

## ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПОСЛЕ ИОННОГО СМЕШИВАНИЯ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, аспирант

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2021

В работе представлены результаты исследования предлагаемого пути повышения износостойкости «дуплексных» покрытий, наносимых на режущие инструменты, за счет предварительного диффузионного насыщения поверхности инструмента азотом (известного как ионное азотирование) с последующим физическим осаждением твердого покрытия (Ti, Cr)N. Предлагаемое покрытие наносилось на инструмент из быстрорежущей стали, но перед этим на азотированную поверхность имплантировался слой с примесью ионов, а затем осаждалось твердое покрытие. В качестве дополнительного, переходного слоя использовали металл: Ti, Zr, W или Al в комбинации с тремя неметаллами: N, C, и O. На стадии процесса «триплекс»-обработки указанные ионы были имплантированы в поверхность подложки для создания модифицированного слоя. Для оценки влияния этих модифицированных слоев на период стойкости инструмента были проведены серии натуральных экспериментов при условиях лезвийной обработки резанием. Наилучшие результаты были достигнуты при «триплекс»-обработке с ионной имплантацией титана.

*Ключевые слова:* износостойкость, дуплексные покрытия, твердое покрытие, триботехнические характеристики, модифицированный слой, «триплекс» обработка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-28-39**

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–4], что металлорежущие инструменты, изготовленные из быстрорежущих сталей при лезвийной обработке резанием, в большинстве случаев подвергаются интенсивному износу (абразивному, адгезионному, диффузионному, окислительному и механическому), в отличие от твердосплавного инструмента. Для снижения интенсивности износа и увеличения периода стойкости быстрорежущего инструмента, а также с целью повышения эффективности металлообрабатывающего производства используют различные композиционные многослойные покрытия. Вследствие схватывания и образования нароста при взаимодействии инструмента с заготовкой происходит износ покрытия, что ведет к интенсификации процесса истирания и сопровождается быстрым возрастанием интенсивности износа самого инструмента [1, 5, 6]. Вместе с тем пути повышения эксплуатационных параметров покрытий на основе изменения объемных характеристик используемых материалов (высокие физико-механические свойства, низкая теплопроводность и т.д.) в большей степени исчерпаны. В этой связи актуально создание на поверхности износостойких покрытий (в тонких слоях) свойств, позволяющих повысить твердость, красностойкость, смазывающий эффект для продления стадии нормального трения и износа [7–10].

При разработке высокоэффективных покрытий для производства необходимо обеспечить рациональное сочетание их объемных и поверхностных свойств. Этого можно достигнуть, создавая на поверхности подложки инструмента в многослойном покрытии дополнительный искусственный подслой путем тройной обработки, включая ионное смешивание [11–15]. В целом такое износостойкое покрытие должно характеризоваться высокой прочностью и твердостью при повышенных температурно-силовых условиях обработки, обладать инертностью и физико-химическую устойчивость, трещиностойкостью при значительных динамических нагрузках и защитными и антифрикционными свойствами.

Целью работы являются теоретико-экспериментальные исследования контактных процессов при лезвийной обработке резанием режущим инструментом с «триплексным» покрытием после дополнительного улучшения ионной смесью.

### МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ

В настоящей работе «триплекс»-обработка выполнялась в три этапа. Методом тлеющего разряда азотировалась подложка инструментального материала. До нанесения твердого покрытия поверхность инструмента была модифицирована ионной смесью, и на модифицированный слой наносилось износостойкое покрытие (Ti, Cr)N методом физического осаждения (ФОП). В качестве подложки использовался инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 (0,8...0,88 % С; 5,0...5,5 % W; 5,0...5,5 % Mo; 3,8...4,2 % Cr; 1,7...2,1 % V; остальное – железо). В специальном устройстве с механической накачивающей системой, содержащей источник нагрева в виде тлеющего разряда и постоянных нагревательных элементов NSV 6/10-11, было произведено ионное азотирование подложки из инструментального материала. Обработка поверхности велась в смеси газов 25 % N<sub>2</sub> + 75 % H<sub>2</sub> (разложившийся аммиак) при температуре 500 °С и следующих технологических параметрах: давление газа 266 Па, время азотирования 0,5 ч, напряжение смещения 600 В, плотность тока тлеющего разряда 3 А×м<sup>-2</sup>.

На установке ННВ 6.6-II с механической и диффузионной накачивающей системой с помощью стандартной катодной дуги в процессе физического осаждения было получено твердое покрытие путем использования одного хромового и двух титановых катодов. Для обеспечения равномерности нанесения покрытия осуществлялось вращение образца в камере при соблюдении расстояния между катодом и образцом не более 200 мм. Технологические режимы нанесения твердого покрытия обеспечивались следующими значениями: температура осаждения 500 °С, плотность тока подложки около 15 А×м<sup>-2</sup>, напряжение смещения подложки 200 В, ток дугового разряда 100 А, давление реактивного газа (азота) 3×10<sup>-1</sup> Па.

