

УДК 021.771.07.001.5

**С. С. Самоутугин<sup>1</sup>, В. И. Лавриненко<sup>2,\*</sup>, Е. В. Кудинова<sup>1</sup>,  
Ю. С. Самоутугина<sup>1</sup>, В. И. Иванов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Приазовский государственный технический университет,  
г. Мариуполь, Украина

<sup>2</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля  
НАН Украины, г. Киев, Украина

\*ceramic@ism.kiev.ua

## **Основы синтеза модифицированных слоев на инструментальных твердых сплавах**

*Разработана методология управления структурообразованием при плазменном модифицировании поверхности инструментальных твердых сплавов с целью получения в поверхностном слое ультрадисперсной структуры с высоким уровнем эксплуатационных характеристик. Представлена структурная схема синтеза модифицированных слоев с ультрадисперсной структурой, которая включает комплекс теоретических, экспериментальных и технологических исследований. Проведены стойкостные испытания модифицированного инструмента.*

**Ключевые слова:** плазменное модифицирование, синтез модифицированных слоев, твердые сплавы, стойкостные испытания.

Все более широкое применение в промышленности находит метод поверхностного модифицирования режущего инструмента из твердых сплавов при нагреве высококонцентрированной плазменной струей [1–3]. Ранее выполненными исследованиями установлена возможность образования на рабочих поверхностях твердосплавного инструмента модифицированного слоя с измененной структурой [4] и повышенными значениями твердости и трещиностойкости [5]. Однако в настоящее время в литературе отсутствуют сведения о методологии выбора технологических параметров плазменного модифицирования поверхности инструментальных твердых сплавов для получения в поверхностном слое ультрадисперсной структуры с высоким уровнем эксплуатационных характеристик.

Для построения, анализа и настройки системы автоматического управления плазмотронами для поверхностной модификации необходимо разработать методологию управления структурированием в твердых сплавах. В настоящее время подобные разработки известны для других способов поверхностного воздействия – плазменного напыления [6, 7], лазерных технологий [8], плазменного упрочнения [9, 10], однако для плазменного поверхностного структурирования поверхностного слоя твердых сплавов такие сведения в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют.

На основании выполненного ранее авторами комплекса исследований тепловых процессов, структуры, фазового состава, параметров кристаллического строения, вязкости разрушения, износостойкости твердых сплавов с модифицированным поверхностным слоем [4, 5, 11], а также с учетом известных

рекомендаций [6–10, 12], разработана структурная схема синтеза модифицированных слоев на твердых сплавах с заданным уровнем эксплуатационных свойств (рис. 1), которая отображает последовательность и задачи отдельных этапов исследований. Основными этапами алгоритма синтеза являются:

1. Назначение заданных величин температур и напряжений в узлах конечно-элементной сетки при моделировании.



Рис. 1. Структурная схема синтеза модифицированных слоев на инструментальных твердых сплавах.

Основными регулируемыми параметрами процесса плазменной обработки в общем случае [2] являются максимальная температура нагрева поверхностного слоя  $T$  и скорость охлаждения поверхностного слоя  $W$ . Как установлено ранее [2], скорость охлаждения в процессах плазменной обработки (без применения дополнительных охлаждающих сред) может составлять  $10^4$ – $10^6$  град/с. На

рис. 2 показаны области возможной реализации различных процессов плазменной обработки в зависимости от соотношения параметров  $T$  и  $W$ .

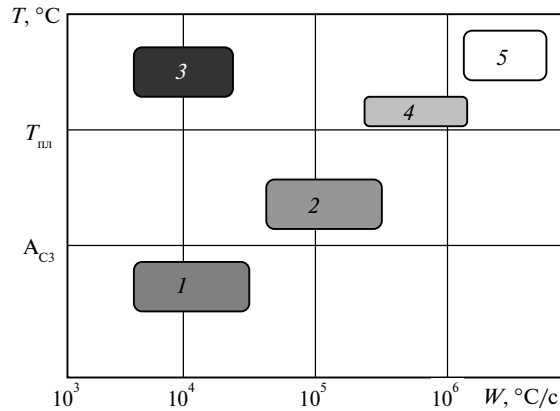


Рис. 2. Области оптимальной реализации процессов плазменной поверхностной модификации: 1 – плазменный отпуск; 2 – плазменная закалка; 3 – плазменное микроплавление; 4 – плазменное наноструктурирование; 5 – плазменная аморфизация.

