

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РЕЗАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАКСИМАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ

*А. П. Тарасюк, д-р техн. наук,*

*Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков*

*Приведены рекомендации по выбору условий резания волокнистых полимерных композитов, при которых обеспечиваются максимальные значения показателей качества поверхностного слоя. Показаны физические особенности влияния режимов резания и геометрических параметров режущей части инструментов на состояние поверхностного слоя полимерных анизотропных материалов.*

### ВВЕДЕНИЕ

Исходя из того, что основной проблемой при механической обработке волокнистых полимерных композитов является сложность обеспечения требуемого качества поверхностного слоя, которое и есть основным лимитирующим фактором, определяющим выбор рациональных условий резания [1], в качестве исходных предпосылок для их выбора нами использовались физические условия обеспечения требуемого качества поверхностного слоя при резании.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку исследователям удалось установить физические условия обеспечения требуемого качества поверхностного слоя при резании полимерных композитов [2], возникли предпосылки выбора рациональных режимов резания и оптимальных геометрических параметров режущей части инструмента обеспечивающих вышеуказанные физические условия. Это и определило цель данной статьи.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве условий механической обработки волокнистых полимерных композитов определялись:

*режим резания* – скорость резания, подача, глубина резания;

*геометрические параметры режущей части инструмента* – передний угол, задний угол, угол наклона главной режущей кромки, главный угол в плане, величина износа инструментов на задней поверхности, радиус округления режущей кромки.

В качестве обрабатываемых использовались 3 группы материалов: полимеры, армированные минеральными волокнами, полимеры, армированные органическими волокнами, и гибридные композиционные материалы.

**Скорость резания.** Поскольку основной причиной трудности обеспечения требуемого качества поверхностного слоя волокнистого композита при резании являются его разрушения на поверхности раздела структурных компонентов и деструкция полимерных составляющих, необходимо при выборе скорости резания стараться обеспечить следующие физические условия:

- повышение хрупкости разрушения, снижение работы пластической деформации и следовательно снижение энергозатрат на резание;
- повышение удельной энергии резания;
- достижение предельной скорости критического роста трещин при разрушении;

- уменьшение нормальных напряжений в плоскости перпендикулярной обработанной поверхности;
- снижение температуры резания.

Поскольку физико-механические свойства полимерных материалов изменяются с изменением скорости их деформирования, становится возможным управлять этими свойствами за счет изменения скорости резания.

Повышение хрупкости разрушения можно достичь за счет увеличения отношения работы упругой деформации к работе распространения трещин. Обеспечить это можно увеличением скорости деформирования композита за счет увеличения скорости резания. При этом снижается ударная вязкость композита и энергия разрушения (следовательно, температура резания) [3].

Кроме того, при повышении хрупкости разрушения уменьшается фактическая площадь контакта по задней поверхности, а, следовательно, и температура резания [1].

Увеличение скорости резания приводит к увеличению скорости распространения трещин в композите (скорости деформации и разрушения) и снижению работы пластической деформации. Предельная скорость закритического роста трещин является максимально возможной для каждого конкретного композита и не зависит от уровня внешних нагрузок, а определяется только структурой материала. Таким образом, для достижения этой скорости для каждого конкретного композита необходимо определить соответствующую скорость.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования увеличения скорости резания (при прочих рациональных условиях резания), можно существенно уменьшить глубину дефектного поверхностного слоя до уровня  $<50$  мкм, при этом глубина трещин вдоль поверхностей раздела распространяется на более чем на 10–20 мкм.

При увеличении скорости резания необходимо обеспечивать такую минутную подачу, при которой в случае нагрева инструмента, через который отводится ~90 % тепла при резании, выше теплостойкости композита, скорость относительного движения инструмента как теплового источника при минутной подаче была достаточной, чтобы избежать термодеструкции полимера (уменьшать время контактирования теплового источника с микрообъемами композита).

Диапазоны рациональных скоростей резания для различных обрабатываемых материалов и видов обработки приведены в таблице 1.

