

УДК 67.017
DOI: 10.12737/17092

А.А. Верещака, А.С. Верещака, Ю.И. Бубликов, М.Г. Оганян

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ НАНОРАЗМЕРНЫХ МНОГОСЛОЙНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрена проблема повышения работоспособности концевых фрез из твердых сплавов на основе модификации физико-механических свойств инструмента путем формирования на его рабочих поверхностях наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий при использовании фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения. Разработаны система и состав трехкомпонентных наноструктурированных многослойно-композиционных модифицирующих покрытий для

осаждения на рабочие поверхности концевых фрез. Приведены результаты лабораторных и промышленных испытаний концевых фрез с разработанными покрытиями для условий черновой и чистовой обработки.

Ключевые слова: фрезерование, концевые фрезы, наноразмерные многослойно-композиционные покрытия, повышение эффективности.

A.A. Vereshchaka, A.S. Vereshchaka, Yu.I. Bublikov, M.G. Oganyan

END-MILLING CUTTER EFFECTIVENESS INCREASE BY APPLICATION OF MODIFICATING NANO-DIMENSIONAL MULTI-LEVEL COMPOSITION COATINGS

The problem of hard-metal end-milling cutter capacity for work increase on basis of tool physical stress-strain properties modification by means of the formation of nano-structured multi-level coatings on tool working surfaces with the use of filtered cathode-vacuum-arc deposition is developed. There is developed a system and a composition of three-component nano-structured multi-level composition modifying

coatings for the deposition on working surfaces of end-milling cutters. The results of laboratory and industrial tests of end-milling cutters with the developed coatings for the conditions of roughing and finishing are represented.

Key words: end-milling cutters, nano-dimensional multi-level composition coatings, effectiveness increase.

Фрезерование концевыми фрезами относят к процессам прерывистого резания, характеризующимся циклическим контактом режущих зубьев инструмента с обрабатываемым материалом при рабочем движении и последующим холостым движением в процессе резания.

Механизм изнашивания зубьев инструмента в значительной степени определяется циклическим изменением термомеханических напряжений, способствующих формированию фронта усталостных микротрещин, резко интенсифицирующих изнашивание. Причём указанный механизм более характерен для твердосплавного инструмента в сравнении с быстрорежущим инструментом, так как быстрорежущая сталь значительно превосходит твердые сплавы по прочности, трещиностойкости и сопротивляемости усталостному разрушению [1-3].

Стойкость фрез при прерывистом резании существенно зависит от соотношения продолжительности холостого и рабочего ходов их зубьев, так как температуры прогрева (рабочий ход) и охлаждения (холостой ход) являются причиной формирования напряжений противоположного знака (растягивающих и сжимающих). Причём с увеличением времени рабочего цикла зубьев фрезы резко возрастает их нагрев и, соответственно, вероятность формирования критических растягивающих напряжений, а с увеличением времени холостого хода увеличивается время остывания зуба и вероятность формирования сжимающих напряжений [2].

Эффективным способом повышения работоспособности концевых фрез из твёрдого сплава является применение наноразмерных многослойно-композиционных покрытий, способных оказывать существенное влияние на кон-

тактные процессы и термомеханические напряжения, действующие на инструмент при чередовании его рабочих и холостых движений. Специфические условия прерывистого резания, характерные для процессов фрезерования, диктуют особые требования к функциональным модифицирующим покрытиям, осаждаемым на инструмент:

- Покрытия должны максимально снижать термомеханические напряжения, действующие на режущую часть инструмента, для повышения её формоустойчивости к термопластическому изменению формы путём создания благоприятных условий контактного взаимодействия формируемой стружки и инструментального материала, особенно по передней поверхности. Это предопределяет повышение долговечности покрытий до разрушения сохранение их положительного влияния на изнашивание инструмента.

- Условия синтеза покрытия на рабочих поверхностях инструмента должны обеспечивать формирование остаточных сжимающих напряжений для снижения вероятности возникновения в покрытии трещин усталости (залечивающий эффект сжимающих напряжений), что, в свою очередь, будет способствовать увеличению времени работы инструмента до полного отказа.

