

УДК 67.05

Влияние свойств композиционного материала на износ твердосплавных концевых фрез^{*}

А.В. Циренщиков¹, А.А. Халиков², О.Л. Хамидуллин²¹ Компания «Технониколь»² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

The effect of composite material properties on the wear of carbide end mills

A.V. Cirensnikov¹, A.A. Khalikov², O.L. Khamidullin²¹ Technonicol² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Рассмотрена актуальная проблема износа режущего инструмента при механической обработке современных композиционных материалов. Исследование направлено на комплексное изучение взаимосвязей между физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, геометрическими параметрами режущего инструмента и характером его износа. Особое внимание уделено анализу процессов, возникающих при фрезеровании стеклопластиков, которые представляют значительную сложность для механической обработки из-за анизотропии и неоднородной структуры. Выполнен многоаспектный анализ факторов, влияющих на стойкость режущих инструментов разных марок. Исследованы прочностные характеристики композиционного материала, абразивность армирующих компонентов и термические явления в зоне резания. Выполнены сравнительная оценка различных типов инструмента с износостойкими покрытиями и анализ механизмов их разрушения. Приведены результаты визуального наблюдения за поведением полимерной матрицы при термическом воздействии и за последствиями налипания стружки на режущую кромку. Установлены основные закономерности, определяющие интенсивность износа режущих кромок. Показано, что проблемы стружкоудаления и теплопередачи ограничивают стойкость режущего инструмента при работе с композиционными материалами. Полученные данные позволили сформулировать практические рекомендации по выбору режущего инструмента и оптимизации режимов обработки. Результаты исследования имеют важное значение для совершенствования технологических процессов механической обработки композиционных материалов и могут быть применены в производственных условиях для повышения операционной эффективности и снижения эксплуатационных затрат.

EDN: APHNIF, <https://elibrary/aphnif>

Ключевые слова: режимы резания, износ фрезы, твердосплавные концевые фрезы, композиционные материалы, полиуретан

The article discusses the actual problem of cutting tool wear during machining of modern composite materials. The research is aimed at a comprehensive study of the interrelationships between the physical and mechanical properties of the processed material, the geometric parameters of the cutting tool and the nature of its wear. Special attention is paid to the

^{*} Работа выполнена в рамках Передовой инженерной школы «Комплексная авиационная инженерия» (Соглашение 075-15-2025-129).

analysis of processes occurring during the milling of fiberglass, which present significant difficulties for mechanical processing due to anisotropy and heterogeneous structure. In the course of the work, a multidimensional analysis of the factors affecting the durability of tools of various brands was carried out. The role of strength characteristics of a composite material, abrasiveness of reinforcing components and thermal phenomena in the cutting zone is investigated. The experimental part includes a comparative assessment of various types of tools with wear-resistant coatings and an analysis of the mechanisms of their destruction. Of particular interest are observations of the behavior of the polymer matrix under thermal action and the consequences of chip sticking to the cutting edge. The key patterns determining the intensity of wear of cutting edges are established. The main factors limiting the durability of cutting tools when working with composites are identified, among which are the problems of chip removal and heat transfer. The obtained results allow us to formulate practical recommendations on the choice of cutting tools and optimization of processing modes. The presented conclusions are important for improving the technological processes of mechanical processing of composite materials and can be applied in production conditions to increase operational efficiency and reduce operating costs.

EDN: APHNIF, <https://elibrary/aphnif>

Keywords: cutting modes, cutter wear, carbide end mills, composite materials and polyurethane

В современном производстве наблюдается активное распространение различных видов композиционных материалов (КМ). Большая часть изделий из КМ близка по форме к готовым деталям, однако некоторые из них требуют дополнительной механической обработки. В связи с этим исследование влияния свойств обрабатываемого материала на износ режущего инструмента (РИ) является основным фактором для оптимизации технологических процессов механической обработки современных КМ.

КМ — очень сложный тип материала для любого вида механической обработки. Благодаря выраженной анизотропии свойств, а также неоднородности структуры они требуют специального РИ [1–3]. Режущий инструмент должен обладать износостойким покрытием, позволяющим увеличить стойкость режущей кромки [4–6]. Особое внимание следует уделять выбору таких геометрических параметров режущей кромки [7–12], как угол подъема спирали, площадь рабочей поверхности зуба и передний угол. В совокупности эти параметры позволяют продлить срок службы РИ [13, 14] и получить поверхности высокого качества без нарушения структурной целостности обрабатываемого материала [15–18].

