

**Таблица 4 – Цветовые компоненты покрытий  $Ti_xN_yC_z$  в зависимости от расхода  $N_2$  и  $C_2H_2$**

$F_{N_2}$ , sccm.	$f_{C_2H_2}$ , sccm.	+a	+b
27,0	4,1	2,1	27,3
26,5	5,0	4,7	27,0
23,5	8,0	8,8	19,8
23,3	8,3	4,9	19,2
23,1	8,4	2,8	18,9
22,7	9,0	3,2	17,4
22,5	9,4	3,9	16,5
22,4	9,5	3,5	15,6

Нанесение декоративно-защитных покрытий с помощью вакуумных ионно-плазменных (вакуумно-дугового и магнетронного) методов напыления находит все более широкое распространение благодаря высокому качеству получаемых декоративно-защитных плёнок и экологической чистоте производства, что особенно важно в современных условиях производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://5ka.ru>.
2. <http://nitridtitana.ru>.
3. <http://www.plasma.megamir.ru>
4. <http://www.plasmacentre.ru>

УДК 621.7/9.048.7

*Котов С.Ю., Беляев Г.Я.*

### ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В процессе работы режущий инструмент (РИ) подвергается частичному или полному износу. Существует ряд технологических способов обработки рабочей поверхности, направленных на ее упрочнение, наиболее прогрессивным и эффективным из которых является метод нанесения на поверхность инструмента покрытий из твердых соединений.

Износостойкое покрытие (ИП) – слой материала (как правило, химического соединения тугоплавких металлов) на поверхности инструментальной основы, который отличается по своим кристаллохимическим, физико-механическим и теплофизическим свойствам от соответствующих свойств основы. Назначение ИП – повышение периода стойкости РИ путем увеличения микротвердости, коррозионной стойкости и термодинамической устойчивости поверхностного слоя, а также снижения фрикционного взаимодействия РИ и обрабатываемого материала.

Широкое промышленное использование РИ с износостойкими покрытиями позволяет решать целый комплекс следующих вопросов:

- значительно повышать период стойкости и надежность РИ;
- увеличивать производительность процессов обработки резанием;
- сократить удельный расход дорогостоящих инструментальных материалов и дефицитных элементов (вольфрам, молибден, тантал, кобальт) для их изготовления;
- расширить область использования твердых сплавов и сократить номенклатуру применяемых сплавов стандартных марок;
- повысить качество поверхностного слоя и точность размеров обработанных деталей.

Нанесение ИП на инструментальные материалы позволяет приблизиться к решению задачи создания “идеального” инструментального материала, обладающего высокой износостойкостью поверхностного слоя в сочетании с достаточной прочностью и вязкостью основы. Инструмент с ИП удовлетворяет самым высоким требованиям работоспособности и надежности, а также качества и производительности обработки резанием.

Процессы физического осаждения покрытий (ФОП) обычно включают вакуумное испарение тугоплавкого металла – образователя соединения покрытия, его частичную или полную ионизацию, подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию покрытия на рабочих поверхностях РИ.

Среди методов ФОП наибольшее распространение в нашей стране получил метод конденсации ИП из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности РИ (метод КИБ). Разработаны и применяются также методы ионного плакирования и ионизированного реактивного напыления (“Спатерин”), магнетронно-ионного распыления (метод МИР) и другие (ионное плакирование, метод реактивного электронно-лучевого плазменного осаждения покрытий из пароплазменной фазы в вакууме (РЭП), активированного реактивного напыления (ARE)) [2].

Метод катодно-ионной бомбардировки (КИБ) основан на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода. Подача в вакуумное пространство реагирующих газов (азота, метана и др.) в условиях ионной бомбардировки приводит к конденсации покрытия на поверхности РИ благодаря протеканию плазмохимических реакций [1].

Все процессы испарения, образования соединений, ионной бомбардировки и конденсации ИП происходят в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. Катод изготавливают из тугоплавкого материала, подлежащего испарению. Особенность метода КИБ заключается в ускорении ионов вещества путем создания отрицательного заряда (относительно корпуса камеры) на режущем инструменте. Характерная особенность метода КИБ – это высокая химическая активность испаряющегося материала, обусловленная образованием конденсата при электродуговом испарении материала катода, за счет которого конденсат преобразуется в высоко ионизированный поток низкотемпературной плазмы.

