

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.9:621.91.01:621.9.025

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-6-4-10

Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, В.Ю. Верещагин

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ СОСТАВНЫХ ФРЕЗ

Разработаны рекомендации, позволяющие минимизировать применение дорогостоящих монолитных фрез посредством использования более дешёвых - составных фрез. Сформирован новый подход к конструкции концевых твёрдосплавных фрез.

Разработаны рекомендации, позволяющие применять составные твёрдосплавные концевые фрезы без снижения точности обработки в сравнении с монолитными фрезами.

Ключевые слова: фреза, точность, обработка, паз, исследование, метод.

B. Ya. Mokritsky, A. V. Morozova, V. Yu. Vereshchagin

MILLING EFFECTIVENESS INCREASE BY MEANS OF HARD-ALLOY COMPOUND END MILLING CUTTERS

The investigation purpose: the effectiveness increase of hard-alloy end milling cutters at the expense of new milling cutter design development conventionally called compound milling cutters.

The problem solved during investigation: the reveal of the most efficient fields of compound milling cutter use.

The scientific novelty of the work: the formation of a new kind of hard-alloy end milling cutter design, to avoid milling cutter destruction in the place of shank end mounting in the chuck of the machine a shank end is made of structural steel and soldered with a hard-alloy cutting part of the milling cutter.

As a result of the investigation it was defined:

a) compound milling cutters compete with monolithic milling cutters in accuracy during billet production of parts at a lower cost of milling cutters;

b) a compound milling cutter with a diameter of 16 mm and a milling cutter length of 92 mm substitute successfully a monolithic milling cutter by production accuracy and ensures cost reduction of a product by 4 %;

c) a compound milling cutter with a length of 220 mm as compared with a monolithic milling cutter ensures product cost reduction by 38% and applicable for general aims at engineering enterprises.

Key words: milling cutter, accuracy, machining, slot, investigation, method.

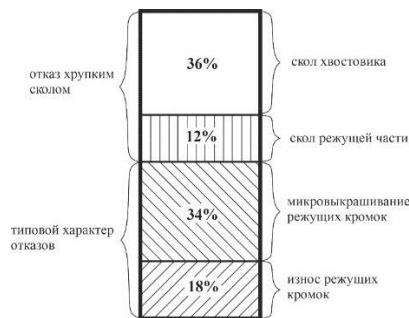
Введение

Применение монолитных концевых твёрдосплавных фрез позволяет обрабатывать заготовки деталей с высокой точностью, но их высокая стоимость снижает эффективность фрезерования. Концентрация нагрузок в области закрепления фрезы

в патроне зачастую приводит к сколу хвостовика фрезы (рис. 1а). Статистика [1] отказов и примеры разрушения хвостовиков концевых монолитных фрез приведены на рис. 1б.



а)



б)

Рис. 1. Примеры а – скола хвостовиков и статистика; б – отказов концевых монолитных фрез

Такая низкая надёжность монолитных фрез ставит задачу поиска более рациональных вариантов конструкции концевых фрез.

Вопросами повышения работоспособности металлорежущего инструмента и концевых фрез занимались многие отече-

Методология исследования

Исследование построено на применении программной среды *ANSYS* как метода исследования [18]. Это позволило рассмотреть разные варианты конструкций разработанных авторами фрез. Они названы составными. У них твёрдосплавная режущая часть сопряжена с хвостовиком, выполненным из более дешёвого материала, исключающего возможность хрупкого разрушения хвостовика у места крепления в патроне станка. Сопряжение режущей части и хвостовика имеет разные варианты исполнения и спаяно.

Параметром для оптимизации конструкции фрезы принята величина отклонения $Y_{\text{откл}}$ стенки паза из условия: чем меньше величина отклонения, тем выше точность обработки (рис. 2).

