

**Повышение стойкости режущего  
твердосплавного инструмента путем управления  
состоянием и свойствами его поверхностных слоев  
с помощью комплексной химико-термической обработки**

© Э.Э. Бобылёв

Кубанский государственный технологический университет,  
Краснодар, 350000, Россия

*Современным способом повышения производительности процесса резания при токарной обработке является нанесение на поверхность режущего инструмента функциональных покрытий на основе карбидов, нитридов, карбонитридов и др. В большинстве технологий нанесения функциональных покрытий предполагается использование технически сложного, дорогостоящего оборудования. Также отмечается резкое изменение свойств покрытий на границе с покрываемым материалом. Однако эти недостатки исключаются в случае применения технологии диффузионного насыщения из среды легкоплавких жидкометаллических расплавов. Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния формирования покрытия на основе карбида титана на поверхности режущего инструмента, изготовленного из твердых сплавов типа ТК и ВК, на его износостойкость и качество поверхности, получаемой после токарной обработки. В процессе исследования проводились натурные испытания, микрорентгеноспектральный анализ, оптическая микроскопия, микродюраметрические испытания. Приведены результаты исследований процесса токарной обработки материалов, относящихся к различным группам резания. Функциональное диффузионное покрытие твердосплавного инструмента, применяемого при обработке, получено вследствие насыщения в расплаве, содержащем свинец, висмут, литий, титан. Такие покрытия толщиной 3...6 мкм способствовали повышению стойкости инструмента до 7,4 раз по сравнению со стойкостью инструмента без покрытий и до 1,5 раз в сопоставлении с этим же показателем инструмента с PVD-покрытием, а также снижению до 2 раз параметра шероховатости Ra обработанной поверхности.*

**Ключевые слова:** *твердый сплав, диффузионное насыщение, функциональное покрытие, стойкость инструмента, токарная обработка*

**Введение.** В современных условиях развития машиностроения предъявляются достаточно высокие требования к производительности процессов механической обработки резанием. Токарная обработка является одним из основных технологических методов обработки. В качестве инструментального материала могут применяться быстрорежущие стали, режущая керамика, кубический нитрид бора и др. Наиболее широко для этих целей используются твердые сплавы двух групп: вольфрамо-кобальтовые (ВК) и титано-кобальтовые (ТК). Они обладают такими ценными технологическими свойствами, как высокими твердостью и теплостойкостью, высокими трибологическими

свойствами, что позволяет использовать эти материалы для изготовления режущего инструмента.

Следует отметить, что качество инструментов из твердых сплавов может быть многократно улучшено благодаря применению технологий формирования и управления свойствами их поверхностных слоев. Как известно, именно состояние поверхностных слоев во многом определяет прочностные характеристики инструмента, поэтому формированием функционального покрытия можно добиться улучшения его эксплуатационных характеристик. Таким образом, перспективным является формирование на поверхности режущего инструмента функциональных слоев на основе карбидов, нитридов, карбонитридов, обладающих высокой твердостью, термической стабильностью и хорошими трибологическими свойствами [1–6].

В качестве элементов, на основе которых формируются функциональные износостойкие слои, применяют титан, хром, вольфрам, ванадий, ниобий и др. В частности, титан, достаточно широко распространенный, образует карбиды твердостью до 32 000 МПа, представляет интерес в качестве элемента, на основе которого может быть сформирован функциональный слой. Кроме того, уже разработаны технологии, позволяющие формировать на поверхности твердых сплавов покрытия на основе карбидов титана [7–11]. Однако их основным недостатком является послойность образования покрытия, представляющего собой «пленку» на поверхности покрываемого материала, что в ряде случаев приводит к снижению адгезии и резкому изменению свойств на границе покрытие — матрица [12–13]. Впрочем, среди таких технологий можно выделить одну, позволяющую сформировать слои, обладающие требуемым градиентом свойств и концентрацией насыщающего элемента, — это диффузионное насыщение в среде легкоплавких жидкометаллических расплавов [1, 7, 14, 15].

Цель настоящей работы — оценить, как влияет формирование на поверхности режущего инструмента из твердых сплавов типа ТК и ВК на износостойкость инструмента и качество поверхности изделия после токарной обработки.

**Методика.** Диффузионному насыщению подвергались пятигранные пластины PNUM-110408 из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 в состоянии поставки.

Технология диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических расплавов основана на эффекте переноса масс. Расплав нагревается до необходимой температуры в среде инертных газов, затем изделия погружаются в него. После выдержки изделия извлекаются и чистятся от следов расплава [14]. Диффузионное насыщение осуществлялось в среде эвтектического состава Pb—Bi—Li, в которую добавлялся порошок титана в количестве 5 % (мас.).

