

УДК 504.064.36

doi 10.54708/22259309_2025_33479

Структурные изменения на поверхности сплава ТТ8К6 с композиционным покрытием после термомеханического воздействия

Т.В. Мухамадеев ¹, А.Ю. Назаров ², В. Р. Мухамадеев ³

¹timur_muhamadeev@bk.ru, ²nazarov_almaz15@mail.ru, ³vener_muhamadeev@mail.ru

¹⁻³ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В данной работе было проведено исследование влияния возможных структурных изменений поверхности на ресурс режущего инструмента. Выполнено аналитическое исследование на поверхности твердого сплава ТТ8К6 с композиционным покрытием TiAlN. Получены значения микротвердости в приповерхностных слоях исследуемых образцов в исходном состоянии и после отжига под давлением с целью определения возможных структурных явлений. Результатами показан резкий скачок твердости на границе «покрытие–основа» в исходном образце и выравнивание твердости в отожженном, значение которого при этом выше исходного образца.

Ключевые слова: износостойкие покрытия; вакуумно-дуговое осаждение; режущий инструмент; испытания на резание; твердый сплав.

ВВЕДЕНИЕ

В современной машиностроительной отрасли применение высокоскоростной металлообработки является одним из основных направлений увеличения производительности и качества получаемых изделий. При этом увеличение скорости резания приводит к снижению периода стойкости и преждевременному разрушению инструмента.

Особое влияние на физико-механические характеристики, состав и строение поверхностных слоев оказывает совокупное влияние давления и температуры. Изменение указанных факторов влияет на микроструктуру и физико-механические свойства материала и, как следствие, на его износостойкость. Кроме того, увеличение температуры и давления приводит к возникновению микротрещин и хрупкому разрушению слоя трения. Весьма распространенным при металлообработке является образование вторичных структур.

В связи с увеличением в машиностроительном производстве станочного оборудования и создания новых сплавов с новыми комбинациями физико-механических характеристик требуются дополнительные экспериментальные и аналитические исследования в области разработок износостойких покрытий, механизмов формирования и влияния на режущий инструмент.

Наиболее перспективным методом увеличения износостойкости режущего инструмента в современном производстве является нанесение многокомпонентных композиционных наноструктурных покрытий.

Для обеспечения максимальной эффективности и износостойкости инструмента требуется дополнительное изучение характера и механизма разрушения, также необходимости выявления конкретных требований, предъявляемых к покрытиям, позволяющих уменьшить интенсивность износа контактирующих поверхностей. Для осуществления принципа самоорганиза-

ции системы «инструмент–деталь» необходимо ввести в состав износостойкой инструментальной композиции материалы, ускоряющие или замедляющие процесс окисления, таким образом оказывающие влияние на процесс изменения структуры ко внешним факторам [1]. Это связано с тем, что в процессе трения свойства поверхностных слоев изменяются, следовательно, исходное состояние покрытий не определяет взаимодействие на всем протяжении процесса резания.

Экспериментальными исследованиями установлено, что значительное влияние на износ металлорежущего инструмента в диапазоне применяемых на производстве скоростей резания одной из основных причин изнашивания являются диффузионные процессы, которые также зависят от структуры контактирующих поверхностей.

Диффузионные процессы сопровождаются диффузионным износом, под которым понимают износ инструмента при высоких температурах резания, происходящий за счет взаимной диффузии материалов инструмента и обрабатываемой детали. Интенсивность данного вида износа зависит от свойств контактирующих поверхностей.

Данный вид износа возникает в результате химических реакций окислительного или обменного характера между соединениями, входящими в состав инструментального и обрабатываемого материалов. Взаимное проникновение атомов и молекул осуществляется в результате различных транспортных механизмов, в том числе и за счет протекания отдельных видов износа, например, абразивного или окислительного.

Таким образом, можно предположить, что износостойкость режущих инструментов в значительной степени зависит от наличия и физико-механических свойств вторичных структур, формирующихся на контактирующих поверхностях в результате температурного воздействия.

Наиболее перспективным и используемым покрытием для металлорежущего инструмента для высокоскоростной обработки является композиционное износостойкое покрытие TiAlN , которое, в свою очередь, не требует использования смазочно-охлаждающих технологических сред. Указанное покрытие обладает более высокой термостойкостью, меньшим коэффициентом трения и высокой твердостью [2, 3], вязкостью разрушения, жаростойкостью [4] по сравнению с покрытием TiN .

