

УДК 621.914

doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-62-72

Высокоскоростное микрофрезерование деталей из композиционных материалов и алюминиевых сплавов

Е.В. Патраев¹, М.С. Вакулин¹, Ю.И. Гордеев², В.Б. Ясинский²

¹ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»

² ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

High-Speed Micromilling of Composite and Aluminum Alloy Parts

E.V. Patraev¹, M.S. Vakulin¹, Y.I. Gordeev², V.B. Yasinsky²

¹ ISS-Reshetnev Company

² Siberian Federal University

Рассмотрена конструкция режущей части сложнопрофильных фрез с высокими производительностью и качеством поверхности. Проведены численные эксперименты с использованием метода конечных элементов, позволяющие определять напряжения и деформации в слое срезаемого материала при обработке многогранными фрезами нового типа и косвенно оценивать удельные нагрузки во время фрезерования. Требуемые размеры и форма режущего выступа установлены с учетом различных геометрических параметров режущей части, свойств материала заготовки и условий резания. Это позволило построить трехмерную модель концевой фрезы с зубом в форме трапеции и числом режущих кромок в количестве 70. Экспериментальные исследования также показали изменение морфологии стружки размером около 2 мкм, что хорошо согласуется с результатами предварительных оценок методом конечных элементов. Производительность обработки фрезами новой конструкции может быть повышена путем увеличения количества единичных циклов резания до 4000...6000 с⁻¹.

Ключевые слова: высокоскоростное микрофрезерование, конечно-элементный анализ, шероховатость поверхности, геометрия режущей части, композиционные материалы, алюминиевые сплавы

The paper deals with the design of the cutting part of complex-profile cutters with high productivity and surface quality. Numerical experiments carried out using the finite element method made it possible to determine the stresses and strains in the layer of the cut material when machining with multifaceted milling cutters of a new type and indirectly estimate the specific cutting forces. The required dimensions and shape of the cutting wedge are set with account for various geometric parameters of the cutting part, properties of the workpiece material, and cutting conditions. This made it possible to obtain a three-dimensional model of an end mill with a trapezoidal tooth and 700 cutting edges. Experimental studies also showed a change in the morphology of chips with a size of about 2 microns, which is in good agreement with the results of preliminary estimates by the finite element method. The productivity of processing with milling cutters of a new design can be improved by increasing the number of single cutting cycles up to 4000–6000 s⁻¹.

Keywords: micromilling, finite element method, surface roughness, geometry of the cutting part of the mill, composites, aluminum alloys

Многоцелевые станки с высокоскоростным шпинделем обеспечивают повышенные точность и производительность обработки сложнопрофильных деталей. Требуемый профиль также можно получить, управляя геометрией режущей кромки и углами концевой фрезы, что обеспечивает уменьшение высоты микронеровностей и улучшает шероховатость поверхности [1].

Микрофрезерование сложнопрофильным режущим инструментом позволяет уменьшить объем срезаемого слоя (размеры стружки) и силы резания, а также выполнить трехмерные микрокомпоненты из широкого спектра металлических и неметаллических материалов, в том числе композиционных (КМ). Кроме того, продольную токарную обработку с использованием вершинного режущего инструмента можно заменить фрезоточением [2].

При уменьшении объема стружки толщина срезаемого слоя может быть сопоставима с радиусом кромки режущего инструмента, а при высокоскоростном фрезеровании изменяются механизмы разрушения материала заготовки: разрушение происходит преимущественно в упругой зоне без существенной пластической деформации.

Эти механизмы формирования стружки отражают так называемый размерный эффект — явление, характеризующееся значительным увеличением удельной силы резания при малой толщине резания, т. е. повышением напряжений сдвига вследствие уменьшения зоны резания [3].

На практике активное применение получила фреза-роутер, объединяющая в себе принципы фрезерования и дробления. Для оценки процесса обработки фрезой-роутером многие исследователи используют удельную силу резания без учета других параметров. Такой подход оправдан, так как несмотря на одинаковые режимы резания и сечение среза доля удельной силы резания при микрофрезеровании увеличивается на 90 % по сравнению с таковой при макрофрезеровании.

Это указывает на то, что при изменении геометрии сечения срезаемого слоя (т. е. формы зуба фрезы) и формы стружки возникают различные удельные силы резания. Анализ зависимостей подачи на зуб и глубины резания от удельной силы резания позволяет заключить, что их влияние несущественно для микрофрезерования.

Можно считать, что при высокоскоростном микрофрезеровании удельная сила резания является наиболее важным параметром, влияющим на рабочий процесс и качество поверхности детали. Применение многолезвийного сложнопрофильного инструмента позволяет снизить удельную силу резания и повысить эффективность и качество обработки.

Однако использование известных аналитических методов расчета на основе геометрических и стереологических моделей [4] ограничено или непригодно при проектировании высокоскоростных фрез и разработке технологии обработки, так как они не учитывают повышенную интенсивность и скорость деформационных процессов.

