



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2021, № 1, с. 118-128.

Поступила: 10.05.2021

Окончательный вариант: 14.05.2021

© УлГУ

УДК 621.7

## Повышение качества и эффективности обработки композиционных материалов за счет использования инструмента из керамики

Федотова Ю. И.<sup>1,\*</sup>, Евсеев А. Н.<sup>2</sup>

[\\*julia241179@mail.ru](mailto:julia241179@mail.ru)

<sup>1</sup>АО «Авиастар-СП», Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>УлГУ, Ульяновск, Россия

---

В работе рассматривается разработка и исследование инновационного режущего инструмента для фрезерной обработки полимерных композиционных материалов на основе углепластика. Разработка технологического процесса и проведение опытных работ по испытанию режущего инструмента для подбора оптимальных режимов резания, которые позволяют повысить эффективность фрезерной обработки и достичь требуемого качества поверхности.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, углепластик, качество поверхности, керамический роутер, фрезерование.

---

### Введение

Самолетостроение, постоянно развиваясь, требует все новых технических решений. Снижение массы конструкции, как инструмент повышения экономической эффективности летательных аппаратов является одной из приоритетных задач развития современной авиационной техники. Наиболее широко этому требованию отвечают новые, так называемые полимерные композиционные материалы (ПКМ), превосходящие по многим параметрам традиционные металлические.

В настоящее время доля использования композиционных материалов в конструкции магистральных самолетов неуклонно растет. К примеру, первоначально доля композиционных материалов в самолетах составляла не более 5-6%, после развития технологий и проектировании новых самолётов А320, А340 (Airbus S.A.S., Европа) и В777 (The Boeing Company, США) было использовано 10-15% композиционных материалов по весу. В этих

самолетах композиционные материалы применялись в основном для отделочных работ в салонах, в обтекателях, зализах и оперениях. В современных самолётах этих двух корпораций A350 и B787 Dreamliner доля композиционных материалов по массе значительно выросла. В конструкции A350 КМ составляют 52 % от веса самолёта, в самолёте B787 схожее соотношение - 50%.

В конструкции российских самолетов также широко используются композиционные материалы. МС-21 задумывался как инновационный самолет. Главная из инноваций: впервые в России и более того, ранее, чем у многих ведущих авиационных производителей самолет будет иметь композитное крыло. Принципиально важно, что речь идет не просто о широком применении композитов, а об их использовании в высоконагруженных конструкциях. Это в свою очередь оказывает существенное влияние на аэродинамическую компоновку и на аэродинамику самолета. Доля использования ПКМ на новом российском самолете МС-21, разрабатываемом корпорацией «Иркут», будет составлять 35-37%. Из композитов у МС-21 будут сделаны также отдельные элементы фюзеляжа, крыло, центроплан и оперение.

На рис. 1 представлено распределение композиционных материалов в самолете МС-21 [1].



Рис. 1. Композиционные материалы в МС-21

Использование композитных материалов в крыле: помимо снижения веса и улучшения прочностных характеристик позволяют добиться большего удлинения крыла, а это заметно улучшает аэродинамические характеристики планера и напрямую влияет на расход топлива. По разным оценкам, лишь этот фактор экономит 6–7% топлива. Сегодня крыло, полностью состоящее из композитных материалов, имеет только американский Boeing 787 Dreamliner и российский МС-21.

## Механическая обработка деталей самолета из полимерных композиционных материалов

Композиционный материал представляет собой комбинацию из разнородных и нерас-творимых друг в друге компонентов, соединяемых между собой в единое целое за счет ад-гезионного взаимодействия на границе их раздела. Наиболее прочными и хорошо освое-нными являются композиционные материалы, армированные непрерывными углеродными волокнами.

Для получения качественных деталей самолета из композиционных материалов необ-ходима механическая обработка.

Механическая обработка композиционных материалов значительно отличается от ме-ханической обработки металлов, в частности скорости резания композиционных материа-лов выше чем у металлов, данные по режимам резания приведены на рис. 2 [2].