Основные исследования сделаны применительно к концевым фрезам, изготавливаемых в соответствии с ГОСТ [19, 20]. Для фрезы диаметром 16 мм рассмотрены длины 92 мм и 123 мм. Рассмотрены случаи, когда длина режущей части составляет 40 мм. За рамками ГОСТ использованы и другие длины фрез. Рассмотрены также разные диаметры фрез, минимальный диаметр 10 мм. Сила резания ограничена величиной 3000 Н, точность обработанной поверхности стенки паза должна быть в пределах 6–9 квалитетов точности, типичных для общего машиностроения.

Обсуждение полученных результатов

Примеры исполнения составных фрез показаны на рис. 3.

На рис. 3а, 3в и 3г показаны разные варианты исполнения фрезы диаметром 16 мм с хвостовиком, выполненным из конструкционной стали 40Х. В частности, на рисунке 3г показана фреза с нанесённым покрытием. Кольцевая канавка на ней –

ственные и зарубежные исследователи, например [2–17]. Однако полученные ими результаты не исчерпали растущие требования современного машиностроения. Требуется разработка новых рекомендаций.

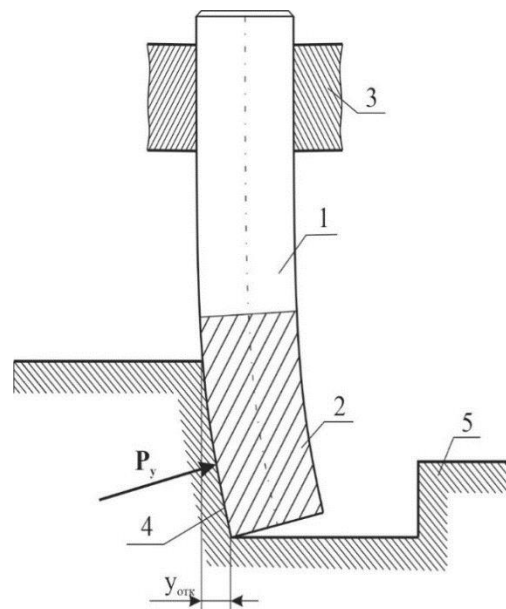


Рис. 2. Схема формирования отклонения $Y_{\text{откл}}$ положения стенки обрабатываемого паза при действии радиальной составляющей P_y силы резания от теоретического вертикального положения стенки: 1 – хвостовик фрезы; 2 – твёрдосплавная режущая часть фрезы; 3 – зажимное устройство станка; 4 – обработанная поверхность паза заготовки 5

Рассмотрено три примера материала хвостовика, конструкционная сталь 40Х, быстрорежущая сталь Р18 и инструментальный твёрдый сплав марки Т30К4. При материале режущей части ВК8 сочетания с такими хвостовиками условно обозначили ВК8 + 40Х, ВК8 + Р18, ВК8 + Т30К4.

это место спая режущей части фрезы с её хвостовиком. Для примера на рисунке 3б показана сборная фреза конструкции фирмы *Sandvik coromant* со сменной режущей частью. Штангенциркуль на фото показан для возможности визуального сравнения габаритов фрезы.



Рис. 3. Примеры составных фрез длиной 92 мм

На рис. 4 приведены отдельные примеры построения диаграмм сравнения, отражающих величины отклонения $Y_{\text{откл}}$ для фрез разной длины L при разной ширине B фрезерования. Под шириной B фрезерования здесь понимается длина участка режущей части фрезы, задействованная в резании (например, из 40 мм длины режущей части фрезы резание осуществляется только 15 мм).

Так, например, из рис. 4а видно, что для фрезы длиной 92 мм при ширине B фрезерования 5 мм все отклонения $Y_{\text{откл}}$ не превышают 3 мкм, а при ширине $B = 15$ мм максимальная величина отклонения – 5 мкм (у фрезы ВК8+40Х). При этом, для остальных фрез (при режущей части ВК8 в сочетании с хвостовиками Р18 и Т30К4) отклонения при ширине фрезерования $B = 15$ мм

соизмеримы с теми, которые были при ширине фрезерования $B = 5$ мм.

