

DOI: [10.34220/2311-8873-2026-29-36](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2026-29-36)



УДК 621.914.1

UDC 621.914.1

2.5.6 – технология машиностроения

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ИЗНОСА
ИНСТРУМЕНТА НА СИЛУ РЕЗАНИЯ
ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА
С НЕЖЕСТКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ**

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF PROCESSING MODES AND TOOL
WEAR ON THE CUTTING FORCE WHEN
MILLING FIBERGLASS PARTS WITH
NON-RIGID ELEMENTS WITH
END MILLS**

Гайст Сергей Валерьевич,

к.т.н., старший преподаватель кафедры
«Технология машиностроения», Алтайский
государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
e-mail: sergei-gaist@mail.ru

Gaist Sergey Valerievich,

candidate of technical sciences, senior lecturer at the
department of mechanical engineering technology, Al-
tai state technical university named after I.I. Polzunov,
Barnaul, Barnaul, e-mail: sergei-gaist@mail.ru

Леонов Сергей Леонидович,

д.т.н., профессор кафедры «Технология ма-
шиностроения», Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Leonov Sergey Leonidovich,

doctor of technical sciences, professor of the depart-
ment of mechanical engineering technology, Altai
state technical university named after I.I. Polzunov,
Barnaul, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Лопатин Борис Александрович,

д.т.н., профессор кафедры «Технология ма-
шиностроения, станки и инструменты»,
Южно-Уральский государственный универ-
ситет (национальный исследовательский
университет), филиал, г. Златоуст,
e-mail: lopatinba@susu.ru

Lopatin Boris Alexandrovich,

doctor of technical sciences, professor of the depart-
ment "Technology of mechanical engineering, ma-
chine tools and tools", South Ural state university
(national research university), branch, Zlatoust,
e-mail: lopatinba@susu.ru

Марков Андрей Михайлович,

д.т.н., профессор кафедры «Технология ма-
шиностроения», Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Markov Andrey Mikhailovich,

doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of mechanical engineering technology,
Altai state technical university named after I.I.
Polzunov, Barnaul, e-mail: andmarkov@inbox.ru

✉¹ **Некрасов Вячеслав Николаевич,**

к.т.н., доцент кафедры «Технология маши-
ностроения», Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползу-
нова, г. Барнаул, e-mail: sla44@mail.ru

✉¹ **Nekrasov Vyacheslav Nikolaevich,**

candidate of technical sciences, associate professor
of the department of mechanical engineering tech-
nology, Altai state technical university named after
I.I. Polzunov, Barnaul, e-mail: sla44@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов резания и износа инструмента на силу резания при фрезеровании концевыми фрезами из твердого сплава ВК8 корпусных деталей из стеклопластика ВПС-30 с нежесткими элементами. На основании полученных значений, характеризующих процесс резания, построены регрессионные зависимости характеризующие силовые явления при фрезеровании.

Ключевые слова: ФРЕЗЕРОВАНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА, ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА, СИЛА РЕЗАНИЯ, НЕЖЕСТКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЕТАЛЕЙ.

Annotation. The results of experimental studies of the effect of cutting modes and tool wear on the cutting force during milling with VK8 hard alloy end mills of VPS-30 fiberglass body parts with non-rigid elements are presented. Based on the obtained values characterizing the cutting process, regression dependences characterizing the force phenomena during milling are constructed.