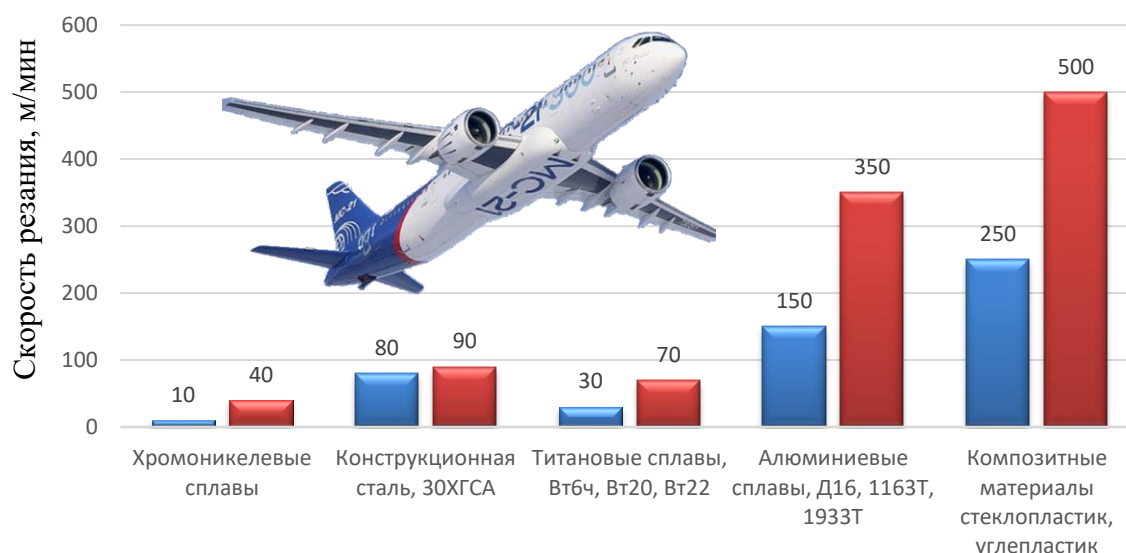


Рис. 2. Скорости резания при обработке деталей самолета из различных материалов:  
■ минимальная скорость резания м/мин, ■ максимальная скорость резания м/мин

Кроме того, композиционные материалы также различаются между собой по своим свойствам и должны обрабатываться с учетом индивидуальных особенностей. Различия свойств, влияющих на обрабатываемость, внутри группы композитов гораздо более значи-тельны, чем, например, между металлами. Это, в свою очередь, создает определенные труд-ности как перед производителями, которые только начинают работать с композиционными материалами, так и перед теми, кто имеет опыт их обработки. Зачастую начало изготовле-ния изделий из этих материалов требует полного переосмысления методов механической обработки, перечня используемого инструмента, способа закрепления заготовки, а, в неко-торых случаях, даже применения специализированного оборудования и оснастки.

Процесс резания композиционных материалов существенно отличается от резания ме-таллов. Во время механической обработки резанием композитных материалов на основе

эпоксидных смол режущая кромка вызывает отслаивание волокон. Непременным условием при резании композитов является острота режущей кромки инструмента, призванная предотвратить любое трение между инструментом и заготовкой. Вероятность износа инструмента также должна быть сведена к минимуму, поскольку любые изменения геометрической формы режущей кромки приведут к мгновенному росту температур в зоне резания и критическому износу кромки. Геометрию инструмента следует подбирать таким образом, чтобы обеспечить легкое ненагруженное резание с минимальными силами резания.

Только индивидуальный подход к каждой отдельной операции при механической обработке композиционных материалов сможет обеспечить в итоге производительный надежный процесс производства изделий из этого непростого материала. Сравнение и оценка любого из предлагаемых методов должна сопровождаться экономическими расчетами. Однако следует помнить, что по отношению к этому материалу главным показателем целесообразности применения того или иного способа обработки не всегда служит скорость съема материала. Достижение требуемого качества на отдельной операции фрезерования и одновременно приемлемой себестоимости её выполнения может значительно повлиять на производительность. Обеспечение требуемого качества на первой операции исключает необходимость в осуществлении доводочных манипуляций, что приведет к сокращению времени полной обработки. В условиях непрерывного развития технологии изготовления деталей из композитов растёт необходимость в появлении специализированных инструментов, учитывающих индивидуальные особенности их механической обработки.

