

П. В. Каплун¹, Е. Б. Сорока²*, А. В. Снозик¹

¹Хмельницкий национальный университет,

г. Хмельницкий, Украина

²Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко

НАН Украины, г. Киев, Украина

*rym40a@gmail.com

Влияние безводородного ионного азотирования на физико-механические и эксплуатационные характеристики твердых сплавов Т5К10, Т15К6

Показано, что ионное азотирование твердых сплавов в безводородной среде приводит к увеличению до 20,1 ГПа среднего значения микротвердости и возрастанию на 15 % разрушающей нагрузки при консольном изгибе. При точении сталей азотированными пластинами коэффициент трения и сила резания уменьшаются до 10 % от их значений до азотирования, интенсивность изнашивания снижается в 2 раза. Эффективность азотирования подтверждена производственными испытаниями при чистой и черновой обработке.

***Ключевые слова:** безводородное ионное азотирование, твердый сплав, микротвердость, консольный изгиб, сила резания, термо-ЭДС, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.*

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность процесса металлообработки деталей в значительной степени зависит от ресурса режущего инструмента. Обеспечение гарантированного ресурса твердосплавных пластин является основой надежной работы автоматизированных и гибких производственных систем. Получить инструментальные материалы с комплексом необходимых характеристик можно с помощью технологий модификации, позволяющих управлять дефектностью и прочностью рабочих поверхностей режущего инструмента [1]. Эффективность применения того или иного вида модификации зависит от условий работы инструмента. Наибольшее распространение на практике получила модификация поверхности, основанная на физическом осаждении покрытий, в частности PVD-покрытий. Такие покрытия значительно повышают работоспособность твердосплавной пластины, когда ее выход из строя обусловлен износом рабочих поверхностей. Развитие технологии PVD позволяет создавать покрытия различной архитектуры: многослойные и многокомпонентные, градиентные, покрытия дискретного типа, что позволяет обеспечить функциональные и прочностные характеристики в системе твердосплавная основа–покрытие [2–5]. Вместе с тем создание покрытий сложной архитектуры усложняет и делает более дорогим процесс их формирования. Кроме того, полученные авторами [6] результаты показывают, что твердосплавный инструмент с PVD-покрытием столбчатой структуры снижает со-

противление режущей кромки твердосплавной пластины локальному нагружению при скальвании. В условиях, когда значительная часть отказов инструмента обусловлена хрупким разрушением режущей части твердосплавной пластины, которое проявляется в выкрашивании режущих кромок и скальвании режущей части (черновая обработка, обработка на тяжелых станках), необходимы методы модификации, приводящие как к уменьшению разброса объемной и локальной прочности, так и к повышению этих характеристик твердого сплава. В литературе существуют отдельные данные о влиянии обработки импульсным магнитным полем (ОИМП) на твердость и износостойкость твердосплавных пластин [7, 8]. Также получены результаты, показывающие, что при модификации твердых сплавов Т5К10 и Т15К6 методом ОИМП предел прочности на изгиб при статическом нагружении возрастает до 27 % от его значения до модификации сплавов, увеличивается сопротивление локальному нагружению кромки, при испытаниях резцов методом “ломающей подачи” наблюдается повышение периода стойкости к разрушению на 17 % [9]. Применение этого метода сдерживается отсутствием результатов оценки влияния режимов ОИМП на изменение комплекса свойств сплавов различных составов.

Проблема создания и развития доступного метода модификации поверхности твердого сплава, который обеспечит повышение износостойкости, локальной и объемной прочности, является актуальной задачей.