Время выдержки пластин в расплаве составляло от 60 до 90 мин при температуре от 950 до 1200 °С. Покрытия наносились в установке для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических расплавов [15].

Перед диффузионным насыщением пластины подвергались предварительной высокотемпературной цементации. Эта стадия необходима для насыщения поверхностных слоев покрываемого материала углеродом, при взаимодействии с которым впоследствии будет формироваться карбид титана. Если стадия предварительной цементации отсутствует, под покрытием образуется обезуглероженный слой ввиду обеднения углеродом карбида вольфрама, являющегося более слабым карбидообразователем, чем выступающий в роли диффузанта титан. Цементация в вакууме проводилась при температуре 1000 °С в течение 90 мин в пропан-бутановой смеси в вакуумной печи VMICRO.

После диффузионного насыщения пластины были подвергнуты термической обработке — старению в среде инертных газов. Целью старения служит перераспределение углерода по покрытию и выделение дисперсной фазы карбида титана.

Твердость пластин измерялась по методу Роквелла по шкале *A* на твердомере ТК-2М. Микротвердость определялась по методу Микро-Виккерса на микротвердомере INCA DuraScan при нагрузке 0,3 гс. Исследования проводили на косых микрошлифах.

Токарную обработку проводили на токарно-винторезном станке Jet GH-1440ZX. Оценку стойкости пластин и качества получаемой после резания поверхности проводили путем сравнительных испытаний при точении материалов из различных групп резания. Для экспериментов были выбраны:

сталь У10 после закалки и отпуска при 500 °С, 43 HRC (группа резания Р);

сталь 30Х13 после закалки и отпуска при 750 °С, HB 240 МПа (группа резания М);

серый чугун СЧ20, HB 240 МПа (группа резания К);

алюминиевый сплав АМг6, HB 65 МПа (группа резания N);

титановый сплав BT1-00, HB 140 МПа (группа резания S);

сталь У10 после закалки и отпуска при 400 °С, 48 HRC (группа резания H).

Испытания проводили наиболее характерных для указанных выше групп обрабатываемости материалах. Для сравнения были выбраны пластины: 1) без покрытия; 2) с однослойным PVD-покрытием на основе карбида титана TiC; 3) с функциональным диффузионным покрытием на основе карбида титана.

За критерий износа твердосплавного инструмента принимались значения шероховатости *Ra* обработанной поверхности деталей

и точность обработки, так как при чистовой обработке основным показателем оценки эксплуатационных свойств режущего инструмента является качество обработанных поверхностей при разных методах механической обработки. Качество обработки оценивалось после обработки заготовок из материалов, относящихся к различным группам резания.

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

Состав поверхностного слоя и переходной зоны исследовали методом рентгеноспектрального микроанализа, для чего были использованы растровый электронный микроскоп JEOL JSM-7500F и спектрометр INCA x-sight фирмы Oxford Instruments Analytical, Ltd (Великобритания).

Фазовый состав покрытий определялся на многофункциональном рентгеновском дифрактометре ДРОН-7М. Съёмка дифрактограмм велась на излучении  $\text{CuK}_\alpha$  при напряжении 30 кВ и силе тока 20 мА. Для идентификации фаз использовалась база данных ICDD PDF-2.

**Результаты и обсуждение.** Вследствие технологического воздействия, состоящего из предварительной цементации, диффузионного насыщения и термической обработки, на поверхности твердосплавных пластин формируется диффузионный слой (рис. 1), содержащий карбиды титана  $\text{TiC}$  в количестве до 93 % (рис. 2, 3) [1]. Полученный диффузионный слой можно условно разделить на две зоны: имеющая высокую микротвердость зона карбидов толщиной до 5,5 мкм и переходная зона (карбидный слой-основа), отличающаяся плавным снижением концентрации элемента-диффузанта и повышением концентрации элементов покрываемого материала. Переходная зона имеет толщину до 20 мкм.

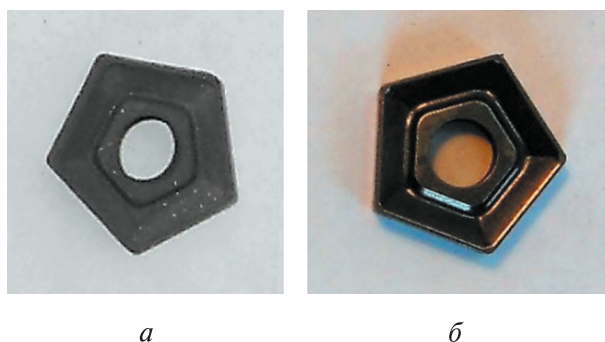


Рис. 1. Пятигранная пластина PNUM до диффузионного насыщения (а) и после него (б)

Зона карбидов представляет собой твердый раствор карбида титана  $TiC$  в  $\alpha-Ti$ . Следует отметить, что покрытия, полученные на сплаве BK8, характеризуются наличием в поверхностном слое интерметаллидного соединения  $Ti_2Co$  и карбида вольфрама  $WC$ .