Процесс КИБ можно представить в виде двух последовательно протекающих процессов:

- ионной бомбардировки, предназначенной для термомеханической активации, залечивания дефектов и очистки поверхности основы ионами испаряемого электрода, ускоренными до энергии (1–3) кэВ;
- собственно конденсации покрытия.

Для регулирования физических характеристик и скорости плазменного потока, а также для достижения больших плотностей ионного потока используют специальные плазмооптические устройства. С целью отсеивания капельной фазы ионного потока применяются сепараторы плазменного потока.

Важное преимущество метода КИБ – низкий температурный режим процесса, что позволяет наносить ИП как на твердосплавный, так и на быстрорежущий РИ.

За счет варьирования технологических параметров конденсации можно изменять свойства ИП. Например, микротвердость можно изменять в пределах 21–36 ГПа и выше, что позволяет наносить многослойные комбинированные ИП с чередующимися слоями различной твердости, или ИП с равномерно изменяющейся твердостью. Это дает возможность обеспечить оптимальное сочетание износостойкости, прочности и трещиностойкости ИП для различных условий работы РИ.

Качество ИП КИБ зависит в значительной степени от состояния поверхностей инструмента. При наличии загрязнений в результате локального газовыделения между РИ и корпусом камеры возникают микродуги, искажается газовый состав в камере. Поэтому необходима тщательная очистка РИ, подлежащего упрочнению [1]. Процесс подготовки РИ перед нанесением ИП состоит в шлифовании и доводке с получением шероховатости поверхности не выше Ra 0,32, удалении загрязнений и обезжиривании путем промывки в бензине или растворах моющих средств с использованием ультразвуковой мойки и сушке сжатым воздухом [1].

В настоящее время применяются одно- и многослойные ИП не только на основе карбидов, нитридов и карбонитридов титана, но также на основе аналогичных соединений других тугоплавких металлов (Hf, Nb, Ta, Cr, Zr, Mo) и их композиций (TiZrN, TiAlCN, TiMoN, TiAlN, TiMoCN и др.).

Совершенствование ИП направлено по пути создания сложных многокомпонентных покрытий и многослойных покрытий, включающих слои как простого, так и сложного состава. Данные типы ИП обладают высокими физико-механическими свойствами (микротвердостью, трещиностойкостью и др.), прочностью сцепления с инструментальной основой и обеспечивают высокую работоспособность РИ. Многослойные покрытия (МП) позволяют наиболее полно учесть условия процесса резания, поэтому при конструировании таких покрытий используются результаты анализа механизма износа и разрушения поверхностей РИ.

Так, потеря работоспособности торцовых фрез с ИП при фрезеровании заготовок из конструкционных углеродистых сталей обусловлена разрушением ИП в результате образования в нем трещин. Причиной возникновения такого рода трещин являются переменные тепловые нагрузки, возникающие при чередовании рабочего и холостого ходов режущего инструмента (РИ). Для повышения работоспособности торцовых фрез применяют многослойные покрытия, эффективность которых выше по сравнению с однослойными. Эффективность МП может быть повышена за счет увеличения их трещиностойкости и прочности адгезионной связи с инструментальной основой. Трещиностойкость можно повысить за счет создания барьеров на пути движения трещин в виде дополнительных границ МП, а также трещиностойкости отдельных его слоев. На основе анализа механизма разрушения МП в процессе резания и положений теории разрушения твердых тел разработана конструкция трехслойного покрытия с чередующимися по твердости слоями – «мягкие» верхний и нижний слои и промежуточный «твердый» слой, которая обеспечивает благоприятное напряженное состояние на границах отдельных слоев покрытия и на границе с инструментальной основой при движении через них трещин. При этом промежуточный слой должен иметь не только большую твердость по сравнению с выше- и нижележащими слоями, но и для эффективного торможения трещин должен обладать высокой трещиностойкостью.

В качестве промежуточного твердого слоя в МП целесообразно использовать покрытие TiZrN. Верхним слоем может служить нитрид титана TiN, который обеспечивает наибольшее снижение контактной температуры и наименьшую амплитуду ее колебания за время рабочего и холостого ходов РИ; в качестве нижнего – карбонитрид титана TiCN, имеющий высокий уровень сжимающих остаточных напряжений. Таким образом, конструкция МП для условий прерывистого резания имеет вид TiCN-TiZrN-TiN.

Конструкция МП, то есть общая толщина и толщина составляющих слоев, оказывает влияние на его механические свойства: микротвердость, прочность сцепления с инструментальной основой и трещиностойкость.