Известно газовое азотирование твердых сплавов, которое проводят при температуре 1273–1473 К в атмосфере азота или азотно-водородной смеси. В [10] сообщается, что после двух-трехчасового насыщения микротвердость увеличивается на 2000–3000 МПа, толщина упрочненного слоя при этом составляет от 3 до 50 мкм, износостойкость повышается в 5 раз. Авторы [11] проводили газовое азотирование в среде N:CO₂:H₂. После такой обработки снижаются усилия резания (на 10–15 %) и коэффициент трения (до 5 %), на 25–30 % повышается износостойкость режущих пластин Т5К10 и Т15К6. Однако методы печного газового азотирования имеют ряд недостатков, связанных с большой продолжительностью процесса, значительным расходом энергии и газов, охрупчиванием острых кромок, малым диапазоном управления физико-механическими свойствами азотированного слоя.

К числу перспективных технологий упрочнения металлических материалов относится азотирование в тлеющем разряде (ионное азотирование), успешно применяемое в Украине и за рубежом. Процесс ионного азотирования позволяет создать диффузионные покрытия с широким комплексом свойств, обеспечивающим повышение прочности, износостойкости и других эксплуатационных характеристик металлических материалов [12–15]. В [16] изложены результаты исследования образцов и режущих пластин из твердых сплавов Т14К8 и Т15К6 после ионного азотирования на установке НГВ 6.6/6-И1 в среде аммиака. Отмечается следующее изменение микротвердости HV_{100} : увеличение на 7 % при температуре азотирования до 873 К и уменьшение на 3 % при температуре процесса 1073 К, что, на наш взгляд, находится в пределах разброса данных. Сообщается об увеличении до 27 % предела прочности на изгиб при испытании твердосплавных штабиков размером 5×5×35 мм. При торцевом точении стали ОС наблюдали уменьшение в 2 раза коэффициента трения, в 2–3 раза снижался линейный износ по передней и задней поверхности режущей твердосплавной пластины. При этом глубина модифицированного слоя после ионного азотирования при температуре 813 К, в зависимости от длительности, составляла от 3 до 7 мкм. Вызывают сомнения данные, свя-

занные с уменьшением от 24 до 70 % модуля нормальной упругости азотированных пластин.

Более эффективным технологическим процессом поверхностного упрочнения является метод ионного азотирования в безводородных средах, который достаточно хорошо изучен и получил широкое промышленное применение для модификации металлических материалов [17, 18]. В отличие от широко распространенного процесса ионного азотирования в водородсодержащих средах, он не вызывает разупрочнения основы, обусловленного вредным влиянием водорода на металл, уменьшается расход электроэнергии и газа, сокращается время азотирования, отсутствие токсичного аммиака делает этот метод экологически безопасным.

Развитию и обоснованию применения ионного азотирования в безводородных средах для модификации рабочих поверхностей твердосплавных пластин посвящены работы [19, 20]. Показаны принципиальные отличия механизма влияния ионного азотирования на структуру поверхностных слоев металлических материалов и твердого сплава. В результате микроструктурных исследований, проведенных методами металлографического, рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализов, установлено, что, в отличие от азотированных сталей и других конструкционных металлических материалов, в азотированном твердом сплаве отсутствуют нитридные фазы. Методом оже-спектроскопии удалось выявить азот в несвязанном состоянии. Сделан вывод о том, что в результате ионного азотирования твердого сплава образуется пересыщенный твердый раствор азота в кобальтовой связке. Установлено, что глубина модифицированного слоя твердого сплава Т5К10 составляет ~ 50 мкм.

Таким образом, на основании анализа состояния проблемы эксплуатационной стойкости твердосплавных режущих пластин, установлено, что ионное азотирование в безводородных насыщающих средах является перспективным способом повышения их износостойкости: повышает физико-механические характеристики твердого сплава, исключает разупрочнение металла водородом и проблему адгезионной прочности покрытия с подложкой, обеспечивает значительную глубину модифицированного слоя. К тому же данный способ является экономичным и экологически чистым.

Цель настоящего исследования – определение влияния ионного азотирования в безводородной среде на физико-механические и трибологические характеристики твердых сплавов, а также на эксплуатационные характеристики твердосплавных режущих пластин.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали пластины и образцы из твердых сплавов Т5К10 и Т15К6 в исходном и модифицированном ионным азотированием состояниях.