- В процессе формирования покрытия необходимо обеспечивать условия, при которых его адгезионная прочность относительно твердосплавного субстрата будет соответствовать максимально возможному уровню. Это также позволит увеличить долговечность покрытия и его положительные эффекты.

Анализ сформулированных требований к покрытиям для фрез позволяет говорить о достаточно низкой эффективности покрытий монослойно-одноэлементного типа на контактных площадках фрезерного инструмента. В этой связи в качестве покрытий на рабочих поверхностях концевых фрез были выбраны многокомпонентные системы нитридов тугоплавких элементов IV-VI групп Периодической таблицы, легированные алюминием. Применение многоэлементных покрытий с многофазной структурой позволяет максимально снизить склонность покрытия к адгезионному взаимодействию с обрабатываемым материалом [2]. Кроме того, многокомпо-

нентные системы нитридов, легированные алюминием или кремнием, предлагаемые к использованию в качестве покрытий, являются типичными высокоэнтропийными соединениями. Высокая стабильность состава, структуры и свойств таких соединений может быть объяснена минимизацией свободной энергии образования из-за максимально возможной конфигурационной составляющей их энтропии [1].

Вместе с тем многоэлементные нитридные покрытия уступают одноэлементным нитридным покрытиям по прочности адгезии с твердосплавным субстратом. Поэтому в работе использовали многослойную систему в виде многослойно-композиционного покрытия (МКП), содержащего три слоя [2;5].

При разработке концепции покрытий для цельнотвердосплавных концевых фрез учитывали особенности контактных процессов, возникающих при фрезеровании широкой гаммы конструкционных материалов. К таким особенностям можно отнести:

- высокий уровень контактных (особенно нормальных) напряжений, возникающих на передней поверхности инструмента из твердого сплава вследствие интенсивного снижения длины (площади) контакта и существенно менее интенсивного уменьшения нормальных нагрузок, действующих на переднюю поверхность;

- концентрацию температурных напряжений на контактных площадках передней и задней поверхностей инструмента, возникающую из-за чрезвычайно низкой теплопроводности твердого сплава и высокого уровня коэффициента его термического расширения;

- практически полное отсутствие застойной зоны обрабатываемого материала и возникающего при ее наличии нароста, выполняющего функции защиты контактных площадок от изнашивания.

Исходя из рассмотренной концепции покрытий, наиболее пригодных для нанесения на фрезерный инструмент, для исследований были отобраны следующие составы многослойно-композиционных покрытий: Ti-TiN-(TiAl)N, Ti-TiN-(TiCr)N, Ti-TiN-(TiCrAl)N и Ti-TiN-(TiAlZr)N.

Нанесение покрытий на цельнотвердосплавные фрезы и твердосплавные СМП

для оснащения моделирующего инструмента выполняли на установке ВИТ-2, реализующей процессы фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) [6-9].

Методика и результаты исследований

Испытания твердосплавных концевых фрез проводились при черновой и чистовой обработке стали 30ХГСА (30CrMnSiA)(HRC 20...22).

Исследование проводили на вертикально-фрезерном станке модели 6Т12. Для получения необходимой информации о составляющих силы резания использовали универсальный тензометрический динамометр УДМ-600, оснащённый интерфейсом и компьютерной программой для обработки полученных экспериментальных данных.

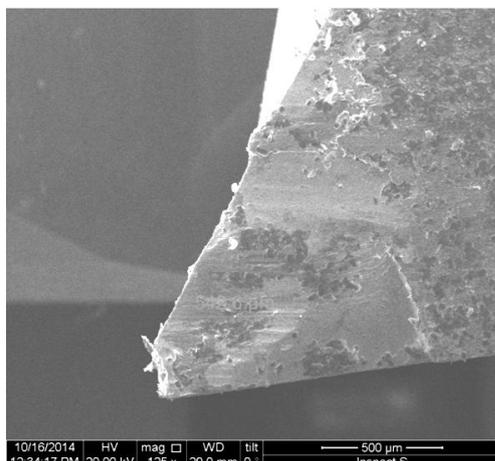
Использовали концевые фрезы с $D_{фр}=16$ мм и $Z=3$. При черновой обработке принимались одинаковыми для всех фрез

Оптимальные марки инструментального материала определялись в соответствии с методикой, описанной в работах [8; 9].