Перед осаждением твердого покрытия осуществлялась модификация ионной смесью из пяти комбинаций различных элементов на высокоэнергетической ионной установке (ионном импланторе), оборудованной турбомолекулярной накачивающей системой с энергией ~ 40 кэВ при комнатной температуре. Были предварительно выбраны нитриды, карбиды и оксиды следующих металлов: Ti + N, W + N, Zr + N, W + C и Al + O. Именно эти комбинации обеспечивают высокие триботехнические свойства при создании тонких слоев с высокой износостойкостью. Для обеспечения эффективности модификации перед ионным миксингом пяти пар металлов и неметаллов было выполнено обязательное травление поверхности инструментов ионами аргона. При модификации использовались небольшие дозы до 8×10<sup>17</sup> ионов/см<sup>2</sup>. Расстояние между образцами и используемыми пластинами составляло около 10 мм. Плотность тока в этом случае составляла 50 мА/см<sup>2</sup>.

Результаты натуральных износостойкостных экспериментов представлены в таблице в виде относительного периода стойкости инструмента при резании как без применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), так и с СОТС. По результатам сравнения времени резания, необходимого для достижения определенного критического значения износа на инструментах с «триплексными» и «дуплексными» покрытиями, была подтверждена эффективность ионной модификации. Для обеспечения достоверности результатов проводили по восемь испытаний при лезвийной обработке резанием по каждой комбинации поверхностной модификации.

Значения относительного периода стойкости инструмента с триплексным покрытием

Элементы смешивания	Относительный период стойкости	
	без СОТС	с СОТС
AlO	3,0	–
TiN	4,0	2,5
ZrN	0,53	–
WN	0,4	–
WC	1,33	–

Триботехнические характеристики модифицированных триплексных покрытий исследовались на адгезионной установке, позволяющей моделировать контактные процессы, аналогичные процессам лезвийной обработки резанием, представленным в работе [3]. Вращающийся индентор из материала режущего инструмента после триплексной обработки устанавливается между двумя полированными образцами из обрабатываемого материала. Для обеспечения идентичности условиям механической обработки резанием поверхности образцов нагревали электроконтактным способом в диапазоне температур 150...500 °С с созданием пластического напряжения в области контакта путем приложения необходимой нагрузки.

Были проведены серии испытаний на нанотрибометре МТИ-3М с компьютерным управлением. Выполнялось нановдавливание поверхности модифицированного слоя для азотированного ионами образца из быстрорежущей стали и образца с дополнительной ионной смесью. Работа упруго-пластической деформации и микротвердость покрытий определялись с помощью данных по перемещению и нагрузке.

Исследование структурно-фазового состава твердого, дуплексного и триплексного покрытий, фазовый и химический составы модифицированных поверхностей, а также зоны износа и контакта режущего инструмента были исследованы посредством оже-электронной спектроскопии (ОЭС), вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и рентгеновской дифракции (XRD). Проведен анализ расширенной тонкой структуры электронных спектров потери энергии (EELFAS). Сканирующая спектроскопия (ОЭС) использовалась для анализа состава поверхности фаски износа на косом срезе поверхности режущего инструмента на различных стадиях износа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты натуральных экспериментальных исследований, представленные в таблице, показывают, что лучшая износостойкость после «триплексной» поверхностной обработки достигнута в ионно-модифицированном слое, содержащем Ti и N. Зависимости износа по задней поверхности от времени резания для режущего инструмента с «триплексным» покрытием представлены на рис. 1. Они показывают

влияние ионного смешивания на период стойкости режущего инструмента в исследуемых условиях резания. Рабочая температура находилась в пределах 600 °С. При использовании СОТС температура снижалась на 100 °С [2] с соответствующим увеличением периода стойкости инструмента.

