

УДК 621.91.01

DOI: 10.12737/article\_58ef809026b201.73125147

**А.М. Марков, д.т.н.,  
Н.А. Макарова, к.т.н.,  
С.В. Гайст, преподаватель**  
(ФГОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова  
656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46)  
E-mail: andmarkov@inbox.ru

## **Износ инструмента при фрезеровании стеклопластика**

*Представлены методика и результаты исследования износа концевых фрез при обработке композиционных материалов, в частности стеклопластика. Исследование проводилось на основе разработанной имитационной модели износа режущей части фрезы в процессе обработки. Моделирование реализовано в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Выявленные закономерности процесса износа подтверждены результатами экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** композиционный материал; стеклопластик; фреза; износ; метод конечных элементов; сила резания; напряжения; режимы резания.

**A.M. Markov, D. Eng.,  
N.A. Makarova, Can. Eng.,  
S.V. Gaist, Lecturer**  
(FSEI HE Polzunov State Technical University of Altay  
46, Lenin Avenue, Barnaul, Russia, 656038)

## **Tool wear at glass-fiber material milling**

*The paper reports the results in the investigations of end mill wear at glass-fiber parts milling. The peculiarities in glass-fiber material machining and processes of tool wear at the milling of similar materials are considered. On the basis of a simulation in a universal program Ansystem system of a finite element analysis there are obtained mathematical dependences connecting a value of milling cutter wear with a cutting force. The experimental investigations carried out confirmed the adequacy of the simulation which gives a reason for its use at designing operations of end milling at the stage of the computation of cutting modes.*

**Keywords:** composite material; glass-fiber material; milling cutter; wear; finite element method; cutting force; stresses; cutting modes.

В настоящее время композитные материалы находят широкое применение в различных отраслях промышленности: космическая и ракетная техника, авиа-, судо-, автомобилестроение и т.д. Одним из видов композитных материалов являются стеклопластики. Они имеют высокую прочность, низкую теплопроводность, обладают хорошими электроизоляционными свойствами, а так же сравнительно низкой стоимостью изготовления. Однако наличие эпоксидного связующего и наполнителя в виде стекловолокон в составе этих материалов приводит к

возникновению ряда проблем при их механической обработке [1, 2], среди которых значительный интенсивный износ режущего инструмента.

Результаты, приведенные в работах ряда исследователей [3 – 5] свидетельствуют, что характер износа инструмента при обработке стеклопластика отличается от изнашивания инструмента при резании металла. Как правило, при лезвийной обработке композиционного материала образуется незначительный износ по передней поверхности, что объясняется малыми

силами, возникающими на передней поверхности и большим износом по задней поверхности, взаимодействующей с обработанной поверхностью из-за упругого восстановления композиционного материала.

Как показывает практика, в начальный период (износ до 0,2 ... 0,25 мм) изнашивание происходит за счет округления режущей кромки, далее износ происходит непосредственно по фактической площади контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом.

В настоящее время физика процесса резания композиционных материалов изучена еще недостаточно полно, что требует проведения дополнительных исследований, как правило связанных со значительными затратами материальных и временных ресурсов. Наиболее эффективно эта задача может быть решена с помощью математического моделирования [6], в

частности, на основе метода конечных элементов. В данной статье представлены результаты моделирования процесса концевой фрезерования стеклопластика в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS.

Для построения трехмерной модели свободного резания рассматривалась схема непосредственного контактного взаимодействия заготовки и инструмента, учитывающая совместное действие таких факторов как пластические деформации и отделение стружки, износ инструмента и тепловые явления на его поверхности.

Инструмент – режущее лезвие концевой фрезы, выполненное из твердого сплава ВК8. Заготовка получена из композитного материала (эпоксидная матрица, армированная стекловолокнами). Свойства составляющих компонентов приведены в табл. 1.

**1. Физико-механические свойства компонентов композиционного материала**

Свойства	Значения для составляющих компонентов	
	Стекловолокно	Эпоксидная смола ЭД-20
Модуль упругости, МПа	82000	3500
Коэффициент Пуассона	0,25	0,2
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2500	1250
Прочность при растяжении, МПа	4200	70
Коэффициент линейного термического расширения, 10 <sup>-6</sup> (1 / °C)	4,3	6

Построение 3D-модели системы «заготовка – лезвие фрезы» осуществлялось в среде автоматизированного проектирования «Компас-3D». В связи с тем, что моделируется черновое, получистовое и чистовое фрезерование, было принято решение использовать различные масштабы при построении моделей. Это позволило сократить время расчета.