Приведенные скорости резания при прочих оптимальных условиях резания обеспечивают достижения интегрального показателя качества  $D$  на уровне 0,8–0,9.

*Таблица 1 – Рациональные скорости резания полимерных композитов (м/с)*

Вид обработки / Обрабатываемый материал	Фрезерование	Точение	Сверление
Стеклопластик	25–30	1,2–1,4	1,0–1,2
Стеклоорганопластик	20–25	1,0–1,2	0,8–1,0
Углеорганопластик	17–22	1,0–1,2	0,7–0,9
Органопластик	15–20	0,8–1,0	0,6–0,8

При снижении требований к качеству скорость резания может снижаться для повышения стойкости инструментов.

Существенное различие в величинах рациональных скоростей резания для фрезерования, с одной стороны, и сверления, точения, с другой стороны, определяется более высокой теплонапряженностью последних

из-за непрерывного контактирования инструмента с обрабатываемым материалом. Очевидно, необходим поиск альтернативных видов обработки цилиндрических поверхностей и отверстий.

**Подача.** Выбор значений подачи при механической обработке композитов определяется в первую очередь обеспечением оптимальных силовых и энергетических характеристик процесса резания.

Подача из всех составляющих режима резания оказывает наибольшее влияние на напряжённое состояние в окрестностях зоны резания. С увеличением подачи растёт толщина среза и соответственно сила резания, особенно ее тангенциальная составляющая –  $P_z$ , что приводит к росту напряжений  $\sigma_z$ , вплоть до достижения предела прочности композита на сжатие и предела адгезионной прочности на разрыв. Это приводит к сложному разрушению, сочетанию разрушения сдвига с отрывом. Адгезионная связь в композите нарушается и под действием  $\sigma_y$  и под действием  $\sigma_z$ , при этом наблюдается вытаскивание волокон из матрицы. При этом существенно снижается качество обработанной поверхности и поверхностного слоя в целом.

Уменьшение подачи (толщины среза) при постоянной ширине способствует уменьшению энергозатрат и увеличению удельной энергии резания. Малые толщины среза обеспечивают эффект взаимодействия отражённых волн и увеличение числа микротрещин в зоне нагружения, при этом зона разрушения материала находится в плосконапряжённом состоянии. Это способствует уменьшению значения динамического коэффициента интенсивности напряжений старта трещин и снижению работы резания. Увеличение удельной энергии резания с уменьшением подачи происходит за счёт уменьшения сечения среза.

Увеличение удельной энергии резания, изменяя реологические свойства композитов, способствует изменению условий релаксации напряжений, минимизируя влияния механического фактора на процесс разрушения композита по поверхности раздела, что сопровождается уменьшением глубины дефектного слоя, ворсистости и шероховатости обработанной поверхности. Увеличение удельной энергии способствует так же повышению хрупкости разрушения, снижению работы пластической деформации и температуры резания, что снижает влияние теплового и химического фактора на процесс разрушения по поверхности раздела, таким образом уменьшая степень деструкции полимерных составляющих композита.

Снижение энергозатрат при резании обеспечивает уменьшение механической и тепловой напряжённости процесса резания, создавая предпосылки для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя.

Таким образом, с целью обеспечения максимального качества поверхностного слоя необходимо стремиться к минимальновозможным значениям подачи. Однако существует нижнее ограничение величины подачи, определяемое, как уже было сказано выше, временем контактирования инструмента, как теплоисточника с микрообъемами композита. Поскольку при резании композитов, как уже было сказано, отводится до 90 % теплоты через инструмент [4], он может нагреваться до значительных температур, превышающих теплостойкость композита. При этом происходит теплообмен между инструментом и обрабатываемым материалом. При этом из-за низкой теплопроводности композита и высокого градиента, перепада температур теплонапряжённая зона локализуется вблизи зоны контакта. При этом температура нагрева обрабатываемого материала от инструмента будет прямо пропорциональна плотности теплового потока, обратно пропорциональна коэффициенту аккумуляции тепла и будет повышаться с течением времени пропорционально корню квадратному от времени нагрева [5]:

$$(\theta, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q_e}{\varepsilon} \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где  $q_e$  – плотность теплового потока;  $\alpha$  – коэффициент аккумуляции тепла;  $\varepsilon = \sqrt{\lambda C_v}$  (где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $C_v$  – удельная объемная теплоемкость) – время нагрева;  $\tau = h^2/S_m$ .