Наиболее существенное влияние на микротвердость оказывает толщина промежуточного слоя TiZrN. При этом наибольшее его влияние имеет место для МП толщиной 4,5 мкм, для МП толщиной 6 мкм оно менее заметно, а для МП толщиной 7,5 мкм наименее существенно. Повышение толщины слоя TiCN также ведет к увеличению микротвердости, но влияние его меньше, чем влияние слоя TiZrN. Снижение влияния твердых слоев TiZrN и TiCN на микротвердость с ростом общей толщины МП вероятно связано с одновременным увеличением толщины верхнего более мягкого слоя TiN, микротвердость которого существенно меньше по сравнению с промежуточным и нижним слоями МП.

Максимальная величина микротвердости имеет место для МП толщиной 4,5 и 6,0 мкм при толщинах слоя TiZrN равных соответственно (55 – 44) % и (55 – 33) % и слоя TiCN соответственно (22 – 33) % и (25 – 42) % от общей толщины; для МП толщиной 7,5 мкм – при толщине слоев TiZrN и TiCN соответственно 40 % и (27 – 40) %. Повышение микротвердости трехслойных покрытий по сравнению с двухслойным TiCN-TiN составило (13,5 – 16,5) % в зависимости от конструкции МП (максимальные значения величины микротвердости для трехслойных МП 38,7 – 39,6 ГПа, для двухслойного покрытия TiCN-TiN – 34,1 ГПа).

Прочность сцепления покрытия с подложкой характеризуется коэффициентом отслоения и коэффициентом трещиностойкости.

Коэффициент отслоения ( $K_0$ ) используют для оценки прочности сцепления ИП с инструментальной основой. При определении коэффициента  $K_0$  используют метод алмазного индентирования на твердомере (например, твердомер ТК-2М) образцов с ИП. Коэффициент  $K_0$  рассчитывают по формуле:

$$K_0 = S_0/S_L,$$

где  $S_0$  – площадь отслоения ИП вокруг лунки от индентора;  $S_L$  – площадь лунки от индентора.

Наибольшее влияние на коэффициент отслоения оказывает толщина нижнего слоя TiCN. При этом данное влияние зависит от соотношения толщины данного слоя с промежуточным слоем TiZrN и верхним TiN. Причем в целом варьирование толщины TiCN приводит к изменению коэффициента отслоения на (41 – 260) % (коэффициента отслоения изменяется в пределах от 0,21 до 0,55). Подобная закономерность в различной степени наблюдается для всех толщин МП, а наибольшее влияние слоя TiCN и соотношения его толщины с промежуточным слоем TiZrN имеет место при общей толщине МП 6 мкм. Зависимости коэффициента отслоения от толщины слоев МП имеют экстремальный характер, а минимум данных зависимостей наблюдается при толщине слоя TiCN в пределах 1,5 – 2,5 мкм в зависимости от общей толщины МП.

Наименьший коэффициент отслоения и, следовательно, наибольшая прочность сцепления с инструментальной основой имеет место для МП толщиной 4,5 мкм ( $K_0 = 0,22$ ) при толщинах нижнего TiCN и промежуточного TiZrN слоев, равных (33 – 44) % от общей толщины МП; для МП толщиной 6 мкм ( $K_0 = 0,21$ ) – соответственно 33 % и (33 – 42) %; для МП толщиной 7,5 мкм ( $K_0 = 0,29$ ) толщины этих слоев должны быть в пределах 27 – 40 %.

Трещиностойкость МП можно оценить по коэффициенту трещиностойкости КТР, который определяют отношением:

$$K_{TP} = S_0/S_{PO},$$

где  $S_0$  – площадь отслоения (разрушения покрытия);  $S_{PO}$  – площадь «потенциально возможного отслоения» (площадь многоугольника, проведенного по вершинам радиальных трещин за вычетом площади лунки).

Наибольшее влияние на износостойкость РИ с МП оказывает толщина слоя TiZrN. При этом изменение интенсивности износа в зависимости от толщины TiZrN составляет от 5,8 до 28,5 % для МП различной общей толщины. Влияние толщины слоя TiN на интенсивность износа РИ также существенно.

Так, при фрезеровании со скоростью резания  $v = 247$  м/мин и подачей  $S_z = 0,4$  мм/зуб для МП толщиной 6 мкм варьирование толщины данного слоя в пределах 1 – 3 мкм приводит к изменению интенсивности износа на 23 %, а минимальный износ в этом случае имеет место при толщине слоя TiN примерно 1,5– 2 мкм.