Упрочнение твердосплавных пластин проводили на специально разработанной и изготовленной установке ионного азотирования для осуществления технологических процессов в безводородных средах [18]. Рабочим газом была смесь азота и аргона. Режимы азотирования в насыщающей среде были выбраны на основе результатов [19] и представлены в табл. 1.

Для исследования микротвердости твердосплавных неперетачиваемых пластин Т5К10 в исходном и азотированном состоянии использовали прибор ПМТ-3. Значение нагрузки на пирамиду составляло 1 Н, продолжительность выдержки – 5 с. С учетом неоднородности твердосплавного материала количество уколов составляло не менее 10.

Таблица 1. Режимы безводородного азотирования твердых сплавов

Марка твердого сплава	Параметры технологического процесса			
	T, K	$p, Па$	$\tau, мин$	$C_{Ar}, \%$
T5K10, T15K6	610	220	166	30

Изучение влияния азотирования на прочностные характеристики твердого сплава осуществляли согласно методике [21] при испытаниях неперетачиваемых режущих пластин из сплава T5K10 по схеме консольного изгиба (рис. 1).

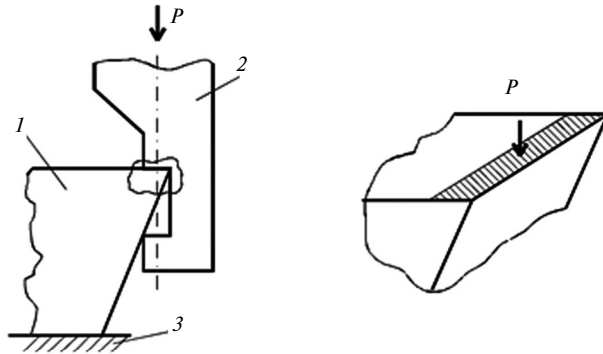


Рис. 1. Схема консольного изгиба неперетачиваемых режущих пластин: 1 – нагружающий элемент; 2 – режущая пластина; 3 – опора.

Испытания и регистрация характеристик прочности пластин проводили на установке ИР-5057-50. Испытаны партии пластин в исходном и модифицированном состоянии. Количество образцов в каждой партии составляло 10 штук, скорость нагружения – 0,7 мм/мин. В качестве сравнительного критерия прочности принято предельное значение разрушающей нагрузки P_{max} , которое фиксировали при помощи тензометрического динамометра.

Для подтверждения изменения физико-механических характеристик азотированного твердого сплава использовали метод неразрушающего контроля, заключающийся в регистрации и обработке сигналов акустической эмиссии (АЭ) с момента начала нагружения пластины до определенного уровня нагрузки, заведомо меньшей разрушающей, с применением комплекса акустической эмиссии [22]. Прием сигналов АЭ осуществляли с помощью пластины-волновода с установленными на ней пьезоэлектрическими датчиками АЭ. Волновод закрепляли в специально разработанном устройстве, и он имел непосредственный контакт с верхней поверхностью испытуемой пластинки через слой акустической смазки. В качестве информативных параметров АЭ выбраны средняя амплитуда сигналов A и суммарное количество n сигналов за период анализа.

Влияние азотирования на силу резания, коэффициент трения и среднюю температуру в зоне контакта обрабатываемого материала с инструментом исследовали при обработке на токарном станке мод. 1К62 без СОТС неперетачиваемыми пластинами из сплава T15K6 заготовок из сталей 45, 40X и 03X18H10T. Режимы резания: подача $f = 0,2$ мм/об, глубина резания $t = 1$ мм, диапазон скоростей резания $v = 60-240$ м/мин. Составляющие силы резания P_x, P_y, P_z измеряли динамометром УДМ-100.