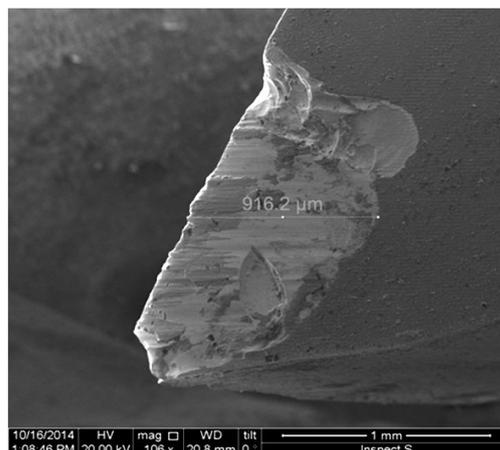
глубина фрезерования $a_p=1,5$ мм, ширина фрезерования $a_e=5$ мм, подача на зуб фрезы $f_z=0,115$ мм/зуб.

При черновой обработке стали 30CrMnSiA фрезы испытывались для двух режимов резания: с высокой скоростью резания ($v = 195$ м/мин или $v = 240$ м/мин) и средней скоростью резания ($v = 140$ м/мин).

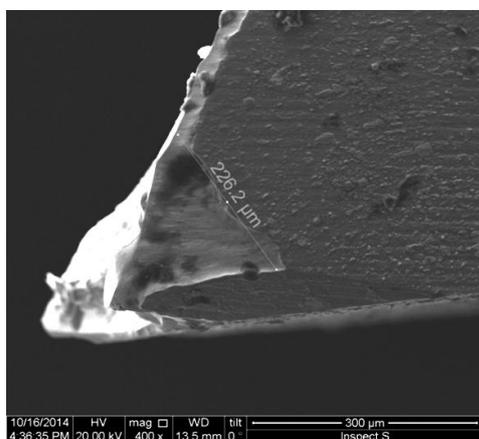
Микрофотографии, иллюстрирующие характер и величину износа зубьев фрезы при различных скоростях резания для покрытий Ti-TiN-(TiAl)N и Ti-TiN-(TiCrAl)N, приведены на рис. 1. Характер и интенсивность износа оценивались по результатам измерения сил резания при фрезеровании.



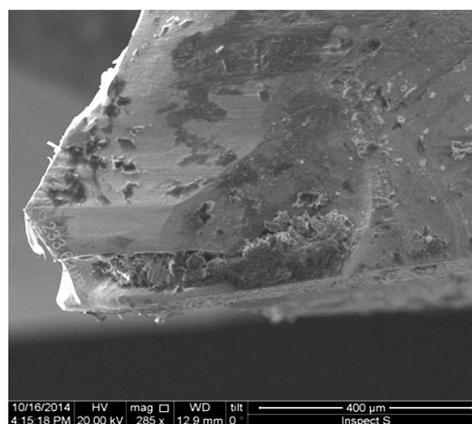
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Характер изнашивания концевых фрез для различных режимов резания: а - Ti-TiN-(TiAl)N, $v = 140$ м/мин; б - Ti-TiN-(TiAl)N, $v = 240$ м/мин; в - Ti-TiN-(TiCrAl)N, $v = 140$ м/мин; г - Ti-TiN-(TiCrAl)N, $v = 195$ м/мин