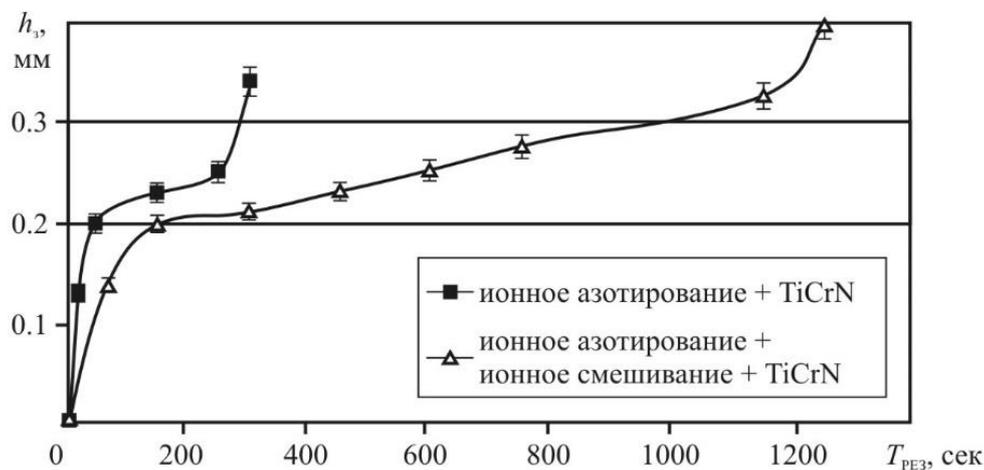


Рис. 1. Зависимость периода стойкости от износа инструмента  $h_3$

На рис. 2 и 3 представлены фазовый и химический составы модифицированного слоя по результатам ЭОС и ВИМС. Основные параметры ионного смешивания приведены на рис. 3а, где толщина имплантированного слоя определялась по линии элементного распределения данных Оже-спектра и составила около 1 мкм.

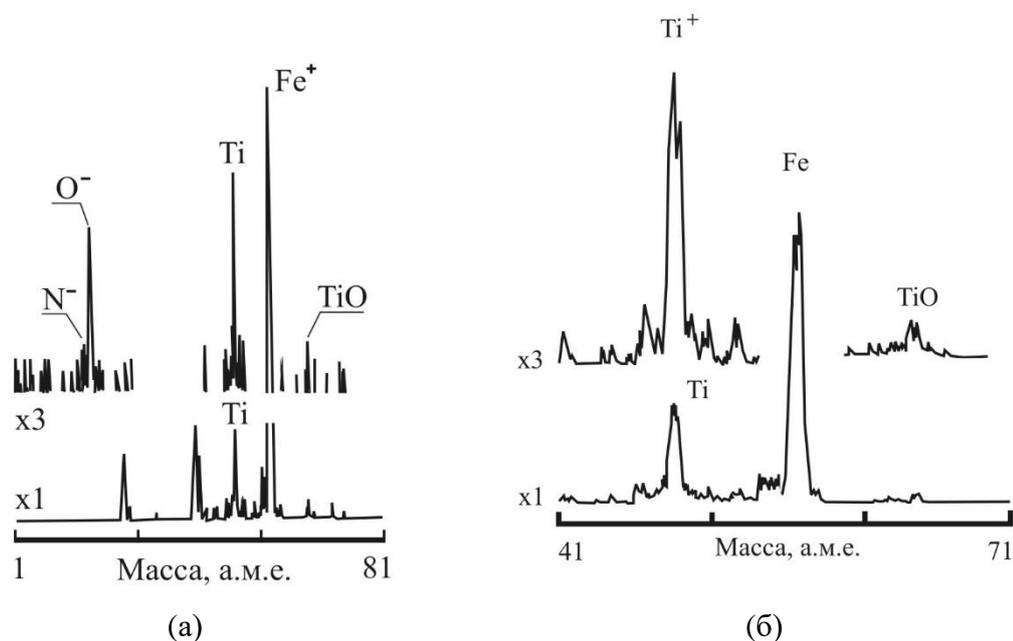


Рис. 2. Спектры ВИМС резца из быстрорежущей стали с «триплексным» покрытием при резании: спектры положительных ионов до работы (а) и после резания в течение 600 с (б)