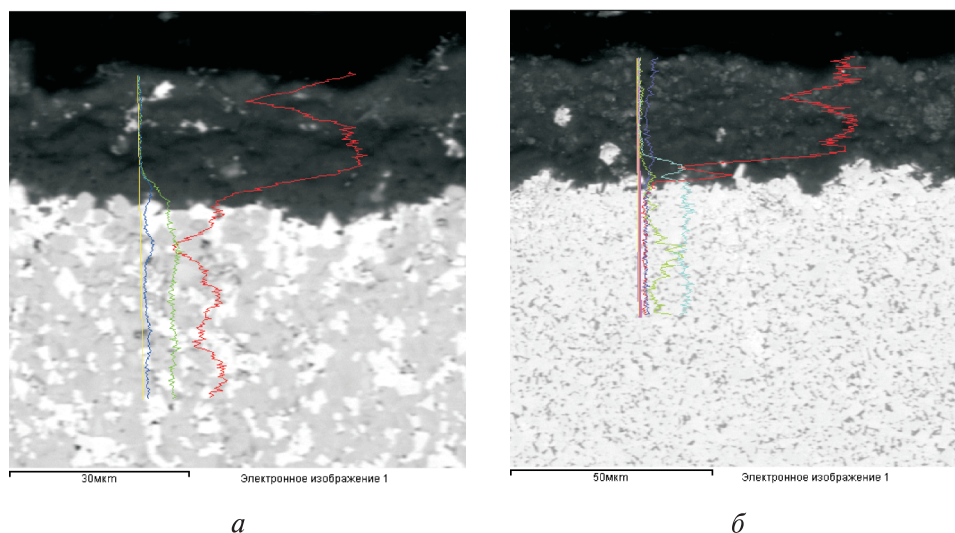


Рис. 2. Функциональный диффузионный титановый слой на твердом сплаве BK8 (а), T15K6 (б) [1]

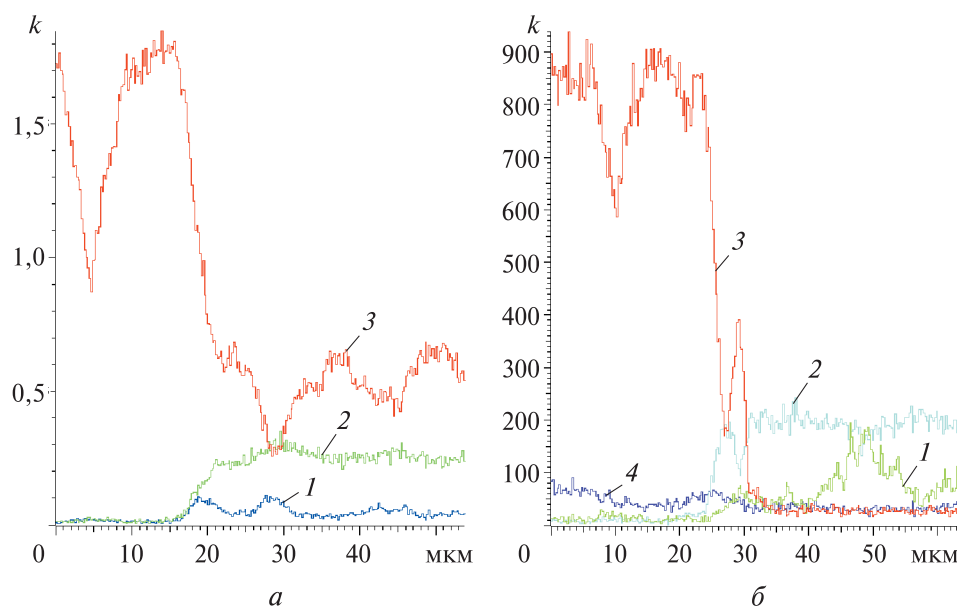


Рис. 3. Распределение элементов в функциональном диффузионном титановом слое и переходной зоне на сплавах:

а — BK8 (1 — кобальт, 2 — вольфрам, 3 — титан);  
б — T15K6 (1 — кобальт, 2 — вольфрам, 3 — титан, 4 — углерод) [1]