Средний коэффициент трения по передней поверхности μ_1 находили из зависимости

$$\mu_1 = \frac{F_1}{N_1}, \quad (1)$$

где F_1 и N_1 – тангенциальная и нормальная силы по передней поверхности пластины, которые вычислены с использованием системы уравнений, полученных на основе экспериментально измеренных P_x , P_y , P_z и переднего угла γ [23]:

$$F_1 = \left(\sqrt{P_x^2 + P_y^2} + (P_z - F_2) \operatorname{tg} \gamma - N_2 \right) \cos \gamma; \quad (2)$$

$$N_1 = \left(\frac{P_z - F_2}{\operatorname{tg} \gamma} + N_2 - \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \right) \sin \gamma. \quad (3)$$

Здесь F_2 и N_2 – тангенциальная и нормальная силы по задней поверхности пластины, которые определяли методом экстраполяции зависимости сил резания от глубины резания на нулевой срез [24].

Для изучения влияния азотирования на изменения температуры в зоне фрикционного контакта инструмент–деталь использовали метод натуральной термопары. Электронный милливольтметр типа Щ 4313 подключали одним проводником к режущей пластине, другим, через медный токосъемник, – к поверхности заготовки и с точностью 0,1 мВ регистрировали термо-ЭДС, которая характеризовала среднюю температуру в зоне контакта.

Кривые износа получены при токарной обработке пластинами Т15К6 в исходном и азотированном состоянии стали 40Х на станке 1К62. Режимы резания $f = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $v = 120$ м/мин, $\gamma = 13^\circ$, без СОТС. Для анализа выбрана величина фаски износа по задней поверхности h_f . Интенсивность изнашивания I определяли на стадии приработки и на стадии установившегося изнашивания по формуле

$$I = \frac{\Delta h_f}{\Delta t v}, \quad (4)$$

где Δh_f – прирост величины линейного износа за время Δt .

Исследования исходных и модифицированных твердосплавных пластин Т5К10 в производственных условиях ПАО “Укрэлектроаппарат”, г. Хмельницкий проведены при чистовой ($v = 175$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $\gamma = 13^\circ$) проточке фланца (материал – сталь 30) на токарном станке с ЧПУ модели ТК20. Критерий износостойкости – максимально возможное количество качественно обработанных однотипных деталей на одну пластину. В условиях ПО “АДВИС”, г. Хмельницкий, на токарном полуавтомате мод. 1Б265-6 проведены испытания пластин Т5К10 при черновом точении поковки из стали 35Х2ГСМА ($v = 60$ м/мин, $s = 1,2$ мм/об, $t = 3$ мм, $\gamma = 13^\circ$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов измерений микротвердости пластин Т5К10 показал уменьшение разброса величины H_{100} для пластин, модифицированных ионным азотированием (минимальные и максимальные значения H_{100} для пластин в исходном состоянии составляли 12,2 и 19,8 ГПа, а для пластин после азотирования 18,4 и 22,6 ГПа). Среднее значение микротвердости модифицированных пластин составило 20,1 ГПа, что на 25 % выше микротвердости пластин в исходном состоянии (в отличие от металлических материалов, когда азотирование приводит к кратному увеличению твердости, что связано с

тем, что при азотировании твердых сплавов нитриды не образуются). Важно отметить уменьшение разброса результатов, в первую очередь, за счет увеличения минимальных значений твердости, что свидетельствует об уменьшении поверхностной дефектности твердого сплава.

Результаты статистической обработки данных испытаний на прочность твердосплавных режущих пластин в условиях консольного изгиба для исходной и модифицированной групп инструментов представлены в табл. 2. Показано, что уровень средней разрушающей нагрузки P_{\max} для модифицированных пластин возрастает на 15 %, а разброс значений уменьшается.