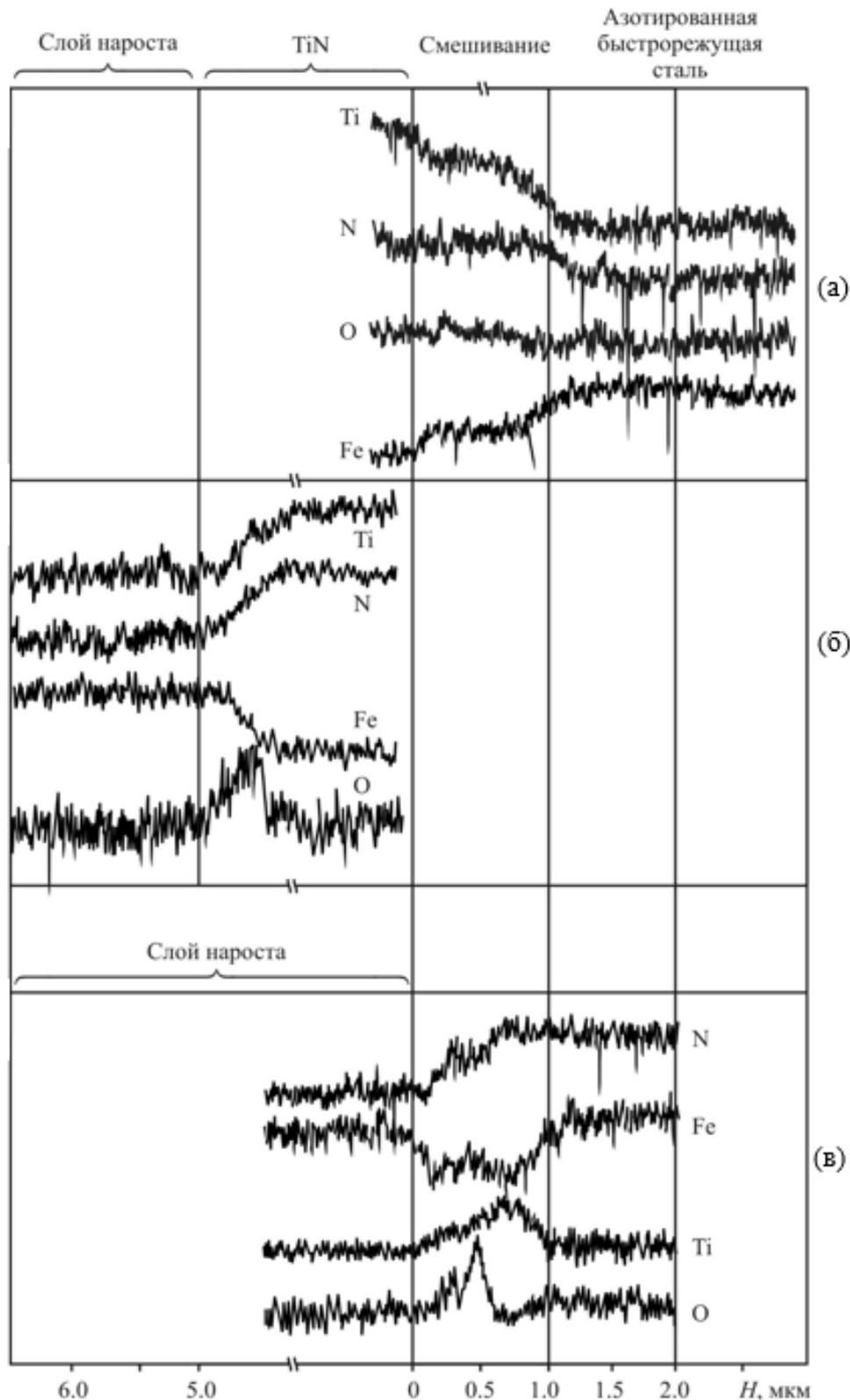


Рис. 3. Линейное распределение элементов по поверхности режущего инструмента и пленки. Оже-спектры: после ионного смешивания азотированной поверхности быстрорежущей стали до эксплуатации (а); поверхность слоя покрытия TiCrN после резания в течение 200 с (б); поверхность кратера износа после резания в течение 600 с (в)

Данные показывают, что твердый раствор азота в титане – это ионно-модифицированный слой (см. рис. 3а). Выявлено (см. рис. 2(а) и 3(а)) значительное количество кислорода на поверхности модифицированного слоя.

На рис. 4 представлены результаты исследования атомной структуры ионно-модифицированного слоя до ФОП-обработки после преобразования Фурье для данных, полученных в результате анализа методом EELFAS поверхности, ионно-модифицированной титаном и азотом. Преобразование Фурье содержит усредненную информацию о структуре ионно-модифицированного слоя после математической обработки электронного спектра. Для больших межатомных расстояний степень упорядоченности в кристаллической решетке мала, что доказывает наличие аморфных переходов в слое [13–15].

На рис. 5 показаны кривые зависимости смещения от нагрузки для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования и в случае ионного азотирования с ионно-смешанным слоем.

Исследование микротвердости, а также работы, связанной с упругой и пластической деформацией слоя, образованного при ионном смешивании, было выполнено с помощью метода нановдавливания.

