-situ testing on the tools durability are carried out. The quality of the processed parts is determined. **Results and Discussion.** It is revealed that functional diffusion titanium layers, obtained by diffusion titanizing from low-melting liquid metal solutions, are formed on the TiC-base. At the same time, the coating is characterized by the presence of two layers – surface layer with a microhardness level of about 30 000 MPa and a transitional layer with a gradual decrease in microhardness level and titanium concentration. It is found that the structure of the diffusion and the transition layers depends on the temperature of diffusion saturation, on the duration of diffusion saturation, as well as on the modes of subsequent heat treatment. The developed technology makes it possible to increase tool life as compared to a tool that does not have a coating up to 7.4 times, and also that has a PVD coating up to 1.85 times, depending on the cutting group and the speed of processing. The coating is most effective at high cutting speed – 190 m/min. At the same time, the roughness parameter Ra is reduced to 2 times, depending on the cutting group and processing conditions.

**For citation:** Sokolov A.G., Bobylev E.E. Influence of the diffusion titanizing from low-melting liquid metal medium on the performance of Ti-WC-Co and WC-Co cutting carbide-tipped tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 46–59. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-46-59. (In Russian).

#### References

1. Sokolov A.G., Bobylev E.E. Elementno-fazovyi sostav i svoistva diffuzionnykh titanovykh pokrytii na rezhushchem tverdospayvnom instrumente tipa TK i VK [The element-phase composition and properties of the surface layers of carbide-tipped tools made of TK and WC-Co alloys]. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 222–228. doi: 10.22226/2410-3535-2017-3-222-228.
2. Brama M., Rhodes N., Hunt J., Ricci A., Teghil R., Migliaccio S., Della Rocca C., Leccisotti S., Lioi A., Scandurra M., Maria G. De, Ferro D., Pu F., Panzini G., Politi L., Scandurra R. Effect of titanium carbide coating on the osseointegration response in vitro and in vivo. *Biomaterials*, 2007, vol. 28, iss. 4, pp. 595–608. doi: 10.1016/j.biomaterials.2006.08.018.

#### \* Corresponding author

Bobylev Eduard Ed., Ph.D. student

Kuban State Technological University,

2 Moskovskaya st.,

Krasnodar, 350072, Russian Federation

Tel.: +7-918-975-8933; e-mail: [ebobylev@mail.ru](mailto:ebobylev@mail.ru)

3. Daniel J., Souček P., Zábranský L., Buršíková V., Stupavská M., Vašina P. On the effect of the substrate to target position on the properties of titanium carbide/carbon coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 328, pp. 462–468. doi: 10.1060/j.surfcoat.2017.06.076.
4. Bonis A. De, Santagata A., Galasso A., Laurita A., Teghil R. Formation of titanium carbide (TiC) and TiC@C core-shell nanostructures by ultra-short laser ablation of titanium carbide and metallic titanium in liquid. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, vol. 489, pp. 76–84. doi: 10.1016/j.jcis.2016.08.078.
5. Xie Z.J., Mai Y.J., Lian W.Q., He S.L., Jie X.H. Titanium carbide coating with enhanced tribological properties obtained by EDC using partially sintered titanium electrodes and graphite powder mixed dielectric. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 300, pp. 50–57. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.080.
6. Ramirez C., Idhil Ismail A., Gendarme C., Dehmas M., Aeby-Gautier E., Poulachon G., Rossi F. Understanding the diffusion wear mechanisms of WC-10%Co carbide tools during dry machining of titanium alloys. *Wear*, 2017, vol. 390–391, pp. 61–70. doi: 10.1016/j.wear.2017.07.003.
7. Il'in A.A., Stroganov G.B., Skvortsova S.V. *Pokrytiya razlichnogo naznacheniya dlya metallicheskih materialov* [Coatings of various purposes for metallic materials]. Moscow, Al'fa-M Publ., Infra-M Publ., 2013. 144 p. ISBN 978-5-98281-355-8.
8. Grigor'ev S.N. *Metody povysheniya stoikosti rezhushchego instrumenta* [Methods to improve the durability of the cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 368 p. ISBN 978-5-94275-591-1.
9. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, vol. 18, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.
10. Caliskan H., Panjan P., Curbanoglu C. Hard coatings on cutting tools and surface finish. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Comprehensive Materials Finishing*, 2017, vol. 3, pp. 230–242. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5.
11. Haubner R., Lessiak M., Pitonak R., Köpf A., Weissenbacher R. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, vol. 62, part B, pp. 210–218. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009.
12. Chang Y.-Y., Weng S.-Y., Chen C.-H., Fu F.-X. High temperature oxidation and cutting performance of AlCrN, TiVN and multilayered AlCrN/TiVN hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 332, pp. 494–503. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.080.
13. Balogh Z., Schmitz G. Diffusion in metals and alloys. *Physical Metallurgy*. 5<sup>th</sup> ed. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2014, vol. 1, pp. 387–559. doi: 10.1016/b978-0-444-53770-6.00005-8.
14. Cardarelli F., Taxil P., Savall A. Tantalum protective thin coating techniques for the Chemical Process Industry: molten salts electrocoating as a new alternative. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1996, vol. 14, iss. 5–6, pp. 365–381.
15. Sokolov A.G., Mansia Salakhaldin. *Sposob obrabotki instrumenta iz stali ili tverdogo splava* [The method of processing of tool steel or hard alloy]. Patent RF, no. 2451108, 2012.
16. Sokolov A.G. *Ustroistvo dlya diffuzionnoi metallizatsii v srede legkoplavkikh zhidkometallicheskih rastvorov* [A device for the diffusion metallization in the environment of the fusible liquid metal solutions]. Patent RF, no. 2521187, 2014.
17. Chaevsky M. Comparison of methods of formation of protective coating from high-temperature liquid media. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, vol. 43, no. 11–12, p. 446.
18. Platonov G.L., Anikin V.N., Anikeev A.I. Izuchenie rosta iznosostoikikh sloev iz karbida titana na tverdykh splavakh [Growth of wear-resistant titanium carbide layers on hard metals]. *Poroshkovaya metallurgiya = Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1980, no. 8 (212), pp. 48–52. (In Russian).
19. Loskutov V.F., Khizhnyak V.G., Kunitskii Yu.A., Kindrachuk M.V. *Diffuzionnye karbidnye pokrytiya* [Diffusion carbide coatings]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991. 168 p. ISBN 5-335-00501-7.
20. Sokolov E.G., Artem'ev V.P., Effect of pores in powder materials on the formation of titanium and chromium diffusion coatings. *Metal Science and Heat Treatment*, 2002, vol. 44, no. 9–10, p. 459. doi: 10.1023/A:1021981401891.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.