Таблица 2. Результаты испытаний пластин из сплава Т5К10 в условиях консольного изгиба

Пластина Т5К10	P_{\max} , Н	Дисперсия $S^2_{P_{\max}}$	Средняя амплитуда сигналов АЭ А, мкВ при нагрузке P, Н			Суммарное количество сигналов АЭ n при нагрузке P, Н		
			800	1000	1200	800	1000	1200
Исходное состояние	1813	540	2160	1944	2190	6,6	8	13,2
Азотированная	2079	445	1188	1158	1200	13,1	15,9	19
Относительное изменение параметра, %								
	+15	–	–45	–40	–45	+98	+99	+44

Обработка данных АЭ при испытаниях прочности выявила различия в характере излучения сигналов в группах исходных и азотированных пластин. Для модифицированных пластин наблюдали уменьшение средней амплитуды сигналов на 45, 40 и 45 % при трех используемых уровнях нагрузки. Суммарное количество сигналов за периоды анализа возросло на 98, 99 и 44 % соответственно. Полученные результаты можно объяснить тем, что азотирование в тлеющем разряде и ионная бомбардировка, как его важная составляющая, вызывают активацию атомов поверхностных слоев, дополнительные перемещения этих атомов в результате взаимодействия с бомбардирующими атомами рабочего газа, что приводит к залечиванию поверхностных дефектов. С точки зрения дислокационной теории, атомы азота создают энергетические барьеры на пути перемещения дислокаций. Именно эти изменения в микроструктуре вызывают увеличение количества сигналов АЭ, как следствие поверхностной активации твердого сплава, и значительное уменьшение амплитуды сигналов в результате связывания дислокаций и создания дополнительных препятствий на пути их перемещения. Эти изменения, а также наличие напряжений сжатия в поверхностном слое объясняют рост прочности твердого сплава.

Зависимости составляющей силы резания P_z , термо-ЭДС ϵ и коэффициента трения μ от скорости резания при обработке заготовки из стали 45 режущими пластинами из сплава Т15К6 в исходном и модифицированном состоянии представлены на рис. 2.

Анализ полученных результатов показал, что значения всех трех исследуемых величин: силы резания, термо-ЭДС и коэффициента трения при обработке стали 45 азотированной пластиной уменьшаются для всех скоростей резания. Благодаря снижению температуры контакта при обработке азотированным инструментом диапазон стабилизации зависимости $P_z = f(v)$ сдвигается вправо по оси абсцисс, что свидетельствует о повышении оптимальной

скорости резания. С увеличением скорости резания возрастает разность между коэффициентами трения при обработке пластиной в исходном и азотированном состояниях. Точение заготовок из стали 40X и стали 03X18N10T со скоростью резания 120 и 100 м/мин также показало снижение величин P_x , P_y , P_z , μ и ϵ (табл. 3). Полученные результаты очевидно можно объяснить тем, что наличие несвязанного в соединения азота приводит к образованию адсорбционных слоев, кроме того, часть атомов азота замещается активными атомами кислорода, что обеспечивает условия для образования вторичных структур.

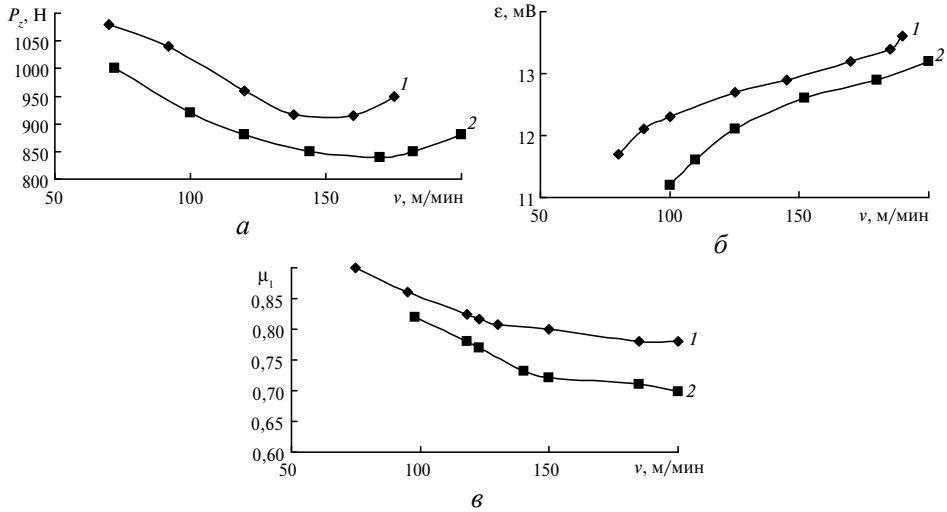


Рис. 2. Зависимости составляющей силы резания P_z (а), термо-ЭДС ϵ (б) и коэффициента трения μ (в) от скорости резания заготовки из стали 45 пластиной из сплава Т15К6: 1 – в исходном состоянии; 2 – после азотирования.