Параметры  $T$  и  $W$  при разработке технологии плазменной обработки не являются параметрами прямого регулирования, а служат комплексными параметрами, на величину которых влияет большое число факторов: мощность плазменной струи (сила тока  $I$ , напряжение  $U$ ); скорость обработки  $v$  (скорость перемещения плазматрона); давление  $p_r$  и расход плазмообразующего газа  $Q_r$ ; давление  $p_v$  и расход  $Q_v$  воды, охлаждающей плазматрон; дистанция обработки  $h$ ; форма и размеры обрабатываемого инструмента или детали; теплофизические и механические характеристики обрабатываемого материала ( $\gamma, \lambda, \alpha, E, HV, \sigma_T$ ); конструктивные параметры плазматрона.

Наиболее оптимальная задача при плазменной модификации твердосплавного инструмента – микро- и наноструктурирование поверхностного слоя с образованием ультрамелкодисперсной структуры. Оптимальные режимы такой обработки находятся в области 4 (см. рис. 2).

2. Расчет оптимальных режимов плазменной обработки с использованием тепловых моделей работы. Задачей исследований на данном этапе является построение тепловых полей при воздействии плазменной струи на твердосплавные пластины (рис. 3) и выбор оптимальных параметров плазменной обработки по методике, приведенной в [11].

3. Оценка напряженного состояния методами рентгеноструктурного анализа. При этом отдельно определяются напряжения в карбидах и связке.

4. Определение твердости  $HV$ , параметров структуры (средний размер частиц карбидов  $\bar{d}$ ) на контрольных образцах. Кроме того, методами рентгеноструктурного анализа определяются период решетки кобальтовой фазы  $a$  (характеризует степень растворения карбидов и насыщения связки вольфрамом и углеродом), размер блоков  $D$  [4].

5. Определение параметров трещиностойкости  $K_{Ic}$  – выполняется при локальных микроиспытаниях при нагружении с применением индентора Виккерса. На изломах выполняется микрофрактографический анализ механизмов разрушения [5].

6. Стойкостные испытания инструмента.

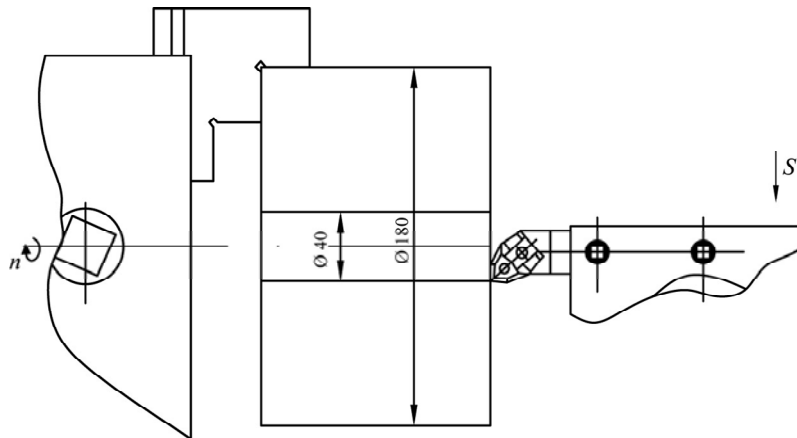


Рис. 3. Схема обработки при испытании твердосплавных пластин на стойкость; режимы резания:  $n = 630$  об/мин,  $t = 1$  мм,  $S = 0,037$  мм/об.

Для оценки стойкости инструментов с пластинами из твердых сплавов была принята методика, предусматривающая проведение испытаний в режиме торцевого точения. Период стойкости инструмента определялся временем работы инструмента до достижения критерия затупления, т. е. временем от установки нового инструмента до его затупления. Для оценки достоверности указанной разработки проведены сравнительные лабораторные испытания стойкости инструмента при использовании контрольных и упрочненных многогранных неперетачиваемых пластин из сплавов ВК8 и Т5К10 и проанализированы наблюдаемые изменения в характере износа инструмента.