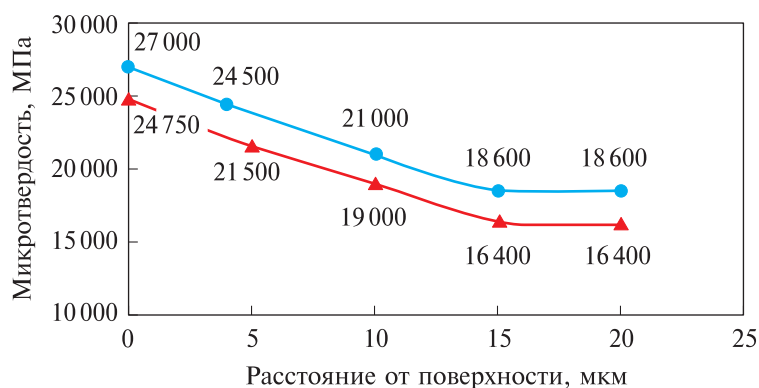
Такие эксплуатационные свойства функционального диффузионного слоя, как его микротвердость, толщина и хрупкость, в основном зависят от режимов диффузионного насыщения. Влияние режимов диффузионного насыщения на характеристики функциональных слоев из карбида титана TiC подробно описано в работах [1, 7]. В представленном исследовании применялись инструменты, показавшие наибольшую износостойкость в условиях лабораторных испытаний. Режимы, при которых инструмент подвергался диффузионному насыщению, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы диффузионного насыщения инструмента

Сплав	Температура, °С	Время, мин
T15K6	1000	60
BK8	1100	90

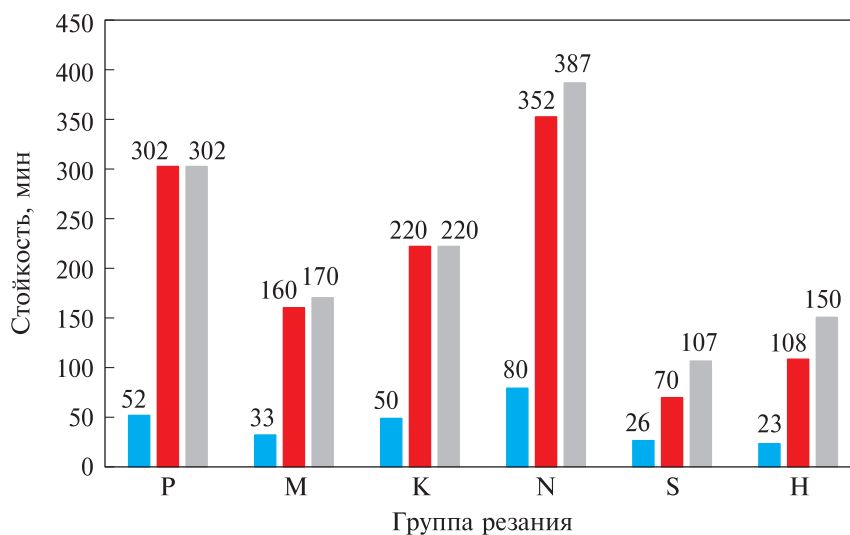
Исследуемые образцы имели толщину поверхностного карбидного слоя 4-5 мкм, микротвердость на поверхности пластины из сплава T15K6 составлял 27 000 МПа, пластины из сплава BK8 — 24 750 МПа (рис. 4).



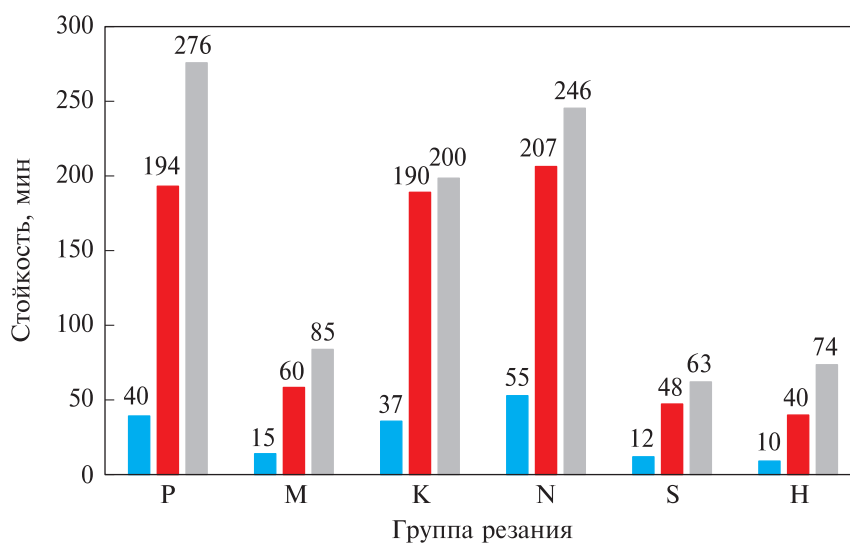
**Рис. 4.** Изменение микротвердости поверхностного слоя твердосплавных пластин из T15K6 (—●—) и BK8 (—▲—), подвергнутых диффузионному насыщению титаном в среде легкоплавких жидкометаллических расплавов, от расстояния до поверхности