Выбор режимов резания существенно влияет на качество получаемой поверхности, а также на скорость износа РИ [19–21]. От способа закрепления обрабатываемой детали зависят точность ее размеров и возможность возникновения вибраций, которые негативно сказыва-

ются на стойкости РИ [22–24]. Кроме того, снизить тепловое воздействие как на режущую кромку, так и на обрабатываемый материал, поможет правильно подобранная система охлаждения [25–28].

Цель работы — определение зависимости характера износа РИ от физико-механических свойств КМ и геометрических параметров режущей кромки.

Подробно исследованы физико-механические свойства обрабатываемого материала, исходя из которых выбрана стратегия обработки. Для определения причин износа проведено исследование режущей кромки испытуемых концевых фрез. На основании полученных данных выявлены зависимости характера износа РИ, а также геометрические параметры режущей кромки, влияющие на стойкость РИ.

Объекты и методы исследования. Обрабатываемым материалом выбран строительный швеллер, изготовленный методом пултрузии. Наполнителем являлось высокомодульное стекловолокно, матрицей — полиуретановое связующее. В качестве РИ выступали концевые фрезы P0801060002500D00 фирмы AXIS и 870060.0 компании SECO (рис. 1).

Обе фрезы диаметром 6 мм, выполненные из твердого сплава WC-Co с покрытием из поликристаллического алмаза, — рашпильные. Тип хвостовика обеих фрез — цилиндрический. У фрезы фирмы AXIS полная длина и длина режущей части равны 60 и 25 мм, у фрезы компании SECO — 65 и 18 мм соответственно.

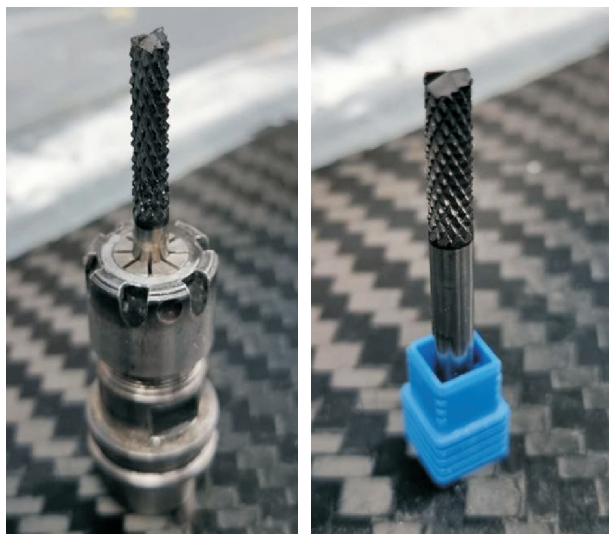


Рис. 1. Внешний вид концевых фрез P0801060002500D00 фирмы AXIS (а) и 870060.0 компании SECO (б)

При исследовании использованы следующие методы: гидростатические испытания для определения плотности материала; испытания выжиганием для нахождения коэффициента армирования; определение твердости по Барколу; динамический механический анализ и дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК) для нахождения температуры стеклования полиуретанового связующего и коэффициента теплоемкости стеклопластика; визуальный осмотр с помощью оборудования для макросъемки; измерение температуры с помощью цифрового тепловизора FLIR C5.

Экспериментальная часть. Испытания проводили на трехосевом станке BEAVER. Заготовки, изготовленные из швеллера, укладывали на подложку. Обрабатываемый материал фиксировали с помощью стальных прижимов и клейкой ленты, предназначенной для снижения вибраций. Охлаждение фрезы осуществляли путем обдува воздухом под давлением. Первоначальные режимы резания подбирали с учетом рекомендаций производителя и вида обрабатываемого материала (в соответствии с классификацией материала TS3 — Thermosetting glass-fibre composites).

Исходя из характеристик станка, а также данных, полученных в результате эксперимента, выбраны следующие режимы резания: скорость резания $v_c = 113$ м/мин; подача на зуб $S_z = 0,01$ мм/зуб; частота вращения шпинделя $n =$

$= 6000$ мин⁻¹; минутная подача $v_f = 600$ мм/мин; ширина резания — 6 мм (фрезерование в паз); глубина резания — 6 мм.

Средний коэффициент наполнения определяли путем выжигания, а среднюю плотность стеклопластика — с помощью гидростатического испытания. По результатам тестирования на твердость по ГОСТ Р 56761–2015 (Метод определения твердости по Барколу) получены следующие параметры: объемная доля волокна — 60 %; средняя плотность $\rho = 1,212$ г/см³; твердость по Барколу (среднее арифметическое значение) — 41 ± 2 .

Выбор значения подачи на зуб S_z обусловлен высокой абразивностью стекловолокна, твердостью материала по Барколу и низкой теплопроводностью стеклопластика (0,23 Вт/(м·К)). Малая подача позволяет снизить механическую нагрузку на режущую кромку, уменьшить тепловыделение в зоне резания и минимизировать риск расслоения материала, характерный для фрезерования КМ.