Микротвердость  $H_\mu$ , ГПа определяют методом индентирования алмазной пирамидой с квадратным основанием (пирамида Виккерса) или с ромбическим основанием (пирамида Кнупа) на микротвердомере (например, ПМТ-3). Глубина внедрения индентора при этом составляет менее 1 – 1,5 мкм (при рекомендуемых значениях нагрузки). Микротвердость по Виккерсу определяют по формуле:

$$H_\mu = 1,854 \cdot P / d^2,$$

где  $P$  – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику;  $d$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей квадратного отпечатка.

Экстремальный характер зависимостей интенсивности износа от толщин слоев МП объясняется сочетанием их механических свойств. В частности, покрытия, обладающие высокими микротвердостью, прочностью сцепления с инструментальной основой и трещиностойкостью, имеют низкую интенсивность износа. Например, МП общей толщиной 6 мкм со слоями по 2 мкм имеет наибольшую микротвердость ( $H_\mu = 38,7$  ГПа), наименьшие коэффициенты отслоения ( $K_0 = 0,21$ ) и трещиностойкости ( $K_{TP} = 0,29$ ) и, соответственно, наименьшую интен-

сивность износа при фрезеровании с высокой скоростью резания. Для данных МП характерно снижение интенсивности износа по сравнению с РИ с базовым покрытием TiCN-TiN в 1,56 – 1,65 раза, а по сравнению с однослойным покрытием TiN – в 2,83 – 2,98 раза.

При фрезеровании со скоростью резания  $v = 157$  м/мин и подачей  $SZ = 0,25$  мм/зуб тепловая напряженность процесса резания ниже – меньше максимум контактных температур по сравнению с предыдущим рассмотренным режимом и более равномерно их распределение по длине контакта. В этих условиях наименьшую интенсивность износа по задней поверхности имеют МП общей толщиной 4,5 мкм с соотношением толщин слоев (по отношению к общей толщине МП) – 33 % для TiCN, (33 – 44) % для TiZrN и (33 – 22) % для TiN. Большая эффективность МП толщиной 4,5 мкм на данном режиме резания объясняется иным механизмом разрушения покрытия. При резании на низкой скорости резания интенсивность процессов трещинообразования снижается, и в разрушении покрытия превалируют адгезионно-усталостные процессы, которым лучше сопротивляются более тонкие покрытия. Снижение интенсивности процессов разрушения «тонких» МП способствует и более высокая прочность их сцепления с инструментальной основой по сравнению с МП большой толщины. Интенсивность износа РИ с данными покрытиями ниже по сравнению с базовым двухслойным покрытием в 1,43 раза, а по сравнению с однослойным покрытием TiN – в 2,55 раза.

Подводя итог всему вышесказанному, следует отметить, что наиболее благоприятное сочетание микротвердости и прочности сцепления с инструментальной основой способствует повышению работоспособности режущего инструмента с покрытием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://5ka.ru>.
2. <http://nitridtitana.ru>.
3. <http://www.plasma.megamir.ru>.
4. <http://www.plasmacentre.ru>

УДК 621.94.084

*Кривко Г.П., Калинин Е.Ю., Лобашевич М.Л., Кулик А.Ю.*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ МЕТОДОМ ППД ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Оценка качества обработки деталей чаще всего производится по шероховатости и волнистости поверхности.

При проведении исследований процесса ППД детали "Борт направляющий" оценка микрогеометрии поверхностного слоя после ППД предполагала измерение шероховатости и волнистости поверхности. Измерение шероховатости поверхностного слоя производилось на приборе "Суртроник-3" с контролем параметра Ra в радиальном направлении детали. Измерение волнистости поверхности осуществлялось на приборе "Талеронд-73".

Дополнительно в данной работе предусматривалось изучение следующих физико-механических свойств поверхностного слоя: микротвердости и микроструктуры, а также плотности и износостойкости.

Измерение микротвердости спеченных порошковых материалов дает усредненное значение микротвердости, так как эти материалы представляют собой во многих случаях многокомпонентную систему. Поэтому для более точной характеристики твердости материала определяется микротвердость его отдельных структурных составляющих. Измерение микротвердости производилось вдавливанием алмазной четырехгранной пирамиды с двухгранным углом при вершине  $136^\circ$  при нагрузках от 0,049 до 4,9 Н в соответствии с ГОСТ 9450-76 на приборе