

ISSN 1999-4125 (Print)

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Научная статья

УДК 621.914:681.513

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-15-27

### СПОСОБ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гайст Сергей Валерьевич, Леонов Сергей Леонидович,  
Марков Андрей Михайлович, Некрасов Вячеслав Николаевич

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

\*для корреспонденции: sergei-gaist@mail.ru



#### Информация о статье

Поступила:

14 марта 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 мая 2023 г.

Принята к публикации:

25 мая 2023 г.

Опубликована:

15 июня 2023 г.

#### Ключевые слова:

механическая обработка,  
композиционный материал,  
адаптивное управление,  
точность формы, режимы  
резания.

#### Аннотация.

В работе описан способ адаптивного управления при механической обработке деталей из композиционных полимерных материалов. Композиты обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с обычными конструкционными материалами, их отличают малый удельный вес, высокая прочность, стойкость к коррозии, прозрачность для электромагнитного излучения. Но вместе с тем есть и недостатки: анизотропность, сложности при механической обработке, склонность к расслоению, низкая жесткость и др. Нежесткая деталь по действием силы резания деформируется, что приводит к отклонению формы обработанной поверхности. В связи с этим целью работы является разработка научно-обоснованного способа адаптивного управления процессом резания при механической обработке деталей из композиционных материалов. Исследование выполнено с использованием основ теории автоматического управления, метода конечных элементов, методов математического анализа и эксперимента. Способ адаптивного управления базируется на методике обеспечения равенства силы резания на всем участке обрабатываемой поверхности. Предложенная методика позволяет осуществить выбор режима обработки и его изменение путем управления рабочими органами станка на основе стабилизации упругих отжатий в технологической системе через контролируемую силу резания для обеспечения допустимых значений отклонения формы обработанной поверхности.

**Для цитирования:** Гайст С.В., Леонов С.Л., Марков А.М., Некрасов В.Н. Способ адаптивного управления процессом резания при механической обработке деталей из композиционных материалов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 2 (156). С. 15-27. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-15-27, EDN: GGCGYX

Для современного машиностроения характерно широкое применение полимерных композиционных материалов. В различных конструкциях и изделиях его использование может

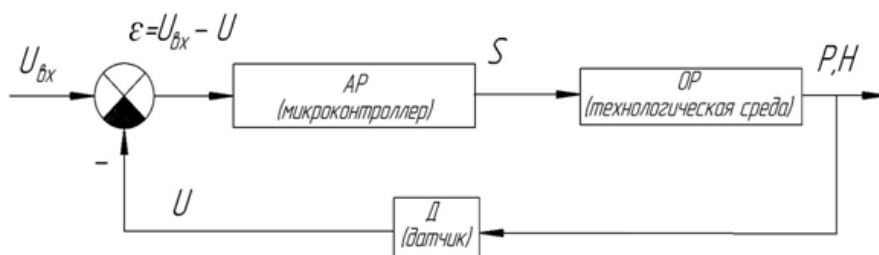


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации силы резания:

АР – автоматический регулятор (микроконтроллер);

ОР – объект регулирования (технологическая система); Д – датчик (динамометр)

Fig. 1. Block diagram of the cutting force stabilization system:

AR – automatic controller (microcontroller);

OR – control object (technological system); D – sensor (dynamometer)

