

**С. С. Самотугин<sup>1</sup>, В. И. Лавриненко<sup>2,\*</sup>, О. А. Христенко<sup>1</sup>,  
Ю. С. Самотугина<sup>1</sup>**

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

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

\*lavrinenko@ism.kiev.ua

## **Повышение стойкости твердосплавных резбовых резцов плазменным поверхностным модифицированием**

*Представлены результаты расчетов и стойкостных испытаний резбовых профильных резцов с напаянными твердосплавными пластинами после плазменного поверхностного модифицирования. Установлено повышение стойкости резцов по сравнению с исходным состоянием в 2,15–2,5 раза (по критериям оптимального и равного износа). После переточек стойкость резцов снижается из-за снижения твердости режущих кромок, оставаясь значительно выше по сравнению с исходными резцами.*

**Ключевые слова:** *резец, резьбонарезание, плазма, упрочнение, твердый сплав.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения металлорежущего инструмента является плазменное поверхностное модифицирование [1]. Данный метод одинаково эффективен как для инструмента из быстрорежущих сталей, так и для инструмента из спеченных твердых сплавов [2–4], в том числе – резьбонарезного [5].

Наиболее распространенным типом инструмента для нарезания резьбы являются стержневые профильные резцы с напаянными твердосплавными пластинами [6–7]. Основные геометрические параметры режущей части профильного резбового резца с нанесенной модифицированной зоной показаны на рис. 1.

При разработке оптимальной технологии поверхностного модифицирования резьбонарезных резцов необходимо учитывать основные особенности нагружения и подготовки таких резцов [6, 7]:

1. У профильного резбового резца в процессах резания и профилировании нарезаемой резьбы участвуют три режущие кромки (см. рис. 1): 1–2 – на лезвии вершины резца, 1–3 – на левом прямолинейном профильном лезвии, 2–4 – на правом прямолинейном профильном лезвии. Все три режущие кромки являются главными. Лезвие вершины резца 1–2, формирующее впадину лезвийного профиля, в процессе резания находится в тяжелых условиях нагружения и прочность его может оказаться недостаточной.

2. Рекомендации по значениям углов [7]: угол при вершине резца  $\alpha_0 = 60^\circ$  (для метрической резьбы); главный угол в плане на правой и левой боковых

кромках  $\varphi_l = \varphi_n = \alpha_0/2$ ; передний угол  $\gamma = 0$ ; задний угол на лезвии 1–2 вершины резца  $\alpha = 8-10^\circ$ .

3. Резьбонарезные резцы работают с относительно малыми значениями скорости резания и толщины срезаемого слоя при обильном поливе рабочей зоны струей СОТС. В таких условиях на лезвиях выделяется относительно небольшое количество теплоты – температура нагрева лезвий не превышает  $400^\circ\text{C}$ . Температурное состояние лезвий слабо влияет на интенсивность их изнашивания и не является лимитирующим фактором при назначении режимов резьбонарезания.

4. Основным критерием, определяющим работоспособность резьбонарезных резцов, является износ по задним поверхностям  $h_3$  (см. рис. 1). Согласно [7], для черновых резьбонарезных резцов  $h_3 = 2$  мм, а для чистовых профильных –  $h_3 = 0,3$  мм;

5. Профильные резьбонарезные резцы с напаянными твердосплавными пластинами допускают сравнительно небольшое число переточек.