Испытания проводили на токарно-винторезном станке мод. 16К20. Обрабатываемая заготовка – диск  $\text{Ø} 180$  мм с отверстием по центру  $\text{Ø} 40$  мм, материал – сталь 40Х (твердостью 32–36 HRC). Для чистоты эксперимента охлаждающую жидкость не применяли, т. е. обработку проводили в режиме сухого трения.

За критерий стойкости режущего инструмента принимали ширину фаски износа по задней поверхности  $h_3 = 0,5$  мм. Величину износа определяли на инструментальном микроскопе после каждых пяти проходов. Период стойкости инструментов определяли по формуле

$$T_{\text{ст}} = t_0 \Pi, \quad (1)$$

где  $t_0$  – время одного прохода, мин;  $\Pi$  – количество проходов до критического износа. Тогда коэффициент повышения стойкости инструментов с твердосплавными пластинами с модифицированным поверхностным слоем составляет

$$K_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{ст}}^{\text{М}}}{T_{\text{ст}}^{\text{И}}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{ст}}^{\text{М}}$  и  $T_{\text{ст}}^{\text{И}}$  – соответственно периоды стойкости резцов с модифицированными и исходными (контрольными) пластинами.

Результаты испытаний (средние значения для десяти резцов с пластинами каждого типа) приведены на рис. 4.

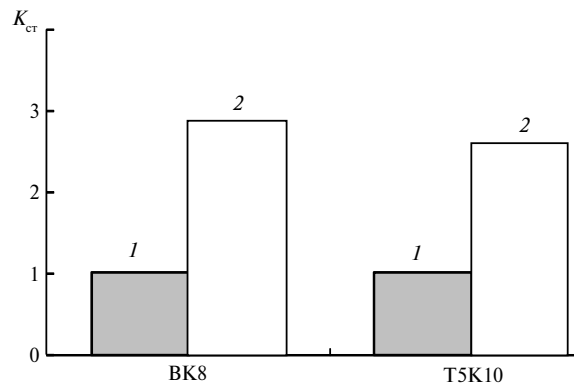


Рис. 4. Изменение коэффициента повышения стойкости режущих пластин из сплавов BK8 и T5K10 при плазменном модифицировании: 1 – исходное состояние; 2 – после плазменного модифицирования.

Испытания показали, что для данных условий резания плазменное модифицирование приводит к значительному (до 3 раз) повышению стойкости твердосплавного инструмента.

После испытаний резцов с пластинами выполняли металлографический анализ структуры в области изношенной режущей кромки со стороны задней поверхности. Исследования показали, что при резании инструментами с пластинами с модифицированным поверхностным слоем (рис. 5, *а*) изнашивание пластин имеет избирательный характер: вначале изнашивается относительно мягкая связующая фаза, затем отделяются оголенные твердые карбидные зерна, образуются поры и пустоты. Оставшиеся карбидные зерна под действием циклических нагрузок подвергаются пластической деформации, в них проходят сдвиговые процессы, вызывающие дробление зерен на блоки. Ввиду отсутствия прочной адгезионной связи по межфазным границам процесс изнашивания пластин ускоряется. И только на расстоянии  $\sim 50$  мкм от режущей кромки можно наблюдать исходную недеформированную структуру твердого сплава (см. рис. 5, *б*).

