

П. В. Каплун¹, Е. Б. Сорока^{2,*}, 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 , К | p , Па | τ , 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).

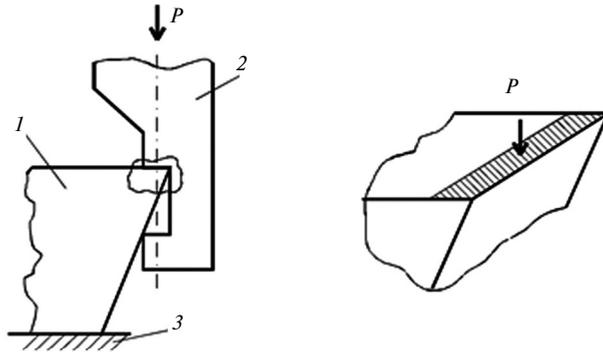


Рис. 1. Схема консольного изгиба неперетачиваемых режущих пластин: 1 – нагружающий элемент; 2 – режущая пластина; 3 – опора.

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.

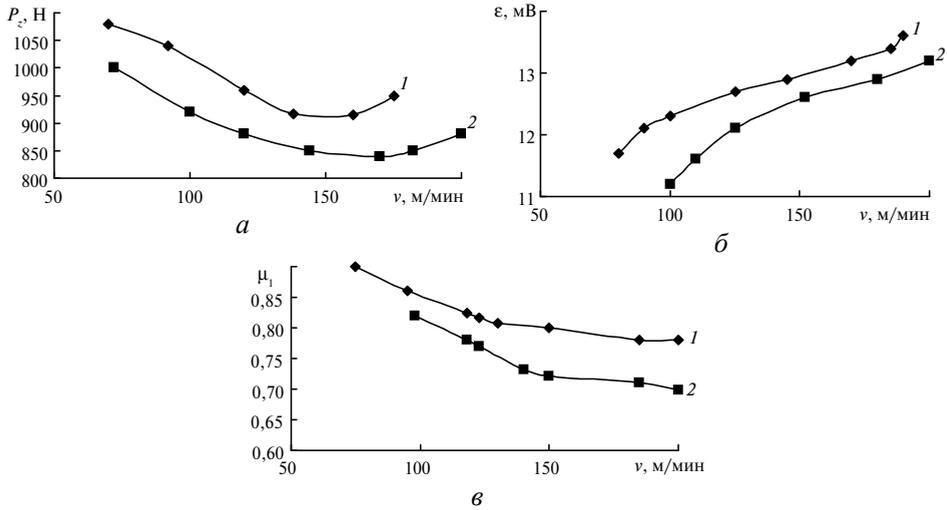


Рис. 2. Зависимости составляющей силы резания P_z (а), термо-ЭДС ϵ (б) и коэффициента трения μ (в) от скорости резания заготовки из стали 45 пластиной из сплава Т15К6: 1 – в исходном состоянии; 2 – после азотирования.

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 I 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.

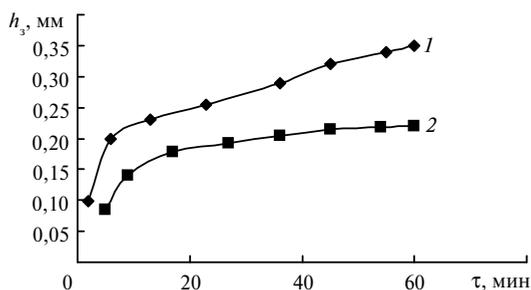


Рис. 3. Кривые износа твердосплавных пластин Т15К6 при обработке стали 40Х ($f = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $v = 120$ м/мин): 1 – исходное состояние; 2 – после азотирования.

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.

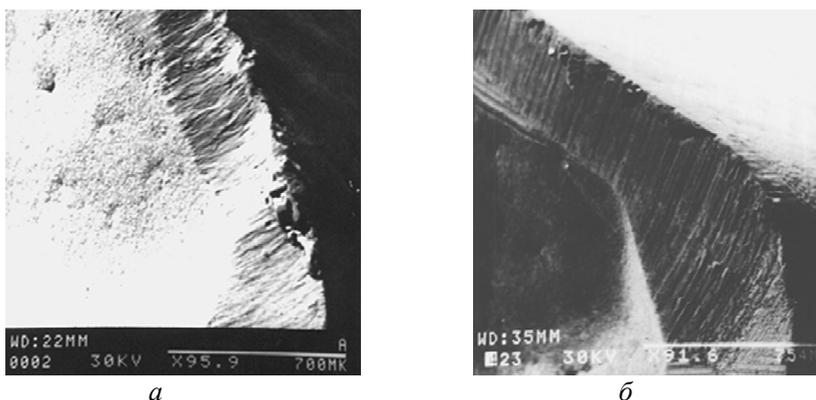


Рис. 4. Вид изношенных участков пластин Т15К6 в исходном состоянии (а) и после азотирования (б) при обработке стали 40Х ($f = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $v = 120$ м/мин).

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 уставившегося 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 титановольфрамовых 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