Полученные данные свидетельствуют о высоких прочностных характеристиках обрабатываемого материала. Значения объемной доли стекловолокна и твердости указывают на возникновение повышенных сил резания при обработке такого материала. Кроме того, высокая твердость стекловолокна будет негативно сказываться на целостности защитного покрытия концевой фрезы, а также на геометрических параметрах ее режущих кромок.

Известно, что свойства КМ на основе матриц из полимерных КМ (ПКМ) существенно зависят от температуры. Для изучения влияния материала на процесс износа РИ оценены теплофизические и физико-химические свойства образцов ПКМ в широком диапазоне температуры. Термограммы ДСК полиуретанового связующего без армирующего наполнителя приведены на рис. 2, где 1 — температура стеклования $T = 70$ °С при удельной теплоемкости $c_p^* = 0,514$ Дж/(г·К).

Несмотря на то, что ярко выраженного тепловыделения в образце не наблюдается, можно отметить некоторое отклонение от базовой линии, что может указывать на процесс доотверждения. Для оценки упругодеформационных свойств стеклопластика исследованы образцы связующего на динамическом механическом анализаторе (ДМА).

Для уточнения характера процесса на брусках полиуретана 60×10×2 мм проведен анализ

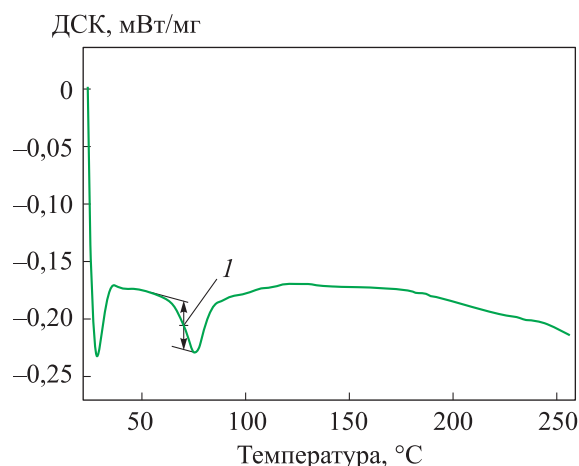


Рис. 2. Термограмма ДСК полиуретанового связующего без армирующего наполнителя

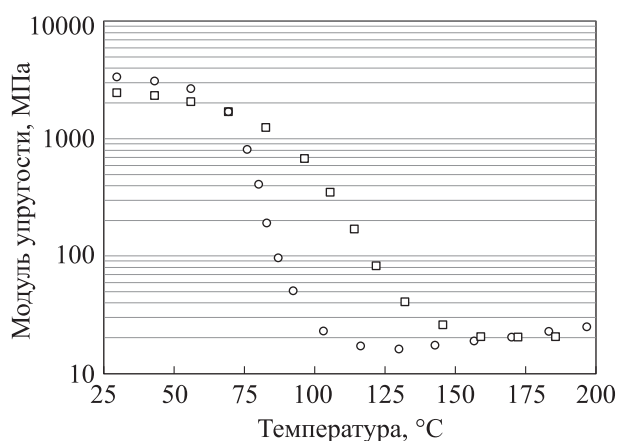


Рис. 3. Термограмма ДМА 1 (○) и 2 (□) полиуретановых образцов

упругодеформационных характеристик на ДМА. Зависимость модуля упругости образцов в исходном состоянии от температуры при различных параметрах закалки приведена на рис. 3.

Видно, что исходный образец имеет температуру стеклования, определяемую по перегибу модуля упругости (T_g –Onset), равную 70 °C. Дополнительная термообработка вызывает повышение температуры стеклования образца, что характерно для процессов доотверждения. Следует отметить, что в процессе термообработки в зоне резания происходит существенный нагрев материала выше температуры стеклования. Это приводит к переходу материала в высокоэластическое состояние, а в совокупности с процессами доотверждения — к высокой адгезии к поверхности концевой фрезы.

Температуру в зоне резания определяли с помощью тепловизора. Съемку проводили во

время работы станка. Обработка материала проходила с использованием воздушного охлаждения. Для закрепления детали на подложке из фанеры использовали стальные прижимы. По результатам исследования выявлено, что для фрез фирмы AXIS средняя температура в зоне резания составляет около 183,3 °C, а для фрез компании SECO — 204 °C.