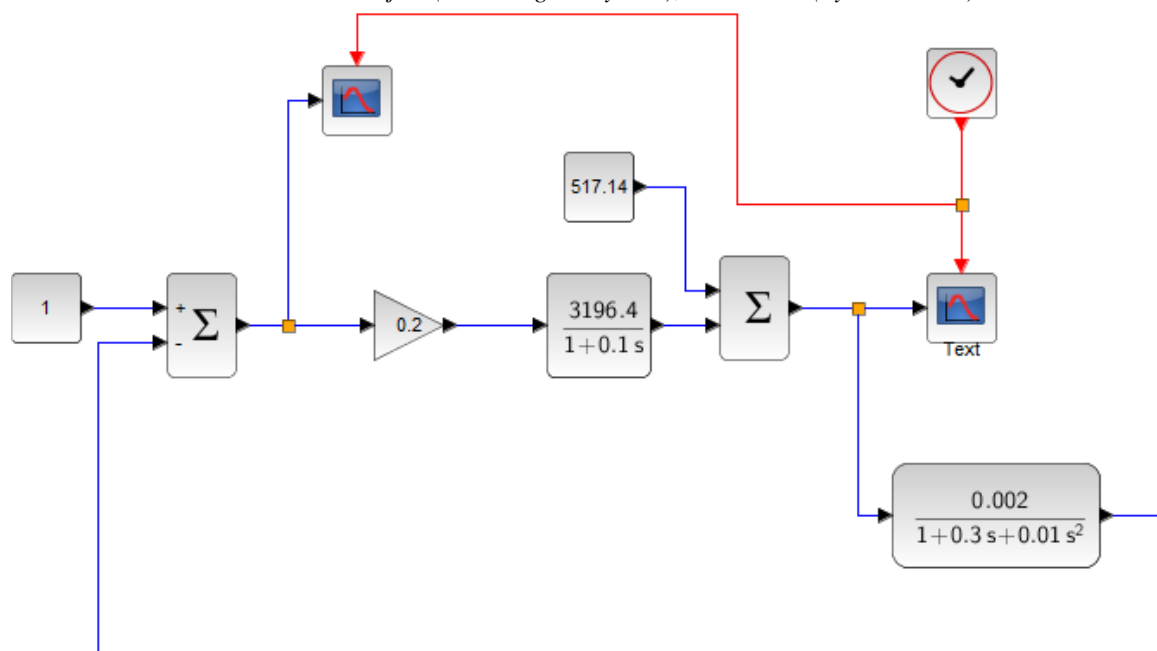


Рис. 2. Экранная форма режимов работы программы Scilab 6.0.2

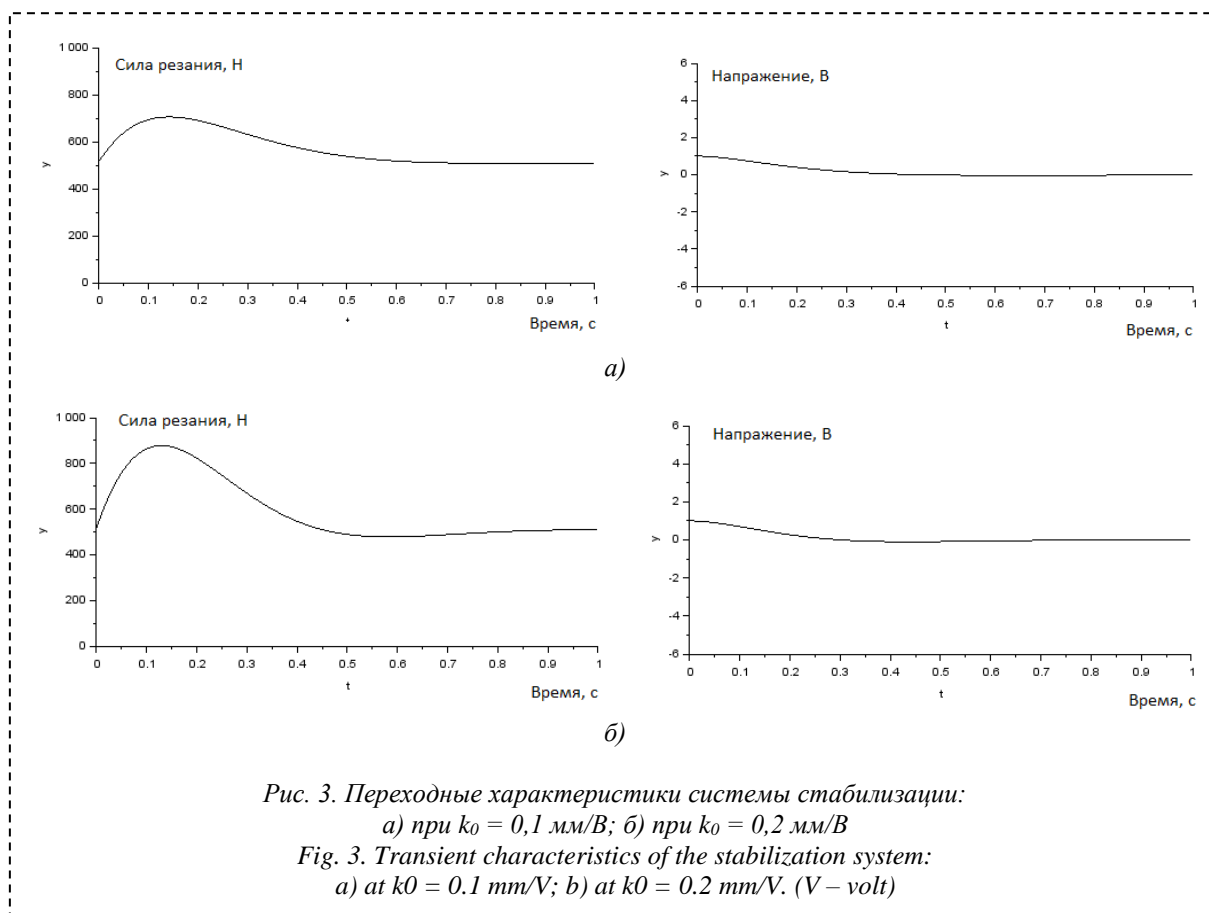
Fig. 2. Screen form of the Scilab 6.0.2. operation modes