Кроме того, из рис. 4а-д при анализе двух видов фрез с разной шириной фрезерования B (например, $B = 5$ мм и $B = 15$ мм) выявлено, что, чем больше длина фрезы L , тем больше и величина отклонения $Y_{\text{откл}}$, т.е. $Y_{\text{откл}L=92\text{мм}} < Y_{\text{откл}L=123\text{мм}} < Y_{\text{откл}L=180\text{мм}}$. Аналогичный вывод можно сделать при сравнительном анализе изображений рис. 4б-е.

Сравнительный анализ рис. 4а-б при исследовании четырех разных видов фрез с одинаковой длиной, например, при $L = 92$ мм, показал, что, чем больше ширина фрезерования B , тем больше и величина отклонения $Y_{\text{откл}}$, т.е. $Y_{\text{откл}B=5\text{мм}} < Y_{\text{откл}B=15\text{мм}} < Y_{\text{откл}B=30\text{мм}} < Y_{\text{откл}B=40\text{мм}}$. Аналогично – для рис. 4в-г и рис. 4д-е.

Подобные диаграммы сравнения получены для всего диапазона рассматриваемых фрез. Информация, представленная

на диаграммах, подтверждена экспериментальными исследованиями при натурном фрезеровании.

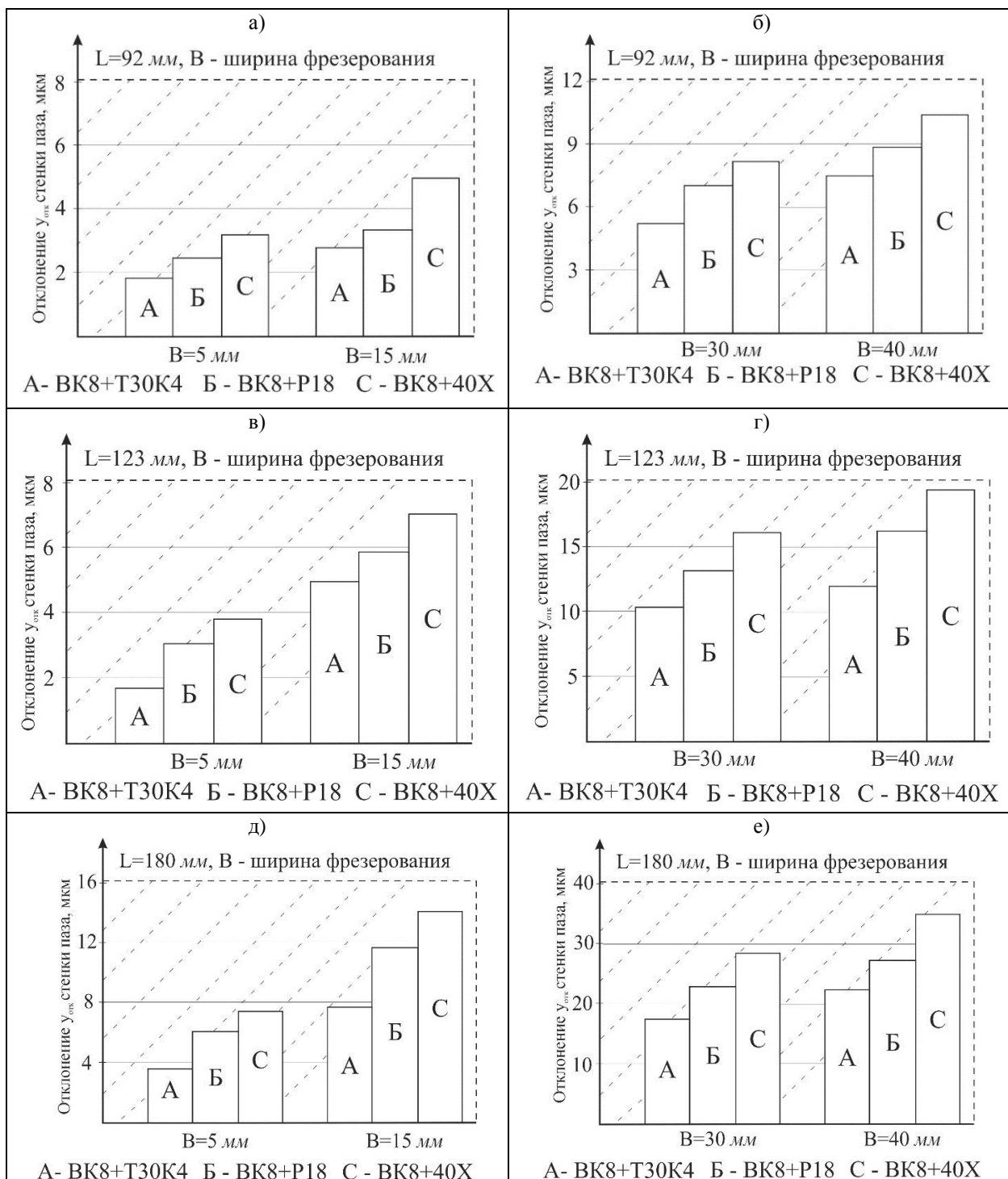


Рис. 4. Графическая иллюстрация изменения величины $U_{откл}$ в зависимости от длины L монолитной фрезы и ширины B фрезерования

Заключение

Анализ графической информации (рис. 1–4) позволяет сделать следующие выводы.

1. Составные фрезы в рамках рассмотренных параметров (длина от 92 мм до 220 мм, длина режущей части 40 мм,