По этим причинам предпочтительным является совместное применение аналитических и численных подходов, основанных на методах конечно-элементного анализа. Например, в работе [5] с помощью модели, разработанной в статье [6], определена минимальная толщина срезаемого слоя конструкционных сталей, оцениваемая в зависимости от радиуса режущей кромки r_e соотношением $h_{\min} = (0,14...0,43)r_e$, что обеспечивает требуемое качество обработки.

Близкие значения минимальной толщины срезаемого слоя получены в экспериментальных исследованиях, посвященных изучению размерных эффектов и особенностям образования стружки при микрофрезеровании [7].

В работе [8] приведены результаты исследования процессов высокоскоростного микрофрезерования поверхностей концевой фрезой с винтовыми зубьями для минимизации микронеровностей поверхностного слоя. Показано, что сила резания уменьшается с увеличением скорости резания вследствие изменения механизма формирования стружки. При этом (несмотря на повышение температуры в зоне резания) с ростом скорости резания износ инструмента сводится к минимуму, снижается шероховатость поверхности.

Особое значение процессы и режущий инструмент высокоскоростного микрофрезерования приобретают при обработке КМ и алюминиевых сплавов для аэрокосмической отрасли, которые объединяют в себе высокие показатели удельной прочности и жесткости. В то же время к деталям из этих материалов предъявляются повышенные требования по точности размеров и шероховатости поверхностей.

К основным проблемам, возникающим при обработке различных КМ, относятся деламинация, вытягивание, непрорезание и сколы волокон КМ [9]. В какой-то степени предотвратить процессы деламинации и вытягивания волокон КМ можно путем наложения ультразвуковых вибраций при высокоскоростном фрезеровании пластиков, армированных углеродным волокном [10]. В результате снижается сила резания, но стойкость инструмента падает, что сказывается на качестве обработки.

В работе [11] показано, что качество обработки углепластика можно повысить оптимизацией режимов резания. В статье [12] даны рекомендации по геометрии режущей части и конструкции инструмента как одного из способов повышения эффективности обработки КМ.

Подробный анализ способов и технологических приемов обработки КМ выполнен в работе [13], а результаты исследований [14] позволили определить механизмы взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым материалом, в том числе и с КМ. Эти данные, а также результаты математического моделирования [15], описывающего поведение КМ при обработке, расширяют представление об особенностях микрофрезерования таких материалов.

В работе [16] приведены результаты экспериментов, позволившие определить наиболее эффективную траекторию режущего инструмента при обработке поверхностей деталей из алюминиевого сплава Д16. Авторами статьи [17] исследован процесс обработки этого же сплава и даны рекомендации по назначению рациональных режимов резания.

Возможным вариантом повышения производительности обработки алюминиевых сплавов может быть сочетание микрофрезерования и электрофизических методов [18]. Стойкость режущего инструмента и качество обработки можно повысить нанесением защитного покрытия на его поверхность [19] или оптимизацией его геометрических параметров [20].

Приведенные данные свидетельствуют как о достоинствах высокоскоростного фрезерования, так и о проблемах описания процессов формообразования и проектирования сложнопрофильного инструмента для их реализации, особенно при обработке деталей из КМ и алюминиевых сплавов.

Однако использование аналитических подходов в сочетании с методами конечно-элементного анализа дает возможность определять минимальную толщину срезаемого материала, размеры стружки и обосновывать рациональные режимы резания и геометрию инструмента. Поэтому разработка новых конструкций фрез и методов численной оценки деформационных процессов в срезаемом слое на основе метода конечных элементов (МКЭ) является актуальной и практически значимой задачей.

Цель работы — оптимизация геометрии многолезвийных фрез для повышения производительности и качества обработки поверхности детали.

Аналитическое обоснование конструкции многолезвийной фрезы.

На основании результатов анализа проблем высокоскоростного микрофрезерования труднообрабатываемых КМ (стеклопластиков) и алюминиевого сплава Д16 определены перспективные конструкции сложнопрофильных концевых фрез с увеличенным числом режущих кромок.

Предполагалось, что по сравнению с аналогами новая конструкция будет иметь увеличенное количество единичных циклов резания, а сечение и объем срезаемого слоя материала уменьшается. Следовательно, и удельная сила резания на каждой кромке зуба будет минимизирована, а шероховатость профиля обрабатываемой поверхности уменьшена.

С помощью традиционных аналитических расчетных моделей [4] оптимизированы геометрические параметры режущей части и разработаны трехмерные модели фрез (рис. 1). При этом учтены результаты предварительно проведенных численных экспериментов на основе МКЭ.

Исходными данными для расчета являлись следующие параметры: скорость резания $v = 100 \dots 200$ м/мин; подача $v_f = 0,01 \dots 0,02$ мм/об; глубина резания $a_p = 8$ мм; ширина резания $a_e = 9,5$ мм; частота вращения шпинделя $n = 4000$ мин⁻¹.