Keywords: FIBERGLASS MILLING, TOOL WEAR, CUTTING FORCE, NON-RIGID PARTS ELEMENTS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Для современного машиностроения одной из отличительных черт стало широкое применение в конструкциях машин и механизмов деталей из полимерных композиционных материалов, в том числе, и из стеклопластиков. Особенностью этих материалов является уникальное сочетание физико-механических свойств, нехарактерное для металлов и сплавов: высокая прочность сочетается с малым весом, стойкостью к коррозии, магнито- и радиопрозрачностью и др. [1]. В настоящее время механическая обработка полимерных композиционных материалов является одним из основных методов придания деталям требуемых параметров точности размеров, формы, относительного расположения поверхностей и шероховатости. Значительный вклад в проработку вопроса лезвийной обработки композиционных материалов внесли исследователи Дударев А. С. [2], Егоров С. В. [3], Лобанов Д.В., [4], Макаров В. Ф. [5], Рычков, Д. А., Янюшкин А.С. [6], S. Ratchev, Becker [7], Chang Rao [8, 9], A. Mkaddem. [10] и др. [11-13]. Авторы, как правило, отмечают сложности обработки композитов, заключающиеся в его следующих особенностях: низкая стойкость обрабатываемого материала к перегреву с образованием прижогов; сложность применения СОЖ из-за высокой гигроскопичности композита, деламинация слоёв наполнителя; разломачивание армирующих волокон на обработанной поверхности; образование скрытых трещин в связующем компоненте; повышенный абразивный износ инструмента и др. Также в работах [14, 15] отмечается, что свойства различных полимерных композиционных материалов могут сильно отличаться друг от друга и невозможно создать единого подхода, позволяющего точно прогнозировать качество деталей при механической обработке.

В изделиях машиностроения успешно внедряют детали из стеклопластика, среди которых можно выделить корпусные детали с достаточно высокими и длинными стенками, обладающими низкой жесткостью и требующими особого подхода при механической обработке для обеспечения заданных показателей точности служебных поверхностей. Сила резания воздействуя на нежесткую стенку детали при обработке может вызывать значительные деформации и вибрации в зоне резания, что повышает риск получения брака [16, 17]. Большая податливость стенки приводит к её большому прогибу, вследствие чего фактическая глубина резания может быть значительно меньше изначально установленной на станке, вызывая погрешность обработки. При этом, учитывая разнообразие конструкций корпусных деталей в местах, где обрабатываемая стенка соединяется с поперечной стенкой или ребрами, её жесткость будет меняться,

а значит иметь разное значение на различных участках. На участках с меньшей жесткостью прогиб стенки будет больше, сьем материала меньше. Для учета деформации обрабатываемой стенки детали и компенсации погрешности глубины резания можно ориентироваться на силу резания. Чем ближе сила резания к номинальному значению для заданной глубины резания, тем меньше погрешность обработки. Управляя силой резания путем изменения режимов резания, можно достичь стабильности глубины обработки. В связи с этим возникает возможность разработки технологических рекомендаций, позволяющих обеспечить требуемое качество изделий. Основой получения таких рекомендаций является проведение эксперимента.

2 Материалы и методы

Экспериментальное исследование выполнялось с использованием станда на базе обрабатывающего центра с системой ЧПУ (рис. 1). Образцы изготавливались в виде деталей коробчатой формы, имеющих четыре стенки и дно. Размеры образцов по наружным поверхностям составили (Д×Ш×В) – 200×80×100 мм, толщина стенок и дна – 10 мм. Материал образцов – стеклопластик, относящийся к конструкционной группе марки ВПС-30 (ТУ 1-595-10-919-2007). Схема закрепления в станочных тисах реализована таким образом, чтобы высота продольной стенки над верхней линией губок составляла 70 мм.

Обработка выполнялась концевыми фрезами из твердого сплава ВК8 диаметром 10 мм, с 4 зубьями, с углами заточки – передним 5 градусов и задним 15 градусов. Угол наклона стружечных канавок – 30 градусов. Геометрия была выбрана исходя из рекомендаций исследований, посвящённых обработке полимерных композитов [18]. Для того чтобы учесть влияние износа инструмента, фрезы использовались в двух состояниях: с радиусом округления режущего клина 0,05 мм, что можно считать инструментом в состоянии нового (или заточенного), и радиусом округления 0,3 мм – в состоянии предельно изношенного [19].

Измерение силы резания выполнялось с помощью разработанного динамометра [20] (рис. 2).



