



Исследование возможностей концевых монокристаллических твердосплавных фрез для обработки заготовок деталей, имеющих градиент твердости

О.Е. Сысоев^{1✉}, Б.Я. Мокрицкий², А.В. Космынин³, Е.О. Сысоев⁴

¹⁻⁴Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – исследовать период стойкости концевых монокристаллических твердосплавных фрез при фрезеровании материалов заготовок деталей с твердостью основы HRC 40 при твердости поверхностного слоя HRC 65 и выше. Для обработки заготовок использовали концевые монокристаллические твердосплавные четырехзубые и девятизубые фрезы; контрольные фрезы были без покрытия. На исследуемых фрезах покрытия выполнялись многослойными, наноструктурированными толщиной до 5 мкм, которые наносили методом конденсации с ионной бомбардировкой на установке серии Булат. Были изучены покрытия трех видов. Первое выполнено из карбонитрида титана и слоя нитрида титана (TiCN+TiN); второе – смеси титана с алюминием и слоя оксида алюминия, смеси нитрида титана с алюминием и слоя оксида алюминия ((TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃). Третий вид покрытия состоял из карбонитрида титана со слоем нитрида смеси титана и алюминия, слоев оксида алюминия и карбида титана (TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC). Обрабатываемые заготовки имели наплавку поверхностного слоя твердостью выше HRC 61. Наплавку наносили с помощью установки дуговой сварки модели TST 350, дополненной сварочным полуавтоматом модели ПДГО–527-4А при использовании порошковой проволоки марки ПП-АН167. Установлено, что период стойкости девятизубой фрезы без покрытия и с покрытием превышает аналогичные периоды стойкости четырехзубой фрезы. По результатам экспериментов отмечено, что на девятизубой фрезе покрытие состава TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC более рационально, и по периоду стойкости превосходит покрытие (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ во всем диапазоне скоростей резания. Получены зависимости периода стойкости от скорости резания отдельно для концевых монокристаллических твердосплавных девятизубых фрез и концевых монокристаллических твердосплавных четырехзубых фрез с различными многослойными наноструктурированными покрытиями. По выявленным зависимостям можно установить наиболее рациональные условия эксплуатации этих фрез. Результаты исследований могут использоваться при создании технологий изготовления деталей с твердостью поверхностного слоя выше HRC 65.

Ключевые слова: высокотвердый наплавленный слой, монокристаллические концевые фрезы с покрытиями, период стойкости концевых фрез, скорость резания

Для цитирования: Сысоев О.Е., Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В., Сысоев Е.О. Исследование возможностей концевых монокристаллических твердосплавных фрез для обработки заготовок деталей, имеющих градиент твердости // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 345–352. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-345-352>. EDN: VBZSRP.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Study of solid carbide end mills for machining workpieces with hardness gradient

Oleg E. Sysoev^{1✉}, Boris Ya. Mokritskii², Alexander V. Kosmyinin³,
Evgeny O. Sysoev⁴

¹⁻⁴Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The present paper sets out to investigate the service life of solid carbide end mills for machining workpieces with an HRC 40 base hardness and a surface layer hardness of HRC 65 and greater. For machining, solid carbide end mills with four and nine teeth were used; control mills were uncoated. The studied mills were coated with 5 μm thick multilayer nanostructured coatings applied using the condensation method with ion bombardment in a Bulat unit. Three types of coatings were studied, including titanium carbonitride with titanium nitride layer (TiCN+TiN);

a mixture of titanium and aluminum with aluminum oxide, mixed titanium and aluminum nitride, and aluminum oxide layers ($\text{TiAl}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$); titanium carbonitride with mixed titanium and aluminum nitride, aluminum oxide, and titanium carbide layers ($\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$). The surface layer hardness of workpieces exceeded HRC 61. The surfacing was applied using a TST 350 arc welding machine equipped with a PDGO-527-4A semiautomatic welding device with a PP-AN167 flux-cored wire. The service life of a nine-tooth mill, both coated and uncoated, was found to exceed that of a four-tooth mill. Experimental results show that $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ coating is more appropriate for a nine-tooth mill. This coating surpasses the $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ coating for the resistance period in the entire range of milling speeds. The dependencies of the tool life on the milling speed were separately obtained for solid carbide nine- and four-tooth end mills with various multilayer nanostructured coatings. The identified dependencies can be used to establish the most appropriate operating conditions for these mills. The research results can be used to develop technologies for manufacturing parts with a surface layer hardness above HRC 65.