Таблица 3. Влияние азотирования на характеристики процесса резания при обработке сталей твердосплавными пластинами Т15К6

Обрабатываемый материал	Состояние пластины	v , м/мин	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	μ	ϵ , мВ
Сталь 45	исходное	130	330	450	930	0,82	12,8
	модифицированное	130	300	390	860	0,75	12,2
40X	исходное	120	380	520	1200	0,80	18,5
	модифицированное	120	360	450	1100	0,74	18,2
03X18N10T	исходное	100	350	410	820	0,92	12,0
	модифицированное	100	320	370	750	0,87	11,8

Анализ кривых износа, полученных при точении стали 40X, показал существенное уменьшение величины износа, как на стадии приработки, так и на стадии установившегося износа (рис. 3). Установлено, что интенсивность изнашивания 1 пластин в исходном и модифицированном состоянии на ста-

дии уставившегося износа снижается от $I = 0,26 \cdot 10^{-4}$ для пластин в исходном состоянии до $I = 0,116 \cdot 10^{-4}$ для азотированных пластин.

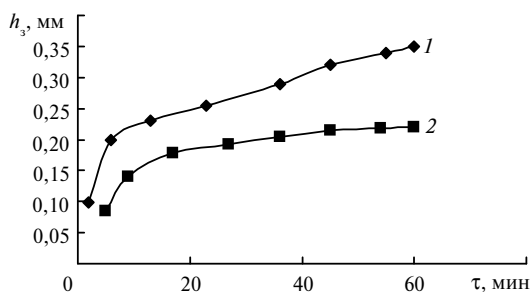


Рис. 3. Кривые износа твердосплавных пластин Т15К6 при обработке стали 40Х ($f = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $v = 120$ м/мин): 1 – исходное состояние; 2 – после азотирования.

Нужно отметить, что внешний вид изношенных участков пластин в исходном и модифицированном состояниях принципиально отличается (рис. 4). Для пластин в исходном состоянии контактный участок имеет явно выраженный неоднородный характер, а для азотированных пластин характерен ровный край в области отрыва стружки от инструмента.

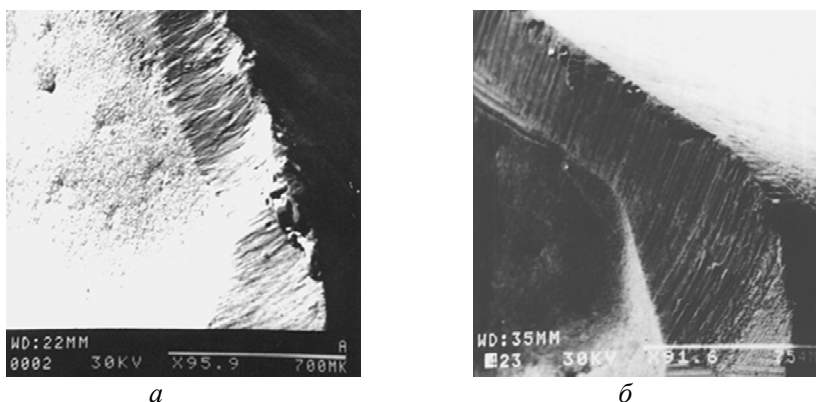


Рис. 4. Вид изношенных участков пластин Т15К6 в исходном состоянии (а) и после азотирования (б) при обработке стали 40Х ($f = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $v = 120$ м/мин).