Таким образом, как в первом, так и во втором случае температура в обрабатываемой области существенно превышает температуру стеклования полиуретанового связующего, что приводит к локальному переходу связующего в высокоэластическое состояние и налипанию стружки на режущую кромку. Такое повышение температуры обусловлено очень низкой теплопроводностью стеклопластика (0,23 Вт/(м·К)), которая существенно снижает отвод теплоты из зоны резания как через поверхность детали, так и через стружку. Кроме того, повышение температуры связано с высокими упругопрочностными характеристиками стеклопластика, что вызывает увеличение силы резания, вследствие чего повышается температура в зоне резания.

Несмотря на значительный нагрев в зоне резания (до 204 °C), работоспособность алмазного покрытия не снижается из-за термической дегградации и окисления, так как теплостойкость поликристаллического алмаза составляет более 700 °C.

С помощью визуального осмотра концевой фрезы на оборудовании для макросъемки определен характер износа ее режущей кромки, выявлены закономерности между видом износа и физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала.

Внешний вид изношенных режущих кромок концевых фрез фирмы AXIS показан на рис. 4. Характер износа фрезы № 1 представляет собой выкрашивание режущей кромки, вследствие чего появляются концентраторы напряжений, нарушающие процесс равномерного изнашивания последней. Такой вид износа свидетельствует о высокой жесткости обрабатываемого материала, что приводит к увеличению силы резания во время фрезерования.

У фрезы № 2 наблюдается стирание защитного покрытия, изготовленного из поликристаллического алмаза, осажденного методом Physical Vapor Deposition, что указывает на высокую абразивность обрабатываемого материала. Кроме того, термотрещины на фрезах № 1 и 3 также

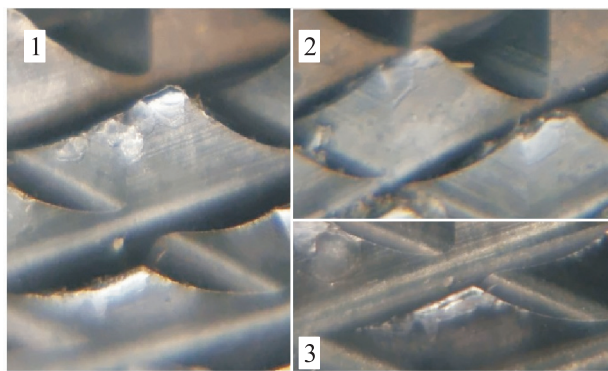


Рис. 4. Внешний вид изношенных режущих кромок концевых фрез фирмы AXIS

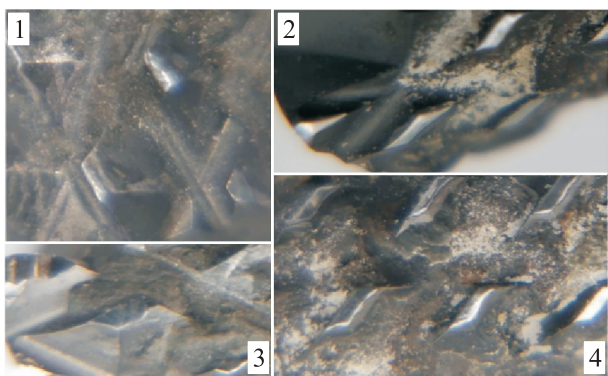


Рис. 5. Внешний вид изношенных режущих кромок концевых фрез SECO

свидетельствуют о сильном тепловом воздействии на них. Однако, несмотря на большой износ режущей кромки, полости между зубьями остаются чистыми. Это связано с правильными геометрическими параметрами режущих кромок ввиду большой площади зуба и наличия положительного переднего угла, которые позволяют, несмотря на существенный износ, отводить стружку, не давая ей налипать на рабочую зону фрезы, что продлевает срок ее службы.

Внешний вид изношенных режущих кромок концевых фрез компании SECO показан на рис. 5. У фрезы № 1 отчетливо видны термотрещины, свидетельствующие о колебаниях температуры в зоне резания. У фрезы № 3 характер износа указывает на выкрашивание режущей кромки, что предполагает высокие абразивность и жесткость обрабатываемого материала. У фрез № 2 и 4 присутствуют следы пластической деформации зубьев. Кроме того, на всех фрезах видно, как обрабатываемый материал забивает канавки между зубьями на рабочей поверхности РИ.

Высокая адгезия материала также может быть связана с переходом в высокоэластиче-

ское состояние при нагреве и с процессом доотверждения при механической обработке. Налипание приводит к снижению эффективной площади зуба, что негативно сказывается на долговечности РИ при таком виде обработки ПКМ. Снижение эффективной поверхности режущей кромки фрезы вследствие налипания материала повышает влияние износа рабочей поверхности на оставшуюся эффективную площадь зуба, что приводит к существенному увеличению силы резания и, соответственно, к тепловому воздействию на фрезу, уменьшая общий срок ее службы.