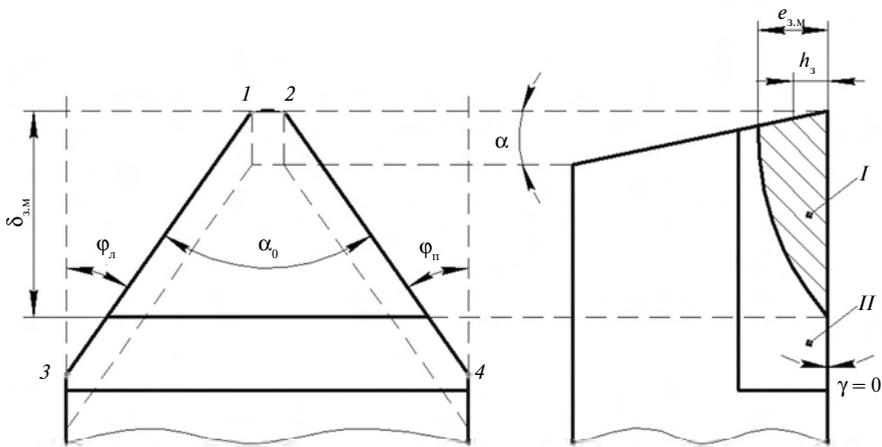


Рис. 1. Геометрические параметры профильных резьбовых резцов с модифицированной зоной: I – модифицированная зона; II – исходный твердый сплав.

Для достижения наиболее высокой работоспособности лезвийного инструмента его обработка плазменной струей должна выполняться по передней поверхности (см. рис. 1). При этом ширина модифицированной зоны  $\delta_{3,м}$  должна обеспечивать сохранение всех трех упрочненных режущих кромок (1–2, 1–3 и 2–4) после возможных переточек резца, а толщина модифицированной зоны  $e_{3,м}$  в плоскости, перпендикулярной кромке 1–2, должна значительно превышать допустимый износ по задней поверхности  $h_3$  (см. рис. 1).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследованы профильные резцы с пластинами из сплавов ВК4, ВК6 и Т15К6 после плазменной обработки. На шлифах, выполненных в плоскости, перпендикулярной режущей кромке 1–2 (см. рис. 1), изучали микроструктуру (с помощью оптического микроскопа “Неофот-21”) и измеряли твердость по Виккерсу.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор оптимальных значений параметров режима плазменной обработки профильных резьбовых резцов осуществляется на основании моделирования и анализа температурных полей при поверхностном концентрированном нагреве

вдоль режущей кромки образца, имеющего форму клина. Предварительными расчетами с использованием рекомендаций [1] установлено, что наиболее высокие значения температуры нагрева и скорости охлаждения достигаются в точках, близких к вершине резца (кромка 1–2) и боковым режущим кромкам 1–3 и 2–4. При удалении от вершины, как вдоль передней поверхности, так и в глубину, максимальная температура нагрева снижается. В таких условиях в различных участках модифицированной зоны могут проходить фазовые и структурные превращения. Ранее установлено [2], что наиболее высокие эксплуатационные свойства и наиболее дисперсная структура реализуются при нагреве поверхностных объемов твердосплавного инструмента плазменной струей до температуры близкой к температуре плавления карбидной фазы, но не превышающей ее. Фазовые и структурные превращения, протекающие в этом случае в карбидах и связке, способствуют образованию субмикроструктурной структуры композиции. В качестве оптимальных приняты режимы плазменной обработки твердосплавных резцовых резцов, обеспечивающие реализацию указанного варианта упрочнения в объемах твердого сплава, прилегающих к режущим кромкам.

При плазменной обработке неперегретых твердосплавных пластин рекомендации по выбору оптимальной технологии плазменного нагрева [2] реализуются таким образом, чтобы наиболее высокая твердость и наиболее дисперсная структура достигались на режущей кромке. После ее износа пластина поворачивается на следующую кромку с модифицированной зоной. Неоднородность структуры твердого сплава и его твердости в модифицированной зоне не сказывается на стойкости пластин. Аналогичная ситуация наблюдается и для резцов с массивными напаянными твердосплавными пластинами. Однако для острозаточенных резцовых резцов, которые в процессе работы подвергаются нескольким переточкам, после каждой очередной переточки на режущей кромке твердость и дисперсность структуры будут ниже, чем сразу после обработки. Это требует внесения корректив при прогнозировании износа и стойкости резцов.