1 – обрабатывающий центр с системой ЧПУ; 2 – корпусная деталь из стеклопластика (образец);
3 – динамометр; 4 – устройство сопряжения; 5 – компьютер

Рисунок 1 – Экспериментальный стенд (общий вид)



Рисунок 2 – Общий вид динамометра

Планирование эксперимента проводилось по методу дробного факторного эксперимента [21]. Этот метод дает достаточно точные результаты при небольших объемах экспериментального исследования. В качестве входных изменяемых параметров были выбраны скорость резания (V , м/мин), подача на зуб (S_z , мм/об) и глубина резания (t , мм). При использовании оборудования с ЧПУ эти параметры легко менять без дополнительных затрат как в лабораторных, так и в промышленных условиях, а значит методику можно будет достаточно просто внедрить в производственный процесс.

Разработанный динамометр позволяет измерять силы резания по трем ортогональным осям (рис. 3). Это позволяет определить силы резания по всем направлениям путем их векторного сложения. В исследовании значимым направлением силы резания является P_y , так как именно она вызывает наибольшую деформацию стенки и приводит к появлению отклонения от прямолинейности обработанной стенки детали.

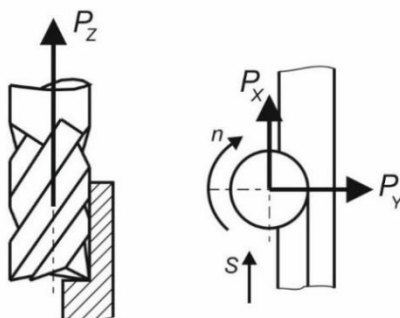


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на стенку образца при концевом фрезеровании

Для проведения серии опытов фрезерования новым (заточенным) инструментом, каждый раз использовалась новая фреза. В опытах фрезерования изношенным инструментом, фрезы доводились до требуемого состояния путем обработки образцов из стеклопластика, не участвующих далее в эксперименте.

Для определения границ интервалов варьирования проводились пробные эксперименты. Границы минимальных значений (min) режимов обработки определялись из возможности сохранения требуемой производительности процесса фрезерования. Максимальные границы (max) определялись появлением нежелательных дефектов обработки – прижогов, появляющихся вследствие температурных явлений. Полученные значения позволили сформировать матрицу планирования экспериментальных исследований. Значения варьируемых параметров сведены в табл. 1. В разработанном экспериментальном стенде для определения силы резания напряжение на клеммах динамометра сопоставлялось по тарировочной зависимости, а также сигнал обрабатывался по методу скользящей средней с помощью ЭВМ. Для исключения влияния случайных погрешностей повторяемость каждого эксперимента составила три раза. Повторяемость определена по нижнему пределу дисперсии.

Таблица 1 – Матрица планирования дробного факторного эксперимента процесса фрезерования

№	V, м/мин		S _z , мм/зуб		t, мм	
1	max	630	max	0,02	max	4
2	max	630	min	0,1	min	1
3	min	64	max	0,02	min	1
4	min	64	min	0,1	max	4

3 Результаты исследований

Средние значения сил резания определялись на основе показаний динамометра. Результаты измерений сил резания при фрезеровании новым (острым) инструментом и достигшим предельного износа приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Значения сил резания при радиусе округления режущего клина 0,05 мм

№	Параметры режимов резания			Сила резания P (Н) (среднее значение по трем экспериментам)		
	V, м/мин	S _z , мм/зуб	t, мм	P _x	P _y	P _z
1	630	0,1	4	467,8	275,3	934,7
2	630	0,02	1	149,6	91,2	298,3
3	64	0,1	1	238,1	141,4	474,2
4	64	0,02	4	171,9	94,5	338,5

Таблица 3 – Значения сил резания при радиусе округления режущего клина 0,3 мм

№	Параметры режимов резания			Сила резания P (Н) (среднее значение по трем экспериментам)		
	V, м/мин	S _z , мм/зуб	t, мм	P _x	P _y	P _z
1	630	0,1	4	1154,2	684,2	2334,2
2	630	0,02	1	273,7	164,0	549,3
3	64	0,1	1	438,6	262,3	879,1
4	64	0,02	4	332,5	195,6	663,0