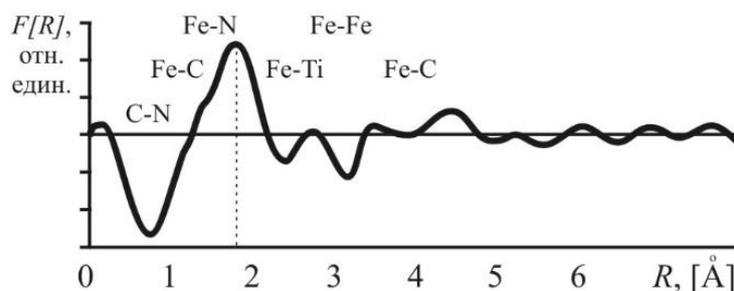


Рис. 4. Данные EELFS пиков обратно рассеянных электронов с поверхности ионно-смешанного слоя после преобразования Фурье

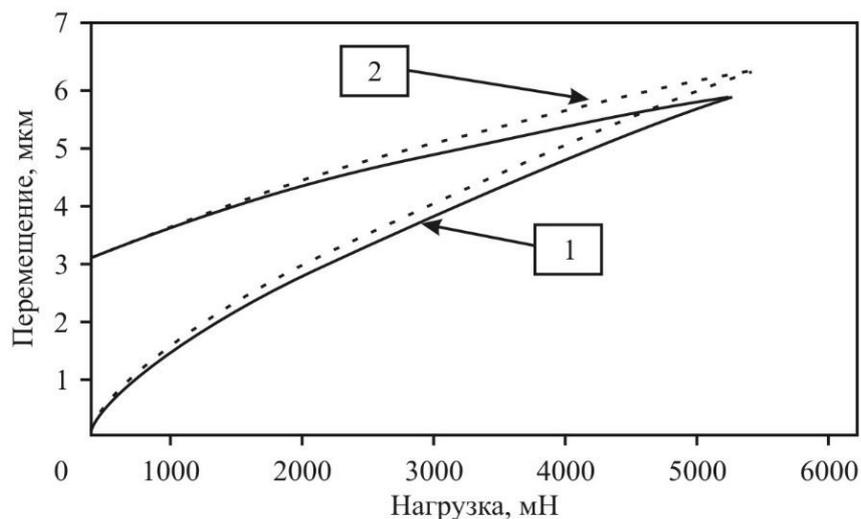
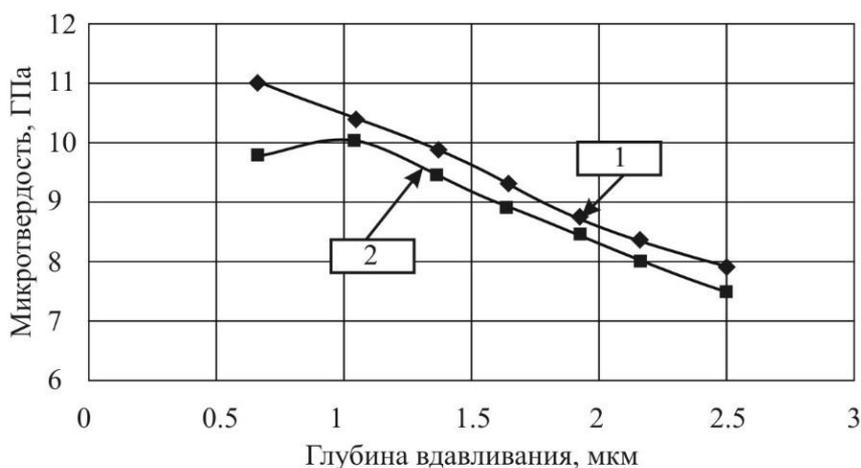
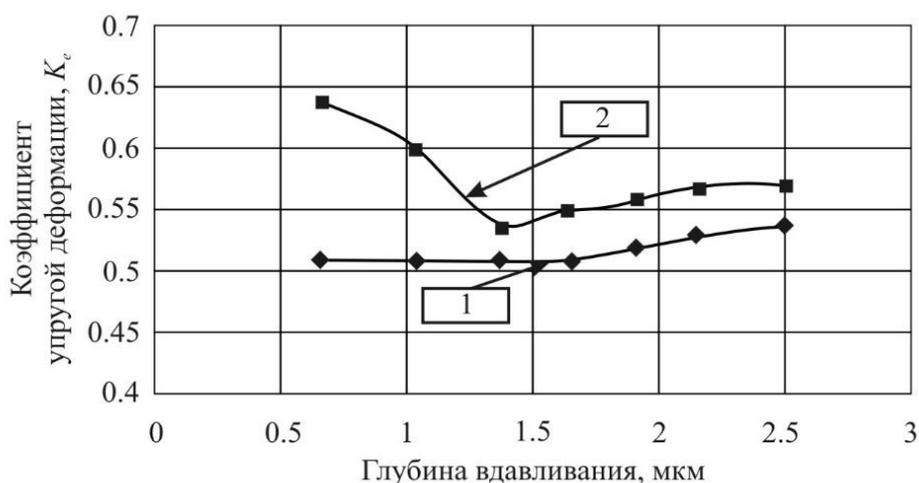


Рис. 5. Влияние нагрузки на перемещение образцов из быстрорежущей стали: 1 – после ионного азотирования; 2 – после ионного азотирования + ионное смешивание