Появление термотрещин и выкрашивания (см. рис. 4 и 5) при отсутствии следов окисления алмазного покрытия подтверждает, что основным механизмом износа является усталостное разрушение режущей кромки под действием циклических ударных и термоциклических нагрузок, а не термическая деградация инструментального материала.

При сравнении характера износа режущих кромок, а также геометрических параметров концевых фрез фирм AXIS и SECO выявлены следующие закономерности:

- тепловое воздействие является основным фактором, ускоряющим износ режущей кромки, так как оно приводит к термоциклическим напряжениям, способствующим зарождению усталостных трещин, и снижает стабильность полимерной матрицы, усиливая налипание стружки;
- при выборе фрезы для обработки ПКМ с целью обеспечения наибольшего срока службы необходимо уделять особое внимание размеру рабочей площади зуба, а также наклону переднего угла; как видно из рис. 6, размер режущих зубьев и передний угол фрезы № 1 (870060.0)

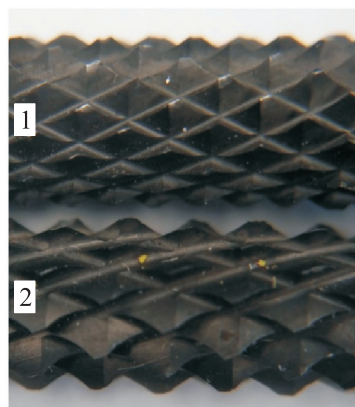


Рис. 6. Внешний вид режущих кромок концевых фрез

существенно меньше, чем у фрезы № 2 (P0801060002500D00). Поэтому срок службы фрезы № 1 в 10 раз меньше, чем у № 2 (выход фрезы из строя фиксировали при ее поломке, либо при достижении критического затупления режущей кромки, определяемого по перегреву материала в зоне резания).

Выводы

1. Определены физико-механические свойства обрабатываемого ПКМ, влияющие на характер износа режущей кромки концевой фрезы. Экспериментальным путем выявлены основные факторы, снижающие срок службы РИ.

2. Отмечено, что теплостойкость твердосплавных концевых фрез с алмазным покрытием значительно превышает предельную температуру резания (204 °C). По этой причине алмазное покрытие сохраняет свойства при температурах, многократно превышающих достигаемые в зоне резания, классический термический износ не является определяющим. Основным механизмом разрушения такого РИ становятся усталостное разрушение и выкрашивание режущих кромок под действием циклических ударных нагрузок при контакте с жестким армирующим волокном.

3. По результатам исследования установлено следующее:

- основным фактором, влияющим на износ режущей кромки, являются как твердость и

жесткость армирующего волокна, так и температура стеклования связующего; низкий коэффициент теплопроводности стеклопластика усугубляет влияние других факторов и приводит к локальному росту температуры в обрабатываемой зоне резания;

- низкая теплоемкость материала сводит к минимуму отвод теплоты вместе с удаляемой из зоны резания стружкой; для повышения срока службы РИ при обработке конструкционных стеклопластиков важно обеспечить эффективную систему его охлаждения;

- стойкость РИ существенно зависит от геометрических параметров режущей кромки (площади зуба и переднего угла); фреза с большей площадью зуба продолжает работать даже при значительном износе режущей кромки, что значительно увеличивает срок ее службы; наличие положительного переднего угла улучшает стружкоотвод, тем самым отводя часть теплоты, а также уменьшает возможность забивания канавок между зубьями.

4. На основании полученных данных рекомендовано использовать концевые фрезы с увеличенной площадью режущего зуба и положительным передним углом для обеспечения эффективного отвода стружки, а также применять активное воздушное охлаждение для компенсации низкой теплопроводности стеклопластика и уменьшения температуры в зоне резания ниже температуры стеклования полимерной матрицы.

Литература

- [1] Çelik Y.H., Türkan C. Investigation of mechanical characteristics of GFRP composites produced from chopped glass fiber and application of taguchi methods to turning operations. *SN Appl. Sci.*, 2020, vol. 2, no. 5, art. 849, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2684-5>
- [2] Slamani M., Chatelain J.F. A review on the machining of polymer composites reinforced with carbon (CFRP), glass (GFRP), and natural fibers (NFRP). *Discov. Mechanical Engineering*, 2023, vol. 2, no. 1, art. 4, doi: <https://doi.org/10.1007/s44245-023-00011-w>
- [3] Du J., Geng M., Ming W. et al. Simulation machining of fiber-reinforced composites: A review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 117, no. 2, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07531-3>
- [4] Chanpariyavatevong A., Boongsood W. Tool wear characteristics of ticn/al2o3 coated carbide inserts while turning glass fiber reinforced epoxy resin under cryogenic cooling. *Key Eng. Mater.*, 2021, vol. 891, pp. 143–149, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.891.143>
- [5] Kannan C.R., Das A.D., Manivannan S. et al. Machinability study on uncoated, coated and coated with treated tool in turning of GFRP. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2446, no. 1, art. 140007, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0108236>
- [6] Sousa V.F.C., Silva F.J.G. Recent advances on coated milling tool technology—a comprehensive review. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 3, art. 235, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>