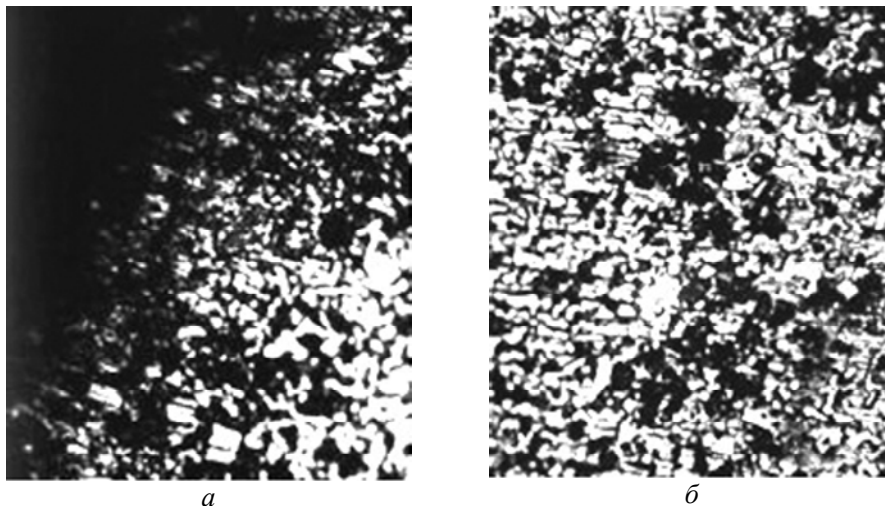


Рис. 5. Микроструктура пластин из сплава T5K10 после резания в исходном состоянии (*а, б*) и после плазменного модифицированного (*в, г*): у режущей кромки на задней поверхности (*а, в*), на расстоянии 50 (*б*) и 10 (*г*) мкм от кромки.

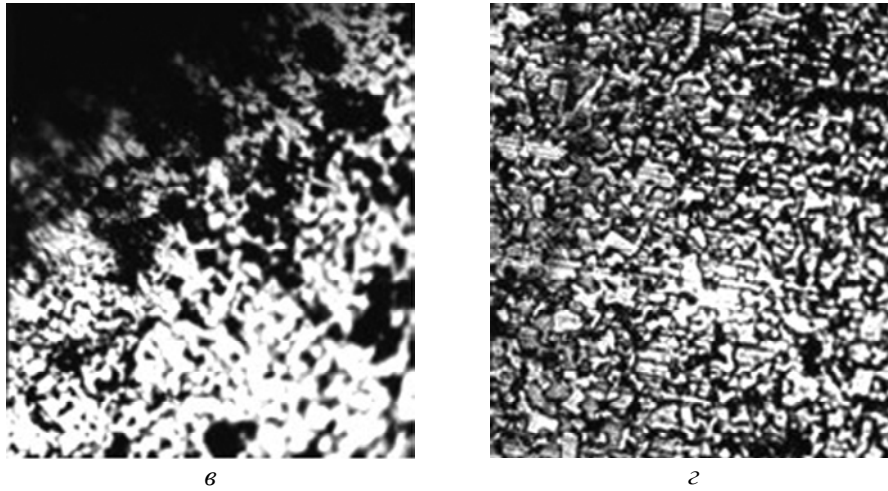


Рис. 5. (Продолжение.)

Качественно иной механизм изнашивания имеет место у резцов с модифицированными пластинами. Прочный, плотный и недеформированный карбидный каркас твердого сплава наблюдается практически у самого изношенного участка инструмента (см. рис. 5, а). Износ имеет более равномерный характер, уменьшается количество микросколов и выкрашиваний. Недеформированная и бездефектная структура упрочненного сплава наблюдается уже на расстоянии  $\sim 10$  мкм от изношенной поверхности инструмента (см. рис. 5, б).

В целом эксплуатационные испытания и исследования механизмов изнашивания упрочненного твердосплавного инструмента в полной мере подтвердили результаты выполненных ранее [4, 5] исследований структуры и механизмов разрушения твердых сплавов после плазменного модифицирования поверхностного слоя.

Повышение стойкости пластин из твердых сплавов обусловлено повышением твердости и трещиностойкости материала модифицированного слоя на режущей кромке инструмента (таблица). Обработка твердых сплавов сверхмощной (до 30 кВт) высококонцентрированной плазменной струей приводит к образованию поверхностного слоя с ультрадисперсной структурой и повышенными эксплуатационными свойствами (твердостью, трещиностойкостью, прочностью, износостойкостью) благодаря изменению механизмов разрушения и изнашивания. Это обусловлено [4, 5] дроблением исходных карбидных зерен, насыщением связки вольфрамом и, как следствие, ее дисперсионным твердением с выделением ультрадисперсных вторичных карбидов, а также повышением адгезионной связи карбидной и связующей фаз.