достигать 60% [1, 2]. Такое соотношение стало возможным благодаря уникальным свойствам стеклопластика: способность воспринимать большие нагрузки, высокая коррозионная стойкость, эластичность, малый удельный вес, сохранение эксплуатационных качеств в агрессивных средах [3, 4, 5].

Детали из композитов, как правило, подвергают механической обработке [6, 7, 8]. Механическая обработка стеклопластика имеет ряд сложностей, которые обусловлены структурой и составом материала: прижоги, разломачивание, расслоения матрицы и наполнителя, низкая собственная жесткость приводит к снижению качества и искажению формы обработанной поверхности [9, 10, 11].

Для получения плоских поверхностей, пазов, уступов применяют фрезерование, которое характеризуется прерывистым контактом инструмента и детали, переменной силой резания, сменой направления силы резания как при попутной, так и встречной схемах резания [12]. В этом случае высокая эластичность при недостаточной жесткости стеклопластика может провоцировать появление вибраций и больших упругих отжатий [7, 11, 13]. Все это ведет к ухудшению качества поверхности детали, ее геометрии и контактных характеристик в изделии.

Действенным способом уменьшения негативного влияния условий обработки на обработанную поверхность при фрезеровании является использование устройств адаптивного управления. Современные устройства адаптивного управления не могут самостоятельно выбрать



условия обработки, поэтому нуждаются в предварительной настройке и отладке, для этого необходима разработка методического и программного обеспечения.

В работе предлагается способ адаптивного управления при фрезеровании деталей из композиционных материалов. Способ позволяет обеспечить допустимые техническими требованиями отклонения формы детали через управление режимом резания. Удобным методом для разработки такого способа является теория автоматического управления [14].

Согласно методике, для заданного материала выбираются параметры режима резания [10, 15]. На их основе были выбраны следующие режимы обработки:  $V = 200$  м/мин;  $t = 0 \div 10$  мм;  $S_z = 0,03 \div 0,35$  мм/зуб.

Для реализации способа была разработана система стабилизации упругих отжатий за счет управления силой резания, позволяющая изменять величину подачи в зависимости от силы резания. Структура данной системы представлена на рис. 1.

Если рассматривать простейший П-регулятор, то микроконтроллер выполняет функцию усилительного звена с передаточной функцией  $W_{AP} = k_0$ . Кроме того, контроллер реализует заданный алгоритм изменения входного сигнала  $U_{вх}$ .

ОР является аperiодическим звеном с передаточной функцией:

$$W_{OP} = \frac{k_1}{T_1 s + 1}, \quad (1)$$

где  $k_1$  – коэффициент передачи (Н),  $T_1$  – постоянная времени (с).

Экспериментально установлено, что стабилизация силы резания должна проводиться на уровне  $P \leq 1500$  Н. При этом на контроллер, реализующий автоматический регулятор, должно подаваться максимальное напряжение  $\varepsilon = 5$  В.