Фрезерование является одной из наиболее востребованных операций обработки изделий из композиционных материалов. Из-за специфических особенностей композитов, как конструкционных материалов, их фрезерование обладает рядом характерных особенностей, отличающих от аналогичного фрезерования металлов. Это, в свою очередь, приводит к значительному конструктивному различию фрез.

Процесс резания композиционных материалов сопровождается большим давлением на режущий инструмент, трением и тепловыделением. Таким условиям работы должны соответствовать материалы, имеющие высокую твердость и теплостойкость.

При резании композиционных неметаллических материалов, как правило, протекающем без применения охлаждающих средств, в силу ранее перечисленных специфических свойств композитов, со стороны заготовки на инструмент воздействует повышенный температурный фактор. Это приводит к тому, что режущие элементы инструмента интенсивно теряют свою твердость и изнашиваются. Следовательно, важным требованием, предъявляемым к инструментальному материалу для обработки композиционных неметаллических материалов, является высокая теплостойкость.

Основные сложности заключаются в получении высокого качества поверхности, особенно при затуплении инструмента происходит увеличение сил резания, что приводит к образованию трещин между волокнами, происходят выкрашивания связующего с обрабатываемой поверхности изделия, особенно в местах захода и выхода инструмента, что, естественно, сказывается на качестве обработки. Слоистая структура приводит к тому, что при

повышенных износах инструмента происходит расслоение материала. Кроме того, при перерезании волокон, наблюдается разломачивание перерезанных волокон, что ухудшает качество обработанной поверхности и заставляет иногда применять дополнительную отделочную операцию, например, зачистку шкуркой.

Качество обработки углепластиков сложно оценить из-за следующих факторов:

1. Получаемая при обработке стружка (пыль) не позволяет судить о качестве механической обработки.

2. Изменение режимов резания практически не влияет на изменение параметров шероховатости поверхности.

3. Приложение излишней осевой силы резания при механической обработке приводит к разрушению обрабатываемой поверхности, которая может быть определена только на лабораторном оборудовании (например, деламинация - отделение нижележащего слоя углеленты).

Разработка новых инструментальных материалов позволяет производить дальнейшие исследования процесса механической обработки композиционных материалов.

### **Исследование применения режущего инструмента при механической обработке деталей из углепластика**

Результаты исследований процесса обработки композитов показали, что наиболее оптимальным инструментальным материалом при обработке композиционных материалов являются твердые сплавы. Но при обработке композиционных материалов происходит быстрое изнашивание твердых сплавов главным образом за счет повышенной температуры в зоне резания и образующегося абразивного истирания кобальта и выпадения вследствие этого отдельных зерен карбидов.

Расход теплоты при обработке полимерных композиционных материалов распределяется следующим образом: в инструмент - 90%, в стружку - 5%, в обрабатываемую деталь - 5%. Такое перераспределение теплового баланса обеспечивает качество обрабатываемой поверхности, но обуславливает низкую стойкость применяемого режущего инструмента, который должен интенсивно отводить выделяющуюся в зоне резания теплоту.

Концентрация теплоты в инструменте приводит к значительному повышению температуры на его режущих кромках, что нельзя не учитывать при выборе инструментального материала и оценки интенсивности изнашивания инструмента.

Исходя из этих параметров был сделан выбор новой марки материала инструмента для обработки композиционных материалов по аналогии с обработкой никелевых сплавов при высоких температурах в зоне резания.