Для диапазона глубин резания от 0,2 до 0,5 мм (чистовое фрезерование) заготовка представляла собой куб с гранями 1,0 мм, с размещенными в нем волокнами диаметром 0,007 мм, расстояние между волокнами 0,04 мм. Режущее лезвие имело следующие размеры: высота – 0,5 мм; ширина – 0,5 мм; длина – 1,2 мм. Передний угол – 15°, задний – 20°.

Для диапазона глубин от 1,0 до 5,0 мм (получистовое и черновое фрезерование) заготовка – куб с гранями 5,0 мм. Режущее лезвие: высота – 5,5 мм; ширина – 5,0 мм; длина – 5,5 мм. Для каждого из диапазонов варьирования глубины резания (видов фрезерования) рассматриваются три состояния режущего лезвия – острозаточенное (новое), имеющее нормальный износ, достигшее предельного износа. Состояние ре-

жущего лезвия задается в модели радиусом при вершине 0,05; 0,2; 0,3 мм соответственно. Скорость резания изменялась от 70 до 628 м/мин.

Поскольку процесс резания представляет собой динамическое деформирование, при котором сила резания изменяется во времени, то в расчетах был использован явный динамический анализ, основой которого является численное решение системы дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Такое решение реализовано в пакете ANSYS–Workbench (Explicit Dynamic), позволяющей решать контактные задачи с физической и геометрической нелинейностями.

Важной процедурой при разработке модели, определяющей точность расчетов, является построение сетки, т.е. выбор типа конечных элементов и их размеров. При этом наиболее предпочтительной является упорядоченная сетка с прямоугольными элементами [7]. В связи с тем, что объектом моделирования является процесс резания композиционного материала, характеризуемый большим градиентом деформаций, наличием концентраторов напряжений в виде трещин, неоднородностей, разрывов связей в

материале, то для заготовки в зоне резания была выбрана мелкая сетка с размером 0,025 мм. Для режущего лезвия использовалась сетка 0,003 мм. С целью уменьшения времени расчета для остального материала выбрана сетка 0,15 мм.

Для расчетной схемы (рис. 1, а) по двум поверхностям заготовки принято условие неподвижности узлов; инструменту задается перемещение в направлении главного движения резания (рис. 1, б).

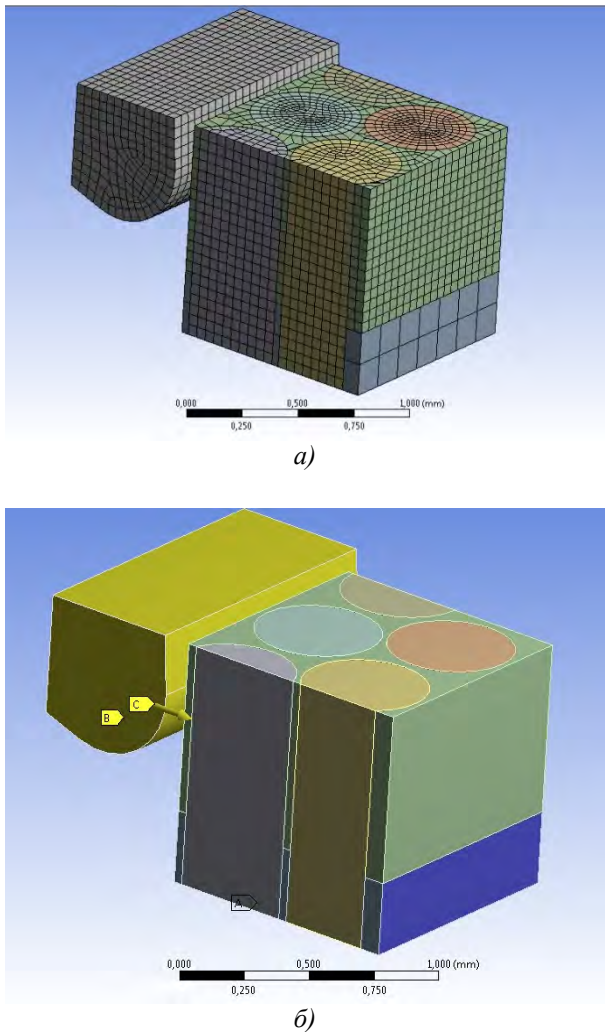


Рис. 1. Расчетная схема:

а – исходная модель; б – схема взаимодействия инструмента и заготовки

Моделирование проводилось при следующих допущениях:

- рассматривается перемещение лезвия фрезы, вызванное главным движением. Перемещение от движения подачи не учитывается;
- главное движение лезвия фрезы по окружности заменяется прямолинейным перемещением, так как моделируется процесс реза-

ния на малом участке;

- стеклопластик рассматривается как объект, состоящий из двух материалов без пограничной фазы.