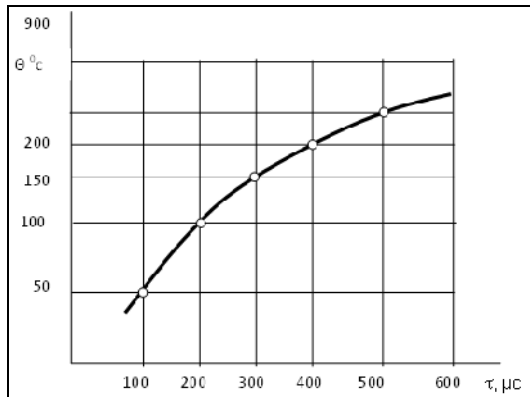


Рисунок 1 – Характер зависимости температуры нагрева обрабатываемого материала от времени нагрева

Таким образом, при неизменной величине плотности теплового потока, зная величину износа инструмента, можно определить минимально допустимую величину минутной подачи, при которой не достигается превышение теплостойкости обрабатываемого материала.

Характер зависимости температуры от времени нагрева приведен на рис. 1.

Рекомендуемые диапазоны подач, обеспечивающие максимальное качество поверхностного слоя, приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Рациональные значения подач при резании композитов

Вид обработки / Обрабатываемый материал	Фрезерование, мм/зуб	Точение, мм/об	Сверление, мм/об
Стеклопластик	0,1–0,15	0,1–0,5	0,1–0,3
Стеклоорганопластик	0,05–0,1	0,1–0,3	0,1–0,3
Углеорганопластик	0,15–0,1	0,1–0,3	0,1–0,3
Органопластик	0,03–0,05	0,1–0,3	0,1–0,2

**Глубина резания.** Глубина резания влияет на составляющие силы резания почти прямо пропорционально (так как удельная работа деформации и удельная работа трения не изменяются), что определяет в качестве лимитирующего фактора при ее выборе предельные значения напряжений на поверхностях структурных компонентов и соответствующих составляющих сил резания.

Для полимеров, армированных минеральными волокнами (стеклянными, углеродными), предельные значения силы трения по задней поверхности –  $F$  – не должны превышать 70–120 Н при нормальной силе на задней поверхности – не более 150 Н. При этом сила трения по передней поверхности должна находиться в пределах 25–50 Н. Удерживание физических составляющих силы резания в указанных диапазонах позволяет минимизировать разрушение композита по поверхности раздела и уменьшить степень термодеструкции. Для полимеров, армированных органическими волокнами, физические составляющие силы резания на задней поверхности не должны превышать 100 Н, при этом сила трения по передней поверхности должны находиться в диапазоне 15–30 Н.

Глубина резания для точения и фрезерования, исходя из припуска на обработку и требуемого качества обработки, как правило, находится в диапазоне 1–5 мм.

Режимы резания различных волокнистых композитов и приведенные рекомендуемые глубины резания в сочетании со скоростью резания подачи и геометрическими параметрами режущей части лимитируются предельными разрушающими напряжениями вдоль поверхностей раздела структурных компонентов композита.

**Передний угол**  $\alpha$ . Проведенные исследования подтвердили, что передний угол в области положительных значений не оказывает существенного влияния ни на один из исследуемых выходных параметров качества обработки, поэтому при выборе его значения необходимо руководствоваться, прежде всего, необходимостью обеспечения максимального угла заострения для обеспечения лучших условий теплоотвода и сохранения прочности режущего клина. Для резцов и фрез значение этого угла необходимо выбрать в диапазоне  $0-5^\circ$ . Уменьшение переднего угла до области отрицательных значений приводит к росту радиальной составляющей силы резания с соответствующим улучшением качественных характеристик обработки.