Keywords: weld high-hard deposit, coated solid end milling cutters, service life of end milling cutters, cutting speed

For citation: Sysoev O.E., Mokritskii B.Ya., Kosmynin A.V., Sysoev E.O. Study of solid carbide end mills for machining workpieces with hardness gradient. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):345-352. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-345-352>. EDN: VBZSRP.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастание требований к условиям эксплуатации изделий в экстремальных условиях привело к необходимости разработки материалов, имеющих существенный градиент твердости от основного материала к тому, который находится на поверхности детали. Особенно это востребовано [1, 2] в космической технике и оборонной промышленности. Градиент твердости материала таких деталей может быть значительным.

В работе исследована обработка фрезерованием материалов заготовок деталей, твердость основы которых находится по шкале твердости Роквелла на уровне HRC 40, а твердость поверхностного слоя составляет HRC 65 и выше.

Испытаниям подвергали монолитные концевые фрезы четырехзубые и девятизубые с покрытиями и без покрытий. Покрытия выполнены многослойными наноструктурированными, толщиной до 5 мкм. Их наносили методом конденсации с ионной бомбардировкой на установке серии Булат.

Покрытия были трех видов:

1) карбонитрид титана плюс слой нитрида титана $\text{TiCN}+\text{TiN}$;

2) смесь титана с алюминием плюс слой оксида алюминия плюс нитрид смеси титана с алюминием плюс слой оксида алюминия $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$;

3) карбонитрид титана плюс слой нитрида смеси титана и алюминия плюс слой оксида алюминия плюс слой карбида титана $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$.

Далее показано, что влияние покрытий на период стойкости фрез различное. В том чис-

ле представлено, что период стойкости девятизубой фрезы без покрытия и с покрытием превышает аналогичные периоды стойкости четырехзубой фрезы. По результатам экспериментов было отмечено, что на девятизубой фрезе покрытие $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ более рационально, чем покрытие $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ во всем диапазоне скоростей резания. По периоду стойкости покрытие $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ превосходит покрытие $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения экспериментальных данных были изготовлены и испытаны концевые монолитные твердосплавные четырехзубые и девятизубые фрезы. Четырехзубые фрезы имели длину 90 мм при длине цилиндрического хвостовика 50 мм и длине режущей части 25 мм. Диаметр режущей части – 10 мм. Радиус при вершине – 0,05 мм. Шаг винтовой линии – 315 мм, спираль правая, угол 30°. Затылок зубьев выполнен двойным, а именно под углом 12° на длине 0,8 мм и далее под углом 20°. Поднутрение у торца фрезы равно 2°, угол при перемычке составил 35°. Девятизубые фрезы имели длину 110 мм при длине цилиндрического хвостовика 70 мм и длине режущей части 30 мм. Диаметр режущей части – 21 мм. Радиус при вершине – 0,07 мм. Шаг винтовой линии – 315 мм, спираль правая, угол 30°. Затылок зубьев выполнен двойным, а именно под углом 10° на длине 0,9 мм и далее под углом 22°. Поднутрение у торца фрезы равно 3°, угол при перемычке – 30°.



Рис. 1. Фото фрез (США): а – двухзубая фреза с винтовой канавкой (модель T73748QTA Z161A 10mm16c 50L0751RTA 4FL STUB Z-CARB); б – четырехзубая фреза с крутой винтовой канавкой (модель 9FL GUTTER 16mm x 92mm 30RTA)

Fig. 1. An image of milling cutters (USA): a – two-tooth milling cutter with a helical flute (model T73748QTA Z161A 10mm16c 50L0751RTA 4FL STUB Z-CARB); b – four-tooth milling cutter with a steep helical flute (model 9FL GUTTER 16mm x 92mm 30RTA)

Внешне эти фрезы похожи на те, которые показаны на рис. 1. Отличаются диаметрами, числом зубьев, геометрическими параметрами и покрытиями.