На рис. 2 в качестве примера приведена микроструктура модифицированной зоны на сплаве ВК4 в определенных участках. Значения твердости в этих участках модифицированной зоны (см. рис. 2) приведены в таблице.

#### Твердость в определенных участках модифицированной зоны

Марка сплава	Твердость <i>HV</i> , в участках (см. рис. 2, а)			
	1	2	3	4
ВК4	1700–1720	1640–1650	1520–1540	1450–1470
ВК6	1670–1700	1590–1610	1470–1490	1380–1400
T15K6	1700–1720	1610–1630	1570–1590	1500–1520

Исследования показали, что структура вольфрамо-кобальтового сплава ВК4 в исходном состоянии (см. рис. 2, б) состоит из зерен карбидов вольфрама WC с огранкой (как свободных, так и контактирующих между собой), погруженных в твердый раствор вольфрама и углерода в кобальте.

Как отмечалось в [1–3], наиболее высокие значения твердости сплавов типа ВК и ТК достигаются при плазменной обработке без расплавления связки – при нагреве до температур ~ 1300–1500 °С. При плазменной обработке резцовых резцов, имеющих форму клина (см. рис. 1), с оптимальными параметрами режима нагрева такая температура достигается в участках, близких к

режущим кромкам (см. рис. 2, участок 1). В этих участках образуется наиболее дисперсная структура модифицированной зоны (см. рис. 2, б) и достигается наиболее высокая твердость (см. таблицу).