В результате исследований, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, были разработаны новые марки минералокерамики, в состав которых с целью повышения проч-

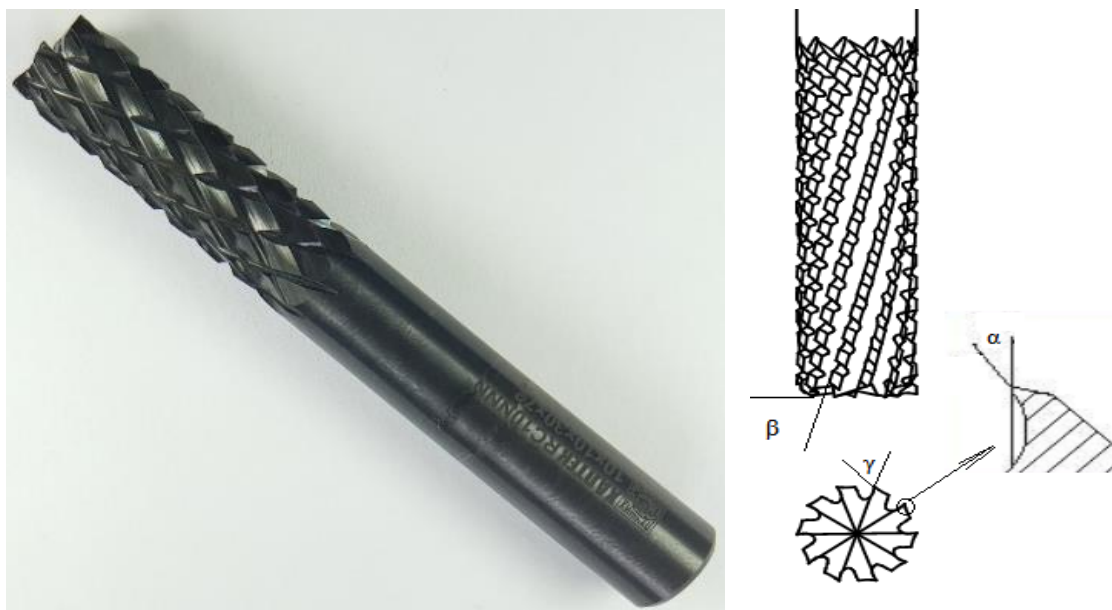
ности введены добавки карбидов, нитридов, оксидов вольфрама, титана, молибдена и циркония. В данной работе проведены опытные исследования монолитных фрез-роутеров с разработкой оптимальной геометрии режущей части.

Керамические сплавы обладают комплексом свойств, которые отличают их от традиционных твердосплавных материалов, что может предопределить их успешное применение для совершенствования современных и разработки принципиально новых конструкций инструмента. Одним из наиболее важных показателей эксплуатации режущего инструмента является его стойкость, определяющая состояние, при котором режущий инструмент выполняет свою работу, имея износ рабочих поверхностей меньше критического значения и обеспечивая качество обрабатываемой поверхности.

Для обработки композиционных материалов на основе углепластика будем использовать монолитные фрезы из нитрида кремния SiAlON с армированием нитевидными кристаллами карбида кремния. Будем использовать роутер с обозначением RC10NNN.

Концепция новой серии фрез заключается в том, что инструмент будет работать без СОЖ на высоких оборотах, при высоких скоростях подачи и относительно большой глубине резания, чтобы отводить больше теплоты образующегося вследствие трения.

На рис. 3 приведен керамический роутер из нитрида кремния SiAlON.



**Рис. 3.** Внешний вид керамического роутера из нитрида кремния SiAlON 10 мм с указанием углов заточки

Конструкция монолитного керамического роутера была разработана чтобы обеспечить высокую производительность обработки и высокую стойкость:

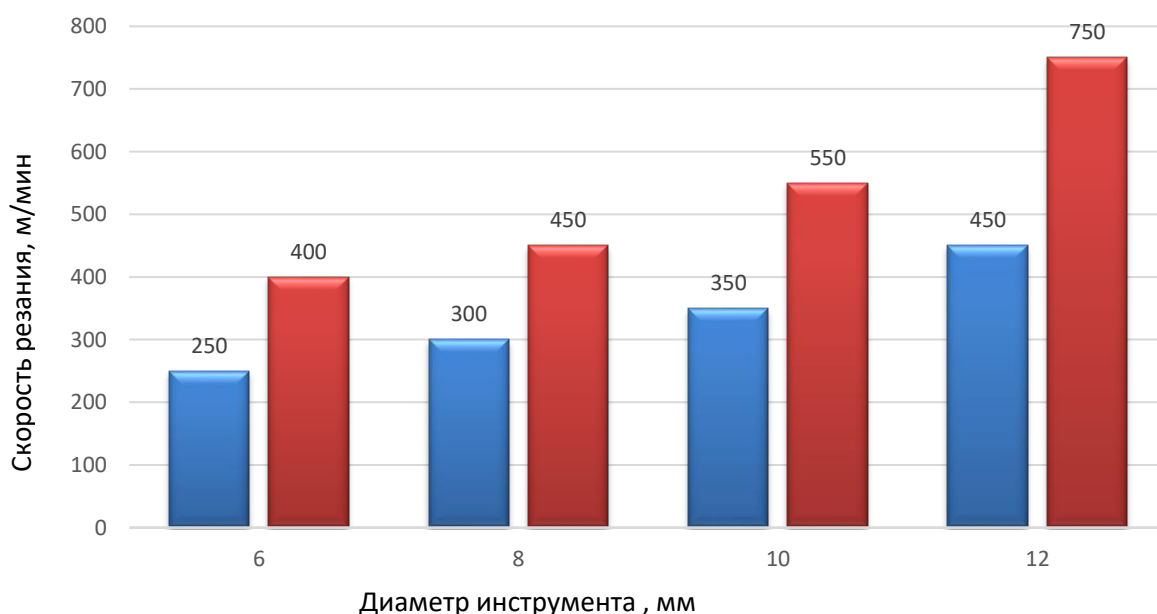
- передний угол  $\gamma = 15...20^\circ$ ;
- задний угол  $\alpha = 10...15^\circ$ ;
- угол заострения  $\beta = 55...60^\circ$ .

Как показали проведенные исследования использование предлагаемого инструмента позволяет значительно улучшить результаты существующей технологией.

В рамках проводимого исследования режимы механической обработки композиционных материалов были подобраны с целью повышении скорости резания и обеспечения качества обработанной поверхности:

1. подача на зуб  $S_z = 0,05 \dots 0,1$  мм/зуб;
2. глубина резания  $t = 0,5 \dots 3$  мм;
3. скорость резания  $V = 500-800$  м/мин
4. обороты шпинделя  $S = 14\ 000-16\ 000$  об/мин.

Для сравнения на рис. 4 приведены скорости резания углепластика роутерами различного диаметра из твердого сплава и керамики [2].



**Рис. 4.** Скорость резания авиационных деталей из углепластика инструментом из:  
■ твердого сплава и ■ керамики

Для проведения исследований подобран фрезерный портальный пятикоординатный обрабатывающий центр с неподвижным столом и специальной перенастраиваемой оснасткой. Обработка происходит за счет перемещения шпиндельной головки по трем координатам и ее наклона в двух плоскостях (4 и 5 координаты). Таким образом, деталь в процессе обработки остается неподвижной и жестко закрепленной.

Станок обеспечивает высокие обороты шпинделя 24 000 об/мин и скорости подачи до 40 м/мин., оборудован специальной защитой приводов и направляющих от углепластиковой пыли и системой удаления пыли из рабочей зоны.

Зажим и фиксацию заготовки производится на специальной перенастраиваемой оснастке для фрезерования при помощи вакуума, дополнительно используются прижимы (где это необходимо), расположенные на расстоянии 0,5-1,0 м по периметру заготовки.

Проведенные исследования показали повышение производительности механической обработки углепластика более чем в 2 раза с обеспечением улучшения качества поверхности, о чем свидетельствуют данные в таблице 1.