диаметр 16 мм) применимы на предприятиях общего машиностроения. Погрешность $U_{откл}$ составляет от 2 до 50 мкм.

2. Чем меньше длина фрезы, тем выше точность изготовления стенки паза (тем меньше величина $U_{откл}$) в заготовке обрабатываемой детали.

3. При длине фрезы 92 мм точность не уступает точности, получаемой при применении монолитной фрезы. Следовательно, фрезу длиной 92 мм можно использовать для изготовления высокоточных деталей (погрешность $U_{откл}$ составляет от 2 до 9 мкм).

4. При длине L 123 и 180 мм составная фреза конкурирует со сборной фрезой и может быть использована при изготовлении деталей общего машиностроения (погрешность $U_{откл}$ составляет от 2 до 35 мкм).

5. При длине 220 мм составная фреза применима для работы в заготовительных участках предприятий общего машиностроения. $U_{откл}$ составляет от 4 до 50 мкм.

6. Из всех вариантов исполнения хвостовиков у составных фрез с позиций точности обработки паза в заготовке детали предпочтителен вариант ВК8 + Т30К4, затем ВК8 + Р18 и ВК8 + 40Х. При этом экономия стоимости составных фрез в сравнении с монолитной фрезой (её стоимость в зависимости от фирмы-производителя для длины 92 мм при диаметре 16 мм изменяется от 1,5 до 2,5 тыс. рублей) составляет: а – для фрезы длиной 92 мм – 4 %; б – для фрезы длиной 123 мм – 12 %; в – для фрезы 180 мм – 26 %; г – для фрезы 220 мм – 38 %.