По результатам экспериментов можно отметить рост сил резания по всем направлениям с увеличением подачи и глубины резания, что в целом очевидно и объясняется увеличением площади срезаемого материала. Повышение скорости резания также показывает рост сил резания для заданного диапазона, что является результатом увеличения сопротивления разрушению обрабатываемого материала с ростом скорости, проявляющего высокие упругие свойства. В целом, стеклопластик в процессе лезвийной обработки показывает преимущественно упругую деформацию с последующим хрупким разрушением. Такое поведение материала можно объяснить физико-механическими свойствами его компонентов. И стеклянные волокна, и полимерная смола в нормальных условиях не проявляют пластичные свойства. Также отмечается слабая выраженность изменения силы резания при прохождении режущего клина инструмента через слоистую структуру стеклопластика. Несмотря на анизотропные свойства обрабатываемого материала, сила резания показывает отсутствие значительных высокочастотных скачков при фрезеровании стенки детали.

Результатом обработки значений силы резания стало получение следующих соотношений:

$$P_z = 815 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, \text{ радиус округления режущего клина } 0,05 \text{ мм;}$$

$$P_z = 1497 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, \text{ радиус округления режущего клина } 0,3 \text{ мм};$$

$$P_x = 407 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, - 0,05 \text{ мм};$$

$$P_x = 748 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, - 0,3 \text{ мм};$$

$$P_y = 244,7 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, - 0,05 \text{ мм};$$

$$P_y = 449 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, - 0,3 \text{ мм}.$$

Для того чтобы определить наиболее подходящий тип зависимостей для описания результатов эксперимента, оценивались линейные и степенные зависимости. В основе оценки использовался метод наименьших квадратов. Проверка показала, что наилучшим образом подходят степенные зависимости, показывающие наибольшую адекватность. При проверке однородности дисперсий разных опытов критерий Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ составил $G = 0,57$ и не превысил табличного значения $G_{\text{табл.}} = 0,77$.

4 Обсуждение и заключение

В экспериментальном исследовании было проанализировано влияние различных В результате проведения экспериментального исследования процесса фрезерования образцов в виде заготовок коробчатой формы из стеклопластика ВПС-30, имеющих нежесткие стенки, были получены зависимости, характеризующие влияние режимов резания на составляющие силы резания измеренных во взаимно перпендикулярных направлениях. В экспериментальных исследованиях жесткость стенки изменялась от 50 до 200 н/мм, в зависимости от положения точки приложения силы резания вдоль стенки, относительно поперечных стенок.

Полученные соотношения позволяют осуществить выбор режимов резания для операции фрезерования при обработке корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика. Это, в свою очередь, позволяет путем прогнозирования силы резания и величины возможной деформации стенки детали в ходе обработки исключить отклонение формы обработанной поверхности, превышающее допустимое значение. Возможные сценарии обработки могут состоять в снижении режимов резания, изменении траектории движения инструмента, использовании устройства с обратной связью на основе динамометра для коррекции условий обработки и т.п.

Результаты эксперимента использованы при разработке методики управления показателями точности при фрезеровании нежестких элементов корпусных деталей, изготавливаемых из стеклопластика.

Список литературы

- 1 Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
- 2 Дударев, А. С. Расчет теплонапряженности процесса резания твердосплавным инструментом полимерных композиционных материалов / А. С. Дударев, Е. В. Нечаева // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 152-156. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029. – EDN VUEGAR.
- 3 Егоров, С. В. Алмазный инструмент для обработки стеклопластиков / С.В. Егоров и др. // Станки и инструмент. – 1971. – №2. – С.36.
- 4 Рычков, Д. А. Износостойкость режущего инструмента, оснащенного особомелкозернистым твердым сплавом, при фрезеровании стеклотекстолита / Д. А. Рычков, Д. В. Лобанов, П. В. Архипов // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 3(59). – С. 25-30. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-3-25-30.
- 5 Макаров, В. Ф. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента / В. Ф. Макаров, А. А. Волковский, А. И. Сабирзянов // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 9(111). – С. 40-48. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-9-40-48. – EDN QBUUCK.