Моделирование процесса резания стеклопластика выявило места основных напряжений в режущем лезвии (рис. 2). Пиковые напряжения, приводящие к интенсивному износу режущей кромки инструмента, возникают в местах перерезания стекловолокна. Помимо этого было зафиксировано, что при резании изношенным инструментом (радиус при вершине 0,3 мм) стекловолокно разрывается и отслаивается от матрицы.

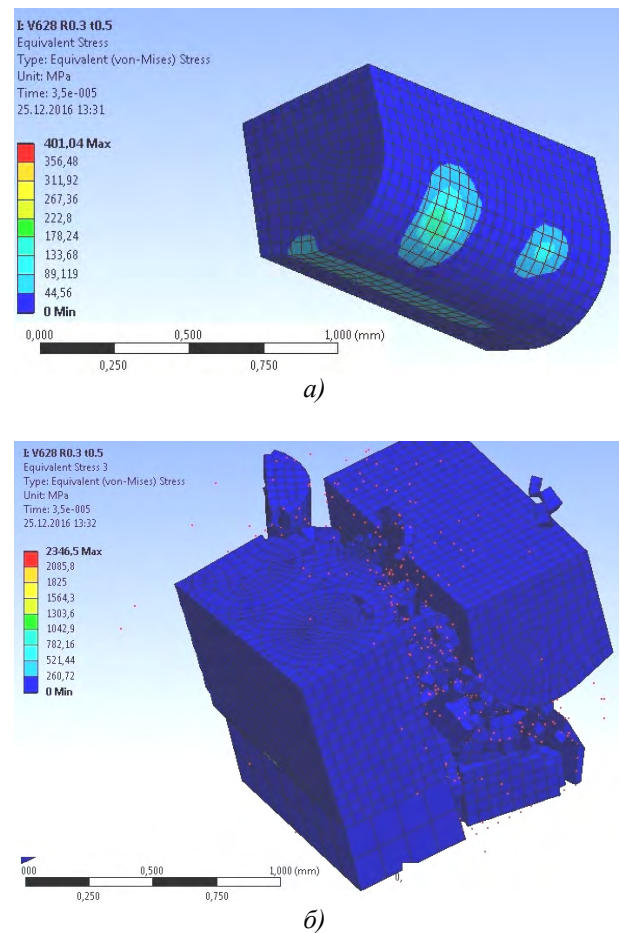


Рис. 2. Результаты моделирования:

а – напряжения, возникающие на лезвии фрезы; б – взаимодействие инструмента и заготовки

Обработка результатов, полученных при моделировании, позволила установить зависимость силы резания от износа инструмента и скорости резания для чернового, получистового и чистового видов фрезерования. Зависимость имеет линейный характер и в общем виде может быть представлена следующим выражением:

$$P_{\Sigma} = a + k\Delta, \quad (1)$$

где  $P_{\Sigma}$  – эквивалентная сила резания, Н;  $\Delta$  – значение износа режущего лезвия, мкм;  $a, k$  – коэффициенты, зависящие от вида обработки. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

**2. Значения коэффициентов для расчета силы резания**

Скорость резания, м/мин	Значения коэффициентов	
	$a$	$k$
черновое фрезерование ( $t = 5,0$ мм)		
70	11,18	2582
200	14,73	2670
628	8,3	3476
получистовое фрезерование ( $t = 1,0$ мм)		
70	3,9	1313
200	19,81	1577
628	78,1	2155
чистовое фрезерование ( $t = 0,2$ мм)		
70	4,3	563,5
200	0,7	935,2
628	21,18	862,6

Для оценки адекватности результатов моделирования реальному процессу был проведен ряд экспериментов по фрезерованию стеклопластика [8]. Использовались концевые фрезы диаметром 10 мм из твердосплавного материала марки ВК8. В качестве экспериментального образца выбраны трубы из высокопрочного стеклопластика, полученные методом косослойной продольно-поперечной намотки (рис. 3).

