

УДК 621.9.04

DOI:10.30987/2223-4608-2021-6-24-28

К.Р. Голубева, студент,  
А.И. Носков, к.ф.-м.н  
(ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ», 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)  
E-mail: golubeva.kr@mail.ru, ainoskov@kai.ru

## Технологии обработки материалов на основе стеклопластиков

*Приведен обзор основных методов механической обработки стеклопластиков, указаны характерные особенности, а так же достоинства и недостатки различных методов обработки. Приведено описание методов лезвийной механической обработки стеклопластиков. Рассмотрены альтернативные методы, такие как гидроабразивная резка и лазерная обработка.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; стеклопластик; механическая обработка; гидроабразивная резка; лазерная резка.

K.R. Golubeva, Student,  
A.I. Noskov, Can. Sc. Physical-Math.  
(FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after Tupolev– KAI»,  
10, K. Marx Str., Kazan, 420111)

## Technologies for processing materials based on glass-fiber materials

*The review of basic methods for glass-fiber material machining is shown, characteristic features are presented also advantages and drawbacks of different processing methods are mentioned. There is shown a description of glass-fiber material edge machining. The alternative methods such as hydro-abrasive cutting and laser working are considered.*

**Keywords:** polymeric composites; fiberglass; machining; hydro-abrasive cutting; laser cutting.

### Введение

Стеклопластик – это композиционный материал, состоящий из стеклянного наполнителя и синтетического полимерного связующего. Стеклопластик является одним из наиболее широко применяемых видов полимерных композиционных материалов (ПКМ), относясь к категории композиционных материалов универсального применения. Благодаря своим высоким механическим показателям в сочетании с низкой плотностью, стеклопластики находят широкое применение в авиа- и автомобилестроении, космической технике, судостроении, строительстве, трубопроводах, и многих других областях. На данный момент стеклопластики являются материалами, занимающими ведущее место по объему применения в авиастроении и других отраслях промышленности среди полимерных композиционных материалов.

В связи с широким применением стеклопластиков актуальным является вопрос их механической обработки. Из-за особенностей формообразования деталей из стеклопластиков они гораздо меньше подвергаются обработке резанием, чем металлические изделия. Необходимость механической обработки стеклопластиков обусловлена тем, что точность изготовления деталей из металлов существенно больше, чем из стеклопластиков. В большинстве случаев механическая обработка стеклопластиков включает в себя сверление отверстий и обработку кромок.

Главной трудностью при обработке стеклопластиков является обеспечение качества поверхностей изделий, поскольку обработка таких материалов обладает рядом особенностей. Связано это, в первую очередь, с характерными свойствами и структурой обрабатываемых материалов, а именно с наличием слоистой структуры и анизотропией свойств стеклопла-

стиков. Также стеклопластики неоднородны, а их внутренняя хрупкость и твердость затрудняют обработку традиционными методами обработки, поэтому приходится прибегать к нетрадиционным методам обработки, в част-

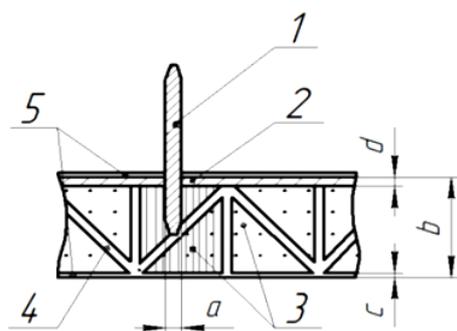
ности, к технологиям лазерной обработке и гидроабразивной резке. Преимущества и недостатки данных технологий приведены в табл. 1.

**1. Сравнительная характеристика методов обработки стеклопластиков**

Вид обработки	Достоинства	Недостатки
Лезвийная	– высокая точность обработки; – низкая шероховатость обработанных поверхностей; – небольшая себестоимость.	– быстрый износ режущего инструмента; – расслоение материала, образование ворса; – повышение температуры в зоне резания, что приводит к термической деструкции матрицы.
Гидроабразивная	– высокая точность обработки; – высокая производительность; – отсутствие термического воздействия на материал; – возможность резки материала большой толщины.	– дорогостоящее оборудование; – высокая шероховатость на поверхностях в зоне разреза.
Лазерная	– высокая точность и скорость обработки; – малая ширина реза (от 0,1 до 1 мм); – возможность обрабатывать поверхности сложной геометрической формы.	– термическое воздействие на материал; – выделение в атмосферу летучих веществ, негативно влияющих на человека.