- 6 Рычков Д. А., Янюшкин А. С. Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3 (72). – С. 23-30. DOI 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.
- 7 S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker, Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (2004) 1629–1641.
- 8 Rao, G.V.G. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnaga // *Composites Science and Technology*. – 2007. – №67. – P.2271-2281.
- 9 Rao, G.V.G. Three-dimensional macro-mechanical finite element unidirectional-fiber reinforced polymer composites / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – №A498. – P.142-149.
- 10 Mkaddem, A. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis / A. Mkaddem, I. Demirci, M.E. Mansori // *Composites Science and Technology*. – 2008. – №68. – P.3123-3127.
- 11 Тарапанов, А.С. Технология обработки специальных материалов: учебное пособие для вузов / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, С.Е. Шишков. – М.: Машиностроение, 2000. – 168 с.
- 12 Дрожжин, В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Дрожжин; Харьков политехн. ин-т. – Харьков, 1982. – 32 с.
- 13 Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании / А. М. Марков, В. Н. Некрасов, Ц. Су [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 31-40. – DOI 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. – EDN NZGRFO.
- 14 Ерохин, А.А. Обработка резанием стеклопластиков / А.А. Ерохин // *Высокопроизводительное резание в машиностроении: сб. трудов*. – М.: Наука, 1966. – С.48-54.
- 15 Комплексный анализ методов обработки полимерных композитных материалов / Т. Р. Абляз, К. И. Донецкий, Е. С. Шлыков [и др.] // *СТИН*. – 2022. – № 6. – С. 5-8. – EDNFHKMBG
- 16 Верховская А.А., Светлова Т.Г., Потапов И.С., Балашов А.В. Управление показателями точности изготовления нежестких корпусных деталей. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Том 1. Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2014. – С. 122-123.
- 17 Димитриенко, Ю.И. Численное моделирование деформирования и прочности трехслойных композитных конструкций с дефектами / Ю.И. Димитриенко, Ю.В. Юрин, Н.Н. Федонюк // *Математическое моделирование и численные методы*. – 2016. – №3. – С.3-23.
- 18 Еренков, О.Ю. Технология получения и обработка резанием полимерных композиционных материалов / О.Ю. Еренков. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014 – 143 с.
- 19 Зубарев, Ю.М. Особенности изнашивания инструментальных материалов при механической обработке резанием заготовок из полимерных композиционных материалов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2018. – №7(85). – С.27-31.
- 20 Патент RU169315U1 Многокомпонентный динамометр / Гайст С. В., Лапенков Е. Ю., Марков А. М., Потапов И. С., Черданцев А. О., Черданцев П. О., Шитюк А. А.. Патентообладатель: ФГБОУ ВО "Алтайский государственный образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ) (RU) – № 2016145705; заявл.: 22.11.2016; Опубл.: 15.03.2017.
- 21 Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

References

- 1 Bulanov, I.M. Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials: a textbook for universities / I.M. Bulanov, V.V. Vorobey. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 1998. 516 p.
- 2 Dudarev, A. S. Calculation of the heat stress of the cutting process with a carbide tool of polymer composite materials / A. S. Dudarev, E. V. Nechaeva // *Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University*. – 2022. – № 3(77). – Pp. 152-156. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029. – EDN VUEGAP.
- 3 Egorov, S.V. Diamond tool for processing fiberglass / S.V. Egorov et al. // *Machines and tools*. – 1971. – No. 2. – P.36.
- 4 Rychkov, D. A. Wear resistance of cutting tools equipped with a special fine-grained hard alloy when milling fiberglass / D. A. Rychkov, D. V. Lobanov, P. V. Arkhipov // *Systems. Methods. Technologies*. – 2023. – № 3(59). – Pp. 25-30. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-3-25-30.