На значения  $k_0$  наложены ограничения, связанные с ограничением силы резания и входным сигналом автоматического регулятора: при глубине резания  $t = 4$  мм  $0,0615 < k_0 < 2,58$  мм/В. Для определения конкретного значения коэффициента  $k_0$  выполнено моделирование в среде Scilab 6.0.2. (Рис. 2).

На рис. 3 представлены переходные характеристики системы стабилизации при различных значениях коэффициента передачи микроконтроллера.

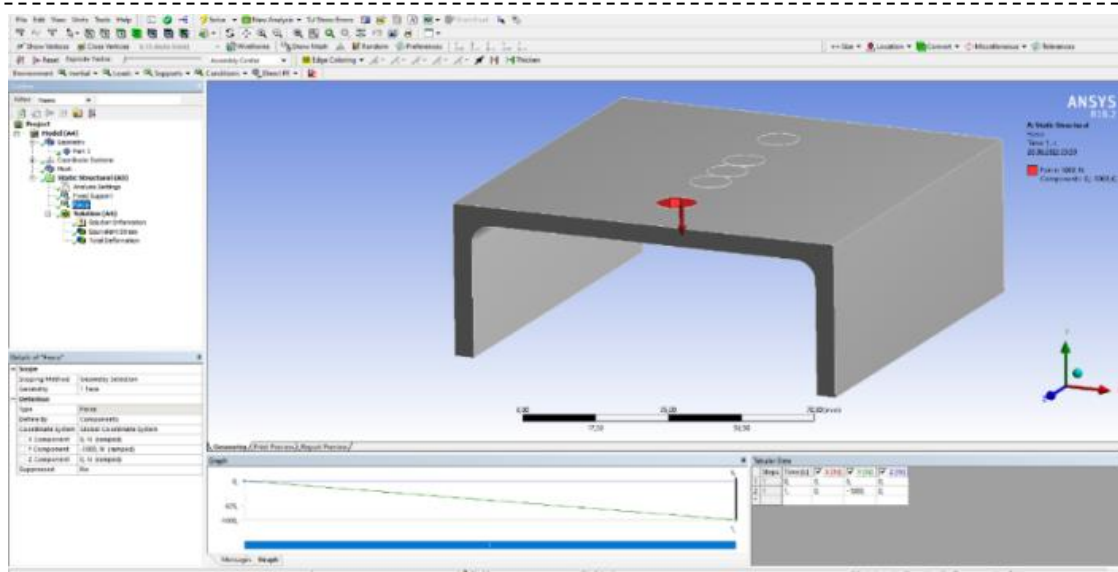


Рис. 4. 3D-модель исследуемой детали  
Fig. 4. 3D model of the investigated part

Таблица. Результаты расчета методом конечных элементов  
Table. Results of calculation by the method of finite elements

x	Перемещение	Жесткость
	мм	Н/мм
20	1,0067	993,344591
40	0,59485	1681,09607
50	0,56905	1757,31482
60	0,5921	1688,9039
80	0,99155	1008,52201

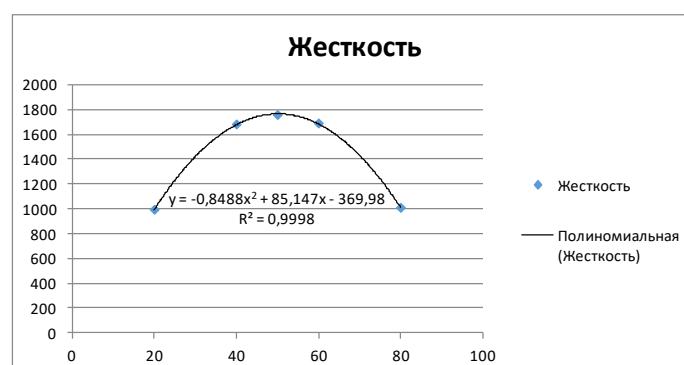


Рис. 5. Аппроксимация жесткости  
Fig. 5. Stiffness approximation

При дальнейшем увеличении  $k_0$  перерегулирование и время переходного процесса возрастают. Поэтому при реализации системы использован коэффициент передачи  $k_0 = 0,1$  мм/В.