- [7] Voss R. et al. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. *CIRP. J. Manuf. Sci. Technol.*, 2017, vol. 18, pp. 75–91, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>
- [8] Sheikh-Ahmad J., He Y., Qin L. Cutting force prediction in milling CFRPs with complex cutter geometries. *J. Manuf. Process.*, 2019, vol. 45, pp. 720–731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.009>
- [9] Ma J., Jia Z., He G. et al. Influence of cutting tool geometrical parameters on tool wear in high-speed milling of Inconel 718 curved surface. *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 2019, vol. 233, no. 1, pp. 18–30, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405417716495>
- [10] Padmakumar M., Shiva Pradeep N. Effect of cutting edge form factor (K-factor) on the performance of a face milling tool. *CIRP. J. Manuf. Sci. Technol.*, 2020, vol. 31, pp. 305–313, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.06.004>
- [11] Zhou Y., Xing T., Song Y. et al. Digital-twin-driven geometric optimization of centrifugal impeller with free-form blades for five-axis flank milling. *J. Manuf. Syst.*, 2021, vol. 58-B, pp. 22–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.019>
- [12] Denkena B., Grove T., Pape O. Optimization of complex cutting tools using a multi-dexel based material removal simulation. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 379–382.
- [13] Zhang L., Zhong Z., Qiu L. et al. Coated cemented carbide tool life extension accompanied by comb cracks: The milling case of 316L stainless steel. *Wear*, 2019, vol. 418–419, pp. 133–139, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.019>
- [14] Zhang Y., Zhu K., Duan X. et al. Tool wear estimation and life prognostics in milling: Model extension and generalization. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2021, vol. 155, art. 107617, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107617>
- [15] Chen Y., Guo X., Zhang K. et al. Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools. *J. Manuf. Process.*, 2019, vol. 37, pp. 114–123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.021>
- [16] Yaka H. Measurement of surface quality and optimization of cutting parameters in slot milling of GFRP composite materials with different fiber ratios produced by pultrusion method. *Surf. Rev. Lett.*, 2021, vol. 28, no. 10, art. 2150095, doi: <https://doi.org/10.1142/S0218625X21500955>
- [17] Alazemi F.K.A.O.H. et al. Optimization of cutting tool geometry for milling operation using composite material—a review. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 2021, vol. 76, no. 1, pp. 17–25.
- [18] Chandra A. et al. Optimisation of machining parameters for CNC milling of fibre reinforced polymers. *Evergreen*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 765–773, doi: <https://doi.org/10.5109/6792826>
- [19] Hassan S.M.F.B.S., Shafei S.B., Rashid R.B.A. Optimization of machining parameters in milling process for high speed machining using Taguchi method for best surface roughness. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 864, no. 1, art. 012110, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012110>
- [20] Mansour G., Kyratsis P., Korlos A. et al. Investigation into the effect of cutting conditions in turning on the surface properties of filament winding GFRP pipe rings. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 1, art. 16, doi: <https://doi.org/10.3390/machines9010016>
- [21] Yardimeden A. Estimating of cutting force and surface roughness in turning of GFRP composites with different orientation angles using artificial neural network. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2022, vol. 61, no. 1, pp. 955–968, doi: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0286>
- [22] Wojciechowski S., Twardowski P., Pelic M. Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 113–118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.102>
- [23] Sun Z., Geng D., Zheng W. et al. An innovative study on high-performance milling of carbon fiber reinforced plastic by combining ultrasonic vibration assistance and optimized tool structures. *J. Mater. Res. Technol.*, 2023, vol. 22, pp. 2131–2146, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.054>
- [24] Liu J., Chen R., Ren C. et al. Effects of axial and longitudinal-torsional vibration on fiber removal in ultrasonic vibration helical milling of CFRP composites. *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 58, pp. 868–883, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.071>

