

УДК 621.793

Д. С. Карпович, к-т техн. наук ; С.И. Карпович, к-т техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ МНОГОСЛОЙНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ**

К износостойким покрытиям инструмента предъявляются достаточно жесткие требования. Во-первых, покрытие за счет создания благоприятных условий контактного взаимодействия на передней поверхности должно обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента для повышения его формоустойчивости, что ведет к увеличению времени работы инструмента до начала образования трещин в покрытии. Во-вторых, покрытие должно иметь высокий уровень остаточных сжимающих напряжений, способствующих возникновению в нем в процессе резания высоких сжимающих нормальных напряжений, что способствует повышению времени работы инструмента до образования трещин и снижению интенсивности процесса трещинообразования. В-третьих, покрытие должно иметь высокую прочность сцепления с инструментальной основой, что позволит увеличить время работы инструмента до полного разрушения покрытия на контактной площадке.

Выполнение перечисленных требований невозможно реализовать в однослойном покрытии. Например, наименьшие значения эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента обеспечивают нитридные покрытия, при этом минимальная их величина имеет место для инструмента с многоэлементными нитридными покрытиями. Максимальный уровень остаточных напряжений и нормальных сжимающих напряжений, возникающих в процессе резания, характерен для нитридных многоэлементных покрытий и карбонитридных покрытий. С другой стороны, карбонитридные и многоэлементные нитридные покрытия уступают одноэлементным нитридным покрытиям по прочности сцепления с инструментальной основой и наоборот. Таким образом, перечисленные выше требования можно реализовать только в многослойном покрытии, которое должно иметь как минимум два слоя. Верхний слой такого покрытия должен обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента для повышения его формоустойчивости и иметь высокие остаточные сжимающие напряжения для обеспечения в покрытии в процессе резания высоких нормальных сжимающих

напряжений, снижающих интенсивность процесса трещинообразования; нижний слой должен обеспечить высокую прочность сцепления покрытия с инструментальной основой.

Прочность сцепления многослойного покрытия определяется толщиной нижнего слоя TiN (таблица 1) [1].

**Таблица 1 - Влияние толщины слоев на  $K_0$  покрытия TiN-(Ti, Zr)N**

Толщина покрытия $h_p$ , мкм	Толщина слоя, мкм		Коэффициент отслоения $K_0$
	(Ti, Zr)N	TiN	
6	2	4	0,26
	3	3	0,20
	4	2	0,21
	5	1	0,31
8	2	6	0,21
	3	5	0,14
	4	4	0,10
	5	3	0,10
	6	2	0,14
10	2	8	0,39
	3	7	0,29
	4	6	0,23
	5	5	0,21
	6	4	0,22
	7	3	0,29
	8	2	0,38

При этом зависимость коэффициента отслоения от толщины слоев имеет экстремальный характер и определяется соотношением толщин верхнего и нижнего слоя и общей толщиной покрытия. Минимум данных зависимостей наблюдается при толщине слоя TiN в пределах (3–5) мкм в зависимости от общей толщины покрытия. С ростом общей толщины покрытия наблюдается тенденция повышения толщины слоя TiN, при которой значения коэффициента отслоения минимальны. Так, например, для покрытия TiN-TiCN толщиной 6 мкм минимальный коэффициент  $K_0$  наблюдается при толщине слоя TiN, равной 3 мкм, при толщине 8 мкм и 10 мкм – толщина слоя TiN соответственно равна 4 мкм и 5 мкм. Наименьший коэффициент отслоения и, следовательно, наибольшая прочность сцепления с инструментальной основой покрытия TiN-TiCN имеет место при толщине нижнего слоя TiN, равной 50 % от общей толщины покрытия; для покрытия TiN-(Ti, Zr)N толщиной 6, 8 и 10 мкм толщина нижнего слоя составляет, соответственно 50 %, (50–63) % и 70%.

Рассмотрим связь между коэффициентом отслоения  $K_0$  и толщиной слоев, мкм.

Для определения модели зададимся моделью вида

$$z(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2,$$

где  $x$  – толщина слоя TiCN, мкм;  $y$  – толщина слоя TiN, мкм;  $z(x, y)$  – параметры, представленные в табл. 1.

Расчет производится в пакете Matlab с использованием тулбокса Curve Fitting Toolbox. Доверительные интервалы для параметров модели вычисляются по следующей формуле

$$C = b \pm t\sqrt{S},$$

где  $b$  - найденные значения параметров,  $t$  - обратная функция для функции распределения Стьюдента,  $S$  - вектор из диагональных элементов матрицы  $sX^T X$ , где  $X$  - матрица плана,  $s$  - среднеквадратичная ошибка.

После приближения данных параметрической моделью проведена оценка качества приближения с использованием различных критериев пригодности приближения: SSE (сумма квадратов ошибок), R-square (критерий R-квадрат), Adjusted R-square (уточненный R-квадрат), RSME (корень из среднего для квадрата ошибки).