При расчете искомых параметров использованы следующие аналитические формулы:

- для объема срезаемого материала

$$Q = a_p a_e v_f / 1000, \text{ см}^3/\text{мин}; \quad (1)$$

- для подачи

$$v_f = n f_z z_n, \text{ мм}/\text{мин}; \quad (2)$$

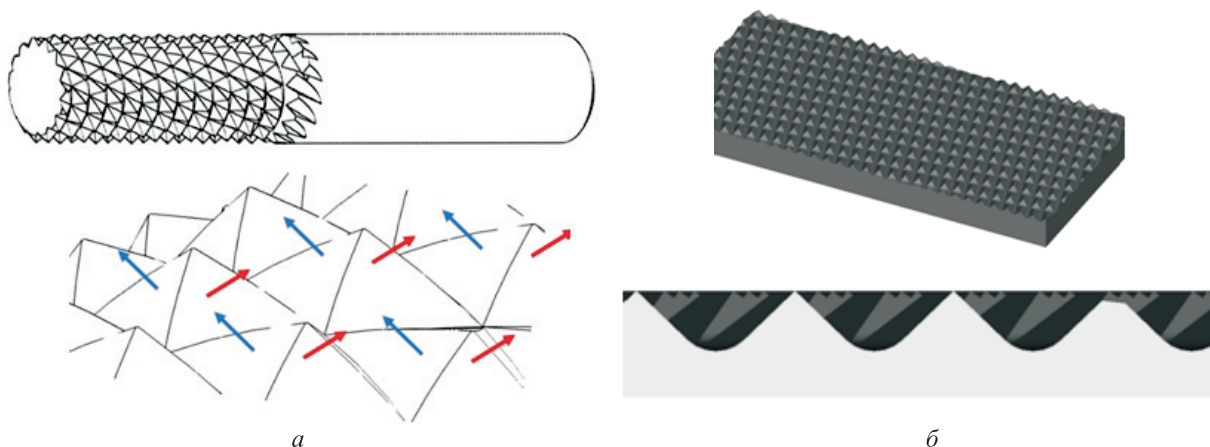


Рис. 1. Результаты моделирования многолезвийной фрезы: а — трехмерная модель и контур режущих кромок; б — схема перекрытия режущих кромок

- для количества единичных циклов резания

$$N = nz / 60, \quad (3)$$

где f_z — подача на зуб, мм/зуб; z_n — количество зубьев; z — количество режущих кромок на высоте 9,5 мм.

Результаты расчета по формулам (1)–(3) в виде графических зависимостей объема срезаемого материала и количества единичных циклов резания от скорости резания новой фрезы приведены на рис. 2. Там же показаны аналогичные зависимости для фрез-роутеров производства компаний ISCAR и Sandvik.

Анализ полученных данных показал, что интенсивность деформаций при обработке поверхности фрезой с новой геометрией можно значительно увеличить по сравнению с таковой для известных аналогов.

Согласно результатам расчета для разных режимов резания, количество единичных циклов резания новой фрезой составило 4000...6000 c^{-1} , а фрез-роутеров компаний Sandvik и ISCAR 2500...4000 c^{-1} и 800...1500 c^{-1} соответственно. При этом возрастает (до 2 раз) объем срезаемого материала, а значит, и производительность обработки.

Расчеты проводили в программном пакете ANSYS Workbench версии 2019 R1 с использованием модуля Explicit Dynamics для моделирования скоростных процессов. Заданное время обработки/моделирования процесса составляло 0,00007 с. В программе расчета была включена опция On Material Failure в окне «Details of Analysis Settings», которая разрушает элементы, деформации которых превысили определенное значение (по умолчанию 1,5). Это позволило

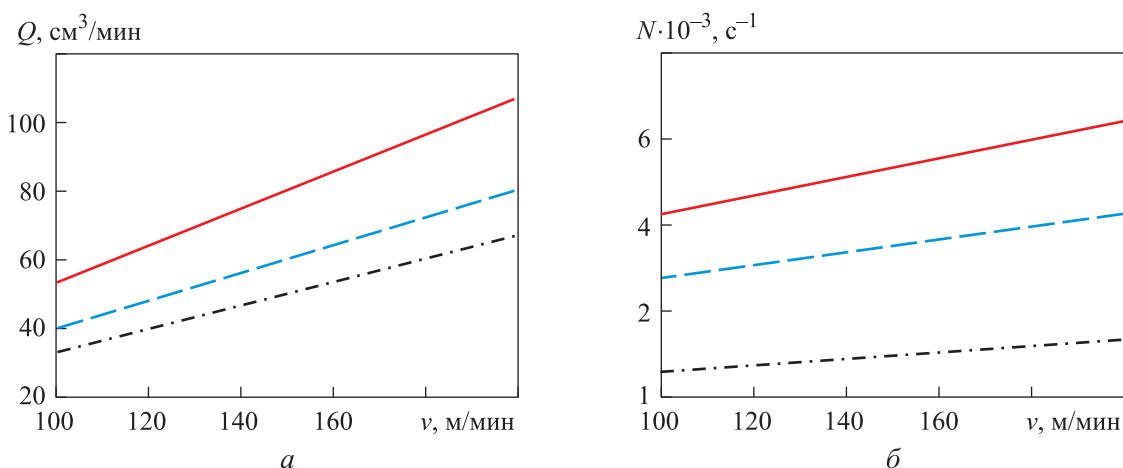


Рис. 2. Зависимости объема срезаемого материала Q (а) и количества единичных циклов резания N (б) от скорости резания v новой фрезы (—) и стандартных фрез-роутеров производства компаний Sandvik (- - -) и ISCAR (- · -)