На рис. 2 приведен график изменения силы резания (в направлении, перпендикулярном направлению подачи инструмента) в процессе обработки по мере нарастания износа для фрез, обеспечивающих объем снятого материала не менее 500 см^3 . В процессе обработки по мере износа фрезы сила резания увеличивается. Начальная сила резания (для новой фрезы) при обработке на скорости резания 140 м/мин больше, чем при обработке на скорости 195 м/мин . Таким образом, с точки зрения усилий резания повышение скорости резания предпочтительно. Однако в этом случае повышение температуры вызывает увеличение износа. Это объясняет увеличение стойкости фрезы с покрытием $\text{Ti-TiN-(Ti,Al,Zr)N}$ при повышении скорости резания. Данное покрытие хорошо переносит высокие температуры, однако повышенные силы резания при обработке на скорости 140 м/мин приводят к его быстрому разрушению. Для данного покрытия целесообразно выбирать рациональную скорость резания (исходя из стойкости фрезы 70 мин), которая будет лежать в диапазоне от 140 до 195 м/мин .

Для фрез с покрытиями Ti-TiN-(Ti,Al)N и Ti-TiN-(TiCrAl)N рекомендуется обработка на скорости резания $\sim 180 \text{ м/мин}$, что обеспечит стойкость около $60\text{-}70 \text{ мин}$ при незначительном снижении производительности обработки.

Анализ кривых износа показывает, что наибольшей стабильностью в процессе износа характеризуется покрытие Ti-TiN-(TiCrAl)N (скорость резания 140 м/мин). Для него наблюдается плавный рост усилий резания, без резких изломов на кривой (рис. 2). Плавный рост наблюдается в процессе обработки 700 см^3 , а затем регистрируется скачкообразное снижение силы резания, связанное с поломкой зуба фрезы (для фрезы с покрытием Ti-TiN-(Ti,Al)N

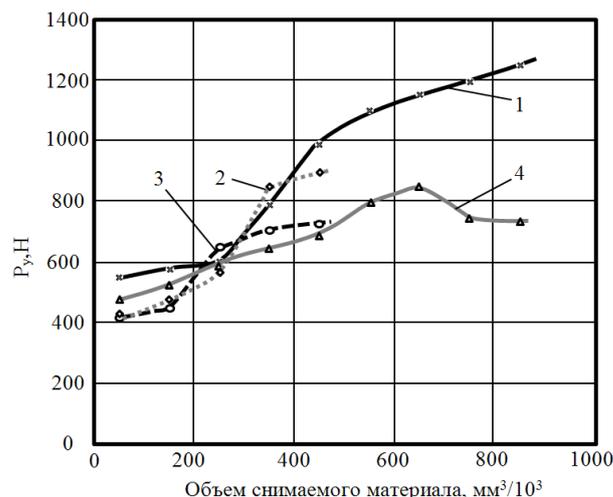


Рис. 2. Изменение силы резания в процессе обработки: 1 - Ti-TiN-(TiAl)N , $v=140 \text{ м/мин}$; 2 - Ti-TiN-(TiCrAl)N , $v=195 \text{ м/мин}$; 3 - Ti-TiN-(TiAlZr)N , $v=195 \text{ м/мин}$; 4 - Ti-TiN-(TiCrAl)N , $v=140 \text{ м/мин}$

плавный рост наблюдается только до 200 см^3).

В процессе чистовой обработки испытывались фрезы с покрытиями $\text{Cr-(Ti,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N}$ и Cr-ZrN-(Cr,Zr)N (таблица).

При чистовой обработке стали 30CrMnSiA концевые фрезы с $D_{\text{фр}}=16 \text{ мм}$ и $Z=2$ испытывались на скорости резания 400 м/мин . Для всех фрез принимались одинаковыми шаг между строчками $a_e=0,2 \text{ мм}$, припуск на обработку $a_p=0,5 \text{ мм}$, подача на зуб $f_z=0,17 \text{ мм/зуб}$.

Видно, что покрытие Cr-ZrN-(Cr,Zr)N характеризуется меньшей стойкостью и не подходит для высокоскоростной чистовой обработки ($v=400 \text{ м/мин}$). Стойкость фрезы с данным покрытием (до полного износа) составила менее $4,5 \text{ ч}$.