Концевые монолитные твёрдосплавные фрезы были испытаны на образцах, содер-

жащих на поверхности высокотвердый слой. На рис. 2 показаны примеры наплавленного высокотвердого слоя и его обработки четырехзубой фрезой диаметром 10 мм.

Высота наплавленного слоя составляла 8–10 мм, твердость слоя – от HRC 65 до HRC 68.

Для наплавки использовали порошковую проволоку марки ПП-АН167. Наплавку осуществляли на установке дуговой сварки модели TST 350, дополненной сварочным полуавтоматом модели ПДГО – 527-4А (производитель ООО ПКФ «Кристалл», диаметр проволоки 1,8 мм).

Измерение величины износа фрез выполняли на мультисенсорном измерительном центре (видеоизмерительной системе) модели Mikro Vu Sol 161, обеспечивающей точность измерения до 0,001 мм. Принята допустимой величиной износа фрез 0,5 мм по задней грани.

На фрезы наносили покрытия, отличающиеся друг от друга. Покрытия наносили методом физического осаждения, а именно методом конденсации с ионной бомбардировкой (метод КИБ) на установке серии Булат (Россия). Общая толщина покрытий не превышала 5 мкм, покрытия выполнены многослойными наноструктурированными [3–5]. Скорость резания составляла 50 м/мин. А также 100, 150 и 200 м/мин при разных покрытиях на режущей части фрезы. Глубину резания применяли 0,5 мм, 1,0 мм и 1,5 мм последовательно. Подача во всех случаях составляла 0,05 мм на зуб.

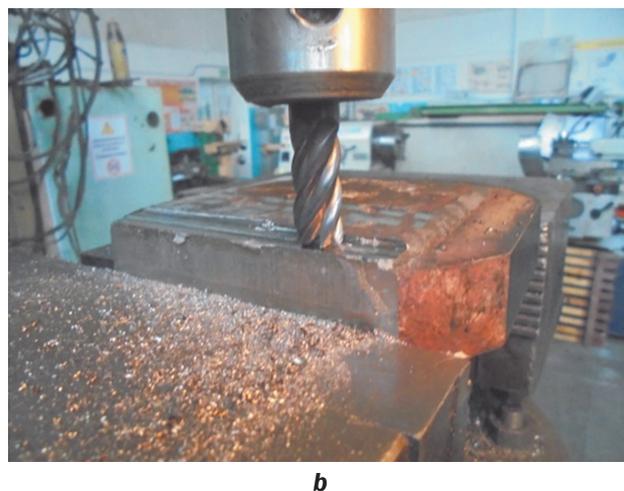
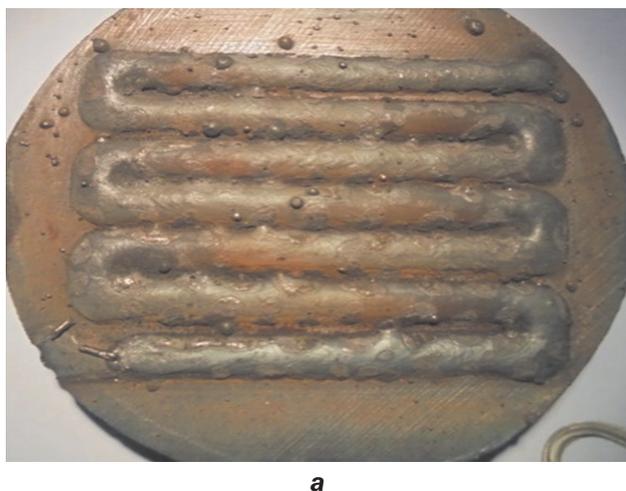