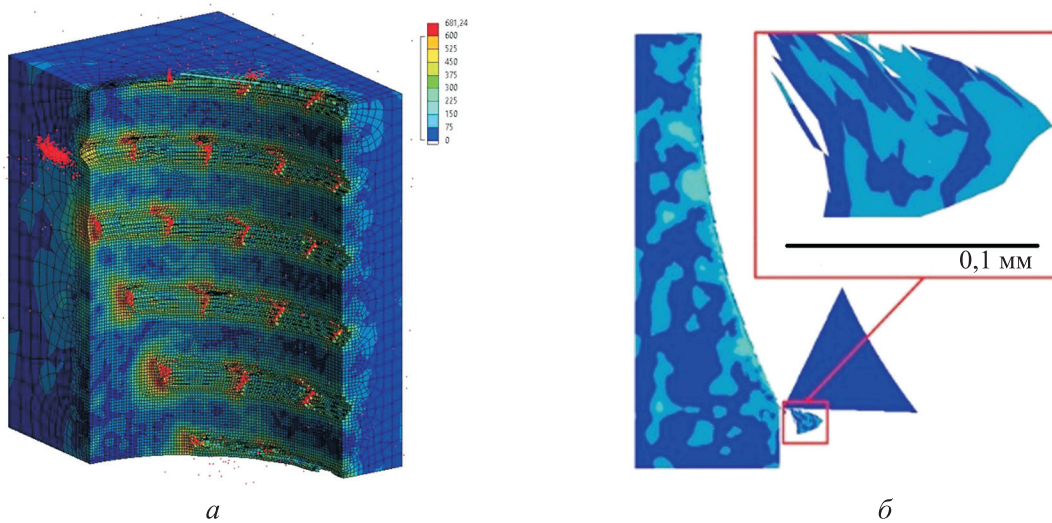


Рис. 3. Результаты расчета процесса фрезерования:
 а — схема резания и напряжения, МПа, в зоне контакта;
 б — единичный цикл резания зубом фрезы и фрагмент формирования стружки

моделировать процессы образования и отвода стружки из зоны резания.

Сравнительные расчеты МКЭ проводили для трех конфигураций фрез диаметром $D = 10$ мм при следующих режимах резания: скорость резания $v = 125$ м/мин; частота вращения шпинделя $n = 4000$ мин⁻¹; подача на оборот $f_n = 0,15$ мм/об; глубина резания $a_p = 8$ мм; ширина резания $a_e = 9,5$ мм.

Численные эксперименты с использованием МКЭ позволили определить напряжения и деформации в слое срезаемого материала при обработке многолезвийными фрезами нового типа, т. е. косвенно оценить удельные нагрузки. Кроме того, результаты расчета дают возможность прогнозировать форму и размер стружки, которые могут появиться при обработке новой фрезой.

Графическое представление процессов деформации иллюстрирует кинематику и последовательность процесса срезания слоя материала. Исследования, основанные на МКЭ, показывают, что удельная нагрузка при использовании новой фрезы уменьшается, тогда как максимальные значения напряжений, возникающих на поверхности заготовки и режущей части инструмента, не превышают 500... 700 МПа (рис. 3, а и б).

В этом случае максимальные значения напряжений концентрируются в тонком поверхностном пограничном слое. Материал не режется (в отличие от традиционного фрезерования), а измельчается и удаляется из зоны резания в виде микрочастиц.

Для более детального представления рабочего процесса выполнено моделирование обработки заготовки одним зубом в 2D-постановке. На рис. 4 приведены результаты расчета поля напряжений при обработке заготовки новой фрезой. Размер элементов на стенке заготовки при 3D-моделировании составил 0,050...0,075 мм, что сопоставимо со значением 0,1 мм, полученным при 2D-моделировании (см. рис. 3, б и 4), и косвенно свидетельствует о достоверности исследования.

Показано, что напряжения изменяются в диапазоне 200...600 МПа, а максимальные напряжения, соответствующие пределу прочности материала заготовки сконцентрированы

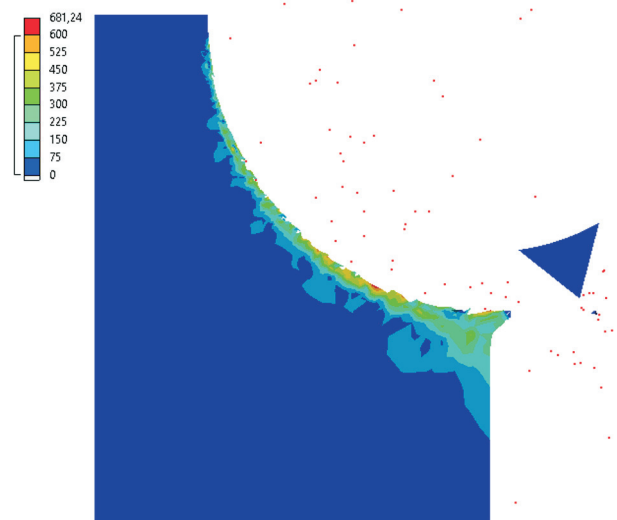


Рис. 4. Поле напряжений, МПа, при обработке заготовки новой фрезой

в приповерхностном слое. Поэтому можно предположить, что в отличие от стандартных инструментов у новой фрезы элементы стружки должны быть существенно меньше по размеру и иметь другую морфологию.