Фрезой с покрытием $\text{Cr-(Ti,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N}$ обработка выполнялась $7,5 \text{ ч}$. По истечении этого времени был зафиксирован незначительный износ режущей кромки. Характер износа фрез показан на рис. 3.

Таблица

Результаты испытаний фрез для чистовой обработки

Инструмент	Скорость резания, м/мин	Обработанная поверхность, см ²	Время резания, мин
Фреза с покрытием Cr-ZrN-(Cr,Zr)N	400	1560	260
Фреза с покрытием Cr-(Ti,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N	400	2680	450

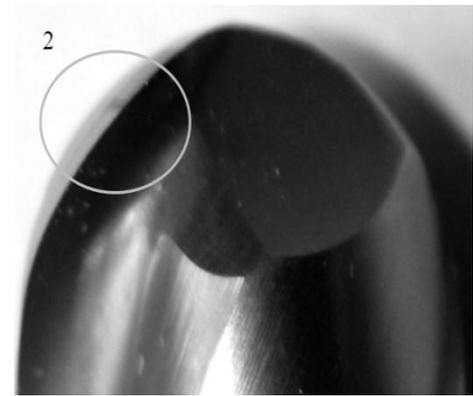
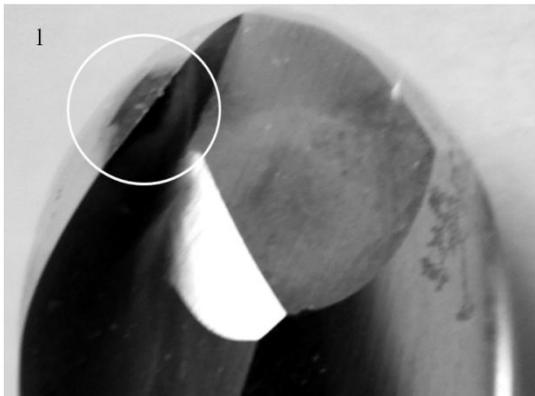


Рис. 3. Характер износа фрез при чистовом резании:

1 - фреза с покрытием Cr-ZrN-(Cr,Zr)N (появление искр в процессе обработки, следы значительного износа); 2 - фреза с покрытием Cr-(Ti,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N (незначительный износ)

С использованием разработанной ранее методики получения трехкомпонентных многослойно-композиционных покрытий (МКП) с наноразмерной зерновой структурой, позволяющей существенно повысить работоспособность твердосплавных концевых фрез, были получены покрытия для цельнотвердосплавных концевых фрез для чернового и чистового фрезерования.

Нанесение покрытий осуществлялось с помощью процесса фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения для формирования МКП, позволяющего повысить качество МКП за счет практически полной (до 90-95 %) фильтрации макро- и

микрокапельной составляющих паро-ионного потока, исключить электроэрозионное растравливание режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента, формировать наноразмерную зерновую структуру МКП и наноразмерную толщину субслоев всех его элементов.

Для черновой обработки деталей лучший результат показал инструмент с покрытием Ti-TiN-(Ti,Cr)N (рекомендуемая скорость резания находится в пределах от 140 до 180 м/мин), для чистовой обработки - инструмент с покрытием Cr-(Ti,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N (скорость резания 400 м/мин).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang, Hui-Wen Ping-Kang Huang, Jien-Wei Yeh, Andrew Davison, Chun-Huai Tsau, Chih-Chao Yang. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-component (AlCrMoSiTi)N coatings / Hui-Wen Chang, Ping-Kang Huang, Jien-Wei Yeh, Andrew Davison, Chun-Huai Tsau, Chih-Chao Yang. Surface and Coatings Technology. - 2008. - Vol. 202. - P. 3360 - 3366.
2. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков. - М.: Машиностроение, 2008. - 310 с.