В ходе исследования было выявлено, что формирование функциональных диффузионных слоев на поверхности режущих инструментов способно существенно увеличить их износостойкость и, как следствие, — повысить производительность токарной обработки. Диаграмма стойкости инструментов при обработке материалов из разных групп резания представлена на рис. 5.

Повышение износостойкости инструмента объясняется формированием на его поверхности функционального слоя, микротвердость которого в 1,45 раз выше твердости основы для сплава Т15К6 и в 1,5 раза выше для сплава ВК8 (см. рис. 4).



а



б

**Рис. 5.** Стойкость инструментов при обработке материалов, относящихся к разным группам резания, при скорости резания 100 м/мин (а) и 190 м/мин (б):

■ — без покрытия; ■ — PVD-покрытие; ■ — диффузионное титановое покрытие

При скорости резания 100 м/мин (рис. 5, а) стойкость инструмента с функциональным диффузионным слоем из карбида титана и стойкость инструмента с PVD-покрытием на основе TiC равны при

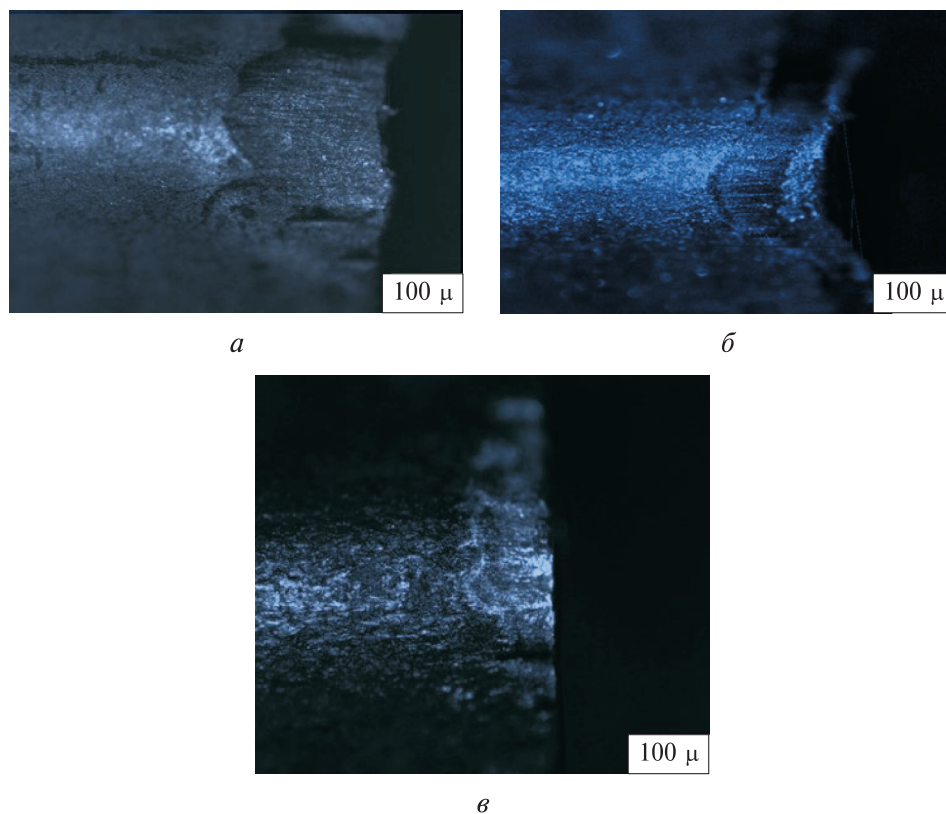
обработке сталей и чугунов (группы резания Р и К), она составила 302 и 220 мин соответственно. При обработке стали 30X13 наблюдается незначительное (на 6 %) увеличение стойкости пластины, имеющей функциональное диффузионное покрытие, по сравнению со стойкостью пластины, имеющей PVD-покрытие на основе TiC. При обработке алюминиевого сплава, титанового сплава и закаленной стали опытные образцы показали бóльшую стойкость, чем пластина с PVD-покрытием на основе TiC: в группе резания N — на 9,1 % , в группе резания S — на 35 % , в группе резания H — на 28 %.