Методика, основанная на МКЭ, позволила провести численные испытания, смоделировать процесс резания материала заготовки и оценить силовые параметры при фрезеровании с учетом динамики процесса. Несмотря на обнаруженные несущественные различия в характере и значениях напряжений в зоне резания можно утверждать, что многолезвийная конструкция фрезы способствует увеличению интенсивности и частоты срезания микрофрагментов приповерхностного слоя. Следствием этого является повышенная производительность процесса обработки или возможность фрезерования с более высокой скоростью резания (при одновременном снижении удельной нагрузки на зуб фрезы).

Комплексная оценка новой конструкции фрезы показывает, что она работает аналогично абразивному инструменту, сочетающему процессы резания и дробления. Этот факт, а также прогнозируемый МКЭ мелко измельченный тип стружки, служит предпосылкой для уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности и повышения производительности фрезерования.

По результатам численного эксперимента создана трехмерная модель оптимизированной конструкции концевой фрезы, имеющая исходный профиль зуба в виде трапеции (рис. 5), расположенный вдоль двух пересекающихся спиральных линий с углами наклона 14 и 71°. Новая конструкция обеспечивает формирование дополнительной режущей кромки на поверхности зуба фрезы (в виде усеченной пирамидки), а значит, и увеличение эффективности срезания слоя материала.

В результате цилиндрическая поверхность имеет около 70 режущих выступов (пирамидок), выполняющих роль режущих элементов, т. е. общее количество режущих кромок в динамике резания может составлять до 280 лезвий при повороте на 360° (на высоте 9,5 мм).

Для верификации полученных результатов сравнительные расчеты проведены с помощью МКЭ. На основе стереологических моделей обоснованы геометрические параметры режущей части фрезы: углы наклона винтовых каналов, высотные и угловые размеры зубьев.

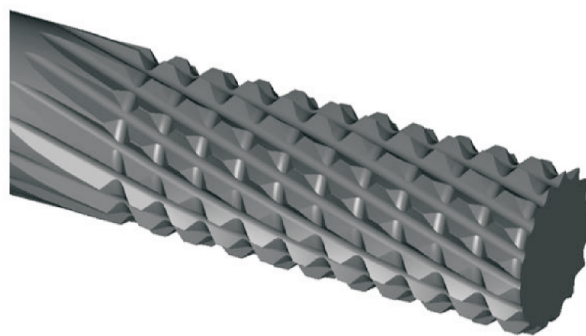


Рис. 5. Трехмерная модель оптимизированной фрезы

Производство инструмента на фрезерно-шлифовальном станке ANCA RX7 контролировалось специально разработанным управляющим программным обеспечением. В качестве материала заготовки для изготовления инструмента использованы стержни из экструдированного наноструктурированного твердого сплава. Благодаря модификации кобальтового связующего добавлением наночастиц оксида алюминия этот новый твердосплавный КМ обладает улучшенными физико-механическими свойствами с точки зрения прочности, трещино- и термостойкости [21].

Совокупность таких свойств является необходимой предпосылкой для эффективной работы разработанной многолезвийной фрезы при высокой скорости резания и в условиях переменных циклических нагрузок. Новый сложно-профильный инструмент использован для экспериментальных исследований при обработке волокнистых КМ и алюминиевых сплавов.

Результаты экспериментов и их обсуждение.

Сравнительные испытания проводили на станке НААС при обработке образцов из волокнистых КМ (стеклопластиков и углепластиков) периферией фрезы. При этом задавали следующие режимы резания: частота вращения шпинделя $n = 2500 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$; толщина срезаемого слоя $a_e = 0,5 \text{ мм}$. Скорость подачи подбирали регулировкой (опытным путем).

В качестве критерия эффективности резания принимали результаты электронно-микроскопических исследований поверхностного слоя материала заготовки на электронном микроскопе ТМ-1000 (Япония). Для обеспечения адекватности и сопоставимости результатов испытаний обработку разными фрезами проводили на одном образце при одинаковых режимах.