Дополнительно выполнены исследования по эффективности применения покрытий (рис. 3г) на составных фрезах. Здесь их результаты не приводятся. Необходимо отметить, что применение покрытий существенно снижает силу резания и её радиальную составляющую P_1 , что снижает прогиб фрезы и, соответственно, повышает точность обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мокрицкий, Б. Я.** Моделирование как средство оптимизации геометрии металлорежущего инструмента / Б. Я. Мокрицкий, В. Ю. Верещагин, А. С. Верещагина // Металлообработка. - 2018. - №1. - С. 14 – 19.
2. **Воробьев, А. В.** Проектирование сменных многогранных пластин для сборных режущих инструментов по целевому назначению / А. В. Воробьев, М. А. Корчуганова, С. И. Петрушин, О. Ю. Ретюнский // Вестник машиностроения. - 2002. - № 5. – С. 47-50.
3. **Петрушин, С. И.** Моделирование процесса изнашивания лезвия режущего инструмент / С. И. Петрушин, А. В. Воробьев // Вестник машиностроения. – 2005. – №12. – С. 31-34.
4. **Bouzakis, K. D.** Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization / K. D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris, E. Bouzakis, D. Biermann, R. M'Saoub // CIRP Ann. Manuf. Technol. 61 (2012) 703–723.
5. **Fox-Rabinovich, G. S.** Impact of annealing on microstructure, properties and cutting performance of an AlTiN coating / G. S. Fox-Rabinovich, J. L. Endrino, B. D. Beake, A. I. Kovalev, S. C. Veldhuis, L. Ning, F. Fotaine, A. Gray // Surf. Coat. Technol. 201 (2006) 3524–29.
6. **Fox-Rabinovich, G. S.** Nano-crystalline filtered arc 5 deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications / G. S. Fox-Rabinovich, G. C. Weatherley, A. I. Dodonov, A. I. Kovalev, L. S. Shuster, et al. // Surf. Coat. Technol. 177–178 (2004) 800–811.
7. **Fox-Rabinovich, G. S.** Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining condition/ G. S. Fox-Rabinovich, K. Yamamoto, S. C. Veldhuis, A. I. Kovalev, G. K. Dosbaeva // Surf. Coat. Technol. 200 (2005) 1804–13.
8. **Erkens, G.** Properties and performance of high aluminum containing (Ti, Al)N based supernitride coatings in innovative cutting applications / G. Erkens, R. Cremer, T. Hamoudi, K.-D. Bouzakis, et al. // Surf. Coat. Technol. 177–178 (2004) 727–734.
9. **Fox-Rabinovich, G. S.** Structure, properties and wear performance of nano-multilayered TiAlCrSiYN/ TiAlCrN coatings during machining of Ni-based aerospace superalloys / G. S. Fox-Rabinovich, B. D. Beake, K. Yamamoto, M. H. Aguirre, S. C. Veldhuis, G. Dosbaeva, A. Elfizy, A. Biksa, L. S. Shuster, A.Y. Rashkovskiy // Surf. Coat. Technol. 204 (2010) 3698–3706.
10. **Zhang, H.** A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions / H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Lv, C. Yan // J. Clean. Prod. 148 (2017) 174–184.
11. **Huang, W.** An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills /

- W. Huang, X. Li, B. Wang, J. Chen, J. Zhou // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 111 (2016) 63–67.
12. **Zhao, W.** Cutting performance evaluation of end mills for titanium aircraft components / W. Zhao, S. Wang, Z. Han, N. He // *Procedia CIRP* 35 (2015) 1–7.
 13. **Baohai, W.** Cutting tool temperature prediction method using analytical model for end milling / W. Baohai, C. Di, H. Xiaodong, Z. Dinghua, T. Kai // *Chin. J. Aeronaut.* 29 (2016) 1788–1794.
 14. **Vereschaka, A. A.** Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nanostructured coatings and their influence on cutting tool life / A. A. Vereschaka, S. N. Grigoriev, N. N. Sitnikov, A. D. Batako // *Wear* 390–391 (2017) 209–219.
 15. **Vereschaka, A. A.** Development of assisted filtered cathodic vacuum arc deposition of nano-dispersed multilayer composite coatings on cutting tools / A.A. Vereschaka // *Key Eng. Mater.* 581 (2014) 62–67, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.62.
 16. **Vereschaka, A. A.** Study of properties of nanostructured multilayer composite coatings of Ti-TiN-(TiCrAl)N and Zr-ZrN-(ZrNbCrAl)N / A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, Ju. I. Bublikov, A. Y. Aksenenko, N. N. Sitnikov // *J. Nano Res.* 40 (2016) 90–98, doi:10.4028/www.scientific.net/JNanoR.40.90.
 17. **Volkhonskii, A. O.** Filtered cathodic vacuum arc deposition of nano-layered composite coatings for machining hard-to-cut materials / A. O. Volkhonskii, A. A. Vereschaka, I. V. Blinkov, A. S. Vereschaka, A. D. Batako // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 84 (2016) 1647–1660, doi:10.1007/s00170-015-7821-8.
 18. **Мокрицкий, Б. Я.** Моделирование процесса резания с применением программы ANSYS / Б. Я. Мокрицкий, В. Ю. Верещагин, А. С. Верещагина // *Вестник машиностроения.* - 2018. - № 4. - С. 69 – 72.
 19. **ГОСТ 32405-2013 (ISO 10911:2010).** Фрезы концевые цельные твердосплавные. Технические условия / взамен ГОСТ 18372-73; дата введ. 01.01.2015. – Москва : Стандартинформ, 2014. – IV, 10 с.
 20. **ГОСТ 17025-71.** Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком. Конструкция и размеры / взамен ГОСТ 8237-57; дата введ. 01.01.73. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 11 с.
 1. **Mokritsky, B.Ya.** Modeling as Means for Optimization of Metal-cutting Tool / B.Ya. Mokritsky, V.Yu. Vereshchagin, A.S. Vereshchagina // *Metalworking.* – 2018. – No.1. – pp. 14-19.
 2. **Vorobiyov, A.V.** Design of replaceable polyhedral plates for composite cutters on intended purpose / A.V. Vorobiyov, M.A. Korchuganova, S.I. Petrushin, O.I. Retyunsky // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2002. – No.5. – pp. 47-50.
 3. **Petrushin, S.I.** Simulation of cutter edge wear / S.I. Petrushin, A.V. Vorobiyov // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2005. – No.12. – pp. 31-34.
 4. **Bouzakis, K. D.** Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization / K. D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris, E. Bouzakis, D. Biermann, R. M'Saoub // *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 61 (2012) 703–723.
 5. **Fox-Rabinovich, G. S.** Impact of annealing on microstructure, properties and cutting performance of an AlTiN coating / G. S. Fox-Rabinovich, J. L. Endrino, B. D. Beake, A. I. Kovalev, S. C. Veldhuis, L. Ning, F. Fotaine, A. Gray // *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 3524–29.
 6. **Fox-Rabinovich, G. S.** Nano-crystalline filtered arc 5 deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications / G. S. Fox-Rabinovich, G. C. Weatherley, A. I. Dodonov, A. I. Kovalev, L. S. Shuster, et al. // *Surf. Coat. Technol.* 177–178 (2004) 800–811.
 7. **Fox-Rabinovich, G. S.** Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining condition/ G. S. Fox-Rabinovich, K. Yamamoto, S. C. Veldhuis, A. I. Kovalev, G. K. Dosbaeva // *Surf. Coat. Technol.* 200 (2005) 1804–13.
 8. **Erkens, G.** Properties and performance of high aluminum containing (Ti, Al)N based supernitride coatings in innovative cutting applications / G. Erkens, R. Cremer, T. Hamoudi, K.-D. Bouzakis, et al. // *Surf. Coat. Technol.* 177–178 (2004) 727–734.
 9. **Fox-Rabinovich, G. S.** Structure, properties and wear performance of nano-multilayered TiAlCrSiYN/ TiAlCrN coatings during machining of Ni-based aerospace superalloys / G. S. Fox-Rabinovich, B. D. Beake, K. Yamamoto, M. H. Aguirre, S. C. Veldhuis, G. Dosbaeva, A. Elfizy, A. Biksa, L. S. Shuster, A.Y. Rashkovskiy // *Surf. Coat. Technol.* 204 (2010) 3698–3706.
 10. **Zhang, H.** A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions / H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Lv, C. Yan // *J. Clean. Prod.* 148 (2017) 174–184.
 11. **Huang, W.** An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills / W. Huang, X. Li, B. Wang, J. Chen, J. Zhou // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 111 (2016) 63–67.
 12. **Zhao, W.** Cutting performance evaluation of end mills for titanium aircraft components / W. Zhao, S. Wang, Z. Han, N. He // *Procedia CIRP* 35 (2015) 1–7.
 13. **Baohai, W.** Cutting tool temperature prediction method using analytical model for end milling / W. Baohai, C. Di, H. Xiaodong, Z. Dinghua, T. Kai // *Chin. J. Aeronaut.* 29 (2016) 1788–1794.
 14. **Vereschaka, A. A.** Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nanostructured coatings and their influence on cutting tool life / A. A. Vereschaka, S. N. Grigoriev, N. N.