**Таблица 1. Исследование производительности и качества обработки**

| Параметр   | Показатель                                   |   |
|--|--|---|
| Материал инструмента                                   | Твердый сплав на основе вольфрама и кобальта | Керамика SiAlON                             |
| Наименование инструмента (производитель)               | 40-1600-10 (НАМ, Германия)                   | RC10NNN 10x10x30x72 (Халтек, Корея, Россия) |
| Диаметр инструмента                                    | 10   | 10  |
| Скорость резания, м/мин                                | 350  | 500   |
| Обороты шпинделя, об/мин                               | 12000  | 14400                                       |
| Подача, мм/мин   | 950  | 2200  |
| Припуск на сторону $A_e$ , мм                          | 5  | 5   |
| Припуск по высоте $A_p$ , мм.                          | 3  | 3   |
| Количество проходов                                    | 8  | 8   |
| Время обработки 1 стрингера (производительность), мин. | 112  | 52  |
| Стойкость, мин   | 200  | 420   |
| Шероховатость поверхности после обработки $R_a$ , мкм  | 6,3  | 2,5   |

Длина обработки керамическим роутером составила более 200 метров.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Скорость резания повышена в 1,4 раза.
2. Производительность обработки повышена более чем в 2 раза.
3. Стойкость инструмента повышена более чем в 2 раза.
4. Шероховатость поверхности обработки улучшена в 2,5 раза, расслоения, сколов и трещин материала не обнаружено.

На рис. 4 приведен износ керамического и твердосплавного инструмента. Сколы и вырыв ленты после фрезерования твердосплавным роутером показаны на рис. 5.



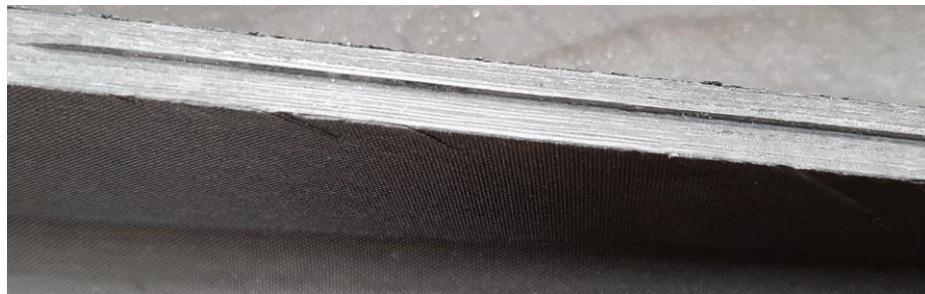


а)



б)

**Рис. 4.** Вид износа (сколы) керамического (а) и твердосплавного (б) инструмента

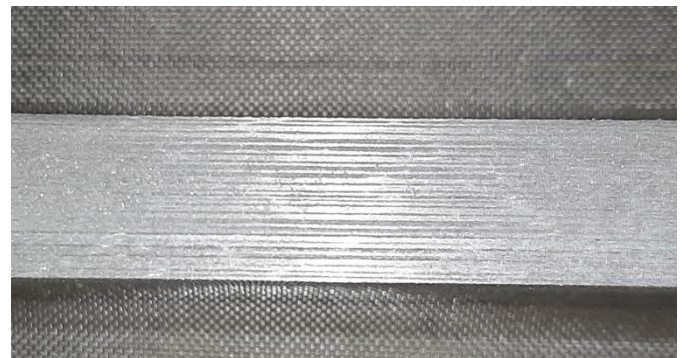


**Рис. 5.** Сколы и вырыв ленты после фрезерования твердосплавным роутером

Сравнение шероховатости поверхности углепластика после фрезерования твердосплавным и керамическим роутером приведена на рис. 6.



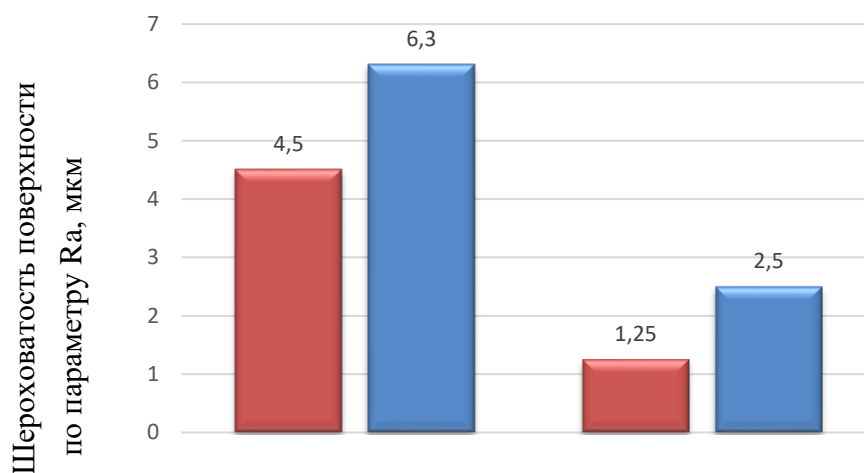
а)