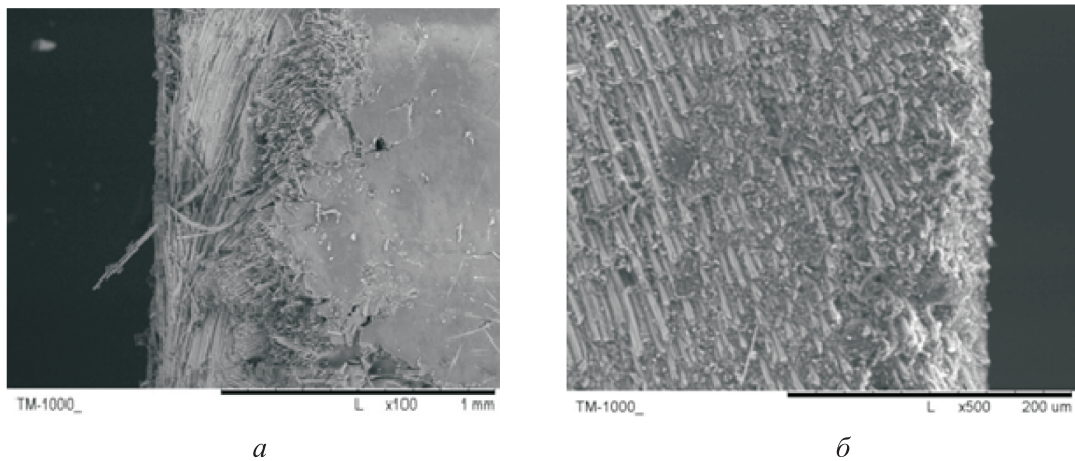


Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения поверхности образца, обработанной стандартной (а) и многолезвийной (б) фрезами

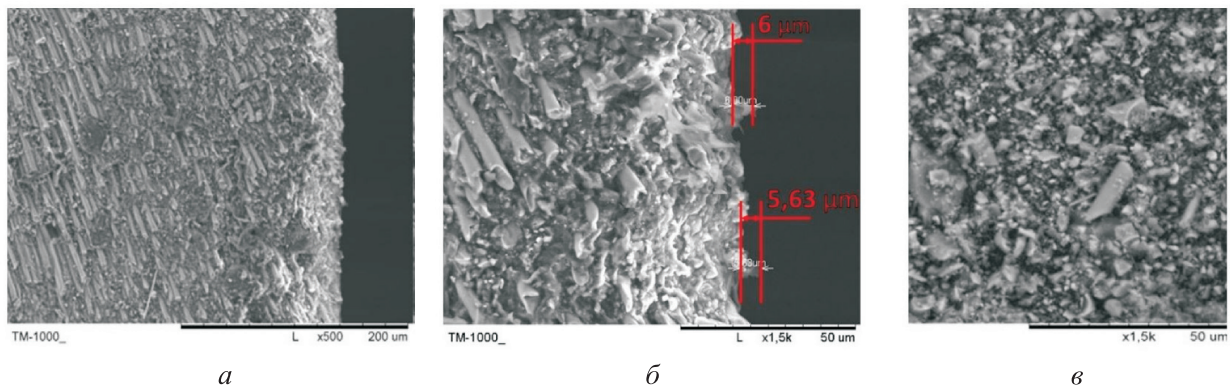


Рис. 7. Электронно-микроскопические изображения топографии поверхности детали (а, б) и стружки (в)

На рис. 6 приведены электронно-микроскопические изображения поверхности образца, обработанной стандартной и многолезвийной фрезами.

Очевидно, что качество поверхности при обработке многолезвийной фрезой выше. При резании стандартной фрезой волокна КМ не связаны между собой, частично вытянуты из матричного материала (рис. 6, а). Цельность структуры КМ после обработки новой фрезой практически не нарушена, волокна не вытянулись из матричного материала и связь между фазами осталась неизменной. У матричного материала нет сколов, а волокна имеют ровные и аккуратные срезы (рис. 6, б).

Это можно объяснить тем, что за счет положительного переднего угла пирамидки (режущей кромки), повышенной интенсивности резания и увеличенного количества единичных циклов резания (до $4000 \dots 6000 \text{ с}^{-1}$) композитные волокна легко срезаются и не вытягиваются из матричного материала.

В качестве основных параметров для сравнительной экспериментальной проверки результатов расчетных исследований использованы значения шероховатости обработанной поверхности и морфология стружки, полученной в процессе резания КМ. Показано, что наряду с улучшенным качеством обработанной поверхности изменяются форма и размеры стружки. Размеры элементов (фрагментов стружки) варьируются в диапазоне $0,5 \dots 2,0 \text{ мкм}$ (рис. 7), что хорошо согласуется с результатами предварительных оценок МКЭ.

Качество поверхности при обработке новой фрезой-роутером выше, чем при резании стандартным инструментом. Значения шероховатости поверхности значительно (до 6 мкм) уменьшаются (рис. 7, б). Это можно объяснить тем, что за счет увеличения количества режущих кромок и интенсивности процессов резания (количества единичных циклов резания до $4000 \dots 6000 \text{ с}^{-1}$) композитные волокна легко срезаются и не вытягиваются из матричного материала.

Аналогичные результаты получены при обработке новой многолезвийной фрезой алюминиевых сплавов. Шероховатость поверхности уменьшилась в 2,5 раза, производительность увеличилась в 2 раза по сравнению с параметрами, полученными после обработки стандартными фрезами.

Морфология и размеры стружки соответствуют интенсивности резания, характерной для высокоскоростного микрофрезерования. При глубине фрезерования 0,5 мм и частоте вращения шпинделя 4000 мин⁻¹ коэффициент дробления стружки $k = 250$. Это также подтверждает повышение производительности процесса обработки и уменьшение удельной силы резания.