Данные по микротвердости и коэффициенту  $K_e$  как отношению работы упругой деформации к полной работе индентации в зависимости от глубины вдавливания для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования и для ионного азотирования с ионно-смешанным поверхностным слоем представлены на рис. 6. Микротвердость слоя толщиной 1 мкм, модифицированного смесью ионов, имеет значение 9,8 ГПа, что ниже значения микротвердости для слоя, азотированного ионами, составляющего 11 ГПа. Однако имеется незначительное различие в микротвердости обоих образцов для больших глубин индентации (рис. 6а). На рис. 6б представлена зависимость коэффициента  $K_e$  от глубины индентации для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования с ионно-смешанным слоем и без него. Значение этого параметра существенно выше (до 0,64) на поверхности ионно-модифицированного слоя, с более низкой микротвердостью по сравнению со слоем после ионного азотирования более (0,5).



(а)



(б)

Рис. 6. Влияние глубины вдавливания на микротвердость (а) и коэффициент упругой деформации (б) для образцов из быстрорежущей стали: 1 – после ионного азотирования; 2 – после ионного азотирования + ионное смешивание

Ионное смешивание также снижает коэффициент трения (рис. 7). При этом для низких температур различие было более значительным, но и для реальных температур резания эта разница существенна.

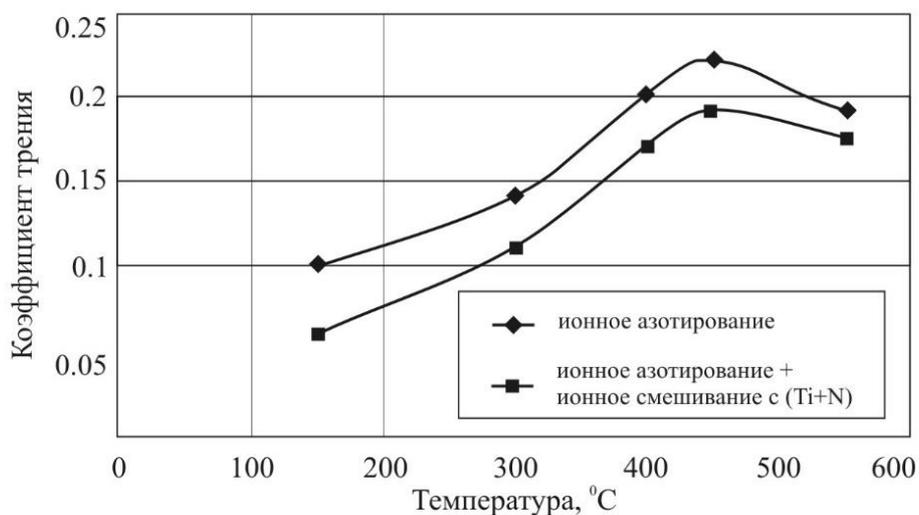


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от температуры для образцов с ионным азотированием и ионным азотированием + ионное смешивание

Ионное смешивание – это один из основных процессов, используемых для получения необходимых размеров и кристаллографической ориентации зерна в процессе формирования пленок [4, 12–15]. Процесс смешивания основан на добавлении нескольких элементов (в нашем случае Ti и N) в основу. Метастабильная фаза, которая в рассматриваемом случае с наибольшей вероятностью является твердым раствором азота в титане (см. рис. 3а), образуется на поверхности ионно-модифицированной подложки из быстрорежущей стали. Минимальный нагрев подложки при ионном смешивании необходим для образования поверхностного слоя с нанокристаллической структурой и, как в данном случае, с аморфноподобной структурой [9]. При ионном смешивании нагреваются формирующиеся пленки или поверхностные слои на атомном уровне, поэтому это явление называется нагревом на атомном уровне (НАУ) [8]. Такой нагрев вызван конденсацией напыленных атомов и последующим очень быстрым охлаждением на атомном уровне. Можно предположить, что образование аморфноподобных структур на поверхности подложки – результат процесса НАУ при жестких неравновесных условиях ионного смешивания.

Очень важно, что ионная модификация ведет к улучшению свойств модифицированного слоя поверхности. Аморфноподобная структура поверхностного слоя влияет на снижение коэффициента трения, что предотвращает интенсивное изнашивание инструмента. Этот слой, типичный для аморфноподобных структур при резании [9], имеет улучшенную способность накопления энергии упругой деформации (см. рис. 6), что снижает вероятность образования трещин. Улучшение данных параметров предотвращает интенсивное повреждение поверхности при переходе от нормальной стадии износа к катастрофической, однако это не является исчерпывающим объяснением причин существенного увеличения периода стойкости инструмента в результате ионного смешивания.