Рис. 2. Фото заготовки детали с наплавленным высокотвердым слоем (а) и фото обработки высокотвердого слоя с глубиной резания 1,5 мм четырехзубой монолитной твёрдосплавной фрезой диаметром 10 мм (б)

Fig. 2. An image of the workpiece with a weld high-hard deposit (a) and an image of high-hard deposit processing with the cutting depth of 1.5 mm using a four-tooth solid carbide milling cutter with the diameter of 10 mm (b)

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В общем виде полученные результаты приведены на рис. 3 и 4. На них графически иллюстрированы зависимости времени работы разработанных фрез от скорости резания. Показаны примеры для фрезы с четырьмя и девятью зубьями. Каждая из фрез имела одинаковые наноструктурированные многослойные покрытия, а именно:

1) слой карбонитрида титана плюс слой нитрида титана TiCN+TiN;

2) слой нитрида смеси титана с алюминием плюс слой оксида алюминия плюс нитрид смеси титана с алюминием плюс слой оксида алюминия (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃;

3) слой карбонитрида титана плюс слой нитрида смеси титана и алюминия плюс слой оксида алюминия плюс слой карбида титана TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC.

Сведения об особенностях используемых покрытий содержатся в работах [6–8].

Анализ данных, приведенных на этих рисунках, позволяет заключить следующее:

1. Период стойкости девятизубой фрезы без покрытия и с покрытием превышает аналогичные периоды стойкости четырехзубой

фрезы. Это не противоречит работам [9–11]. Период стойкости фрезы без покрытия вырос с 4 до 9 мин при скорости 50 м/мин, т.е. в 2,25 раза. Период стойкости фрезы с покрытием TiCN+TiN вырос с 6,5 до 13 мин, т.е. в 2 раза. Данное покрытие принято считать одним из востребованных типовых покрытий благодаря простоте его нанесения и, соответственно, низкой стоимости процесса нанесения.

Период стойкости фрезы с покрытием (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ вырос с 9 до 13 мин, т.е. в 1,4 раза. Период стойкости фрезы с покрытием TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC вырос с 14 до 20 мин, т.е. в 1,5 раза.

2. При скорости резания 50 м/мин влияние покрытия TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC на период стойкости оказалось более значимым, чем влияние иных покрытий. С увеличением скорости резания уровень влияния именно этого покрытия изменяется. При максимально использованной скорости резания 200 м/мин влияние покрытий минимизируется.

3. В отношении четырехзубой фрезы установлено, что покрытие TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC более рационально, чем покрытие (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ во всем