Покрытия, нанесенные на режущие инструменты, позволяют увеличить его износостойкость за счет уменьшения силы трения, снижения деформации и силы резания [5, 6], изменения направления и интенсивности тепловых потоков, при этом повышение износостойкости инструмента с покрытиями также объясняется экранирующим эффектом контактных поверхностей от внешних воздействий [6].

Исследования [7, 8] свидетельствуют о том, что основное влияние на твердость покрытий, модуль упругости и другие физико-химические свойства оказывают такие параметры, как размер зерна, составляющие компонентов покрытия; температура подложки; способы нанесения и возможность образования аморфной фазы из нитридов.

На основе соотношения Холла-Петча к определению твердости нанокристаллических материалов возможно аналитически определить максимальное значение твердости [8].

В нанокристаллическом материале объемная доля границ зерен значительно преобладает по сравнению с обычным микрокристаллическим материалом. В случае кристаллического состояния общая твердость будет определяться от объемной доли границ и их зерен.

Исследованиями [1] было показано, что изменение энтропии за счет превращений в поверхностных слоях может быть как отрицательным, так и положительным. Отрицательное значение принимается при образовании структурных и фазовых составляющих, отсутствующих на диаграммах состояний или прохождения химических реакций с отрицательным химическим сродством. При образовании твердых растворов до насыщения или стехиометрических химических реакций, соответствующих равновесным диаграммам состояний.

В твердосплавных режущих инструментах с композиционными наноструктурными покрытиями на изменение энтропии влияет внедрение структурных элементов в основу инструмента. То есть происходит смешение покрытия с основой, что, в свою очередь, повлечет

уменьшение среднего размера зерна контактирующей поверхности и, как следствие, увеличение твердости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследования было определение структурных изменений, происходящих на поверхности твердого сплава ТТ8К6, происходящие при пластической деформации и повышенных температурах в контактной зоне.

Для экспериментальных исследований использовались быстросменные многогранные пластины из твердосплавного титантанталкобальтового соединения ТТ8К6, предварительно подвергнутого азотированию (для лучшей адгезии покрытия и подложки), и нанесенным на них покрытием (Ti, Al)N. Толщина покрытия была измерена на приборе *Calotest*. Толщина покрытия составила $h_{\text{покр}} = 6.124$ мкм.

Для определения возможного влияния атмосферы образцы отжигались при 700°C под давлением 0.5 ГПа в течение 20 минут в условиях окружающей среды.

На исследуемых поверхностях по методике [6] было выполнено измерение микротвердости по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере *Struers Duramin* при силе в 5 Н и при выдержке в течение 10 с.

Для исследования химического состава были изготовлены образцы в виде наклонных шлифов под углом 5° к верхней части исследуемых поверхностей, позволяющие увеличить ширину исследуемой области практически в десять раз. Предварительно образцы обезжиривались, затем помещались во внутрь подготовительные камеры спектрометра и подвергались 5-минутному травлению в среде ионов аргона. Травление осуществлялось под давлением газа в 10^{-4} Па и со скоростью травления порядка 20 монослоев в минуту. Такая подготовка образцов исключила воздействие случайного загрязнения на результаты анализа.

На следующем этапе исследований наклонные шлифы были рассмотрены с помощью растрового электронного микроскопа *Vega3* фирмы *Tescan* при ускоряющем напряжении 20 kV при увеличении 5000 крат. Изображения были получены с помощью детектора обратно отражен-