Варьируемыми параметрами приняты режимы резания: скорость резания  $v$ , м/мин; подача  $S$ , мм/зуб и глубина фрезерования  $t$ , мм. В процессе экспериментов контролировали износ инструмента  $\Delta$ , мкм; силу резания  $P$ , Н; шероховатость обработанной поверхности  $Ra$ , мкм. Измерение силы резания осуществлялось с помощью оригинального многокомпонентного динамометра (положительное решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2016145705/28 от 22.11.2016).

Как показали экспериментальные исследования, основной причиной выхода из строя режущего инструмента является износ по задней поверхности, при этом наблюдается выкрашивание режущей кромки (рис. 4).

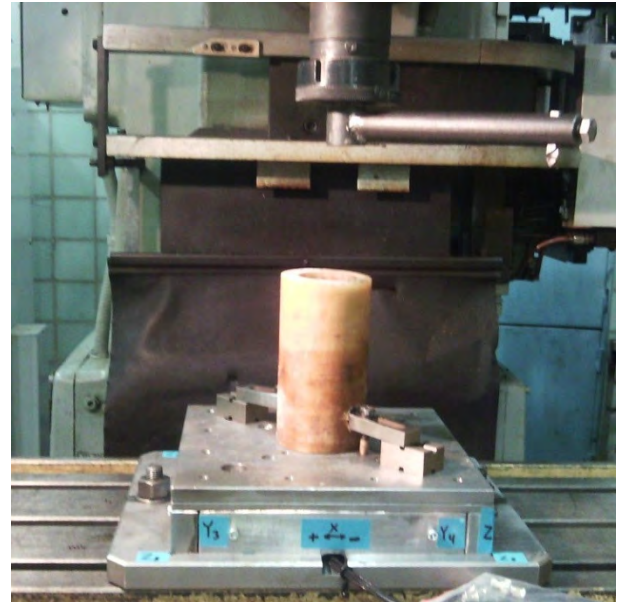
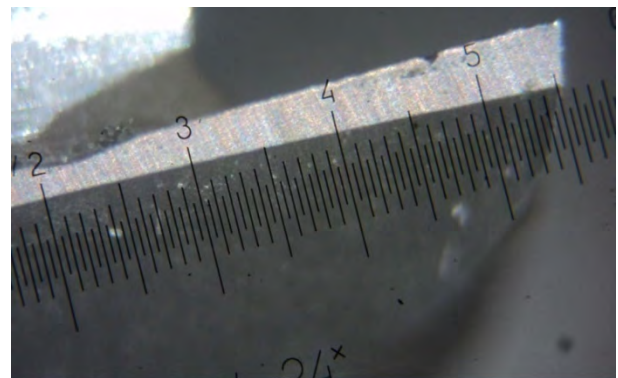


Рис. 3. Экспериментальные образцы, установленные на столе динамометра



а)



б)

Рис. 4. Режущее лезвие фрезы:

а – новая фреза; б – фреза, достигшая предельного износа по задней поверхности 0,3 мм

Помимо этого при работе изношенным инструментом ухудшается качество обработанной

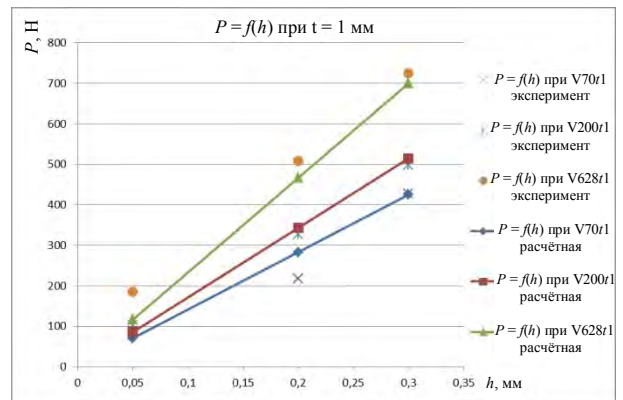
поверхности: увеличивается шероховатость, появляется отслоение волокон от матрицы стеклопластика (рис. 5).