б)

**Рис. 6.** Шероховатость после фрезеровки твердосплавным (а) и керамическим (б) роутером

Параметры шероховатости после фрезерования керамическим роутером находятся в диапазоне Ra 2,5 – 1,25, по сравнению с твердосплавным роутером Ra 6,3 – 4,5 и приведены на рис. 7.



**Рис. 7.** Шероховатость и качество поверхности после фрезеровки:  
 ■ твердосплавным роутером и ■ керамическим роутером

## Заключение

Целью проведенных исследований являлась разработка и определение работоспособности инструмента, для оценки возможности использования в конструкциях инструмента различных марок высокопрочных материалов. Кроме того, были определены рациональные характеристики процесса резания, геометрические параметры инструмента, гарантирующие высокое качество обработанной поверхности. Также были выполнены опытные исследования для оценки работоспособности инструмента и качества обработки на различных режимах резания.

По результатам выполненных исследований был разработан монолитный инструмент из керамики-роутер для фрезерования углепластиков и рекомендации по работе с монолитным керамическим роутером применение гидравлических патронов, позволяющих уменьшить биение инструмента в патроне и обеспечить максимальную жесткость технологической системы с исключением возможных вибраций.

Использование керамического материала и инновационной геометрии создает эксплуатационные характеристики, благодаря которым новая серия фрез должна идеально подходить для обработки деталей из углепластика, применяющегося в аэрокосмической отрасли. Нестандартная геометрия включает оптимизированный угол наклона винтовой линии, который позволяет уменьшить силу резания и предотвращает эффект «вибрации», обычный при обработке крупногабаритных заготовок из углепластика. Кроме того, использование специальной технологии шлифования фрез, позволит добиться более высокого сопротивления выкрашиванию даже в экстремальных условиях черновой обработки. К другим особенностям можно отнести наличие прочного зуба с отрицательным углом и специально разработанной режущей кромкой, которая выдерживает высокие температуры и нагрузки. Экономическая эффективность производства для современного предприятия является одним из важных показателей при проектировании технологического процесса. Внедрение результатов проведенных исследований позволит достичь годовой экономии в размере не

менее 10 млн. руб. При применении механической обработки изделий на этот параметр в значительной степени оказывает влияние режущий инструмент, поскольку себестоимость продукции зависит от его стоимости, работоспособности и производительности обработки, которые изменяются в соответствии с конструктивными особенностями инструмента. Использование такого инновационного инструмента приведет к повышению качества и эффективности обработки композиционных материалов методом фрезерования.

### Список литературы

1. Тарасов Ю.М. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012, №4(2), с. 12-18.
2. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. *Справочник технолога машиностроителя*. М.: Машиностроение, 2003.
3. Амалицкий В.В. *Исследование режущих свойств керамики при фрезеровании ЦСП*. М.: МЛТИ, 1991.
4. Булгаев А.М. *Совершенствование конструктивно-технологических методов повышения износостойкости инструментов для обработки неметаллических материалов*: автореф. ... канд. техн. наук. М., 2002. 28 с
5. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. *Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
6. Илясов В.В. *Физико-химические основы создания новых твердых и сверхтвердых инструментальных материалов*: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук - Ростов-на-Дону, 2000. 52 с.
7. Ковалевский С.В. Исследование технологических возможностей применения прогрессивного режущего инструмента // “Нейросетевые технологии и их применение” (*материалы VII Международной научной конференции*). Краматорск: ДГМА, 2009. С. 72–77.