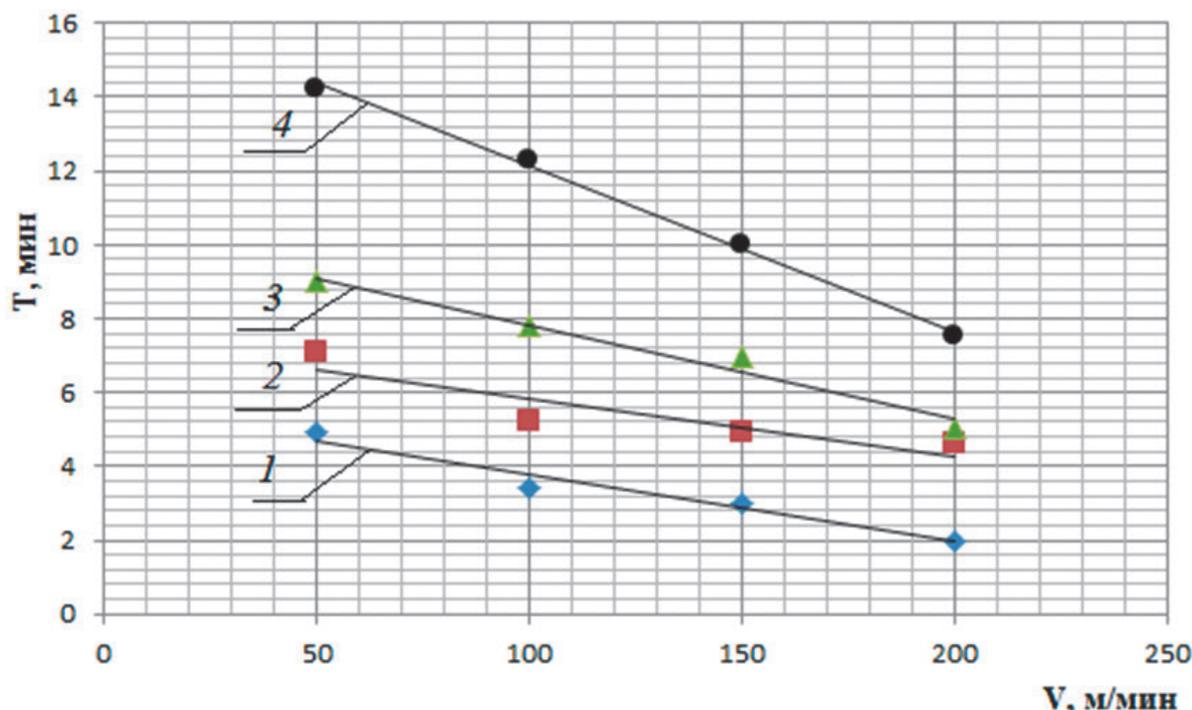


Рис. 3. График зависимости периода стойкости (T, мин) четырехзубой фрезы от скорости резания (V, м/мин): 1 – фреза без покрытия; 2 – фреза с покрытием TiCN+TiN; 3 – фреза с покрытием (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃; 4 – фреза с покрытием TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC

Fig. 3. Graph of the four-tooth milling cutter life period (T, min) as a function of the cutting speed (V, m/min): 1 – uncoated milling cutter; 2 – TiCN+TiN coated milling cutter; 3 – (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ coated milling cutter; 4 – TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC coated milling cutter