Выводы

1. С помощью аналитических моделей расчета деформационных процессов при резании в сочетании с МКЭ изучено влияние геометрии режущей части нового многолезвийного инструмента и режимов резания на интенсивность процессов деформации при высокоскоростном микрофрезеровании.

2. Определена оптимизированная геометрия режущей части сложнопрофильной фрезы.

3. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность новой фрезы и повышение ее производительности при одновременном улучшении качества поверхности.

Литература

- [1] Hideaki O., Koji U., Ippei K., et al. High speed milling processes with long oblique cutting edges. *J. Manuf. Process.*, 2015, vol. 19 pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.004>
- [2] Binchurov A.S., Indakov N.S., Gordeev Y.I., et al. Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 537, no. 3, art. 032101, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032101>
- [3] Brandao de Oliveira F., Rodrigues A.R., Coelho R.T., et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2015, vol. 89, pp. 39–54, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>
- [4] Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории. 5. Определение кинематического, напряженного и деформированного состояний обрабатываемой заготовки. *Вестник Машиностроения*, 2008, № 5. с. 61–69.
- [5] Vogler M.P., Devor R.E., Kapoor S.G. On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2004, vol. 126, no. 4, pp. 685–694, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1813470>
- [6] Chuzhoy L., Devor R.E., Kapoor S.G., et al. Microstructure-level modeling of ductile iron machining. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2002, vol. 124, no. 2, pp. 162–169, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1455642>
- [7] Cuba Ramos A., Autenrieth H., Strauß T., et al. Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, no. 3, pp. 594–600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.007>
- [8] Mohammad L., Saeid A., Mohsen A. 3D FEM simulation of tool wear in ultrasonic assisted rotary turning. *Ultrasonics*, 2018, vol. 88, pp. 106–114, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.03.013>
- [9] Вавилин В.А., Пасечник К.А., Пушкарев А.Ю. и др. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2018, т. 1, № 14, с. 12–14.
- [10] Abd Halim N.F.H., Ascroft H., Barnes S. Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Procedia Eng.*, 2017, vol. 184, pp. 185–191, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.084>
- [11] Стуров А.А., Чащин Н.С. Механообработка композиционного материала с использованием робототехнического комплекса на базе робота Kuka KR210. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2019, т. 23, № 4, с. 743–750.

- [12] Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор). *Труды ВИАМ*, 2019, № 1, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114>
- [13] Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор). *Труды ВИАМ*, 2016, № 9, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>
- [14] Мешкас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2016, № 8–2, с. 291–299.
- [15] Истоцкий В.В., Протасьев В.Б., Виноградов А.Е. Учет реологических свойств при обработке резанием композитных материалов. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2017, № 3, с. 78–84.
- [16] Андрющенко С.А., Ростовцев П.А., Рошупкин С.И. Экспериментальное исследование влияния стратегий обработки на шероховатость поверхности при фрезеровании алюминиевых сплавов концевыми фрезами. *Современные технологии: проблемы и перспективы*. Севастополь, СГУ, 2019, с. 11–15.
- [17] Трусов В.Н., Законов О.И., Шикин В.В. Исследование параметров процесса фрезерования алюминиевого сплава Д16Т. *Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки*, 2012, № 3, с. 155–162.
- [18] Куликов М.Ю., Иноземцев В.Е., Бочаров А.А. Исследование процесса формообразования при совмещении фрезерной и электрохимической обработки алюминия. *Металлообработка*, 2015, № 6, с. 50–53.
- [19] Демин А.С., Лаврентьев С.В. Режущий инструмент с покрытием DLC при обработке алюминиевых сплавов. *Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки. Сб. ст. Межд. науч.-практ. конф. Ч. 3. Стерлитамак, АМИ*, 2017, с. 116–118.
- [20] Ковалевский А.В. Выбор рациональных режимов фрезерования для обработки алюминиевых сплавов. *Омский научный вестник*, 2008, № 4(73), с. 64–66.
- [21] Gordeev Y.I., Yasinskiy V.B., Anistratenko N.E., et al. Study of the formation features of hard metal composites structure obtained from bimodal powder mixtures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 511, art. 012032, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/511/1/012032>

References

- [1] Hideaki O., Koji U., Ippei K., et al. High speed milling processes with long oblique cutting edges. *J. Manuf. Process.*, 2015, vol. 19 pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.004>
- [2] Binchurov A.S., Indakov N.S., Gordeev Y.I., et al. Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 537, no. 3, art. 032101, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032101>
- [3] Brandao de Oliveira F., Rodrigues A.R., Coelho R.T., et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2015, vol. 89, pp. 39–54, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>
- [4] Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 5. Determining the kinematic, stress, and strain states of the blank. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2008, no. 5, pp. 61–69. (In Russ.).
- [5] Vogler M.P., Devor R.E., Kapoor S.G. On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2004, vol. 126, no. 4, pp. 685–694, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1813470>
- [6] Chuzhoy L., Devor R.E., Kapoor S.G., et al. Microstructure-level modeling of ductile iron machining. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2002, vol. 124, no. 2, pp. 162–169, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1455642>
- [7] Cuba Ramos A., Autenrieth H., Strauß T., et al. Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, no. 3, pp. 594–600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.007>