#### Пример реализации системы

На рис. 4 показана 3D-модель обрабатываемой детали.

Методом конечных элементов при силе 1000 Н получены значения деформации, а по ним рассчитана жесткость детали. Результаты приведены в таблице.

На рис. 5 приведена аппроксимация жесткости параболой. Практически точно жесткость можно рассчитать по выражению

$$C = -0,8488x^2 + 85,147x - 369,98. \quad (2)$$

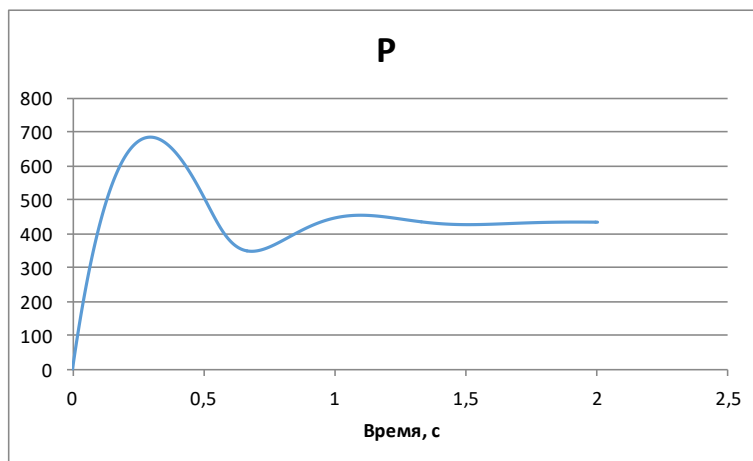


Рис. 6. Переходная характеристика нелинейной системы  
Fig. 6. Transient response of the nonlinear system

В связи с тем, что сила резания определяется параметрами режима резания ( $V$ ,  $S_z$  и  $t$ ), возможно организовать независимое управление подачей и глубиной резания. Рассмотрим сначала управление только подачей.

Для инструмента производителем рекомендован режим резания  $V = 628$  м/мин,  $t = 5$  мм,  $S_z = 0,1$  мм/зуб. При линеаризации зависимости для расчета силы резания получены значения  $a = 3885,9$ ;  $b = 628,69$ . Тогда  $k_1 = a = 3885,9$ . Критерий устойчивости  $b_1 > \frac{b_3}{b_2}$  приводит к ограничению  $k_0 < 2,12$  мм/В. Ограничение по максимальному значению силы резания приводит к выражению  $k_0 > 0,0448$  мм/В.

Дифференциальное уравнение, описывающее работу динамометра:

$$T_2^2 \ddot{u} + 2eT_2 \dot{u} + u = k_2 P. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее работу технологической системы:

$$T_1 \dot{P} + P = 926V^{0.12}S_z^{0.45}t^{0.26}. \quad (4)$$

Математическое описание регулятора:

$$S_z = k_0(u_{\text{вх}} - u). \quad (5)$$

Глубина резания с учетом упругих отжатий:

$$t = t_0 - \frac{P}{C}. \quad (6)$$

Начальные условия определяются значениями  $u_0$ ,  $q_0$ ,  $P_0$ ,  $S_{z0}$ ,  $t_0$ .

Сначала рассмотрим переходную характеристику с учетом нелинейности. На рис. 6 приведено это решение при  $k_0 = 0,1$  мм/В. При сравнении с переходной характеристикой (рис. 3) видно хорошее соответствие результатов, что свидетельствует о правильности линеаризации системы. Некоторая повышенная колебательность вызвана нелинейностью системы.

В связи с тем, что в процессе обработки жесткость технологической системы меняется, меняются и упругие отжатия, даже при стабилизации силы резания. В соответствии с этим меняется и точность получаемого размера. Поэтому необходимо организовать изменение входного сигнала САР, обеспечивая стабилизацию упругих отжатий.

На рис. 7 показано изменение упругих отжатий. Он очень похож на график рис. 6, но и при стабилизации силы резания при времени более 1,5 с за счет изменения жесткости происходит изменение и упругих отжатий.

Для стабилизации упругих отжатий рассмотрим поведение САР в статике.