- 5 Makarov, V. F. Improving the productivity and quality of processing composite materials based on the choice and rational use of abrasive tools / V. F. Makarov, A. A. Volkovsky, A. I. Sabirzyanov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2020. – № 9(111). – Pp. 40-48. – DOI 10.30987/2223-4608-2020-9-40-48. – EDN QBUUCK.
- 6 Rychkov D. A., Yanushkin A. S. Method of increasing the efficiency of production of polymer composite products // Metalworking (technology, equipment, tools). 2016. No. 3 (72). pp. 23-30. DOI 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.
- 7 S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker, Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts, International Journal of Machine Tools and Manufacture 44 (2004) 1629–1641.
- 8 Rao, G.V.G. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnaga // Composites Science and Technology. – 2007. – №67. – P.2271-2281.
- 9 Rao, G.V.G. Three-dimensional macro-mechanical finite element unidirectional-fiber reinforced polymer composites / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // Materials Science and Engineering. – 2008. – №A498. – P.142-149.
- 10 Mkaddem, A. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis / A. Mkaddem, I. Demirci, M.E. Mansori // Composites Science and Technology. – 2008. – №68. – P.3123-3127.
- 11 Tarapanov, A.S. Technology of processing special materials: a textbook for universities / A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov, S.E. Shishkov. – M.: Mashinostroenie, 2000. – 168 p.
- 12 Drozhzhin, V.I. Physical features and patterns of the cutting process of laminated plastics: abstract of the dissertation. ... Doctor of Technical Sciences / V.I. Drozhzhin; Kharkov Polytechnic University. in-T. – Kharkov, 1982. – 32 p.
- 13 Technological quality assurance of the surface layer of fiberglass composites during end milling / A.M. Markov, V. N. Nekrasov, Ts. Su [et al.] // Metalworking (technology, equipment, tools). – 2020. – Vol. 22, No. 4. – pp. 31-40. – DOI 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. – EDN NZGRFO.
- 14 Erokhin, A.A. Processing by cutting fiberglass / A.A. Erokhin // High-performance cutting in mechanical engineering: collection of works, Moscow: Nauka Publ., 1966, pp.48-54.
- 15 Complex analysis of methods of processing polymer composite materials / T. R. Ablyaz, K. I. Donetskiiy, E. S. Shlykov [et al.] // STIN. – 2022. – No. 6. – pp. 5-8. – EDNFHKMBG
- 16 Verkhovskaya A.A., Svetlova T.G., Potapov I.S., Balashov A.V. Control of accuracy indicators for manufacturing non-rigid body parts. Actual problems of aviation and cosmonautics. Volume 1. Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev. 2014. pp. 122-123.
- 17 Dimitrienko, Yu.I. Numerical modeling of deformation and strength of three-layer composite structures with defects / Yu.I. Dimitrienko, Yu.V. Yurin, N.N. Fedonyuk // Mathematical modeling and numerical methods. 2016. No. 3. pp.3-23.
- 18 Yerenkov, O.Y. Technology of obtaining and cutting polymer composite materials / O.Y. Yerenkov. Komsomolsk-on-Amur: Publishing House of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "KnAGTU", 2014 - 143 p.
- 19 Zubarev, Yu.M. Features of wear of tool materials during mechanical processing by cutting blanks from polymer composite materials / Yu.M. Zubarev, A.V. Priemyshev // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2018. – №7(85). – Pp.27-31.
- 20 Patent RU169315U1 Multicomponent dynamometer / Gaist S. V., Lapenkov E. Yu., Markov A.M., Potapov I. S., Cherdantsev A. O., Cherdantsev P. O., Shityuk A. A. Patent holder: Altai State University of Higher Education Altai State Technical University named after I.I. Polzunov (AltSTU) (RU) – No. 2016145705; application: 11/22/2016; Published: 03/15/2017.
- 21 Adler, Yu.P. Planning an experiment in search of optimal conditions / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovskiy. – M.: Nauka, 1976. – 278 p.

© Гайст С. В., Леонов С. Л., Лопатин Б. А.,
Марков А. М., Некрасов В. Н., 2026