Испытания, проведенные в условиях серийного производства при чистовом точении стали 30 показали увеличение периода стойкости (определяемого количеством обработанных деталей) азотированных пластин из сплава Т5К10 в 2,6 раза по сравнению с пластинами в исходном состоянии.

В условиях черногого точения ступицы из стали 35Х2ГСМА трехгранной неперетачиваемой пластиной в исходном состоянии выход из строя пластины был связан с ее поломкой, исключающей дальнейшее использование пластины. В 50 % случаев полная поломка происходила при обработке первой гранью, в остальных случаях пластины разрушались при точении второй гранью. Применение модифицированных пластин позволило полностью исключить отказы в результате поломок. Все девять азотированных пластин использованы полностью, причиной отказа был износ, для двух пластин из девяти наблюдали скол при точении одной из граней.

ВЫВОДЫ

Создание в результате азотирования фазы твердого раствора азота в кобальтовой связке способствует повышению ее микротвердости. Для азотированного твердого сплава значения H_{100} достигают 20–22,6 ГПа, уменьшается их разброс за счет увеличения минимальных значений на 50 % при увеличении среднего значения на 25 %.

Уменьшается разброс значений разрушающей нагрузки и на 15 % возрастает средняя величина разрушающей нагрузки при консольном изгибе модифицированных пластин Т15К6 по сравнению с пластинами в исходном состоянии. Зарегистрировано уменьшение до 45 % средней амплитуды сигналов акустической эмиссии при консольном изгибе азотированных пластин с момента начала нагружения до определенного уровня нагрузки, заведомо меньшей разрушающей, и возрастание до 99 % суммарного количества сигналов за периоды анализа по сравнению с необработанными пластинами.

Установлено, что азотирование приводит к изменению условий контакта и характеристик резания при обработке различных сталей твердосплавными пластинами из Т5К10: средний коэффициент трения и сила резания снижаются до 10 %, за счет снижения температуры в зоне контакта инструмент–деталь на 20 % повышается оптимальная скорость резания. При точении стали 40Х модифицированными пластинами уменьшается износ пластин как на стадии приработки, так и на стадии установившегося износа. Интенсивность изнашивания пластин на стадии установившегося износа снижается более чем в 2 раза.

В результате производственных испытаний установлено увеличение стойкости при чистовом точении стали 30 по технологическому критерию: количество деталей с заданной чистотой обработки поверхности и точностью размеров возросло в 2,6 раза при обработке инструментом, оснащенном азотированными пластинами Т5К10, по сравнению с инструментом, оснащенным пластинами в исходном состоянии. При черновом точении стали 35Х2ГСМА азотирование позволило полностью исключить поломку режущих пластин. Количество обработанных деталей при этом возросло почти в 4 раза.

Низкая себестоимость и экологическая чистота ионного азотирования твердых сплавов в безводородных средах, а также улучшение в результате данного метода модификации комплекса физико-механических, трибологических, эксплуатационных характеристик твердых сплавов и твердосплавных режущих пластин позволяют рассматривать данный метод модификации как перспективный для пластин, предназначенных для различных условий и видов обработки.

Показано, що іонне азотування твердих сплавів у безводневому середовищі приводить до збільшення до 20,1 ГПа середнього значення микротвердості і зростання на 15 % руйнівного навантаження при консольному згині. При точінні сталей азотованими пластинами коефіцієнт тертя і сила різання зменшуються до 10 % від їх значення до азотування, інтенсивність зношування знижується в 2 рази. Ефективність азотування підтверджена виробничими випробуваннями в умовах чистової й чорнової обробки.

Ключові слова: безводнє іонне азотування, твердий сплав, микротвердість, консольний згин, сила різання, термо-ЕРС, коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування.

Ion nitriding of hard alloys in a non-hydrogen medium leads to increase to 20.1 GPa of the average microhardness, rise in the breaking load by 15% under cantilever bending. When processing steels with nitrided plates, the coefficient of friction and cutting force are reduced to 10%, the wear rate decreases by a factor of 2. The effectiveness of nitriding is confirmed by production tests under finishing and roughing.