Для представленных данных в табл. 1 получены следующие значения коэффициентов  $p_i$  вместе с доверительными интервалами, соответствующими уровню вероятности 95%:

$$\begin{aligned} p_{00} &= 0.09815 (0.07874, 0.1176) \\ p_{10} &= 0.03018 (0.01473, 0.04563) \\ p_{01} &= 0.0377 (0.02186, 0.05355) \\ p_{20} &= 0.1173 (0.09679, 0.1379) \\ p_{11} &= 0.1712 (0.1303, 0.212) \\ p_{02} &= 0.129 (0.1071, 0.1508). \end{aligned}$$

Полученные значения параметров:

SSE: 0.003141

R-square: 0.9726

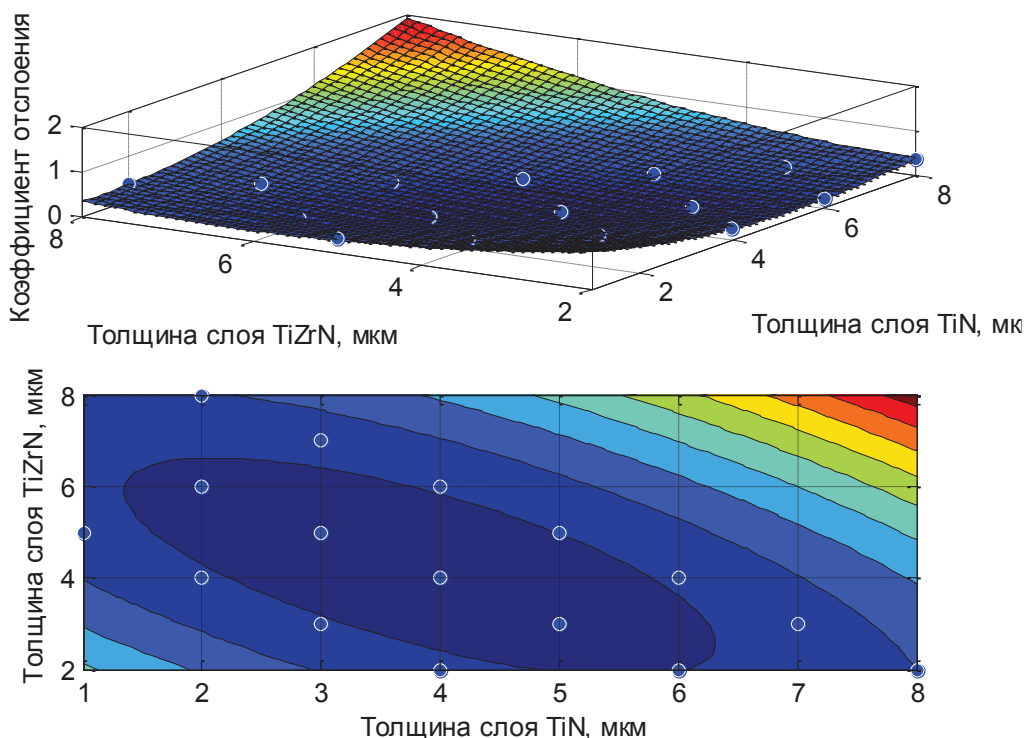
Adjusted R-square: 0.959

RMSE: 0.01772.

Графическая интерпретация зависимости коэффициентом отслоения  $K_0$  и толщиной слоев, мкм представлена на рис. 1.

Сравнивая многослойные покрытия различной толщиной, можно отметить, что минимальный коэффициент отслоения, а, следовательно, наибольшую прочность сцепления имеют покрытия толщиной 8 мкм. Кроме того, для данных покрытий характерен меньший разброс значений  $K_0$  при различных соотношениях толщин

отдельных слоев. Большую прочность сцепления с инструментальной основой имеют покрытия TiN-(Ti, Zr)N, коэффициент отслоения для которых в 3,0–6,7 раза ниже по сравнению с покрытием TiN-TiCN. При этом микротвердость данных покрытий выше микротвердости покрытий TiN-TiCN аналогичной конструкции всего на (17–36) %.



**Рисунок 1 – Зависимости между коэффициентом отслоения  $K_d$  и толщиной слоев, мкм**

Сопоставление механических свойств многослойных покрытий и однослойных TiCN, (Ti, Zr)N показывает, что их микротвердость отличается незначительно, в то время как прочность сцепления существенно различна. Так коэффициент отслоения  $K_d$  покрытия TiN-TiCN в 2,5 раза ниже по сравнению с однослойным покрытием TiCN, а TiN-(Ti, Zr)N – в 12 раз по сравнению с покрытием (Ti, Zr)N.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – М. : Машиностроение, 2008. – 311 с.