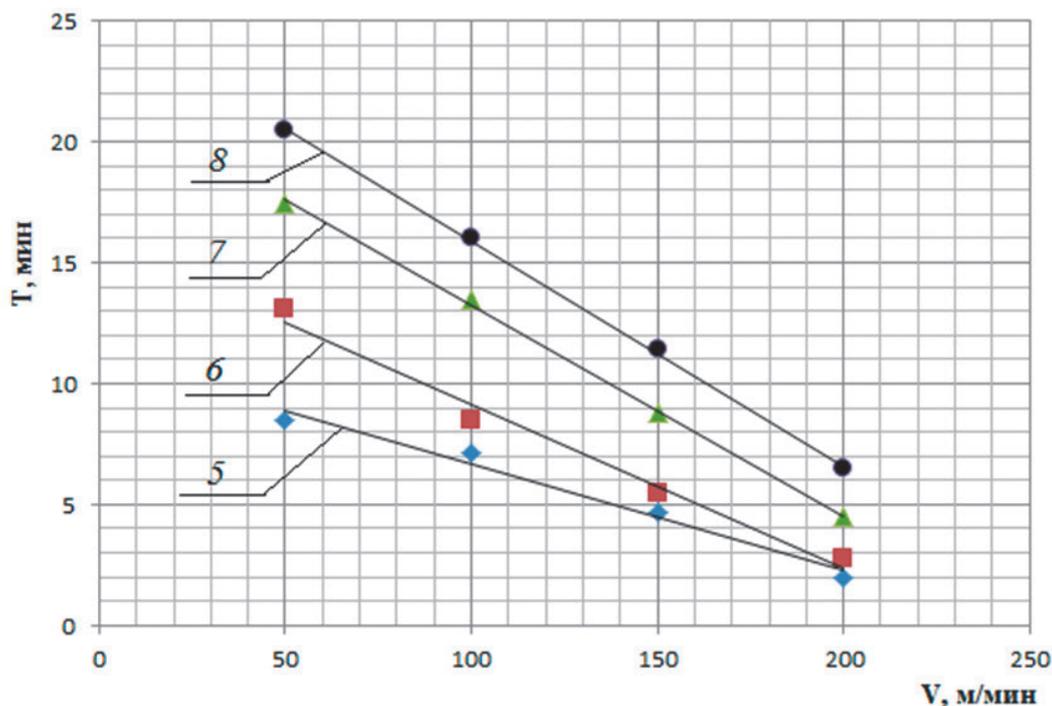


Рис. 4. График зависимости периода стойкости (T , мин) девятизубой фрезы от скорости резания (V , м/мин): 5 – фреза без покрытия; 6 – фреза с покрытием $TiCN+TiN$; 7 – фреза с покрытием $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$; 8 – фреза с покрытием $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$

Fig. 4. Graph of the nine-tooth milling cutter life period (T , min) as a function of the cutting speed (V , m/min): 5 – uncoated milling cutter; 6 – $TiCN+TiN$ coated milling cutter; 7 – $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$ coated milling cutter; 8 – $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$ coated milling cutter

диапазоне скоростей резания. По периоду стойкости покрытие $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$ превосходит покрытие $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$ от 1,3 до 1,5 раза, причем с ростом скорости резания это превосходство растет.

4. В отношении девятизубой фрезы установлено, что покрытие $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$ более рационально, чем покрытие $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$ во всем диапазоне скоростей резания. По периоду стойкости покрытие $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$ превосходит покрытие $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$ от 1,5 до 3 раз, причем с ростом скорости резания это превосходство растет. Это не противоречит работам^{6,7} [12–14].

Соотношение периодов стойкости инструмента с разными покрытиями при различных скоростях резания представлено в таблице.

Из таблицы следует, что инструмент с покрытием $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$ превосходит инструмент с покрытием $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$ от 1,6 до 3 раз. Это объясняется тем, что в покрытии $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$ верхний слой выполнен из алмазоподобного материала Al_2O_3 . Указанный материал отличается высокой твердостью. Когда истекает его работоспособность, то он, разрушаясь по механизму хрупкого межзеренного скола, разрушает и нижерасположенные слои покрытия.

Соотношение периодов стойкости инструмента с разными покрытиями при различных скоростях резания
 Correlation of different coating tool life periods and different cutting speeds

Скорость резания, м/мин	50	100	150	200
Соотношение видов покрытий фрез $TiCN+(TiAl)N+Al_2O_3+TiC$: $(TiAl)N+Al_2O_3+(TiAl)N+Al_2O_3$	1,6	1,7	2,2	3,0

⁶Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: учеб. пособ. Томск: ТПУ, 2004. 204 с.

⁷Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.

В покрытии TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC верхним слоем является карбид титана TiC. Этот материал TiC более устойчив к знакопеременным нагрузкам, при исчерпании работоспособности он разрушается по вязкому механизму, что более длительно. Кроме того, данный материал при вязком разрушении предохраняет нижерасположенный алмазоподобный слой Al₂O₃ от хрупкого разрушения и даже «заделывает» в нем образующиеся микротрещины, что также продлевает ресурс работоспособности инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные результаты исследования рациональности приме-

нения разработанных монокристаллических твердосплавных концевых фрез при обработке высокотвердых слоев, нанесенных на материал заготовки детали. При этом установлено, что период стойкости четырехзубой фрезы существенно ниже периода стойкости девятизубой фрезы. Вместе с тем эффект влияния разных покрытий для четырехзубой и девятизубой фрез аналогичен, а именно покрытия повышают период стойкости, и с ростом скорости резания эта эффективность увеличивается. Данный факт не противоречит сведениям, приведенным в работах [15–17].

Использование результатов и рекомендаций, указанных в статье, позволит развить знания, изложенные в работах [18–20].