Данный вопрос необходимо рассмотреть с позиций трибологии и синергетики. Известно, что тонкие защитные пленки формируются на поверхности в результате

процесса «самоорганизации» при трении [5]. Детальное изучение таких трибопленок приведено в источниках [4, 8]. Защитные пленки перенасыщены твердыми растворами кислорода, который поступает из окружающей среды. Аморфноподобная структура может быть сформирована также в результате реакции с материалом инструмента. Эти типы Ti-O пленок образуются в верхних слоях поверхности исследуемого покрытия TiCrN, полученного методом ФОП (см. рис. 3(б)).

Начальная аморфноподобная структура поверхности, обнаруженная после ионного смешивания (см. рис. 4), похожа на структуру пленок, образованных на поверхности при трении. Быстрое образование защитных пленок наиболее вероятно при взаимодействии твердого покрытия с ионно-смешанным слоем при резании. Ионное смешивание улучшает процесс, который естественно протекает в трибосистеме в ходе самоорганизации и завершается формированием устойчивых защитных пленок. На конечной стадии процесса износа слоя, содержащего твердое ФОП-покрытие, т.е. приблизительно на 250-й отметке пути резания для «дуплексных» покрытий (см. рис. 1), кислород из окружающей среды проникает через многочисленные поры и достигает поверхности ионно-модифицированной подложки. Так как этот слой имеет очень высокую плотность точечных дефектов, реакция с кислородом происходит очень быстро (см. рис. 3(в)). Таким образом, когда твердое покрытие полностью изношено, защитные трибопленки уже содержатся в поверхностных слоях. Эти пленки задерживают переход к катастрофической стадии износа инструмента с тем, чтобы трибосистема снова могла вернуться к стабильному состоянию износа. (Результаты стабилизации скорости износа и продления эффективного периода стойкости (срока службы) инструмента показаны на рис. 1). Благодаря этим эффектам, период стойкости режущих инструментов из быстрорежущей стали, изготовленных по технологии «триплексного» покрытия, увеличился в 4 раза.

С точки зрения самоорганизации можно рассматривать как естественные процессы при трении, так и искусственные процессы, происходящие вследствие ионного смешивания. Поэтому управление искусственными процессами ионного смешивания, которые поддерживают эволюцию естественных процессов, имеющих место при трении, уменьшает скорость износа. Это типичное управление процессом трения с положительной обратной связью, которая значительно увеличивает период стойкости (срок службы) инструмента [4, 8, 12–15].

## ВЫВОДЫ

1. Многослойные покрытия, полученные после предварительного азотирования подложки инструментального материала с последующей ионной модификацией на высокоэнергетической установке и нанесением твердого покрытия, позволяют увеличить период стойкости инструмента в 3–4 раза.

2. Наилучшими триботехническими характеристиками и износостойкостью обладает «триплексное» покрытие с подложкой, содержащей ионную смесь (Ti + N).

3. Увеличение периода стойкости инструмента достигнуто при образовании ионно-модифицированным слоем аморфноподобной структуры, имеющей более низкий коэффициент трения, улучшенную способность накопления энергии упругой деформации, что предотвращает глубокое повреждение поверхности.

4. В процессе резания содержащий кислород трибопленки интенсивно развиваются на поверхности ионно-модифицированного слоя, защищая режущий инструмент от износа, что позволяет продлить устойчивую нормальную стадию износа и значительно увеличить период стойкости инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса механообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
3. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 99 с.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiya Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // *Wear*. 1997. V. 206. № 1–2, pp. 214–220.
5. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 326 с.
6. Vereschaka A.A., Miganov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research*. – *Trans Tech Publications Ltd*, 2014. V. 871, P. 159–163.
7. Vereschaka A., Miganov M., Vereschaka A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. № 20. С. 9282–9286.
8. Barsoum M.W., Yoo H.I., Polushina I.K., Rud V.Y., Rud Y.V., El-Raghy T. Electrical conductivity, thermopower, and hall effect of  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_4AlN_3$  and  $Ti_3SiC_2$  // *Physical Review B*. 2000. V. 62. № 15. P. 10194–10198.
9. Cui X., Zhao B., Jiao F., Zheng J. Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high-and ultra-high-speed milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 83. № 1–4. P. 55–65.
10. Saglam H., Yaldiz S., Unsacar F. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature // *Materials and Design*. 2007. V. 28. № 1. P. 101–111
11. Özel T., Hsu T.-K., Zeren E. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. V. 25. № 3–4. P. 262–269.
12. George M., Coupeau C., Colin J., Grilhe J. Mechanical behaviour of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation // *Acta Materialia*. 2005. V. 53. № 2. P. 411–417.
13. Marx V.M., Toth F., Wiesinger A., Berger J., Kirchlechner C., Cordill M.J., Fischer F.D., Rammerstorfer F.G., Dehm G. The influence of a brittle Cr interlayer on the deformation behavior of thin Cu films on flexible substrates: Experiment and mode // *Acta Materialia*. 2015. V. 89. P. 278–289.
14. Lee H.Y., Han J.G., Baeg S.H., Yang S.H. Structure and properties of WC-CrAlN superlattice films by cathodic arc ion plating process // *Thin solid films*. 2002. V. 420. P. 414–420.
15. Park J.-K., Baik Y.-J. The crystalline structure, hardness and thermal stability of AlN/CrN superlattice coating prepared by D.C. magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 200. № 5–6. P. 1519–1523.