В случае повышения скорости резания до 190 м/мин наблюдается снижение стойкости исследуемых инструментов. Однако стойкость опытных образцов, имеющих функциональное диффузионное покрытие, оказалась выше во всех группах резания (рис. 5, б).

Увеличение стойкости резцов с диффузионным функциональным покрытием обусловлено формированием на его поверхности покрытия, основу которого составляет карбид титана TiC, имеющий высокие износостойкость и трибологические свойства, а также отсутствием резкого изменения свойств на границе покрытие — основа. Следует отметить, что при возрастании скорости резания стойкость опытных образцов из материалов всех групп резания выше стойкости образцов с PVD-покрытием на основе TiC и пластины без покрытия. При скоростном резании многократно повышается температура в зоне резания, что влечет за собой увеличение термической нагрузки на режущую кромку инструмента и снижение его стойкости. Поскольку карбид титана имеет высокую термическую стабильность, процессы разупрочнения режущей кромки протекают медленнее, чем в инструментах с PVD-покрытиями на основе TiC.

В результате испытаний было выявлено, что диффузионное насыщение инструмента типа ТК и ВК титаном из среды легкоплавких жидкометаллических растворов способствует увеличению стойкости инструмента, уменьшению адгезионного схватывания обрабатываемого материала с инструментальным, а также образованию наростов (рис. 6). Так, после 10 мин обработки образца из коррозионностойкой стали 30X13 без покрытия образуется нарост высотой 24 мкм (рис. 6, а), износ передней поверхности составляет 126 мкм. У образца, имеющего PVD-покрытие на основе TiC, наблюдается образование нароста высотой 34 мкм; отмечается меньший износ передней поверхности, его величина составила 94,5 мкм (рис. 6, б). На образце с диффузионным титановым покрытием, состоящим из частиц карбида титана в титановой матрице, налипание обрабатываемого материала на режущую кромку инструмента не выявлено; износ передней поверхности инструмента составил 27 мкм (рис. 6, в).





**Рис. 6.** Состояние передней поверхности резцов после обработки образцов из коррозионностойкой стали в течение 10 мин со скоростью  $V = 190$  м/мин, подачи  $S = 0,05$  мм/об:

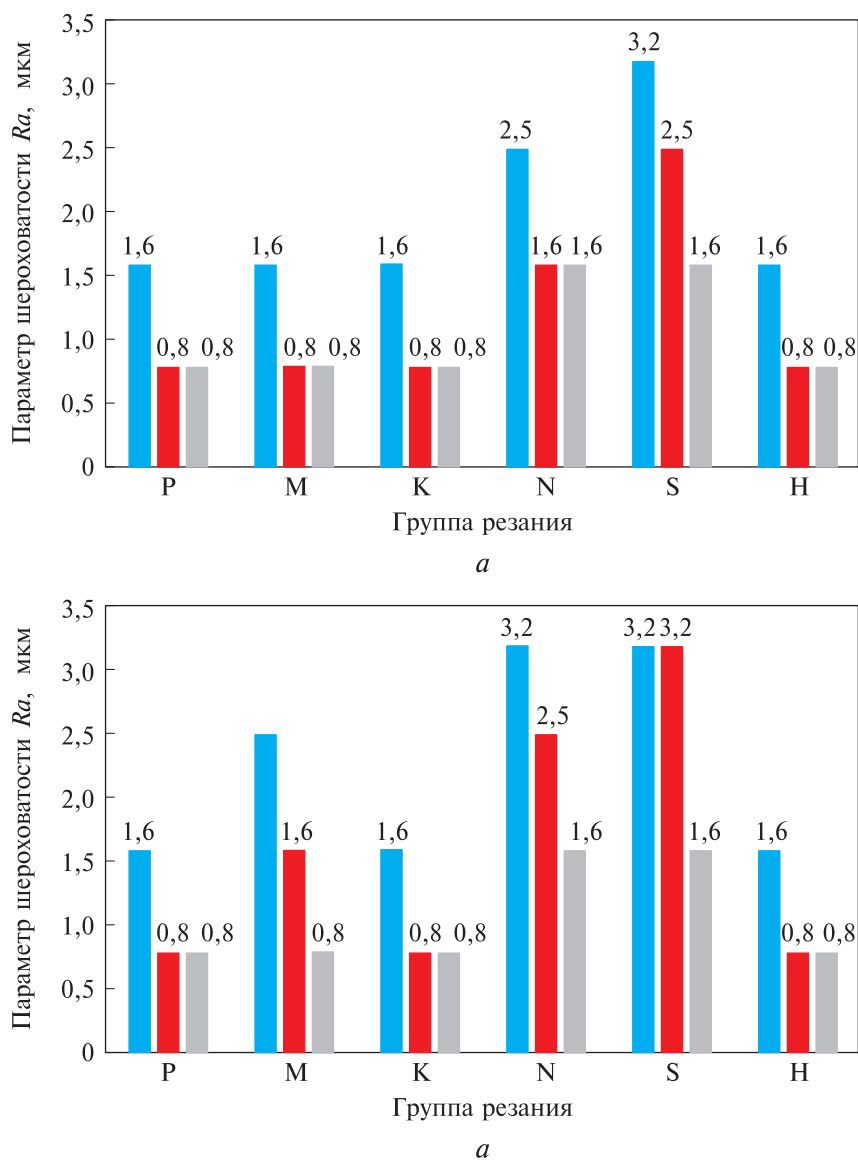
*a* — резец без покрытия; *б* — резец с покрытием PVD на основе TiC; *в* — резец с диффузионным титановым покрытием