**Лезвийная обработка**

Лезвийная обработка включает в себя операции разрезки, сверления, точения и фрезерования (рис. 1). Данные технологии хорошо изучены, широко применяются и обеспечивают высокую точность изготовления деталей. Однако существуют особые требования для реализации процесса лезвийной обработки, так как процесс резания композитов существенно отличается от резания металлов.



**Рис. 1. Схема фрезерной механической обработки:**  
*a* – толщина реза; *b* – толщина панели из ПКМ;  
*c* – толщина обшивки; *d* – толщина металлической вставки; 1 – фреза; 2 – металлическая вставка в панели из ПКМ; 3 – внутренняя структура панели из разнородных наполнителей; 4 – внутреннее ребро жесткости панели; 5 – верхняя и нижняя обшивки панели [1]

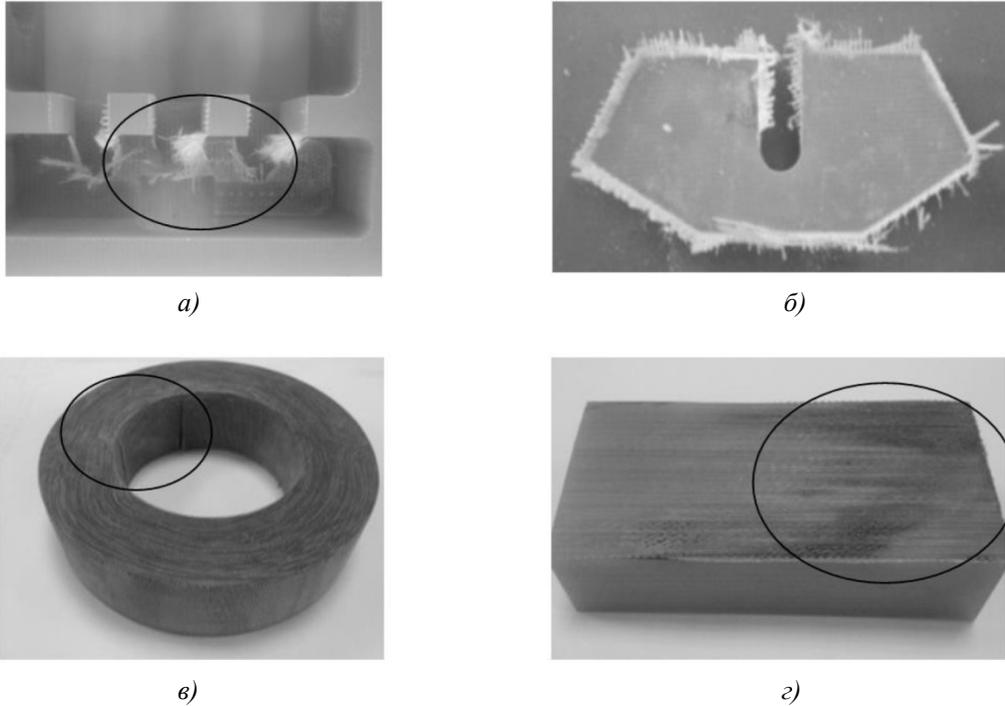
Обработка стеклопластиков резанием ос-

ложняется тем, что в процессе резания образуется мелкодисперсный порошок, который не только вреден для здоровья человека, но и оказывает отрицательное влияние на качество обрабатываемой поверхности. Также на качество обработки сильное влияние оказывает анизотропия свойств материала. В частности, стеклопластики с однонаправленным расположением волокон обрабатываются лучше, так как при их обработке режущая кромка инструмента не перерезает волокна, а скользит вдоль них, а значит, инструмент в процессе резания изнашивается меньше. Следовательно, от схемы армирования зависит качество обработанной поверхности, поэтому при выполнении механической обработки стеклопластика резанием следует уделять особое внимание направлению подачи режущего инструмента относительно направления армирования.

Помимо структуры и состава на обрабатываемость стеклопластиков резанием влияет также и метод их изготовления. Выявлено, что стеклопластики, полученные прессованием при высоких давлениях, показывают более низкую обрабатываемость, чем стеклопластики, полученные прессованием при низких давлениях, намоткой и контактным методом. Это объясняется различной степенью плотности волокон и пористостью в стеклопластике, а также различной адгезией связующего к стекловолокну.

Для лезвийной обработки стеклопластиков актуальна проблема выбора режущего инструмента, поскольку он играет важную роль в получении качественной поверхности. Для обработки ПКМ характерен быстрый износ режущего инструмента, обусловленный упругим восстановлением обрабатываемого мате-

риала после прохождения режущего клина [2]. Неправильно подобранный режущий инструмент и режимы резания приводят к расслоению материала, наличию вырванных волокон, повышению температуры в зоне резания, что приводит к термической деградации матрицы [3] (рис. 2).



**Рис. 2. Виды брака при механической обработке стеклопластиков:**  
*a* – отслаивание; *b* – разлохмачивание; *v* – растрескивание; *z* – прижоги [4]

Исследования показали, что для чистовой обработки стеклопластиков пригодны только алмазные инструменты. Для черновой обработки в некоторых случаях могут быть использованы твердосплавные инструменты. Для получения качественного разреза необходимо, чтобы был выбран именно такой инструмент, который обеспечивает требуемое качество и скорость резания при оптимальной производительности [5].

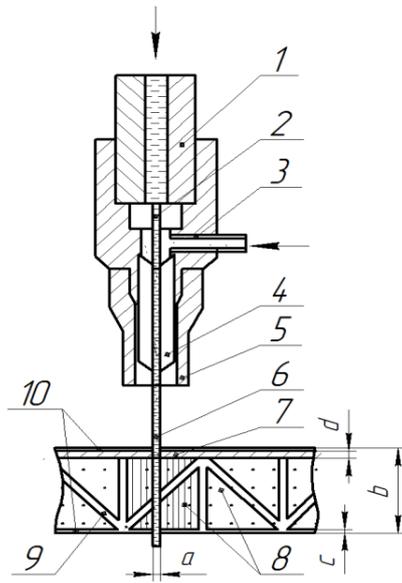
### Гидроабразивная резка

Гидроабразивная резка – это вид механической обработки, при котором удаление обрабатываемого материала происходит посредством воздействия на него струи чистой воды или смеси воды и твердого абразивного материала, выпускаемая из режущей головы с большой скоростью и под высоким давлением (рис. 3). В качестве абразива чаще всего применяют гранатовый песок.

Гидроабразивная резка, в отличие от фрезерования, более производительна и обеспечивает экологическую безопасность технологического процесса. Также такая обработка позволяет обрабатывать детали из стеклопластика с высокой точностью и при этом получать высокое качество реза (шероховатость кромки при гидроабразивной резке может достигать  $Ra = 1,6$  мкм) [6].

Однако при реализации процесса гидроабразивной резки имеется ряд сложностей и ограничений. В частности, в самом начале процесса возникает гидроудар, который может привести к расслаиванию материала со стороны выхода гидроабразивной струи. Сложность также вызывает обработка толстых материалов, так как в процессе резки струя может отклоняться от прямой линии, что ведет к образованию рисок и ухудшению качества получаемых кромок. Стоит отметить, что процесс гидроабразивной резки сложно реализовать при сборке, так как со стороны выхода гидро-

абразивной струи должно быть обеспечено свободное пространство.



**Рис. 3. Схема гидроабразивной резки:**  
*a* – толщина реза; *b* – толщина панели из ПКМ;  
*c* – толщина обшивки; *d* – толщина металлической вставки; 1 – магистраль для подвода воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – патрубок для подачи абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя воды с абразивом; 7 – металлическая вставка в панели из ПКМ; 8 – внутренняя структура панели из разнородных наполнителей; 9 – внутреннее ребро жесткости панели; 10 – верхняя и нижняя обшивки панели [1]

### Лазерная обработка

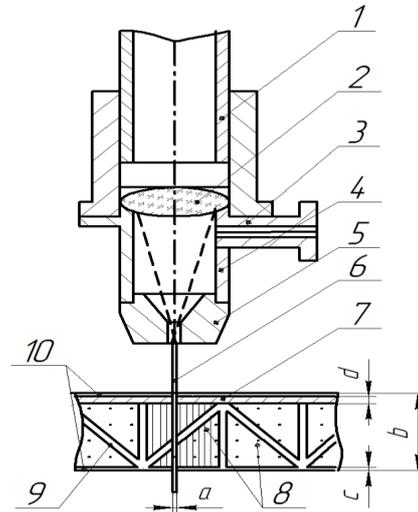
В последнее время наблюдается резкий рост исследований в области лазерной резки композитов, поскольку лазерная обработка предлагает привлекательную альтернативу среди всех нетрадиционных методов обработки.

Лазерная обработка стеклопластика включает в себя операции раскроя, гравировки и сверления. Суть процесса лазерной резки полимерных материалов состоит в том, что мощный луч инфракрасного излучения, генерируемый в резонаторе, передается и фокусируется специальной линзой на обрабатываемый материал (рис. 4).

Пятно фокуса разогревается лучом до высокой температуры на всю глубину листа, что приводит к выпариванию материала, который в дальнейшем выдувается из реза режущим газом высокого давления. Для лазерной обработки стеклопластиков используются CO<sub>2</sub> лазеры.

Лазерная резка отличается высоким качеством конечного продукта, низкой стоимостью, быстротой и точностью обработки, узкой ши-

риной реза и небольшой зоной термического воздействия. Контролируя различные технологические параметры лазера, можно производить разрезы для различной геометрии и сложной формы. Лазерная резка является бесконтактной, безабразивной технологией, исключая износ инструмента, прогибы станка, вибрации и т.д. [7].



**Рис. 4. Схема лазерной резки:**  
*a* – толщина реза (диаметр лазера); *b* – толщина панели из ПКМ; *c* – толщина обшивки; *d* – толщина металлической вставки; 1 – блок лазерного излучения; 2 – средство фокусировки лазерного луча; 3 – патрубок для подачи инертного газа; 4 – камера; 5 – сопло; 6 – лазерный луч; 7 – металлическая вставка в панели из ПКМ; 8 – внутренняя структура панели из разнородных наполнителей; 9 – внутреннее ребро жесткости панели; 10 – верхняя и нижняя обшивки панели [1]

К недостаткам данного метода обработки можно отнести образование на поверхности реза сажи, выгорание связующего и образование дефектного слоя, образование расслоений материала по периметру реза. Также затрудняется обработка материала больших толщин.

Улучшить качество получаемой поверхности реза можно с помощью подбора оптимального сочетания входных и выходных параметров лазерной обработки, что, в свою очередь, вызывает определенные трудности. Сложность выбора технологических режимов лазерной резки стеклопластиков заключается в том, что матрица и армирующие волокна имеют разные характеристики (теплопроводность; температуры испарения и плавления; оптические свойства для заданных длин волн).

Экспериментальные данные исследования лазерной резки ПКМ показывают, что различие теплофизических свойств компонентов материала требует оптимизации как парамет-

ров лазерного излучения (энергетических и пространственных), так и скорости резки.

Следовательно, подбор оптимальных параметров резки для каждого материала ведется экспериментально методом проб и ошибок с использованием теоретических моделей, позволяющих спрогнозировать глубину реза и выбрать оптимальное сочетание параметров для получения наилучшего качества поверхности [8, 9].

Одним из главных недостатков лазерной обработки является наличие термического воздействия на материал, однако размер зоны термического воздействия (ЗТВ) можно регулировать мощностью лазерного излучения и скоростью резки. Также для обработки стеклопластиков предпочтительнее использовать многопроходную обработку с высокой скоростью, что позволяет уменьшить ЗТВ и получить высокое качество поверхности [10].

### Заключение

В результате обзора научных публикаций и исследований было выявлено, что современные технологии обработки стеклопластиков остаются не до конца изучены, что задает направления для дальнейшего исследования.

Традиционные методы обработки стеклопластиков по многим параметрам начинают уступать альтернативным методам, таким как лазерная и гидроабразивная резка. При этом наиболее перспективным методом обработки стеклопластиков в настоящее время является лазерная обработка, поскольку она характеризуется отсутствием дорогостоящих расходных материалов, ограничений на контур, форму и габариты детали. Главным недостатком данного метода является наличие термического воздействия на материал, однако он решается путем подбора оптимальной совокупности входных и выходных параметров обработки, что позволяет на выходе получить высокое качество обработанной поверхности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грищенко, Т.А., Мелюхов, Н.И., Любушкин, В.О. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2017. – № 2 (31). – С. 49-55.
2. Ющенко, Д.А., Лобанов, Д.В. Методы лезвийной обработки изделий из композиционных материалов их специфика и перспективы // Технологии и материалы. – 2015. – №3. – С. 30-35.
3. Раскутин, А.Е., Хрульков, А.В., Гирш, Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. – 2016. – № 9 (45). – С. 12.
4. Журавлева, Т.А. Технологическое обеспечение качества гидроабразивного резания стеклопластиков за счет

управления параметрами прошивки: дис. канд. техн. наук. – Оrel. – 2015. – 171 с.

5. Chang, C.S. Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools // Journal of Materials Processing Technology. vol. 180. – PP. 117-129.

6. Мальшева, Г.В., Гузева, Т.А., Федоров, Б.Б. Особенности гидроабразивной обработки стеклопластиков // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – С. 66-70.

7. Patel Pathik, Modi Bhavin S., Sheth Saurin, Patel Tejas Experimental Investigation, Modelling and Comparison of Kerfwidth in Laser Cutting of GFRP // Bonfring International Journal. – vol. 5. – no. 2. – PP. 55-62.

8. Hayat A.Eltawahni, Abdul G.Olabi, Osama M. Bas-mage, Khaled Y. Benyounis CO2 Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. – 2020. – vol. 1. – PP. 145-159.

9. Pathik Patel, Saurin Sheth, Tejas Patel Experimental Analysis and ANN Modelling of HAZ in Laser Cutting of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites // Procedia Technology. – 2016. – vol. 23. – PP. 406-413.

10. Schneider, F., Wolf, N., Petring, D. High Power Laser Cutting of Fiber Reinforced Thermoplastic Polymers with cw- and Pulsed Lasers // Physics Procedia. – 2013. – vol. 41. – PP. 415-420.

### REFERENCES

1. Grishchenko, T.A., Melyukhov, N.I., Lyubushkin, V.O. Hydro-abrasive cutting use at polymeric composite parts processing // Bulletin of Engineering School of DVFU. – 2017. – No.2(31). – PP. 49-55.
2. Yushchenko, D.A., Lobanov, D.V. Methods for composite edge processing, their peculiarities and outlooks // Technologies and Materials. – 2015. – No.3. – PP. 30-35.
3. Raskutin, A.E., Khrulkov, A.V., Girsh, R.I. Technological peculiarities of composite machining at manufacturing structure parts (review) // Proceedings of VIAM. – 2016. – No.9 (45). – PP. 12.
4. Zhuravlyova, T.A. Quality Technological Support of Fiberglass Hydro-abrasive Cutting with Piercing Parameter Control: Can. Sc. Tech. thesis. – Orel. – 2015. – PP. 171.
5. Chang, C.S. Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools // Journal of Materials Processing Technology. vol. 180. – PP. 117-129.
6. Malysheva, G.V., Guzeva, T.A., Fyodorov, B.B. Peculiarities in Fiberglass Hydro-abrasive Processing // Up-to-date Science Intensive Technologies. – 2018. – No.9. PP. 66-70.
7. Patel Pathik, Modi Bhavin S., Sheth Saurin, Patel Tejas Experimental Investigation, Modelling and Comparison of Kerfwidth in Laser Cutting of GFRP // Bonfring International Journal. – vol. 5. – no. 2. – PP. 55-62.
8. Hayat A.Eltawahni, Abdul G.Olabi, Osama M. Bas-mage, Khaled Y. Benyounis CO2 Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. – 2020. – vol. 1. – PP. 145-159.
9. Pathik Patel, Saurin Sheth, Tejas Patel Experimental Analysis and ANN Modelling of HAZ in Laser Cutting of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites // Procedia Technology. – 2016. – vol. 23. – PP. 406-413.
10. Schneider, F., Wolf, N., Petring, D. High Power Laser Cutting of Fiber Reinforced Thermoplastic Polymers with cw- and Pulsed Lasers // Physics Procedia. – 2013. – vol. 41. – PP. 415-420.

Рецензент д.т.н.  
Руслан Мискадесович Янбаев