- [8] Mohammad L., Saeid A., Mohsen A. 3D FEM simulation of tool wear in ultrasonic assisted rotary turning. *Ultrasonics*, 2018, vol. 88, pp. 106–114, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.03.013>
- [9] Vavilin V.A., Pasechnik K.A., Pushkarev A.Yu., et al. Features of mechanical processing of polymeric composite materials. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2018, vol. 1, no. 14, pp. 12–14. (In Russ.).
- [10] Abd Halim N.F.H., Ascroft H., Barnes S. Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Procedia Eng.*, 2017, vol. 184, pp. 185–191, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.084>
- [11] Sturov A.A., Chashchin N.S. Machining composite material by a robotic complex based on KUKA KR210 robot. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 4, pp. 743–750. (In Russ.).
- [12] Minibaev M.I., Raskutin A.E., Goncharov V.A. Peculiarities of technology production specimens of pcm on cnc machines (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2019, no. 1, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114> (in Russ.).
- [13] Raskutin A.E., Khrul'kov A.V., Girsh R.I. Technological features of composite materials machining in manufacturing details of structures (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 9, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12> (in Russ.).
- [14] Meshkas A.E., Makarov V.F., Shirinkin V.V. Technology improves the processing of composite materials by milling. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2016, no. 8–2, pp. 291–299. (In Russ.).
- [15] Istotskiy V.V., Protas'yev V.B., Vinogradov A.E. Taking into consideration the rheological properties in machining of composite materials. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 3, pp. 78–84. (In Russ.).
- [16] Andryushchenko S.A., Rostovtsev P.A., Roshchupkin S.I. [Experimental study of the influence of machining strategies on surface roughness during milling of aluminum alloys by end mills]. *Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy* [Modern Technologies: Issues and Prospects]. Sevastopol', SGU Publ., 2019, pp. 11–15. (In Russ.).
- [17] Trusov V.N., Zakonov O.I., Shikin V.V. Research on milling parameters for the D16T aluminium alloy. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2012, no. 3, pp. 155–162. (In Russ.).
- [18] Kulikov M.Yu., Inozemtsev V.E., Bocharov A.A. Investigation of the process of formation when combined milling and electrochemical machining of aluminum. *Metalloobrabotka*, 2015, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.).
- [19] Demin A.S., Lavrent'yev S.V. [Cutting regime with DLC coating at processing of aluminium alloys]. *Problemy, perspektivy i napravleniya innovatsionnogo razvitiya nauki. Sb. st. Mezhd. nauch.-prakt. konf. Ch. 3* [Problems, Prospects and Direction of Science Innovative Growth. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. P. 3]. Sterlitamak, AMI Publ., 2017, pp. 116–118. (In Russ.).
- [20] Kovalevskiy A.V. Setting rational milling modes for processing of aluminum alloys. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2008, no. 4(73), pp. 64–66. (In Russ.).
- [21] Gordeev Y.I., Yasinskiy V.B., Anistratenko N.E., et al. Study of the formation features of hard metal composites structure obtained from bimodal powder mixtures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 511, art. 012032, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/511/1/012032>

Статья поступила в редакцию 13.09.2021

Информация об авторах

ПАТРАЕВ Евгений Валерьевич — заместитель генерального директора по производству. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: office@iss-reshetnev.ru).

ВАКУЛИН Максим Сергеевич — инженер-технолог третьей категории. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: mixdib@mail.ru).

ГОРДЕЕВ Юрий Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр-т Свободный, д. 79, e-mail: tms-mtf@rambler.ru).

ЯСИНСКИЙ Виталий Брониславович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр-т Свободный, д. 79, e-mail: tms-mtf@rambler.ru).

Information about the authors

PATRAEV Evgeny Valerievich Deputy General Director for Production. ISS-Reshetnev Company (662972, Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 52, e-mail: evpatraev@iss-rechetnev.ru).

VAKULIN Maxim Sergeevich — Process Engineer of the third category. ISS-Reshetnev Company (662972, Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 52, e-mail: mixdib@mail.ru).

GORDEEV Yriy Ivanovitch — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Design-Engineering Support of Mechanical Industries. Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodniy Ave., Bldg. 79, e-mail: tms-mtf@rambler.ru).

YASINSKY Vitaliy Bronislavovitch — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Design-Engineering Support of Mechanical Industries. Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodniy Ave., Bldg. 79, e-mail: tms-mtf@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Патраев Е.В., Вакулин М.С., Гордеев Ю.И., Ясинский В.Б. Высокоскоростное микрофрезерование деталей из композиционных материалов и алюминиевых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 62–72, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-62-72

Please cite this article in English as:

Patraev E.V., Vakulin M.S., Gordeev Y.I., Yasinsky V.B. High-Speed Micromilling of Composite and Aluminum Alloy Parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 62–72, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-62-72