В большинстве случаев, особенно для малоразмерных инструментов, рекомендуется принимать передний угол равным  $0^\circ$ , что кроме прочих достоинств повышает технологичность изготовления.

**Задний угол**  $\beta$ . Лимитирующим фактором, определяющим величину заднего угла, являются величины напряжений и температуры резания возникающих под действием сил на задней поверхности инструмента. Влияние заднего угла определяется прежде всего упругим последствием (восстановлением) обрабатываемого материала [4], причем с изменением величины заднего угла более интенсивно меняются радиальная составляющая за счет изменения нормальной силы на задней поверхности (увеличение фактической площади контакта по задней поверхности). Это приводит к росту напряжений  $\gamma$  и увеличению глубины трещин расслоения вдоль волокна.

Увеличение заднего угла обеспечивает снижение энергозатрат при резании за счет уменьшения сил на задней поверхности, однако одновременно с этим ухудшаются условия теплоотвода из-за уменьшения угла заострения. Оптимальные значения задних углов в зависимости от обрабатываемого материала и вида обработки находятся в диапазоне  $18-30^\circ$  (см. табл. 3).

Таблица 3 – Рекомендуемые значения задних углов для резцов и фрез

Вид обработки \ Режущий инструмент	Резцы	Фрезы
Стеклопластик	$(18-20)^\circ$	$(18-20)^\circ$
Стеклоорганопластик	$(20-22)^\circ$	$(20-25)^\circ$
Углеорганопластик	$(22-25)^\circ$	$(25-27)^\circ$
Органопластик	$(25-27)^\circ$	$(27-30)^\circ$

\*Рекомендованные углы приведены для инструментов с материалом режущей части ВК 8

**Угол наклона главной режущей кромки.** Улучшение качественных характеристик процесса резания при увеличении угла наклона главной режущей кромки достигается за счет снижения энергозатрат резания, уменьшения макро- и микровыкрашиваний режущей кромки, обеспечения оптимальных кинематических условий среза, минимизирующих разрушение по поверхности раздела структурных компонентов композита. Эффективность увеличения угла наклона

главной режущей кромки увеличивается с уменьшением толщины среза и увеличения объемной доли органических волокон в композите.

*Таблица 4 – Рекомендованные углы наклона главной режущей кромки для резцов и фрез*

Инструмент Обрабатываемый материал	Резцы °	Фрезы °
Стеклопластик	(35–55)°	(45–55)°
Стеклоорганопластик	(55–65)°	(55–60)°
Углеорганопластик	(45–60)°	(55–60)°
Органопластик	(60–70)°	(60–65)°

**Главный угол в плане.** Выбор главного угла в плане предопределяется видом напряженно-деформированного состояния композита. С увеличением главного угла в плане уменьшается отношение ширины к толщине среза, что приводит к уменьшению составляющей –  $P_z$ . Влияние на составляющую  $P_y$  определяется действием двух конкурирующих явлений уменьшением отношения  $v/a$  при увеличении и увеличением отношения длины криволинейного переходного лезвия к рабочей длине главного лезвия (в условиях упругого восстановления это приобретает определяющее действие). Таким образом, это влияние имеет экстремальный характер, что и определяет величину главного угла в плане.

**Величина износа инструмента и радиус округления режущей кромки.**

Лимитирующим фактором, определяющим критерий затупления режущих инструментов по обработке волокнистых полимерных композитов, является состояние поверхностного слоя после механической обработки.

Увеличение площади износа по задней поверхности приводит к росту фактической площади контакта с обрабатываемым материалом, росту сил на задней поверхности и соответственно работы трения на задней поверхности и энергозатрат резания.