Список источников

1. Киричек А.В., Лазуткин А.Г., Соловьёв Д.Л. Статико-импульсная обработка и оснастка для её реализации // СТИН. 1999. № 6. С. 20–24. EDN: SGDUUH.
2. Лазуткин А.Г., Киричек А.В., Степанов Ю.С., Соловьёв Д.Л. Механика нагружения поверхности волной деформации: монография. М.: Машиностроение, 2005. 150 с. EDN: QKZOGЕ.
3. Мокрицкий Б.Я., Мокрицкая Е.Б. Лезвийная обработка упрочненных материалов. Часть 3. Обработка заготовок деталей, упрочнённых наплавками высокой твёрдости // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 11. С. 495–497. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497>. EDN: KQMJLK.
4. Мокрицкий Б.Я., Скрипилёв А.А. Управление фрезерованием высокотвердых заготовок // Вестник машиностроения. 2022. № 12. С. 72–75. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-12-72-75>. EDN: NIHITM.
5. Верещака А.А., Верещака А.С., Григорьев С.Н. Многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия режущего инструмента, работающего в тяжелых условиях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 12. С. 3–11. EDN: PUUJFF.
6. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями: монография. М.: Машиностроение, 1986. 192 с. EDN: PJARET.
7. Табаков В.П., Порохин С.С. Использование многослойных покрытий для повышения работоспособности режущего инструмента, работающего в стесненных условиях // Металлообработка. 2010. № 3. С. 40–44.
8. Chen Huajie, Zhou Aihui. Orbital-free density functional theory for molecular structure calculations // Numerical Mathematics Theory Methods and Applications. 2008. Vol. 1. Iss. 1. P. 1–28.
9. Барбышев Б.В., Путилова У.С., Некрасов Р.Ю., Некрасов Ю.И., Харитонов Д.А. Механика деформирования и разрушения при резании. Т. I. Нестационарный процесс резания: монография. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. 212 с. EDN: SXNHSZ.
10. Кабалдин Ю.Г., Киле А.А., Тараев С.П. Разрушение твердосплавного инструмента с покрытием при прерывистом резании // Вестник машиностроения. 1991. № 7. С. 32–35.
11. Wang Nina, Zhang Guangpeng, Ren Lijuan, Pang Wanjing, Wang Yupeng. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 66. P. 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.014>. EDN: TWSEFS.
12. Криворучко Д.В., Залогова В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
13. Григорьев С.Н., Метель А.С., Исайков А.Н., Мельник Ю.А. Осаждение упрочняющих покрытий с помощью универсальных источников ускоренных частиц и металлического пара // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 36–40. EDN: PVJNKV.
14. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., Okunkova A.A., Pivkin P.M., Peretyagin P.Y., et al. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic and mills for nickel alloy machining: problems and prospects // Coatings. 2021. Vol. 11. Iss. 5. P. 532. <https://doi.org/10.3390/coatings11050532>. EDN: BSLLQF.
15. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates // Journal of Nano Research. 2017. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>. EDN: YUZOIN.
16. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V., et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings // Coatings. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>. EDN: KNRXMU.

17. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>.
18. Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю. Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 421–434. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>. EDN: ODIAXA.
19. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. Iss. 5–6. P. 1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>. EDN: LJEETH.
20. Chawla G., Kumar V., Sharma R. Neural simulation of surface generated during magnetic abrasive flow machining of hybrid Al/SiC/B₄C-MMCs // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021. Vol. 7. Iss. 4. P. 153. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00587-4>. EDN: EMIASN.