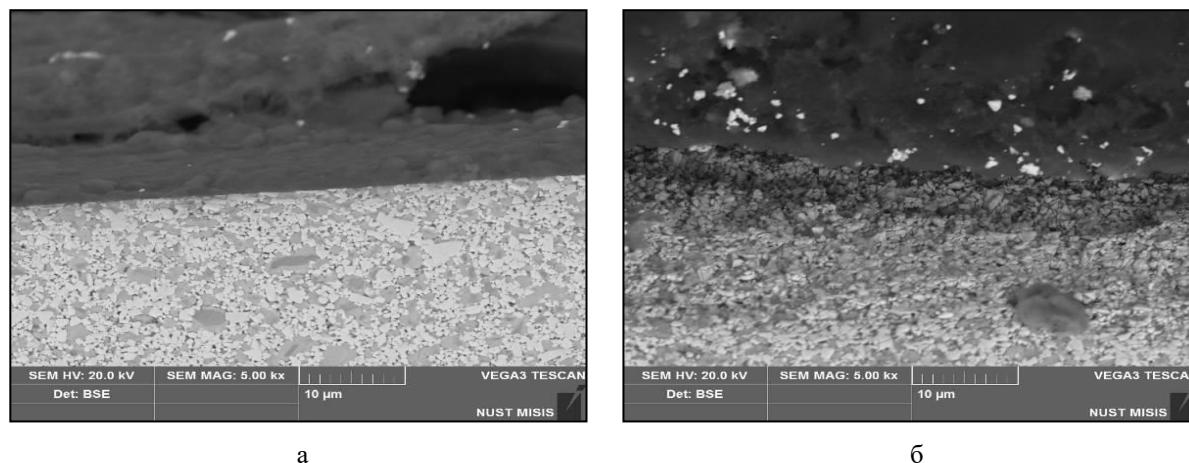


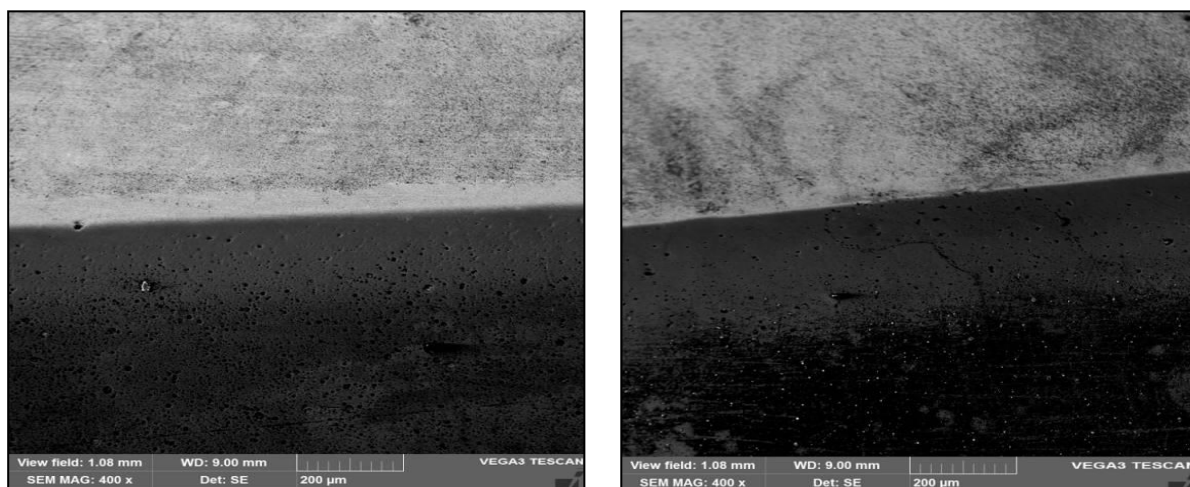
Рис. 1 Изображение шлифа (20 kV , BSE, увеличение 5000 крат):
а – исходный образец; б – отожженный образец

ных электронов (BSE – *backscattered electrons*), предназначенного для получения изображений с информацией о вариациях состава на основе контраста по атомному номеру. На рис. 1 представлены изображения исходного образца и отожженного.

Для исследования элементного состава использовался детектор отраженных электронов при увеличении в 400 крат. Отраженные электроны, детектируемые *Inlens*-детектором SE, практически не изменяют основной сигнал, создаваемый куда более мощным потоком вторичных электронов. На рис. 2 представлены изображения исходных образцов для количественного исследования элементов на поверхности образцов.

На рис. 2 а достаточно отчетливо видна область с более плотной светлой структурой.

Это азотированный слой, полученный перед нанесением покрытия. На рис. 2 б этот слой на некоторых участках отсутствует либо гораздо меньшей толщины по сравнению с исходным



а б
Рис. 2 Изображение шлифа (SE, увеличение 400 крат):
a – исходный образец; *b* – отожженный образец

образцом. Это, по-видимому, связано с диффузией азота в окружающую среду в процессе отжига либо произошли структурные изменения с образованием новых структурных составляющих.

Значения микротвердости получали на равном расстоянии от края покрытия на наклонном шлифе. Выполнялось 12 значений в области покрытия и еще 12 на таких же расстояниях в подложке. Были получены следующие средние значения микротвердости (рис. 3).