- Sitnikov, A. D. Batako // *Wear* 390–391 (2017) 209–219.
15. **Vereschaka, A. A.** Development of assisted filtered cathodic vacuum arc deposition of nano-dispersed multilayer composite coatings on cutting tools / A.A. Vereschaka // *Key Eng. Mater.* 581 (2014) 62–67, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.62.
 16. **Vereschaka, A. A.** Study of properties of nanostructured multilayer composite coatings of Ti-TiN-(TiCrAl)N and Zr-ZrN-(ZrNbCrAl)N / A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, Ju. I. Bublikov, A. Y. Aksenenko, N. N. Sitnikov // *J. Nano Res.* 40 (2016) 90–98, doi:10.4028/www.scientific.net/JNanoR.40.90.
 17. **Volkhonskii, A. O.** Filtered cathodic vacuum arc deposition of nano-layered composite coatings for machining hard-to-cut materials / A. O. Volkhonskii, A. A. Vereshchaka, I. V. Blinkov, A. S. Vereshchaka, A. D. Batako // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 84 (2016) 1647–1660, doi:10.1007/s00170-015-7821-8.
 18. **Mokritsky, B.Ya.** Simulation of cutting using ANSYS software / B.Ya. Mokritsky, V.Yu. Vereshchagin, A.S. Vereshchagina // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2018. – No.4. – pp. 69-72.
 19. **GOST 32405-2013 (ISO 10911:2010).** *Hard-Alloy Integral End Milling Cutters*. Technical Specifications / instead of GOST 18372-73; introduction date: 01.01.2015. – Moscow: Standardinform, 2014. – IV, pp. 10.
 20. **GOST 17025-71.** *Milling Cutters with Cylindrical Shank End. Design and Dimensions* / instead of GOST 8237-57; introduction date: 01.01.73. – Moscow: Standardinform, 2005. – pp. 11.

Ссылка для цитирования:

Мокрицкий, Б.Я. Повышение эффективности фрезерования посредством применения концевых твёрдосплавных составных фрез / Б. Я. Мокрицкий, А. В. Морозова, В. Ю. Верещагин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2021. – № 6. – С. 4 - 10. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-6-4-10.

Статья поступила в редакцию 29.03.21.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета, Киричек А.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 25.05.21.

Сведения об авторах:

Мокрицкий Борис Яковлевич, д.т.н., гл. науч. сотрудник, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, e-mail: boris@knastu.ru.

Морозова Анна Валентиновна, к. соц. н., докторант по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств», вед. инженер лаборатории «Волновое деформационное и комби-

Mokritsky Boris Yakovlevich, Dr. Sc. Tech., Chief research assistant, Prof. of the dep. “Mechanical Engineering”, Komsomolsk-upon-Amur State University, e-mail: boris@knastu.ru.

Morozova Anna Valentinovna, Can. Sc. Sociol., Doctoral candidate in specialty “Automation of Technological Processes and Production”, Leading engineer of the lab. “Wave Deformation and Combined Strengthen-

ing in Additive and Subtractive Technologies” Брянского государственного технического университета, e-mail: niotostu@gmail.com.

Верещагин Владислав Юрьевич, доцент кафедры «Информационные системы и цифровое образование» Новосибирского государственного педагогического университета, e-mail: Klirickv@yandex.ru.

ing in Additive and Subtractive Technologies”, Bryansk State Technical University, e-mail: niotostu@gmail.com.

Bereshchagin Vladislav Yurievich, Assistant Prof. of the dep. “Information Systems and Digital Education”, Novosibirsk State Pedagogical University, e-mail: Klirickv@yandex.ru.