References

1. Kirichek A.V., Lazutkin A.G., Soloviev D.L. Static-pulse processing and its implementation tooling. *Machines and Tooling*. 1999;6:20-24. (In Russ.). EDN: SGDUUH.
2. Lazutkin A.G., Kirichek A.V., Stepanov Yu.S., Soloviev D.L. *Mechanics of surface loading by a deformation wave: monograph*. Moscow: Mashinostroenie; 2005, 150 p. (In Russ.). EDN: QKZOGЕ.
3. Mokritsky B.Ya., Mokritskaya E.B. Blade processing of hardened materials (in parts). Part 3. Processing of workpieces of parts hardened by high-hardness surfacing. *Strengthening technologies and coatings*. 2021;17(11):495-497. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497>. EDN: KQMJLK.
4. Mokritskiy B.Ya., Skripilev A.A. Control of milling of highly hard workpieces. *Russian Engineering Research*. 2022;12:72-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-12-72-75>. EDN: NIHITM.
5. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Grigoriev S.N. Nano-scale multilayered composite coatings for cutting tools used in heavy cutting conditions. *Strengthening technologies and coatings*. 2012;12:3-11. (In Russ.). EDN: PUUJFF.
6. Vereschaka A.S., Tretiakov I.P. *Cutting tools with wear-resistant coatings: monograph*. Moscow: Mashinostroenie; 1986, 192 p. (In Russ.). EDN: PJARET.
7. Tabakov V.P., Porokhin S.S. Using multilayer coatings to improve the performance of cutting tools operating in confined spaces. *Metalloobrabotka*. 2010;3:40-44. (In Russ.).
Deformation and fracture mechanics when cutting. Vol. I. *Non-stationary cutting process: monograph*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 2012, 212 p. (In Russ.). EDN: SXNHSZ.
10. Kabaldin Yu.G., Kile A.A., Taraev S.P. Coated carbide tool failure under intermittent cutting. *Russian Engineering Research*. 1991;7:32-35. (In Russ.).
11. Wang Nina, Zhang Guangpeng, Ren Lijuan, Pang Wanqing, Wang Yupeng. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;66:281-292. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.014>. EDN: TWSEFS.
12. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. *Cutting process modeling using the finite element method: methodological foundations: monograph*. Sumy: Universitetskaya kniga; 2012, 496 p. (In Russ.).
13. Grigoriev S.N., Metel' A.S., Isaikov A.N., Mel'nik Yu.A. Deposition of hardening coatings using universal sources of accelerated particles and metal vapor. *Strengthening technologies and coatings*. 2005;9:36-40. (In Russ.). EDN: PVJNKV.
14. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., Okunkova A.A., Pivkin P.M., Peretyagin P.Y., et al. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic and mills for nickel alloy machining: problems and prospects. *Coatings*. 2021;11(5):532. <https://doi.org/10.3390/coatings11050532>. EDN: BSLLQF.
15. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*. 2017;45:110-123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>. EDN: YUZOIN.
16. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V., et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings. *Coatings*. 2018;8(11):395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>. EDN: KNRXMU.
17. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017;148:174-184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>.
18. Mokritskii B.Ya., Vereshchagin V.Yu. Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end-milling hard-alloy combined cutters. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):421-434. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>. EDN: ODIAXA.
19. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2005;200(5-6):1804-1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>. EDN: LJEETH.
20. Chawla G., Kumar V., Sharma R. Neural simulation of surface generated during magnetic abrasive flow machining of hybrid Al/SiC/B₄C-MMCs. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021;7(4):153. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00587-4>. EDN: EMIASN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сысоев Олег Евгеньевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Строительство и архитектура»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
✉ fks@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-8893>

Oleg E. Sysoev

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Construction and Architecture
Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
✉ fks@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-8893>

Мокрицкий Борис Яковлевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Машиностроение»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

Boris Ya. Mokritskii,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Mechanical Engineering Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

Космынин Александр Витальевич,

д.т.н., профессор,
проректор по науке и инновационной работе,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
avkosm@knastu.ru

Alexander V. Kosmynin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Vice-Rector for Research and Innovation,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
avkosm@knastu.ru

Сысоев Евгений Олегович,

к.э.н., доцент,
профессор кафедры «Строительство и архитектура»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
jonpochta@mail.ru

Evgeny O. Sysoev,

Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Professor of the Construction and Architecture
Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
jonpochta@mail.ru

Заявленный вклад авторов**Authors' contribution**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов**Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье**Information about the article**

Статья поступила в редакцию 03.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 16.04.2025 г.; принята к публикации 12.05.2025 г.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 16.04.2025; accepted for publication 12.05.2025.