3. Полетика, М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструментов / М.Ф. Полетика. - М.: Машгиз, 1962. - 150 с.
4. Vereshchaka, A.A. Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools / A.A. Vereshchaka, A.S. Vereshchaka, O. Mgaloblishvili, M.N. Morgan, A.D. Batako // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. - Vol. 72. - Is. 1-4. - P. 303-317.
5. Верещака, А.А. Режущие инструменты с модифицирующими износостойкими комплексами / А.А.Верещака, А.С.Верещака, М.И. Седых. - М.: МГТУ «Станкин», 2014. - 195 с.
6. Верещака, А.А. Некоторые аспекты выбора функциональных покрытий для режущих инструментов / А.А.Верещака // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2013. – Т. III. - № 6. - С. 57-59.
1. Chang, Hui-Wen Ping-Kang Huang, Jien-Wei Yeh, Andrew Davison, Chun-Huai Tsau, Chih-Chao Yang. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-component (AlCrMoSiTi)N coatings / Hui-Wen Chang, Ping-Kang Huang, Jien-Wei Yeh, Andrew Davison, Chun-Huai Tsau, Chih-Chao Yang. Surface and Coatings Technology. - 2008. - Vol. 202. - P. 3360 – 3366.
2. Tabakov, V.P., Formation of cutter wearproof ion-plasma coatings / V.P. Tabakov. – М.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 310.
3. Poletika, M.F., Contact loads on tool cutting surfaces / M.F. Poletika. – М.: Mashgiz, 1962. – pp. 150.
4. Vereshchaka, A.A. Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools / A.A. Vereshchaka, A.S. Vereshchaka, O. Mgaloblishvili, M.N. Morgan, A.D. Batako // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. - Vol. 72. - Is. 1-4. - P. 303-317.
5. Vereshchaka, A.A., Cutters with modifying wearproof complexes / A.A. Vereshchaka, A.S. Vereshchaka, M.I. Sedykh. – MSTU “Stankin”, 2014. – pp. 195.
6. Vereshchaka, A.A., Some aspects in choice of functional coatings for cutters / A.A. Vereshchaka // Proceedings of Kabardino-Balkaria State University. – 2013. Vol. III. – No 6 – pp. 57-59.
7. Vereshchaka, A.A., Multi-level composition coatings for end-milling cutters: methodology of creation and peculiarities of application / A.A. Vereshchaka, Yu.I. Bublikov, M.G. Oganyan // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2014. – No 3(43). – pp. 14-19.
8. Vereshchaka, A.A., Development of assisted filtered vacuum-arc deposition process / A.A. Vereshchaka // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2014. – No 3(43). – pp. 10-13.
9. Vereshchaka, A.A., Functional coating effectiveness increase for cutters precipitated by KIB-MeVVA method, by means of steam-ionic stream filtration for macro- and micro-particles separation / A.A. Vereshchaka // Bulletin of MSTU “Stankin”. – 2015. – No 1(32). – pp. 41-48.

Материал поступил в редколлегию
29.06.15.

Рецензент: д.т.н., профессор
М.Ю. Куликов

Сведения об авторах:

Верещака Алексей Анатольевич, к.т.н., ИКТИ РАН, e-mail: ectech@rambler.ru.

Верещака Анатолий Степанович, д.т.н., профессор ИКТИ РАН, тел.: +7- 916-479-01-25.

Vereshchaka Alexey Anatolievich, Can.Eng., ИКТИ RAS, e-mail: ectech@rambler.ru.

Vereshchaka Anatoly Stepanovich, D.Eng., Prof., ИКТИ RAS, Phone.: +7-916-479-01-25.

Бубликов Юрий Иванович, к. ф.-м. н., ИКТИ РАН, e-mail: yubu@rambler.ru.

Оганиян Максим Гайкович, МГТУ «Станкин», e-mail: g.oganyan@stankin.ru.

Bublikov Yury Ivanovich, Can.P-M, ИКТИ RAS, e-mail: yubu@rambler.ru.

Oganyan Maxim Gaikovich, MSTU «Stankin», e-mail: g.oganyan@stankin.ru.