- [25] Shahabaz S.M., Sharma S., Shetty N. et al. Influence of temperature on mechanical properties and machining of fibre reinforced polymer composites: a review. *Engineered Science*, 2021, vol. 16, pp. 26–46, doi: <http://dx.doi.org/10.30919/es8d553>
- [26] Jia Z., Fu R., Wang F. et al. Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites. *Polym. Compos.*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 437–447, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.23954>
- [27] Soepangkat B.O.P., Norcahyo R., Pramujati B. et al. Multi-objective optimization in face milling process with cryogenic cooling using grey fuzzy analysis and BPNN-GA methods. *Eng. Comput.*, 2019, vol. 36, no. 5, pp. 1542–1565, doi: <https://doi.org/10.1108/EC-06-2018-0251>
- [28] Wang J., Ge J., Chen G. et al. Sustainable cooling/lubrication induced thermo-mechanical effects on ultrasonic vibration helical milling of CFRP/Ti–6Al–4V stacks. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2023, vol. 6, no. 3, pp. 311–328, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.02.002>

References

- [1] Çelik Y.H., Türkan C. Investigation of mechanical characteristics of GFRP composites produced from chopped glass fiber and application of taguchi methods to turning operations. *SN Appl. Sci.*, 2020, vol. 2, no. 5, art. 849, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2684-5>
- [2] Slamani M., Chatelain J.F. A review on the machining of polymer composites reinforced with carbon (CFRP), glass (GFRP), and natural fibers (NFRP). *Discov. Mechanical Engineering*, 2023, vol. 2, no. 1, art. 4, doi: <https://doi.org/10.1007/s44245-023-00011-w>
- [3] Du J., Geng M., Ming W. et al. Simulation machining of fiber-reinforced composites: A review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 117, no. 2, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07531-3>
- [4] Chanpariyavatevong A., Boongsood W. Tool wear characteristics of ticn/al2o3 coated carbide inserts while turning glass fiber reinforced epoxy resin under cryogenic cooling. *Key Eng. Mater.*, 2021, vol. 891, pp. 143–149, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.891.143>
- [5] Kannan C.R., Das A.D., Manivannan S. et al. Machinability study on uncoated, coated and coated with treated tool in turning of GFRP. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2446, no. 1, art. 140007, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0108236>
- [6] Sousa V.F.C., Silva F.J.G. Recent advances on coated milling tool technology—a comprehensive review. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 3, art. 235, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>
- [7] Voss R. et al. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. *CIRP. J. Manuf. Sci. Technol.*, 2017, vol. 18, pp. 75–91, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>
- [8] Sheikh-Ahmad J., He Y., Qin L. Cutting force prediction in milling CFRPs with complex cutter geometries. *J. Manuf. Process.*, 2019, vol. 45, pp. 720–731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.009>
- [9] Ma J., Jia Z., He G. et al. Influence of cutting tool geometrical parameters on tool wear in high-speed milling of Inconel 718 curved surface. *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 2019, vol. 233, no. 1, pp. 18–30, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405417716495>
- [10] Padmakumar M., Shiva Pradeep N. Effect of cutting edge form factor (K-factor) on the performance of a face milling tool. *CIRP. J. Manuf. Sci. Technol.*, 2020, vol. 31, pp. 305–313, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.06.004>
- [11] Zhou Y., Xing T., Song Y. et al. Digital-twin-driven geometric optimization of centrifugal impeller with free-form blades for five-axis flank milling. *J. Manuf. Syst.*, 2021, vol. 58-B, pp. 22–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.019>
- [12] Denkena B., Grove T., Pape O. Optimization of complex cutting tools using a multi-dexel based material removal simulation. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 379–382.
- [13] Zhang L., Zhong Z., Qiu L. et al. Coated cemented carbide tool life extension accompanied by comb cracks: The milling case of 316L stainless steel. *Wear*, 2019, vol. 418–419, pp. 133–139, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.019>