**Рис. 5. Качество обработанной поверхности:**  
а – изменение шероховатости; б – дефекты поверхностного слоя

Полученные в ходе эксперимента результаты подтвердили линейную зависимость силы резания от износа инструмента. Значения силы резания для всех видов фрезерования совпадают с результатами моделирования. В качестве примера на рис. 6 показаны экспериментальные и расчетные значения силы резания для режима получистового фрезерования. Аналогичные графики получены для чернового и чистового видов фрезерования. Несовпадение экспериментальных и расчетных значений не превыша-

ет 10 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели реальному процессу.



**Рис. 6. Зависимость изменения силы резания от износа фрезы**

### Выводы

1. Разработанная имитационная модель процесса фрезерования стеклопластика позволяет прогнозировать величину и характер износа режущего инструмента. Вне зависимости от вида фрезерования (черновое, получистовое, чистовое) и режимов резания преобладающим видом износа режущего инструмента является износ по задней поверхности.

2. Моделирование подтвердило, что наибольшие по величине напряжения, приводящие к интенсивному износу режущего лезвия инструмента, возникают в момент перерезания стекловолокон. В ряде случаев это приводит к выкрашиванию режущего лезвия инструмента.

3. При фрезеровании изношенным инструментом в большинстве случаев происходит не срезание, а разрыв стекловолокна и его отслоение от матрицы, обуславливающие увеличение шероховатости и разлохмачивание обработанной поверхности.

4. Сила резания при фрезеровании стеклопластика имеет линейную зависимость от износа инструмента. Полученные математические зависимости позволяют рассчитать ее значение в зависимости от скорости резания и износа для чернового, получистового и чистового видов фрезерования.

5. Экспериментальное исследование подтвердило адекватность имитационной модели реальному процессу, что позволяет использовать ее при проектировании операции фрезерования для назначения режимов резания.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, В.Ф., Мешкас, А.Е., Ширинкин, В.В. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 22. – С. 14–22.
2. Мозговой, Н.И., Марков, А.М. Исследование процесса формирования показателей качества отверстий в деталях из стеклопластика // Ползуновский вестник. – 2009. – № 2. – С. 23.
3. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 176 е., ил.
4. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн 1/Под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта; Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
5. Мешкас, А.Е., Макаров, В.Ф., Ширинкин, В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 291–299.
6. Leonov S.L., Markov A.M., Belov A.B., Sczygol N. Generalized mathematical model predicting the mechanical processing topography // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 7. Сер. "VII International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, ISPCIME 2015" 2016. С. 012009.
7. Болотеин, А.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей после механической обработки средствами компьютерного моделирования // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2014. – № 1 (28). – С. 54–60.
8. Гайст, С.В., Катаева, С.А., Марков, А.М., Черданцев, П.О., Лапенков, Е.Ю. Экспериментальное исследование процесса формирования показателей качества при фрезеровании стеклопластика // Вестник Брянского

государственного технического университета. – 2016. – № 3 (51). – С. 129–136.

## REFERENCES

1. Makarov, V.F., Meshkas, A.E., Shirinkin, V.V. Machining Investigation of aerospace parts made of new composites // *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 22. – pp. 14–22.
2. Mozgovoy, N.I., Markov, A.M. Investigation of quality index formation for holes in glass-fiber parts // *Polzunov Bulletin*. – 2009. – № 2. – С. 23.
3. Stepanov, A.A. *High-strength Composite Polymeric Material Cutting*. – L.: Mechanical Engineering, Leningrad Branch, 1987. – pp. 176, il.
4. *Reference Book on Composites*: In 2 Books. Book 1/under the editorship of J. Lyubin; transl. from Engl. A.B. Geller, M.M. Gelmont; under the editorship of B.E. Geller. – M.: mechanical Engineering, 1988. – pp. 448.
5. Meshkas, A.E., Makarov, V.F., Shirinkin, V.V. Technologies allowing increase of composite machining effectiveness by milling method // *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. – 2016. – № 8-2. – pp. 291–299.
6. Leonov S.L., Markov A.M., Belov A.B., Sczygol N. Generalized mathematical model predicting the mechanical processing topography // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 7. Сер. "VII International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, ISPCIME 2015" 2016. С. 012009.
7. Bolotein, A.N. Analysis of stress-strain state in parts after machining by means of computer simulation // *Bulletin of Soloviev State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. – 2014. – № 1 (28). – pp. 54–60.
8. Gaist, S.V., Kataeva, S.A., Markov, A.M., Cherdantsev, P.O., Lapenkov, E.Yu. Experimental investigation of quality index formation at glass-fiber milling // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – № 3 (51). – pp. 129–136.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандожко

