

УДК 621.9.27.004.42

МРНТИ 55.13.17

DOI 10. 56525/TTAF3740

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

***Баширов Р. Д., Расулов Ф. Р., Гамдуллаева И. Г.**

Азербайджанский технический институт, Баку, Азербайджан

e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az; e-mail: fuzuli.resulov@aztu.edu.az;

e-mail: ilhame.hemdullayeva@aztu.edu.az

Аннотация. В статье рассмотрены особенности механической обработки отверстий в полимерных композиционных материалах (ПКМ), в частности в углепластиках и стеклопластиках. Проведен анализ характерных дефектов, возникших при сверлении, включая расслоение и разрушение волокон на входе и выходе инструмента. Приведены результаты экспериментального исследования эффективности различных типов сверл из твёрдосплавных и инструментальных материалов, в том числе с алмазным покрытием и поликристаллическим алмазом. Установлено, что для повышения качества обработки, при особенно высоких требованиях к точности и минимизации дефектов, наиболее эффективно применять алмазные сверла. Выявлена зависимость производительности и качества обработки от конфигурации режущей кромки и режимов резания. Отмечена актуальность проводимых исследований, направленных на оптимизацию параметров инструмента и режимов резания при обработке ПКМ.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, механическая обработка, режимы резания, износ инструмента. режущий инструмент, геометрические и конструктивные параметры инструмента, сверление, инструментальный материал.

Введение: Производство деталей из композиционных материалов на основе полимерной матрицы, армированной стеклянными или углеродными волокнами в эпоксидных, фенольных или полиамидных смолах, требует применения высокоточных методов механической обработки. Наиболее распространёнными методами являются сверление, фрезерование, токарная обработка, полировка, резка заготовок с использованием пил из быстрорежущих инструментальных сталей и твёрдых сплавов, а также ножевая резка и применение алмазных кругов.

При механической обработке полимерных композиционных материалов (ПКМ) заострённым режущим инструментом важно использовать инструменты с острым режущим краем и минимальной шероховатостью поверхностей. Это необходимо для эффективного срезания волокон, улучшенного удаления стружки и снижения силы трения между инструментом и обрабатываемым материалом. В то же время, армирующие волокна и матричные компоненты ПКМ оказывают абразивное воздействие на режущий инструмент, вызывая его интенсивный износ. Это приводит к увеличению сил резания, повышенному тепловыделению и снижению качества обработанной поверхности.

Таким образом, выбор оптимального инструмента и режима обработки является ключевым фактором при работе с ПКМ в целях обеспечения высокой точности, минимизации износа и сохранения требуемого качества поверхности изделия.

Материалы и методы исследования. Механическая обработка полимерных композиционных материалов (ПКМ), обуславливает наличие массивной, неоднородной структуры, а также специфику физико-механических свойств как матрицы, так и армирующих

волокон. Эти особенности влияют на зоны резания и устойчивость процесса обработки. При выборе острого инструмента необходимо учитывать тип матрицы (термореактивная или термопластичная) и тип армирования (однородное, направленное, тканевое и др.), а также физико-механические характеристики компонентов, такие как упругость модуля, теплопроводность, прочность и устойчивость к термическим воздействиям [1-3].

Матрицы с более низкой твердостью и вязкостью (например, эпоксидные или полиамидные связующие) в процессе резания склонны к плавному воздействию и прилипанию к режущей кромке, особенно при недостаточно эффективном отводе стружки. Это может вызвать перегрев и повреждение как инструмента, так и обрабатываемых деталей [2]. Поэтому при работе с ПКМ важно тщательно правильно подбирать инструментальные материалы и режимы резания, направленные на снижение температурных и механических воздействий.

Наибольшее распространение при обработке ПКМ получили инструменты с поликристаллическим алмазным покрытием (PCD) и изделия из сверхтвердых материалов, таких как кубический нитрид бора (CBN) [4]. Применение алмазных инструментов оправдано благодаря их высокой долговечности и термостойкости. Однако при увеличении зернистости алмазного покрытия (до 45–60 мкм) наблюдается снижение качества поверхности из-за микротрещин и неравномерности среза [5]. Для обеспечения чистоты обработки и стабильного съема материала необходимо выбрать инструмент с переменной зернистостью (обычно 10–30 мкм) и подбирать режим резания: скорость резания 80–180 м/мин, подача 0,02–0,15 мм/об и глубина резания не более 0,2 мм за один проход [6].

К последствиям наиболее характерных дефектов, возникающих при механической обработке ПКМ, относятся микротрещины в связующем веществе, расслоение композита вдоль волокон, «неразрезание» волокон и образование заусенцев, и перегрев и термическое разрушение матрицы [4-6].

Механизм резания ПКМ принципиально отличается от обработки традиционных металлов тем, что разрушение армирующих волокон и матриц происходит по разным причинам: волокна подвергаются сдвигу, вытягиванию и расслоению, тогда как матрица, как правило, разрушается по хрупкому механизму [7]. Для минимизации выявленных дефектов использовались инструменты геометрическими параметрами заточку под углом вершин 90–130°, задние углы до 10–15°, оптимизацию формы стружколома и увеличенный угол наклона острой кромки [8].

Также эффективность сверления ПКМ можно повысить за счет использования многоступенчатых и специальных спиральных сверл, разработанных с учетом конкретной структуры материала. Исследования показали, что при использовании сверл с PCD-напылением удаётся добиться стабильной работы инструмента при скорости резания до 180 м/мин и просверливании более 800 отверстий без заметного износа инструмента [14].

В некоторых случаях применяются комбинированные методы обработки, такие как ультразвуковая вибрационная резка, криогенная обработка и водоструйная поддержка при открытии резания, что позволяет улучшить теплоотвод и снизить уровень микродефектов в обрабатываемом слое [5].

Результаты исследования. В процессе сверления ПКМ часто возникают характерные дефекты как на входной, так и на выходной кромке отверстий. Это обусловлено особенностями взаимодействия острого инструмента с анизотропной и многослойной структурой материала приведенного на рисунке 1. На входе сверла, как правило, наблюдаются разрывы и затем вытягивание волокна, а на выходе — расслоение, неразрезанные волокна и выкрашивание матрицы. Поскольку отверстия в конструкциях из ПКМ создают напряжение, дефекты данных могут значительно снизить как усталостную, так и статическую прочность деталей [9-12].

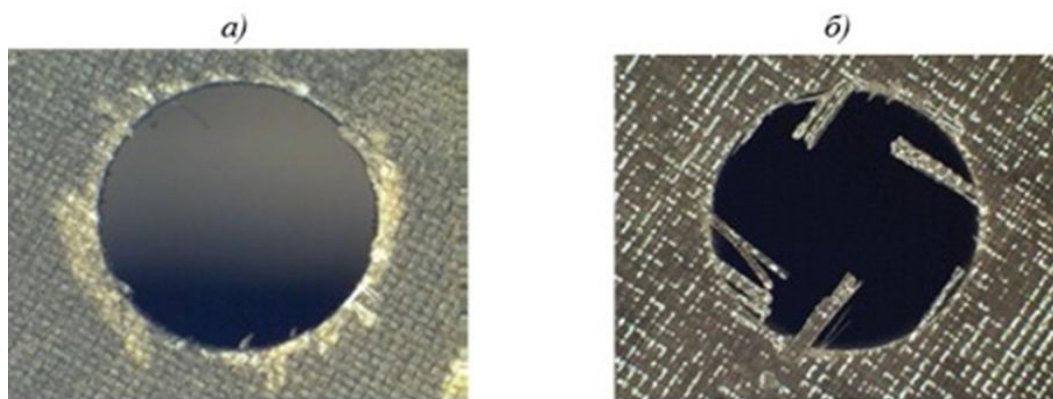


Рисунок 1 - Локальное отслаивание слоев материала (а) и срезание волокон на внутренней поверхности отверстия из-за нарушения режимов резания при сверлении (б) при неправильной осевой подаче инструмента при сверлении.

С целью минимизации дефектов производители острого инструмента разрабатывают специальные сверла геометрической формы, позволяющие снизить уровень механических и термических воздействий на обрабатываемую зону. Наиболее эффективным способом в данном направлении является применение сверл с двойной заточкой и острыми кромками на боковой поверхности представленный на рис. 2, что позволяет избежать истирания и разрушения волокна при сверлении [13, 14]. Такие сверла, как правило, направляются направляющими элементами, которые создают плотный контакт с поверхностным материалом и предотвращают расслоение. Рекомендуемые режимы резания при этом включают скорость — 110–180 м/мин, подача — 0,02–0,15 мм/об [4,7,12].

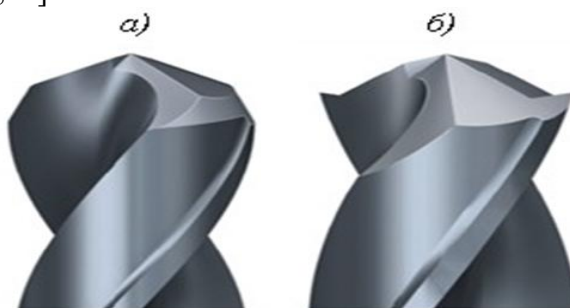


Рисунок 2 - Сверла двойной заточки (а) и (б) с острыми кромками на боковой поверхности для эмалирования полимерных композиционных материалов.

В ходе экспериментальных исследований нами были изучены режимы сверления тонких слоев эпоксидного углепластика. Обработка отверстий в многослойных панельных конструкциях проводилась с использованием четырех типов сверл из различных инструментальных материалов:

- Сверло из твёрдосплава марки ВК3М;
- Сверло из быстрорежущей инструментальной сталь HSS-G;
- Сверло твердосплавные СЦЦ513;
- Специальный твёрдосплавные сверла НАМ 380 Prima.

Сравнительная оценка проводилась по параметрам остроты инструмента и качества изготовления отверстий. Все сверления выполнялись на вертикальном настольном сверлильном станке, обеспечивая плавное поступательное перемещение инструмента. В ходе исследований были рассмотрены три режима резания: до 100, 150 и 200 м/мин.

При скорости до 100 м/мин на выходе сверла формировалась кайма из обрезанных волокон, особенно при использовании сверл из сплавов СЦЦ513. Также было зафиксировано раздавливание материала и снижение его прочности при сверлении.

Наилучшие результаты были достигнуты при использовании инструмента из материала НАМ 380 Prima. По критерию стойкости к коррозионному и абразивному изнашиванию сверла измерялись по количеству напряжений, выполненных на данный момент, проявляющихся дефектной каймы. При скоростях 150 и 200 м/мин инструмент НАМ 380 Prima обеспечивает стабильное качество сверлений без признаков расслоения. Эти результаты позволяют использовать данный инструмент для прецизионной обработки отверстий в тонкостенных листах из ПКМ.

Современные острые инструменты, оснащенные твёрдосплавными пластинами с алмазным покрытием или поликристаллическими алмазными установками, демонстрируют высокую эффективность при сверлении труднообрабатываемых композиционных материалов [11, 13]. Геометрия острых кромок в таких инструментах разрабатывается с учетом особых физико-механических свойств каждого типа материала, что обеспечивает как высокую точность глубины деформации, так и минимальные повреждения краевых зон.

В последнее время корпусные детали, такие как корпуса лодок, передние и задние части автомобилей, все шире изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). При обработке отверстий сравнительно большого диаметра в подобных деталях предпочтительно использовать кольцевые сверлильные головки, которые демонстрируют значительно более высокую эффективность по сравнению с традиционным сверлением. Обработка же отверстий малого диаметра, а именно до 10 мм, более целесообразна с применением традиционных сверл и соответствующих технологических режимов. В то же время при обработке отверстий диаметром свыше 10 мм использование кольцевых сверлильных головок позволяет существенно снизить вероятность расслаивания волокон по краям отверстия и уменьшить отклонение его профиля от идеальной окружности.

В последние годы отмечается стремительное расширение использования ПКМ при изготовлении корпусных конструкций маломерных судов, элементов военной техники, а также кузовных деталей автомобилей (передних и задних). Популярность данных материалов обусловлена их высокой прочностью и жесткостью при низкой плотности, химической инертностью, а также устойчивостью к агрессивным внешним воздействиям. Эти характеристики делают ПКМ особенно востребованными в транспортном машиностроении, где критически важно обеспечить снижение массы конструкций без потери их прочностных и эксплуатационных свойств. Однако, несмотря на очевидные достоинства, механическая обработка ПКМ сопряжена с рядом технологических сложностей. Они вызваны анизотропной и многослойной структурой материала, а также специфическими физико-механическими свойствами армирующих волокон (стеклянных, углеродных и др.) и полимерной матрицы. В процессе обработки возможно появление таких дефектов, как расслаивание, вырыв и повреждение волокон, термическое разрушение матрицы, а также снижение качества поверхности. Следовательно, для обеспечения высокого качества механической обработки отверстий в ПКМ необходимо строгое соблюдение технологических режимов, выбор режущего инструмента с оптимальной геометрией, а также применение вспомогательных методов, включая охлаждение, оптимизацию траектории резания и контроль силовых параметров. Только комплексный подход позволяет минимизировать риск возникновения дефектов и гарантировать надежность готовых конструкций.

Заключение. В процессе сверления полимерных композиционных материалов наблюдаются дефекты, такие как расслоение и разрушение волокна на входе и выходе, что отрицательно влияет на прочностные характеристики концов изделий.

Результаты проведенных экспериментальных исследований, согласно которым использование сверл с консервативной геометрией, в частности с двойной заточкой и тонкими режущими кромками, позволяет снизить вероятность возникновения таких дефектов, как расслоение и образование кромки.

Среди экспериментальных вариантов продемонстрированы лучшие технологические и эксплуатационные характеристики сверла, изготовленного из материала НАМ 380 Prima. При скоростях резания 150–200 м/мин эти инструменты обеспечивают стабильное качество обработки и отсутствие дефектов на выводных отверстиях.

На основании анализа экспериментальных данных и литературных источников можно сформулировать следующие выводы:

1. Для обеспечения высокого качества обработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) необходимо использовать инструмент с точно рассчитанной геометрией и правильно подобранными режимами резания.

2. Снижение осевой нагрузки позволяет уменьшить вероятность расслоения и разрушения материала, улучшая целостность обрабатываемого изделия.

3. Применение сверл с двойной заточкой и алмазным покрытием значительно повышает качество обработки, уменьшая количество дефектов на входе и выходе.

4. В настоящее время продолжаются исследования, направленные на оптимизацию режимов резания с использованием новых экспериментальных инструментальных материалов. Это особенно важно для отраслей с растущими требованиями к точности и надежности, таких как авиастроение и космическая промышленность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилин В.А., Пасечник К.А., Пушкарев А.Ю., Амельченко Н. А. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2018. Том 1. стр.12-15. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-mehanicheskoy-obrabotki-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov/viewer>
2. Винокуров, Ю. А. Технология обработки композиционных материалов. – М.: Академкнига, 2021.
3. Горелов С. А. Обработка полимерных композиционных материалов /С. А. Горелов. – М.: Машиностроение, 2018.
4. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Обработка полимерных композиционных материалов лезвийным инструментом. Научно-технические технологии в машиностроении, № 3, 2019. стр.27-31. DOI: 10.30987/article_5c7434f17ef7f9.84873144
5. Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор). Композиционные материалы. Труды ВИАМ №10 (70) 2018. стр.53-61. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61
6. Федотова Ю. И., Евсеев А. Н., Повышение качества и эффективности обработки композиционных материалов за счет использования инструмента из керамики, Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2021, № 1, с. 118-128. <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>.
7. Cao, K. K. and Khocheng, H. The effect of bit length and feed rate on delamination when drilling composite materials using a saw drill //International Journal of Machine Tool Engineering and Production, 2003, 43(11), pp. 1087-1092. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6>
8. Hooper R.M., Henshall J.L., Klopfer A. The wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436898000407>. DOI: 10.1016/S0263-4368(98)00040-7.
9. Jagadeesh P, Mavinkere Rangappa S, Suyambulingam I, Siengchin S, Puttegowda M, Binoj JS, Gorbatyuk S, Khan A, Doddamani M, Fiore V, Cuadrado MMM. Drilling characteristics and properties analysis

of fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Heliyon*. 2023 Mar 13;9(3): e14428. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14428>

10. Ravi Sekhar T.P. Singh Mechanisms in turning of metal matrix composites: a review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2015. No. 4 (2). P. 197–207. URL: <http://www.jmrt.com.br>. <https://DOI:10.1016/j.jmrt.2014.10.013>.

11. Scriabin V.A. Features of machining parts made of polymer materials with edge tools. *Transport Engineering*. 2022; 5:13-21. <https://doi:10.30987/2782-5957-2022-5-13-21>.

12. Szwajka, K., Trzepieciński, T. Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard. *J Wood Sci* 62, 305–315 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6>

13. Tsao, C.C. Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite material. *Int J Adv Manuf Technol* 32, 877–884 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0414-9>

14. Xu J (2022), A review on tool wear issues in drilling CFRP laminates. *Front. Mater.* 9:990773. <https://doi:10.3389/fmats.2022.990773>

REFERENCES

1. Vavilin V.A., Pasechnik K.A., Pushkarev A.YU., Amel'chenko N. A. Osobennosti mekhanicheskoy obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki – 2018. Tom 1. str.12-15. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-mekhanicheskoy-obrabotki-polimernykh-kompozitsionnykh-materialov/viewer>

2. Vinokurov, YU.A. Tekhnologiya obrabotki kompozitsionnykh materialov. – M.: Akademkniga, 2021.

3. Gorelov S. A. Obrabotka polimernykh kompozitsionnykh materialov / S. A. Gorelov. – M.: Mashinostroenie, 2018.

4. Zubarev YU.M., Priemyshev A.V. Obrabotka polimernykh kompozitsionnykh materialov lezviynym instrumentom. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii*. № 3, 2019. str. 27-31. DOI: 10.30987/article_5c7434f17ef7f9.84873144

5. Pripisnov YA.A., Grishina O.I. Sovremennye metody mekhanicheskoy obrabotki kompozitsionnykh materialov (obzor). *Kompozitsionnye materialy. Trudy VIAM*. №10 (70)2018. str. 53-61. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61

6. Fedotova YU. I., Evseev A. N., Povyshenie kachestva i effektivnosti obrabotki kompozitsionnykh materialov za schet ispol'zovaniya instrumenta iz keramiki, *Uchenye zapiski UIGU. Ser. Matematika i informatsionnye tekhnologii. UIGU. Elektron. zhurn.* 2021, № 1, str. 118-128. <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>.

7. Cao, K. K. and Khocheng, H. The effect of bit length and feed rate on delamination when drilling composite materials using a saw drill // *International Journal of Machine Tool Engineering and Production*, 2003, 43(11), pp. 1087-1092. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6>

8. Hooper R.M., Henshall J.L., Klopfer A. The wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436898000407>. DOI: 10.1016/S0263-4368(98)00040-7.

9. Jagadeesh P, Mavinkere Rangappa S, Suyambulingam I, Siengchin S, Puttegowda M, Binoj JS, Gorbatyuk S, Khan A, Doddamani M, Fiore V, Cuadrado MMM. Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Heliyon*. 2023 Mar 13;9(3): e14428. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14428>

10. Ravi Sekhar T.P. Singh Mechanisms in turning of metal matrix composites: a review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2015. No. 4(2). P. 197–207. URL: <http://www.jmrt.com.br>. <https://DOI:10.1016/j.jmrt.2014.10.013>.

11. Scriabin V.A. Features of machining parts made of polymer materials with edge tools. *Transport Engineering*. 2022; 5:13-21. <https://doi:10.30987/2782-5957-2022-5-13-21>.

12. Szwajka, K., Trzepieciński, T. Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard. *J Wood Sci* 62, 305–315 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1555-6>

13. Tsao, C.C. Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite material. *Int J Adv Manuf Technol* 32, 877–884 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0414-9>

14.Xu J (2022), A review on tool wear issues in drilling CFRP laminates. Front. Mater. 9:990773. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.990773>

ПОЛИМЕРЛІ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДАҒЫ ТЕСІКТЕРДІ БҰРҒЫЛАУ КЕЗІНДЕ ҚҰРАЛДЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

***Баширов Р. Д., Расулов Ф. Р., Гамдуллаева И. Г.**

Әзірбайжан техникалық университеті, Баку қ, Әзірбайжан
e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az; e-mail: fuzuli.resulov@aztu.edu.az;
e-mail: ilhame.hemdullayeva@aztu.edu.az

Андатпа. Мақалада полимерлі композициялық материалдардағы (ПКМ), атап айтқанда көміртекті және шыны талшықтардағы тесіктерді механикалық өңдеу ерекшеліктері қарастырылады. Бұрғылау кезінде пайда болған тән ақауларға, соның ішінде құралдың кірісі мен шығысындағы талшықтардың стратификациясы мен бұзылуына талдау жасалды. Карбидті және аспаптық материалдардан, соның ішінде гауһар жабыны мен поликристалды гауһардан жасалған бұрғылардың әртүрлі түрлерінің тиімділігін эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Өңдеу сапасын жақсарту үшін дәлдікке және ақауларды азайтуға ерекше жоғары талаптар қойылса, гауһар бұрғыларды қолдану тиімді екендігі анықталды. Өңдеу өнімділігі мен сапасының кесу жиегінің конфигурациясына және кесу режимдеріне тәуелділігі анықталды. ПКМ өңдеу кезінде құрал параметрлерін және кесу режимдерін оңтайландыруға бағытталған зерттеулердің өзектілігі атап өтілді.

Түйін сөздер: полимерлі композициялық материал, өңдеу, кесу режимдері, құралдың тозуы, кескіш құрал, құралдың геометриялық және құрылымдық параметрлері, бұрғылау, аспаптық материал.

INVESTIGATION OF TOOL EFFECTIVENESS WHEN DRILLING HOLES IN POLYMER COMPOSITE MATERIALS

***Bashirov R., Rasulov F., Gamdullaeva I.**

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan
e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az; e-mail: fuzuli.resulov@aztu.edu.az;
e-mail: ilhame.hemdullayeva@aztu.edu.az

Annotation. The article discusses the features of mechanical processing of small-diameter holes in polymer composite materials (PCM), in particular, in carbon fiber and fiberglass. The analysis of common defects that occurred at the inlet and outlet of the drill, including delamination, edging and destruction of the wire. Experimental investigation of the effectiveness of various types of drills made of carbide and tool materials, including diamond-coated and polycrystalline diamond. It is shown that specialized drills and diamond-soldered cutters are used to improve the processing quality, especially in conditions of high precision and the need to minimize defects.

The dependence of processing performance on the cutting-edge configuration and cutting modes has been established. The relevance of current research on optimizing the results of the tool and the processing modes of the PCM is noted.

Keywords: polymer composite material, mechanical processing, cutting modes, tool wear, cutting tools, geometric and structural parameters of the tool, drilling, milling, tool material.