Формирование диффузионных функциональных покрытий на твердых сплавах также способствует снижению параметра шероховатости  $Ra$  обрабатываемой поверхности (рис. 7).

Как показал анализ результатов исследования, при скорости резания 100 м/мин (рис. 7, *a*) режущий инструмент, имеющий функциональное диффузионное покрытие на основе карбида титана TiC, при обработке сталей, чугунов, закаленных сталей обеспечивает уровень параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности, аналогичный этому параметру для инструмента с PVD-покрытием на основе TiC. Однако при обработке титановых сплавов ( $S$ ) параметр  $Ra$  ниже у поверхности обработанного опытного образца (см. рис. 7, *a*). В остальных случаях получаемая шероховатость равна шероховатости, полученной после обработки инструментом с PVD-покрытием на основе TiC.

При увеличении скорости резания до 190 м/мин снижение качества поверхности у обработанного опытного образца не наблюдается (рис. 7, *б*). Отметим, что на опытном образце, имеющем функцио-

нальное диффузионное покрытие, процесс наростообразования протекает менее интенсивно, чем было обусловлено повышение качества обработанной поверхности.



**Рис. 7.** Качество поверхности материалов после токарной обработки, относящихся к различным группам резания, на скорости резания 100 м/мин (а) и 190 м/мин (б):  
■ — без покрытия; ■ — PVD-покрытие; ■ — диффузионное титановое покрытие

### Выводы

1. Диффузионное насыщение твердых сплавов типа ТК и ВК в расплаве Pb–Bi–Li с добавлением титана обеспечивает формирование на их поверхности функционального покрытия толщиной от 3 до

6 мкм. Благодаря такому покрытию увеличивается стойкость инструмента до 7,4 раз по сравнению со стойкостью инструмента без покрытия и до 1,5 раз по сравнению с этим параметром инструмента, имеющего PVD-покрытие на основе TiC.

2. Функциональные покрытия на основе карбида титана способствуют снижению параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности до 2 раз по сравнению с шероховатостью инструмента без покрытия. При сравнении с шероховатостью инструмента с PVD-покрытием на основе TiC этот параметр снижается в случае обработки коррозионностойких сталей, цветных металлов и титановых сплавов инструментом с функциональным покрытием.

3. Твердосплавный инструмент с диффузионным функциональным покрытием на основе карбида титана TiC наиболее рационально применять для обработки труднообрабатываемых материалов при повышенных скоростях резания.

**Финансирование:** исследования выполнены по гранту, представленному Российским фондом фундаментальных исследований, договор № 18-38-00382.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sokolov A.G., Bobylyov E.E. The element-phase composition and properties of the surface layers of carbide-tipped tools made of TK and WC-Co alloys. *Letters on Materials*, 2017, no. 7 (3), pp. 222–228. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-3-222-228
- [2] Pak A.Ya. A vacuum-free method for producing cubic titanium carbide in the plasma of low-voltage direct-current arc discharge. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, pp. 1192–1194. DOI: 10.1134/S1063785019010152
- [3] Daniel J., Soucek P., Zábanský 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] De Bonis A., 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., Aebly-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] Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э. Кинетика формирования покрытий на базе карбида титана, нанесенных по технологии диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов, на сплавах типа ТК и ВК. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2016, № 2 (71), с. 59–69.

- [8] Григорьев С.Н. *Методы повышения стойкости режущего инструмента*. Москва, 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, 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] 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, issues 5-6, pp. 365–381.
- [14] Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э. *Способ повышения износостойкости изделий из твердого сплава*. Патент 2618289 РФ, МПК С23 С 12/00 (2006.01). Оpubл. 03.05.2017, бюл. № 13, 6 с.
- [15] Соколов А.Г. *Устройство для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов*. Патент 2521187 РФ, МПК С23С 10/18; С23С 2/04 (2006.01). Оpubл. 27.06.2014, бюл. № 18, 8 с.