#### Эксплуатационные свойства твердых сплавов после плазменного поверхностного модифицирования

Марка сплава	HV		$K_{IC}$ , МПа м <sup>1/2</sup>		$K_{CT}$
	в исходном состоянии	в модифицированной зоне	в исходном состоянии	в модифицированной зоне	
ВК8	1420	1620	12,0	14,2	2,8
T5K10	1450	1680	8,4	10,0	2,7

Таким образом, приведенные выше исследования свидетельствуют о перспективности использования плазменного поверхностного ультрадисперсного структурирования поверхностного слоя твердых сплавов для повышения износостойкости режущего инструмента.

*Розроблено методологію та структурну схему управління структуроутворенням при плазмовому модифікуванні інструментальних твердих сплавів з метою отримання в поверхневому шарі ультрадисперсної структури з високим рівнем експлуатаційних характеристик. Представлено структурну схему синтезу модифікованих шарів з ультрадисперсною структурою, яка включає комплекс теоретичних, експериментальних і технологічних досліджень. Проведено стійкісні випробування модифікованого інструментів.*

**Ключові слова:** плазмове модифікування, синтез модифікованих шарів, тверді сплави, стійкісні випробування.

*Structurization management methodology developed by plasma modification Carbide tool to produce a surface layer of ultrafine structures with a high performance. The block diagram of the synthesis of modified layers of ultrafine structure, which includes a set of theoretical, experimental and technological research. Conducted stage life tests of the modified instrument.*

**Keywords:** plasma modification, the synthesis of modified layers, hard alloys, life tests.

1. Лаврінченко В. І., Ситник Б. В., Скрябін В. О. та ін. Вплив плазмової обробки на зміну елементного складу поверхні робочого шару твердосплавного інструменту, її шорсткості та зносостійкості // Сверхтв. материалы. – 2010. – № 4. – С. 64–69.
2. Самотугин С. С., Лецинский Л. К. Плазменное упрочнение инструментальных материалов. – Донецк: Новый мир, 2002. – 338 с.
3. Самотугин С. С., Нестеров О. Ю., Мазур В. А. и др. Поверхностное упрочнение инструментальных сталей и сплавов при нагреве высоконцентрированной плазменной струей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 23–28.
4. Самотугин С. С., Лавринченко В. И., Кудинова Е. В., Самотугина Ю. С. Влияние режимов плазменной поверхностной обработки на структуру и свойства инструментальных твердых сплавов // Сверхтв материалы. – 2011. – № 3. – С. 23–28.
5. Самотугин С. С., Лавринченко В. И., Кудинова Е. В., Самотугина Ю. С. Исследование трещиностойкости и механизмов разрушения инструментальных твердых сплавов после плазменного поверхностного модифицирования // Там же. – 2013. – № 4. – С. 63–73.
6. Борисов Ю. С., Кривцун И. В., Мужиченко А. Ф. Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 42–51.
7. Харламов М. Ю. Использование многопроцессорных вычислительных систем при численном моделировании течения электродуговой плазмы // Электронное моделирование. – 2009. – 31, № 5. – С. 83–94.
8. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під ред. Л. Ф. Головка, С. О. Лукаценка. – К.: Вістка, 2009. – 296 с.
9. Кундас С. П., Марковник Д. В., Иванов Д. Г. и др. Математическая модель процесса поверхностного плазменного упрочнения стальных деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 3. – С. 41–46.
10. Сосин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. – СПб: Из-во Политехнического ун-та, 2008. – 406 с.
11. Самотугин С. С., Мазур В. А., Кудинова Е. В. Математическое моделирование процесса плазменного поверхностного модифицирования твердосплавного инструмента // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт: Зб. наук. пр. – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 123–130.
12. Петрова Л. Г., Чудина О. В. Прогнозирование упрочнения металлов и сплавов на основе методологии управления структурообразованием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 7. – С. 3–11.

Поступила 29.04.16