По полученным значениям микротвердости был построен график зависимости $HV=f(h_{res})$, согласно которому видно, что происходит скачок твердости на границе «покрытие–подложка» исходного образца (рис. 3). Предположительно, данный скачок наблюдается из-за повышенной концентрации азота. Твердость исследуемого образца постепенно выравнивается, но при этом значения выше твердости подложки. И по мере углубления в основу значение твердости приближается к твердости основы. Это связано со структурными изменениями, происходя-

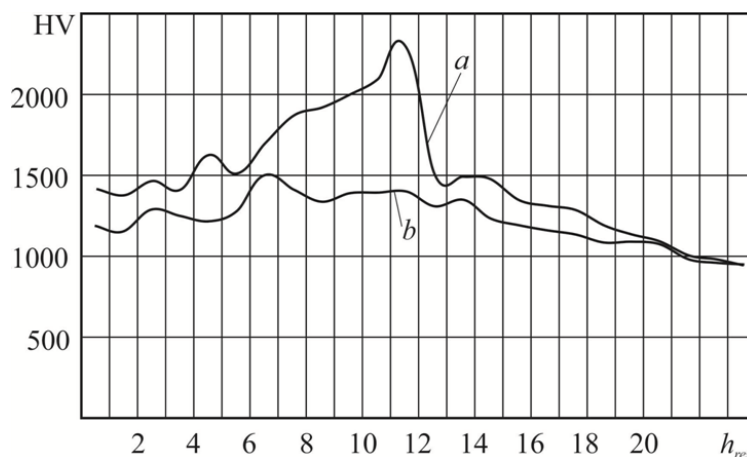


Рис. 3 Изменение микротвердости в зависимости от глубины измерения:
a – исходный образец; *b* – отожженный образец

щими на поверхности режущего инструмента благодаря внедрению структурных элементов

покрытия в подложку, которое приводит к уменьшению среднего значения структурной составляющей, приводящему к увеличению микротвердости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

во-первых – увеличение микротвердости в исходном образце на границе «покрытие–подложка» связано с высоким содержанием азота, полученного азотированием поверхности перед нанесением покрытия. Данный скачок твердости может являться концентратором напряжений или других внутренних факторов, которые могут привести к отслоению покрытия;

во-вторых – изменение твердости происходит за счет принудительного внедрения структурных элементов покрытия в приповерхностные слои инструмента, которое приводит к увеличению среднего значения твердости вновь образованных смешанных поверхностных слоев;

в-третьих – в процессе структурных изменений происходит снятие внутренних напряжений, приводящее к выравниванию свойств в поверхностных слоях;

в-четвертых – при 427°C происходит перестройка решетки кобальта от α -модификации к β -модификации, вследствие чего происходит изменение гексагональной кристаллической решетки в кубическую гранецентрированную. В свою очередь данный процесс является диффузионным процессом, что способствует проникновению покрытия в кобальтовую связку подложки. Это говорит о том, что перед возникновением диффузионных потоков в зоне термомеханического воздействия происходят структурные изменения на поверхности, а конкретнее – между покрытием и подложкой.

Необходимо отметить, что внедрение структурных элементов покрытия в основу увеличивает протяженность границ зерен, что оказывает существенное влияние на уменьшение глубины проникновения диффундирующих элементов из контактирующих изделий в основу.

Благодарности:

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мигранов М. Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе прогнозирования процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов: дис... д-ра техн. наук. М.: РУДН, 2007. 328 с. [M. Sh. Migranov. Improving the wear resistance of tools based on predicting processes of adaptation of friction surfaces during metal cutting. Dis. Dr. Techn. Sciences. Moscow, PFUR. 2007.]
2. Chu X., Barnett S. A., Wong M. S., Sproul W. D. Reactive unbalanced magnetron sputter deposition of polycrystalline TiN/NbN superlattice coatings // Surf. Coat. Technol. 1993. Vol. 57. P. 13–18. [X. Chu X., S. A. Barnett, M. S. Wong, W. D. Sproul. Reactive unbalanced magnetron sputter deposition of polycrystalline TiN/NbN superlattice coatings. Surf. Coat. Technol. 1993. Vol. 57. P. 13–18.]
3. Hovsepian P. E., Lewis D. B., Munz W. D. Recent progress in large scale manufacturing of multilayer/superlattice hard coatings // Surf. Coat. Technol. 2000. Vol. 133–134. Pp. 166–175. [P. E. Hovsepian, D. B. Lewis, W. D. Munz. Recent progress in large scale manufacturing of multilayer/superlattice hard coatings. Surf. Coat. Technol. 2000. Vol. 133–134. pp. 166–175.]
4. Кавалейро А. Мир материалов и технологий. Наноструктурные покрытия. М.: Техносфера, 2011. 298 с. [A. Cavaleiro. World of materials and technologies. Nanostructured coatings // A. Cavaleiro, D. de Hosson. M.: Tekhnosfera Publ., 2011. 298 p.]
5. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с. [A. S. Vereshchaka. Performance of cutting tools with wear-resistant coatings. M.: Mashinostroyeniye Publ., 1993. 336 p.]
6. Migranov M. Sh., Mukhamadeev V. R., Migranov A. M., Mukhamadeev I. R., Khazgalieva A. A. Structure and phase changes in nanostructured compound coatings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 447 (2018) 012082 doi:10.1088/1757-899X/447/1/012082 [M. Sh. Migranov, V. R. Mukhamadeev, A. M. Migranov, I. R. Mukhamadeev, A. A. Khazgalieva. Structure and phase changes in nanostructured compound coatings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 447 (2018) 012082 doi:10.1088/1757-899X/447/1/012082]
7. Maier J., Prill S., Reichert B. Space charge effects in polycrystalline, micropolycrystalline and thin film samples. Application to AgCl and AgBr, Solid state ionics. 1988. V. 28-30. Part. 2. Pp. 1465–1469. [J. Maier, S. Prill, B. Reichert. Space charge effects in polycrystalline, micropolycrystalline and thin film samples. Application to AgCl and AgBr, Solid state ionics. 1988. V. 28-30. Part. 2. pp. 1465–1469.]

8. Ovchinnikov S. V., et al. Thermal Stability of Nanostructured Superhard Coatings on the Basic of TiN // 9 Inter. Conference on Modification on Materials with Particles Beams and Plasma Flows. Eds. N. Koval, A. Ryabchikov, Tomsk. 2008. P. 472–478. [S. V. Ovchinnikov, et al., Thermal Stability of Nanostructured Superhard Coatings on the Basic of TiN, 9 Inter. Conference on Modification on Materials with Particles Beams and Plasma Flows. Eds. N. Koval, A. Ryabchikov, Tomsk, Russia. pp. 472–478. 2008.]

9. Mitterer C., Mayrhofer P. H., Musil J. Thermal stability of PVD hard coatings // Vacuum. 2005. Vol. 71. P. 279–284. [C. Mitterer, P.H. Mayrhofer, J. Musil, Thermal stability of PVD hard coatings, Vacuum. Vol. 71. pp. 279–284. 2005.]

ОБ АВТОРАХ:

МУХАМАДЕЕВ Тимур Венерович, студент кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, timur_muhamadeev@bk.ru

НАЗАРОВ Алмаз Юнирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, nazarov_almaz15@mail.ru.

МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, vener_muhamadeev@mail.ru.

METADATA:

Title: Structural changes on the surface of the TT8K6 alloy with a composite coating after thermomechanical exposure.

Author: T.V. Mukhamadeev ¹, A.Y. Nazarov ², V.R. Mukhamadeev ³

Affiliation:

¹⁻³ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia,

Email: ¹ timur_muhamadeev@bk.ru, ² nazarov_almaz15@mail.ru, ³ vener_muhamadeev@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (34), pp. 79-84, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: In this work, the Ti-Al system coatings are considered. The coatings were applied using the NNV 6.6-I1 unit, using two single-component cathodes. During the coating process, a mixture of nitrogen N₂ and acetylene C₂H₂ reaction gases was supplied to the chamber in the following ratios: 1:4, 2:3, 3:2, and 4:1. The microhardness of the samples was determined, and the values were compared with the microhardness of the uncoated and TiAlN-coated samples. It was found that the sample with a coating at the ratio of reaction gases N₂:C₂H₂=2:3 has the highest microhardness. In the next stage of research, the chemical composition of the front surface of the cutting tool was determined in detail using electron microscopy. After durability tests, it was determined that the most wear-resistant coating when cutting metals with the studied samples is the coating at the ratio of gases N₂:C₂H₂=4:1.

Key words: wear-resistant coatings, vacuum-arc deposition, cutting tool, cutting tests, hard alloy

MUKHAMADEEV Timur Venerovich, student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, timur_muhamadeev@bk.ru.

NAZAROV Almaz Yunirovich, Cand. Sci., Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, nazarov_almaz15@mail.ru.

MUKHAMADEEV Vener Rifkatovich, Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology, vener_muhamadeev@mail.ru.