Keywords: hydrogen free ion nitriding, hard alloy, microhardness, cantilever bending, cutting force, thermo-electromotive force, friction coefficient, wear rate.

1. Лошак М. Г. Упрочнение твердых сплавов – К.: Наук. думка, 1977. – 148 с.
2. Верещака А. С., Карпушевски Б., Дюбнер Л. Г. Анализ основных аспектов проблемы применения многослойно-композиционных наноструктурированных функциональных покрытий для режущего инструмента // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – Вип. 2. – С. 87–100.
3. Береснев В. М. Принципи створення іонно-плазмових багатокомпонентних багатофункціональних покриттів з високими експлуатаційними властивостями: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харків, 2006. – 32 с.
4. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H. G., et al. The architecture and performance of multilayer and compositionally gradient coatings made by cathodic arc evaporation // Surf. Coat. Technol. – 1993. – **61**, N 1–3. – P. 209–214.
5. Soroka E., Lyashenko B., Qiao Shengru et al. Tribological behaviour and cutting performance of PVD-TiN coating/substrate system with discontinuous surface architecture // Rare Metal Mater. Eng. – 2011. – **40**, N 4. – P. 580–0584.
6. Родічев Ю., Сорока О., Майборода В. Міцність та пошкоджуваність різальних кромок твердосплавних пластин при локальному навантаженні // Матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ, 2015. – С. 236–239.
7. Козлюк А. Ю., Овчаренко А. Г., Курепин М. О. Обоснование схемы комбинированной магнитно-импульсной обработки твердосплавного режущего инструмента // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1. – С. 131–134.
8. Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю., Курепин М. О. Повышение износостойкости пластин из твердого сплава // Обработка металлов. – 2010. – № 2. – С. 13–15.
9. Сорока О., Родічев Ю., Ковальов В., Васильченко Я. Зміцнення твердосплавного різального інструменту для важкого машинобудування на основі поверхневої та об'ємної модифікації фізичними методами // Вісник ТНТУ. – 2013. – **71**, № 3. – С. 143–145.
10. Takase Takao. Современные тенденции развития технологии поверхностного упрочнения (Current trends in the development of surface hardening technology) // Kinzoku Zairyo (Metals in Engineering). – 1977. – **17**, N 5. – P. 6–11.
11. А. с. 1044676 СССР, МКИ C23C 11/14. Способ газового азотирования твердосплавных пластин / Г. С. Овсяян. – Опубл. 30.09.83, Бюл. № 36.
12. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
13. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. – М.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
14. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Структура и прочность азотированных сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
15. Коган Я. Д. Структура и прочность азотированных сплавов // Новые методы химико-термической обработки в машиностроении. – М.: МАДИ, 1982. – С. 11–13.
16. Свиденко Е. В. Повышение эксплуатационных свойств титановольфрамowych твердых сплавов с использованием технологии высокоэнергетической обработки: Дис. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 2016. – 174 с.
17. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах: Дис. ... д-ра техн. наук. – Хмельницький, 1990. – 541 с.
18. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – 318 с.
19. Каплун В. Г., Пастух І. М., Снозик О. В. Оптимізація параметрів режиму іонного азотування твердосплавного інструменту // Проблеми сучасного машинобудування: 36. наук. пр. – Хмельницький: ТУП, 1996. – С. 104–106.
20. Пат. на винахід 23328 А Україна, МКВ C23C8/36. Спосіб хіміко-термічної обробки твердосплавних пластин / В. Г. Каплун, О. В. Снозик. – Опубл. 31.08.98, Бюл. № 4.
21. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
22. Ройзман В. П., Ковтун І. І. Програмно-апаратний комплекс акустичної емісії // Вимірювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 1. – С. 33.
23. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
24. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.

Поступила 19.09.17
После доработки 07.06.18
Принята к публикации 07.06.18