С увеличением радиуса округления режущей кромки уменьшается удельная энергия резания за счет увеличения площади контакта режущей кромки и прикромочного участка передней поверхности с обрабатываемым материалом при неизменной величине работы деформирования.

Таким образом, увеличение износа инструментов ухудшает энергетические характеристики процесса резания, что приводит к ухудшению качественных показателей механической обработки.

Лимитирующим фактором для полимеров, армированных минеральными волокнами, является величина площадки износа на задней поверхности, которая определяет предельно допустимые силу и работу трения по задней поверхности, при которых степень деформации полимерного связующего и глубины распространения трещин по поверхности раздела достигают предельных значений; для композитов, в состав армирующих элементов которых входят органические волокна, лимитирующим фактором является предельная величина радиуса округления режущей кромки, которая определяет минимально-допустимую удельную энергию резания, ниже которой не происходит перерезание органических волокон в плоскости резания.

Поскольку величина радиуса округления режущей кромки и величина износа на задней поверхности связано между собой простой зависимостью [4]:

$$= r_0 + kh_z, \quad (2)$$

где  $r_0$  – начальный радиус округления режущей кромки после заточки;  
 $k$  – коэффициент, зависящий от инструментального материала и вида обработки и колеблется в диапазоне 0,15–0,35.

Удобно предельно допустимый радиус округления режущей кромки выражать через предельно допустимую величину площадки износа по задней поверхности. Рекомендации по их выбору приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Рекомендуемые критерии затупления инструментов для различных видов обработки и обрабатываемых материалов (мм)

Вид обработки	Цилиндрическое фрезерование	Сверление
Обрабатываемый материал		
Стеклопластик	0,25	0,2
Стеклоорганоластик	0,15	0,12
Углеорганоластик	0,12	0,12
Органоластик	0,1	0,1

\*Рекомендации приведены для инструментов, приготовленных из сплава ВК8

## ВЫВОДЫ

Установлено, что наибольшее влияние на качество поверхностного слоя, обработанного резанием композита, оказывают те условия резания, которые оказывают наибольшее влияние на энергетические характеристики процесса резания: скорость резания и радиус округления режущей кромки за счет влияния на удельную энергию резания, параметры среза и износ за счет влияния на энергозатраты процесса резания, а их совместные действия определяет условие и степень разрушения по поверхностям раздела структурных компонентов.

## CHOICE OF OPTIMAL CUTTING CONDITIONS OF COMPOSITES PROVIDING MAXIMUM QUALITY OF THE SURFACE

*A. P. Tarasyuk,*

*Ukrainian Engineering And Pedagogical Academy, Kharkov*

*Recommendations for the choice of cutting conditions of fibrous composites, which will ensure maximum quality of the surface layer are given in the paper. The author shows the physical features of the influence of the cutting blade and the geometric parameters of the instruments on the state of the surface layer of polymer anisotropic materials.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасюк А. П. Проблемы исследования поверхностного слоя детали из волокнистых полимерных композитов, обработанных резанием / А. П. Тарасюк // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Харків : НТУ «ХП», 2001. – № 1. – С. 259–262.
2. Тарасюк А. П. Расширение функциональных возможностей волокнистых полимерных композитов за счет разработки эффективных процессов механической обработки : дис. ... д-ра техн. наук / А. П. Тарасюк. – Харьков, 2011. – 567 с.
3. Вереzub Н. В. Энергетические аспекты разрушения полимерных композитов при резании / Н. В. Вереzub, Г. Л. Хавин, А. П. Тарасюк // Резание и инструмент в технологических системах : международный научно-технический сборник. – Харьков : НТУ «ХПИ» – 2001. – Вып. 59. – С. 28–34
4. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс : дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Дрожжин. – Харьков, 1982. – 388 с.
5. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н. В. Вереzub, А. П. Тарасюк, Г. Л. Хавин и др. – Харьков : Издательство ХГАДУ (ХАДИ), 2001. – 180 с.

*Поступила в редакцию 11 октября 2012 г.*