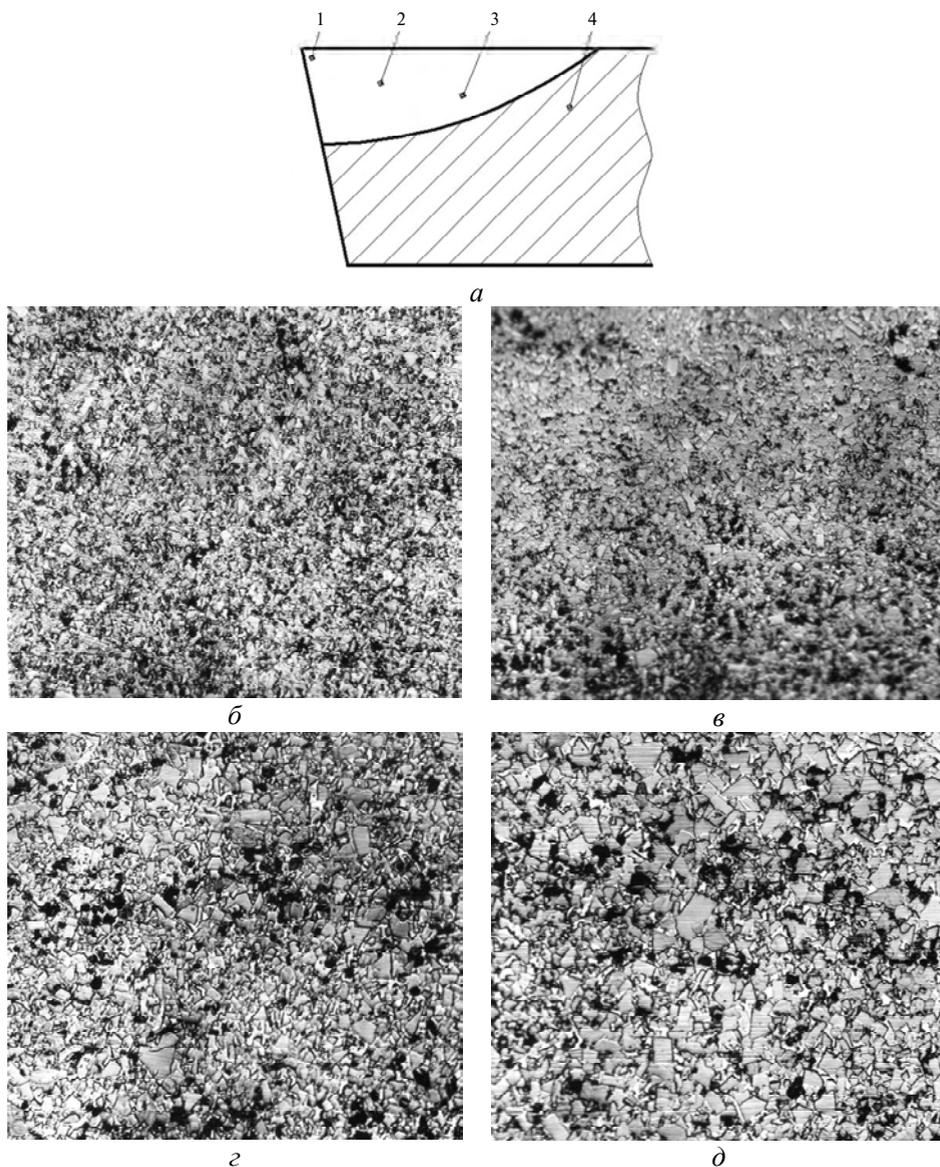


Рис. 2. Схема исследования (а) и микроструктура участков 1 (б), 2 (в), 3 (г), 4 (д) модифицированной зоны на резах с пластинами из сплава ВК4;  $\times 1500$ .

Основным процессом, определяющим структуру и свойства модифицированной зоны, при плазменном модифицировании, как и при лазерном [2], является контактное плавление карбидов, происходящее на межфазных границах карбид–связка. Оно зависит от двух факторов – смачиваемости карбидов жидкой связующей фазой и растворимости карбидов в связке. Сплавы типа ВК характеризуются хорошей смачиваемостью компонентов (угол смачивания  $\theta \approx 0^\circ$ ). Контактное плавление межфазных границ способствует раз-

делению плотных групп карбидов на мелкие частицы. Степень превращения в карбидах неодинакова и зависит от их размеров.

Окончательная структура сплава ВК4 при плазменном модифицировании (см. рис. 2, б) формируется в неравновесных условиях высокоскоростного охлаждения. Наряду с измельчением исходных карбидных зерен, происходит распад пересыщенного твердого раствора W и C в Co с выделением дисперсных вторичных карбидов. Оплавленные зерна первичных карбидов имеют неправильную форму и “рыхлые” края, а зерна выделившихся в результате дисперсионного твердения вторичных карбидов – преимущественно округлую форму (см. рис. 2, б). По мере удаления от кромок пластины в глубину модифицированной зоны (см. рис. 2, а, точки 2 и 3) температура нагрева, степень и полнота контактного плавления первичных карбидов снижаются, увеличивается размер зерен (см. рис. 2, в), плавно переходя к исходной структуре (см. рис. 2, д). Наряду с частично оплавленными зернами сохраняются и неоплавленные зерна с огранкой.

При плазменной обработке сплава Т15К6 твердость также значительно повышается (см. таблицу). Сплавы системы WC–TiC–Co типа ТК характеризуются неполной смачиваемостью компонентов ( $\theta > 0^\circ$ ) в условиях контактного плавления [2], что не позволяет в полной мере реализовать дисперсионное упрочнение связи.

Повышение твердости сплава типа ТК после плазменного воздействия (см. таблицу) связано как с измельчением зерен, так и упрочнением связи при насыщении ее вольфрамом и углеродом в результате диффузии и распада пересыщенного твердого раствора (W, Ti) C.

Таким образом, исследованиями установлено, что наличие на режущей части резца модифицированной зоны шириной до 10 мм и глубиной до 3 мм (см. рис. 1, зона II) позволяет реализовать одно из главных технико-экономических преимуществ поверхностного модифицирования по сравнению с нанесением покрытий из нитридов или карбидов – возможность выполнения нескольких переточек (иногда до десяти) с сохранением модифицированной зоны и без необходимости повторного упрочнения (рис. 3, а).

На рис. 3, б показан характер изменения твердости на передней поверхности резца в модифицированной зоне от режущей кромки в глубину материала вдоль центральной оси  $x$ .

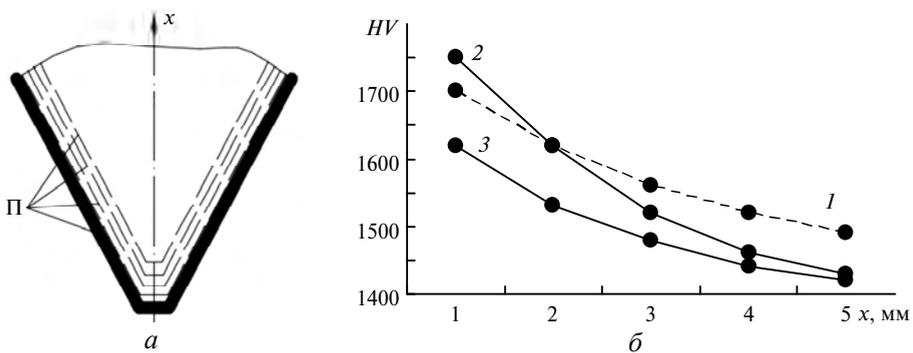


Рис. 3. Схема выполнения переточек (П) профильного резцового резца (а) и характер изменения твердости на передней поверхности (б): 1 – Т15К6; 2 – ВК4; 3 – ВК6.

Согласно [7], если восстановление режущих свойств инструмента происходит посредством повторных переточек, то нормой износа инструмента является нормированная толщина стачиваемого слоя  $H$ , рассчитанная исходя

из требования полного удаления слоя со следами износа, а также удаления слоя, в пределах которого возможно снижение механических свойств вследствие нагрева до высоких температур в процессе резания  $\Delta h_3 = 0,1-0,2$  мм. Тогда (рис. 4):

$$H = (h_{3\max} + \Delta h_3) \sin \alpha. \quad (1)$$

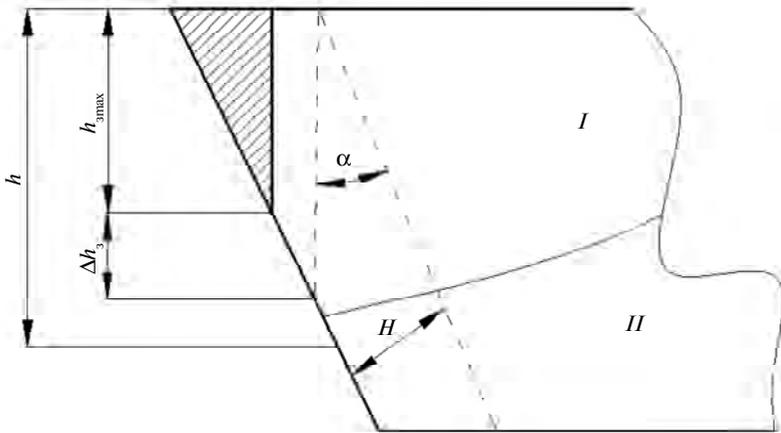


Рис. 4. Схема определения нормы износа профильных резцов с модифицированной зоной (согласно [7]): I – модифицированная зона; II – исходный твердый сплав.

Установив значение  $H$  по нормативным требованиям  $h_{3\max}$  для заданного типа твердого сплава, условий и режима резания и зная характер изменения твердости модифицированной зоны (см. рис. 3, б), можно прогнозировать как значение твердости режущей кромки, так и зависящее от нее значение стойкости резцов с модифицированной зоной после переточек

В свою очередь, в качестве нормируемого показателя  $h_{3\max}$  в формуле (1) для резбовых профильных резцов целесообразно использовать критерии равного износа  $h_{3,р}$  или оптимального износа  $h_{3,опт}$ , которые определяют графически по кривым износа [7], полученным экспериментально при нарезании резьбы резцами с модифицированной зоной после переточек. В качестве примера на рис. 5 показаны кривые износа, построенные при нарезании метрической резьбы М16 на заготовках из стали 20 черновыми резцами с напаянными пластинами из сплава ВК4, подвергнутыми плазменному модифицированию на оптимальных режимах (согласно [2]). Скорость резания выбрали по рекомендациям [8].

Результаты испытаний (см. рис. 5) показали, что плазменное поверхностное модифицирование профильных резбовых резцов с напаянными пластинами из сплава ВК4 приводит к значительному повышению их износостойкости как непосредственно после плазменной обработки, так и после последующих переточек. Степень повышения работоспособности резцов можно выразить зависимостью

$$K_{ст} = \frac{\tau_m}{\tau_n}, \quad (2)$$

где  $\tau_m$  и  $\tau_n$  – соответственно время обработки резцами после модифицирования и исходными для достижения заданного значения износа по задней поверхности  $h_3$ , определяемой по критерию равного износа (см. рис. 5, линия I для сплава ВК4:  $h_3 = 1,4$  мм) или по критерию оптимального износа [7] (см. рис. 5, линия II).

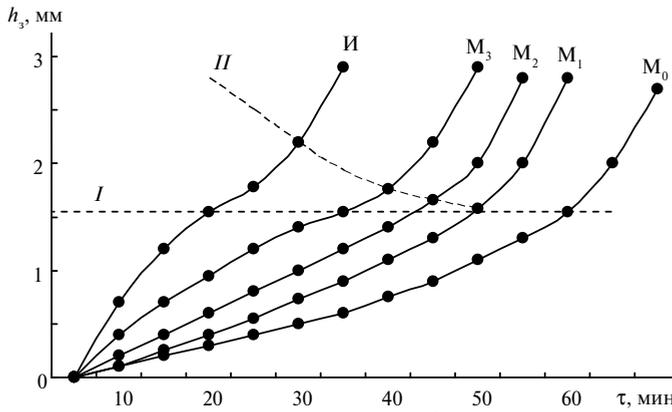


Рис. 5. Зависимость износа  $h_3$  от времени работы профильных режущих резцов с пластинами из сплава ВК4: И – резец в исходном состоянии;  $M_0$  – резец после плазменного модифицирования;  $M_1, M_2, M_3$  – резцы после плазменного модифицирования и соответствующих переточек (индексы 1, 2, 3 – количество переточек); I, II – линии равного и оптимального износа соответственно.

Изменение степени повышения стойкости  $K_{ст}$  резцов после модифицирования и переточек показано на рис. 6.

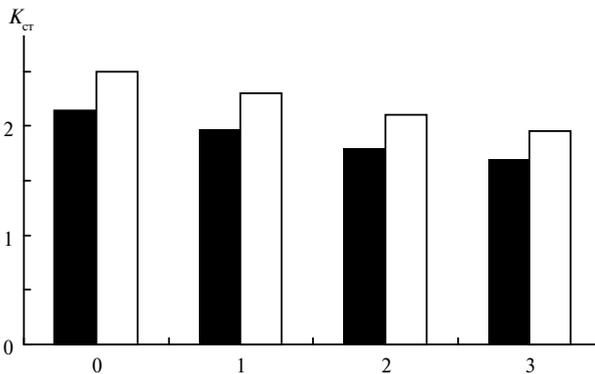


Рис. 6. Изменение степени повышения стойкости резцов с модифицированной зоной после переточек по критериям оптимального (■) и равного (□) износа; 0–3 – количество переточек.

Еще одной особенностью характера износа резцов после плазменного модифицирования является отсутствие начального участка интенсивного износа (так называемой стадии приработки), что также вносит определенный вклад в степень повышения износостойкости. Это объясняется тем, что степень дисперсности твердого сплава в модифицированной зоне (см. рис. 2, б) значительно выше по сравнению с исходным твердым сплавом (см. рис. 2, д). Благодаря этому с самого начала процесса резания не проявляется неравномерность распределения силовых, тепловых и контактных нагрузок – стадия приработки практически отсутствует.

### ВЫВОДЫ

Эффективным методом повышения стойкости режущих резцов с напаянными твердосплавными пластинами является плазменное поверхностное модифицирование. После плазменной обработки на оптимальных режимах на режущей кромке резца образуется модифицированная зона с

ультрадисперсной структурой и повышенной твердостью. Размеры модифицированной зоны (ширина – 10 мм, глубина – до 3 мм) позволяют выполнять несколько переточек без повторного упрочнения.

Основным процессом, влияющим на структуру и твердость модифицированной зоны, является контактное плавление карбидов на межфазных границах карбид–связка. В условиях высокоскоростного охлаждения происходит диспергирование исходных карбидов и выделение ультрадисперсных вторичных карбидов при распаде пересыщенного твердого раствора W и C в Co.

Дисперсность структуры и твердость сплавов в модифицированной зоне неравномерны, что связано с неравномерным нагревом поверхностных объемов. Наиболее дисперсная структура и наиболее высокая твердость достигаются в объемах, прилегающих к исходной режущей кромке.

*Представлено результати розрахунків і стійкісних випробувань різбових профільних різців з напаяними твердосплавними пластинами після плазмового поверхневого модифікування. Встановлено підвищення стійкості різців в порівнянні з вихідним станом в 2,20–2,75 рази (за критеріями оптимального і рівного зносу). Після переточувань стійкість різців знижується через зниження твердості ріжучих кромок, залишаючись значно вище в порівнянні з вихідними різцями.*

**Ключові слова:** різець, різьбонарізання, плазма, зміцнення, твердий сплав.

*The paper presents the results of tool life calculations and testing of threading profiled tools with brazed hardmetal inserts upon surface plasma modification. The tool life of such inserts has been found to be 2.15–2.5 times (by the criteria of optimal and equal wear) that of unmodified ones. Upon re-sharpening of tools, their life becomes shorter due to a decrease in hardness of cutting edges, but is still much longer than that of tools with unmodified inserts.*

**Keywords:** cutting tool, threading, plasma, hardening, hardmetal.

1. Самотугин С.С., Лещинский Л.К. Плазменное упрочнение инструментальных материалов. Донецк: Новый мир, 2003. 338 с.
2. Самотугин С.С., Лавриненко В.И., Кудинова Е.В., Самотугина Ю.С. Влияние технологии плазменного поверхностного модифицирования на структуру и фазовый состав инструментальных твердых сплавов. *Сверхтв. материалы*. 2011. № 3. С. 74–84.
3. Самотугин С.С., Кудинова Е.В., Самотугина Ю.С., Лавриненко В.И. Свойства и работоспособность инструментальных твердых сплавов после плазменного поверхностного модифицирования. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016. № 5. С. 25–32.
4. Самотугин С.С., Лавриненко В.И., Кудинова Е.В., Самотугина Ю.С. Основы синтеза модифицированных слоев на инструментальных твердых сплавах. *Сверхтв. Материалы*. 2017. № 3. С. 78–84.
5. Самотугин С.С., Христенко О.А. Технологические основы плазменного поверхностного модифицирования резьбонарезного инструмента. *Наука та виробництво: Зб. наук. пр.* Маріуполь, 2016. Вип. 1. С. 62–66.
6. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. М: Высшая школа, 1974. 400 с.
7. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. Москва: Высшая школа, 1985. 304 с.
8. Самотугин С.С., Христенко О.А., Кудинова Е.В., Касаткин Ю.Г. Особенности расчетов режима резания твердосплавными резьбонарезными резцами с модифицированным слоем. *Наука та виробництво: Зб. наук. пр.* Маріуполь, 2018. Вип. 18. С. 43–46.

Поступила в редакцию 03.07.18

После доработки 01.11.18

Принята к публикации 02.11.18