- [14] Zhang Y., Zhu K., Duan X. et al. Tool wear estimation and life prognostics in milling: Model extension and generalization. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2021, vol. 155, art. 107617, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107617>
- [15] Chen Y., Guo X., Zhang K. et al. Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools. *J. Manuf. Process.*, 2019, vol. 37, pp. 114–123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.021>
- [16] Yaka H. Measurement of surface quality and optimization of cutting parameters in slot milling of GFRP composite materials with different fiber ratios produced by pultrusion method. *Surf. Rev. Lett.*, 2021, vol. 28, no. 10, art. 2150095, doi: <https://doi.org/10.1142/S0218625X21500955>
- [17] Alazemi F.K.A.O.H. et al. Optimization of cutting tool geometry for milling operation using composite material—a review. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 2021, vol. 76, no. 1, pp. 17–25.
- [18] Chandra A. et al. Optimisation of machining parameters for CNC milling of fibre reinforced polymers. *Evergreen*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 765–773, doi: <https://doi.org/10.5109/6792826>
- [19] Hassan S.M.F.B.S., Shafei S.B., Rashid R.B.A. Optimization of machining parameters in milling process for high speed machining using Taguchi method for best surface roughness. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 864, no. 1, art. 012110, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012110>
- [20] Mansour G., Kyratsis P., Korlos A. et al. Investigation into the effect of cutting conditions in turning on the surface properties of filament winding GFRP pipe rings. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 1, art. 16, doi: <https://doi.org/10.3390/machines9010016>
- [21] Yardimeden A. Estimating of cutting force and surface roughness in turning of GFRP composites with different orientation angles using artificial neural network. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2022, vol. 61, no. 1, pp. 955–968, doi: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0286>
- [22] Wojciechowski S., Twardowski P., Pelic M. Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 113–118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.102>
- [23] Sun Z., Geng D., Zheng W. et al. An innovative study on high-performance milling of carbon fiber reinforced plastic by combining ultrasonic vibration assistance and optimized tool structures. *J. Mater. Res. Technol.*, 2023, vol. 22, pp. 2131–2146, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.054>
- [24] Liu J., Chen R., Ren C. et al. Effects of axial and longitudinal-torsional vibration on fiber removal in ultrasonic vibration helical milling of CFRP composites. *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 58, pp. 868–883, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.071>
- [25] Shahabaz S.M., Sharma S., Shetty N. et al. Influence of temperature on mechanical properties and machining of fibre reinforced polymer composites: a review. *Engineered Science*, 2021, vol. 16, pp. 26–46, doi: <http://dx.doi.org/10.30919/es8d553>
- [26] Jia Z., Fu R., Wang F. et al. Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites. *Polym. Compos.*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 437–447, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.23954>
- [27] Soepangkat B.O.P., Norcahyo R., Pramujati B. et al. Multi-objective optimization in face milling process with cryogenic cooling using grey fuzzy analysis and BPNN-GA methods. *Eng. Comput.*, 2019, vol. 36, no. 5, pp. 1542–1565, doi: <https://doi.org/10.1108/EC-06-2018-0251>
- [28] Wang J., Ge J., Chen G. et al. Sustainable cooling/lubrication induced thermo-mechanical effects on ultrasonic vibration helical milling of CFRP/Ti–6Al–4V stacks. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2023, vol. 6, no. 3, pp. 311–328, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.02.002>

Статья поступила в редакцию 23.03.2026

Информация об авторах

ЦИРЕНЩИКОВ Александр Вячеславович — технический специалист. Компания «Технониколь» (390000, Рязань, Российская Федерация, ул. Восточный промузел, д. 21, e-mail: sasha89225006998@mail.ru).

ХАЛИКОВ Амир Айратович — аспирант кафедры производства летательных аппаратов. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 55, e-mail: halikov.amir@mail.ru).

ХАМИДУЛЛИН Оскар Ленарович — кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 55, e-mail: khamidullinoskarl@mail.ru).

Information about the authors

TSIRENSHCHIKOV Alexander Vyacheslavovich — Technical Specialist. Technonicol (390000, Ryazan, Russian Federation, Vostochny Promuzel, St., Bldg. 21, e-mail: sasha89225006998@mail.ru).

KHALIKOV Amir Ayratovich — Postgraduate, Department of Aircraft Production. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 55, e-mail: halikov.amir@mail.ru).

KHAMIDULLIN Oskar Lenarovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Production. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 55, e-mail: khamidullinoskarl@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Циренщиков А.В., Халиков А.А., Хамидуллин О.Л. Влияние свойств композиционного материала на износ твердосплавных концевых фрез. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 61–70.

Please cite this article in English as:

Cirenshikov A.V., Khalikov A.A., Khamidullin O.L. The effect of composite material properties on the wear of carbide end mills. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 61–70.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие Д.В. Виноградова «Формообразование при лезвийной обработке»

Показано место обработки резанием в общей структуре технологических процессов, раскрыты основные понятия теории резания, кратко описаны основные виды лезвийной обработки, раскрыты их особенности, показаны способы формообразования, применяемые при резании, преимущества и недостатки каждого из них. Изложен алгоритм построения геометрических параметров лезвий режущих инструментов, приведены примеры определения углов лезвий некоторых инструментов. Дано введение в кинематику резания: описаны системы координат, используемые при проектировании и изготовлении режущих инструментов, а также погрешности, возникающие при замене одной системы координат на другую.

Для студентов, изучающих дисциплину «Основы компьютерного проектирования», входящую в программу подготовки по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов». Может быть полезно при изучении курсов «Основы теории резания», «Основы проектирования режущих инструментов».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>