Статья поступила в редакцию 19.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бобылёв Э.Э. Повышение стойкости режущего твердосплавного инструмента путем управления состоянием и свойствами его поверхностных слоев с помощью комплексной химико-термической обработки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-12-2043>

**Бобылёв Эдуард Эдуардович** — старший преподаватель кафедры «Системы управления и технологические комплексы», Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов: материаловедение (в машиностроении); формирование структуры и свойств поверхности деталей, изготовленных из конструкционных материалов путем нанесения на их поверхность функциональных покрытий; порошковая металлургия и композиционные материалы. e-mail: ebobylev@mail.ru

## **Enhancing the durability of cutting carbide tools by controlling the state and properties of its surface layers using complex chemical and thermal treatment**

© E.E. Bobylev

Kuban State Technological University, Krasnodar, 350000, Russia

*A current way of increasing cutting efficiency in the turning operation is applying functional coatings based on carbides, nitrides, carbonitrides, etc. on the cutting tool surface. Most technologies for applying functional coatings are supposed to use technically sophisticated, expensive equipment. In addition, the coatings have a sharp change in properties at the coating-coated material boundary. The technology of diffusion saturation from the medium of low-melting liquid metal melts lacks these disadvantages. The aim of the work was to study the effect of the formation of a coating based on titanium carbide on the surface of a cutting tool made of hard TiC-WC-Co and WC-Co alloys on its wear resistance and the quality of the product surface after turning. The research methods included field tests, micro-x-ray spectral analysis, optical microscopy, and microdurametric tests. The paper presents the results of research of turning of materials of various cutting group using a carbide tool with a functional diffusion coating obtained due to saturation in the melt containing Pb, Bi, Li, Ti. The resulting coatings had a thickness of 3-6 microns, and contributed to an increase in tool life up to 7.4 times compared to the tools with PVD coating and tools without coatings as well as a decrease of the roughness parameter Ra of the treated surface up to 2 times.*

**Keywords:** *hard alloy, diffusion saturation, functional coating, tool life, turning*

**Funding.** The research was carried out under a grant provided by The Russian Foundation for Basic Research, contract no. 18-38-00382.

### REFERENCES

- [1] Sokolov A.G., Bobylev E.E. *Letters on materials*, 2017, no. 7 (3), pp. 222–228. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-3-222-228
- [2] Pak A.Ya. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, no. 12, pp. 1192–1194. DOI: 10.1134/S1063785019010152
- [3] Daniel J., Souček P., Záborský L., Bursikova V. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 328, pp. 462–468. DOI: 10.1060/j.surfcoat.2017.06.076
- [4] De Bonis A., Santagata A., Galasso A., Laurita A., Teghil R. *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., Lian W.Q., Jie X.H. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 300, pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.080
- [6] Ramirez C., Ismail A. I., C. Gendarme, Dehmas M., Aeby-Gautier E., Poulachon G., Rossi F. *Wear*, 2017, vol. 390-391, pp. 61–70. DOI: 10.1016/j.wear.2017.07.003
- [7] Sokolov A.G., Bobylev E.E. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) — Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*, 2016, no. 2 (71), pp. 59–69.
- [8] Grigoryev S.N. *Metody povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta [Methods for increasing the durability of the cutting tool]*. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2011, 368 p. ISBN 978-5-94275-591-1

- [9] Bobzin K. *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. *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. *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. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 332, pp. 494–503. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.080
- [13] Cardarelli F., Taxil P., Savall A. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1996, vol. 14, no. 5-6, pp. 365–381.
- [14] Sokolov A.G., Bobylev E.E. *Sposob povysheniya iznosostoykosti izdeliy iz tverdogo splava* [Method for increasing wear resistance of hard alloy products]. Patent RF, no. 2618289, 2006, Bulletin 2017, no. 13, 6 p.
- [15] Sokolov A.G. *Ustroystvo dlya diffuzionnoy metallizatsii v srede legkoplavkikh zhidkometallicheskich rastvorov* [Equipment for diffusion metallization in the medium of low-melting liquid-metal solutions]. Patent RF, no. 2521187, 2006, Bulletin 2014, 18, 8 p.

**Bobylev E.E.**, Assist. Professor, Department of Control Systems and Technological Complexes, Kuban State Technological University. Research interests: material science (in mechanical engineering), formation of the structure and surface properties of parts made of structural materials by applying functional coatings to their surface, powder metallurgy and composite materials. e-mail: ebobylev@mail.ru