**Для цитирования:** Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Износостойкие покрытия для режущего инструмента после ионного смешивания // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 28–39.

## **WEAR-RESISTANT COATINGS FOR CUTTING TOOLS AFTER IONIC MIXING**

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Postgraduate

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,  
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The paper presents the results of a study of the proposed way to increase the wear resistance of “duplex” coatings applied to cutting tools, which are due to preliminary diffusion saturation of the tool surface with nitrogen (known as ion nitriding) followed by physical deposition of a hard coating (Ti, Cr) N. The proposed coating was applied to a high-speed steel tool, but before that a layer with an impurity of ions was implanted on the nitrided surface, and then a hard coating was deposited. As an additional, transition layer, a metal was used: Ti, Zr, W and Al in combination with three non-metals N, C, and O. At the stage of the triplex-processing process, these ions were implanted into the surface of the substrate, creating a modified layer. To assess the effect of these modified layers on the tool life, a series of field experiments were carried out under the conditions of blade cutting. The best results were achieved with "triplex" treatment with titanium ion implantation.

*Keywords:* wear resistance, duplex coatings, hard coating, tribotechnical characteristics, modified layer, "triplex" treatment.

### **REFERENCES**

1. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiyami [Performance of cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 336 p.
2. Migrantov M.Sh., Shuster L.Sh. Intensifikatsiya protsessa mekhanooobrabotki na osnove ispolzovaniya efekta samoorganizatsii pri trenii [Intensification of the machining process based on the use of the effect of self-organization during friction]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005. 202 p.
3. Shuster L.Sh. Adgezionnoye vzaimodeystviye tverdykh metallicheskih tel [Adhesive interaction of solid metal bodies]. Ufa: Gilem, 1999. 99 p.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiyy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997. V. 206. No. 1–2, pp. 214–220.
5. Krioni N.K., Migrantov M.Sh. Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazheniy. [Coatings and greases for high temperature tribo conjugation]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 326 p.
6. Vereschaka A.A., Migrantov M.Sh. Study of wear resistance of sintered powder tool materials. *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*, 2014. V. 871, pp. 159–163.

7. Vereschaka A., Migranov M., Vereschaka A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. No. 20, pp. 9282–9286.
8. Barsoum M.W., Yoo H.I., Polushina I.K., Rud V.Y., Rud Y.V., El-Raghy T. Electrical conductivity, thermopower, and hall effect of  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_4AlN_3$  and  $Ti_3SiC_2$  *Physical Review B*. 2000. V. 62. No. 15, pp. 10194–10198.
9. Cui X., Zhao B., Jiao F., Zheng J. Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high-and ultra-high-speed milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 83. No. 1–4, pp. 55–65.
10. Saglam H., Yaldiz S., Unsacar F. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature. *Materials and Design*. 2007. V. 28. No. 1, pp. 101–111.
11. Özel T., Hsu T.-K., Zeren E. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. V. 25. No. 3–4, pp. 262–269.
12. George M.; Coupeau C.; Colin J.; Grilhe J. Mechanical behaviour of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation. *Acta Materialia*. 2005. V. 53. No. 2, pp. 411–417.
13. Marx V.M., Toth F., Wiesinger A., Berger J., Kirchlechner C., Cordill M.J., Fischer F.D., Rammerstorfer F.G., Dehm G. The influence of a brittle Cr interlayer on the deformation behavior of thin Cu films on flexible substrates: Experiment and mode. *Acta Materialia*. 2015, V. 89, pp. 278–289.
14. Lee H.Y., Han J.G., Baeg S.H., Yang S.H. Structure and properties of WC-CrAlN superlattice films by cathodic arc ion plating process. *Thin solid films*. 2002. V. 420, pp. 414–420.
15. Park J.-K., Baik Y.-J. The crystalline structure, hardness and thermal stability of AlN/CrN superlattice coating prepared by D.C. magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 200. No. 5–6, pp. 1519–1523.

Поступила в редакцию/received: 29.10.2020; после рецензирования/ revised: 2.12.2020;  
принята/accepted 15.12.2020