Динамометр вместо дифференциального уравнения (4) в статике описывается выражением:

$$u = k_2 P. \quad (7)$$

Сила резания в статике (вместо дифференциального уравнения (4)):

$$P = 926V^{0.12}S_z^{0.45}t^{0.26}. \quad (8)$$

Уравнения (5) и (6) не изменяются. Упругие отжатия, вызывающие отклонения от плоскости, описываются выражением:

$$\Delta = \frac{P}{C}. \quad (9)$$

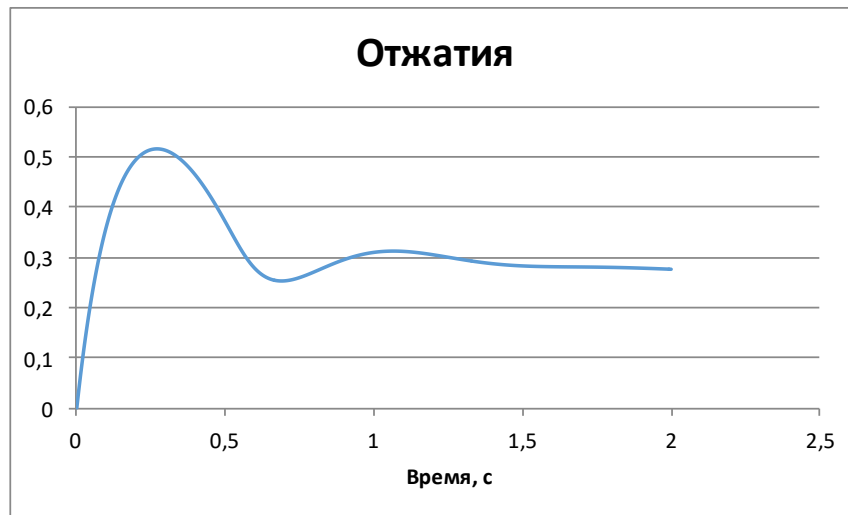


Рис. 7. Упругие отжатия в технологической системе

Fig. 7. Elastic squeezes in the technological system

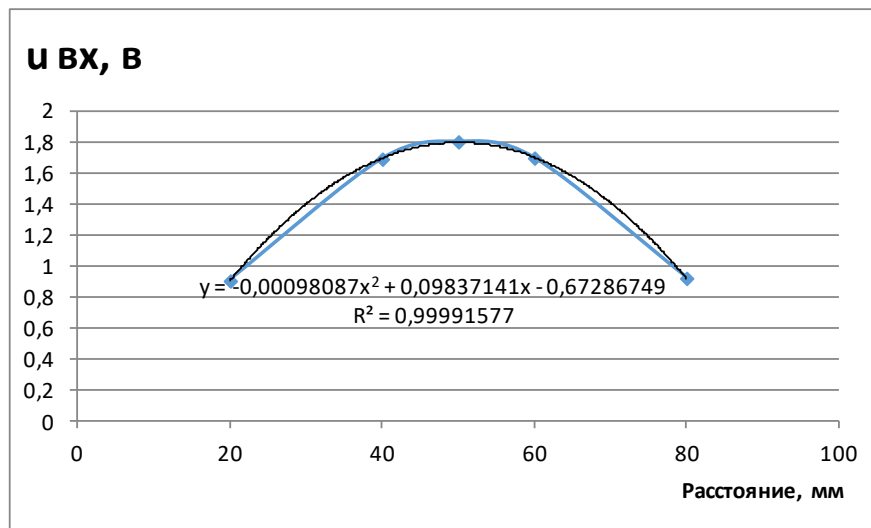


Рис. 8. Оптимальное управление, обеспечивающее стабилизацию упругих отжатий

Fig. 8. Optimal control providing elastic squeezes stabilization

При изменении жесткости технологической системы в процессе обработки (выражение (2)) будет несколько меняться стабилизированное значение силы резания за счет изменения подачи и глубины резания. Это является один из признаков системы со статической ошибкой. В соответствии с этим изменяется и величина упругих отжатий. Компенсировать это изменение можно управление по  $u_{вх}$ .

Если установить фиксированное значение упругих отжатий, найти величину  $u_{вх}$  для различных значений  $C$ , получим зависимость управления в процессе обработки нежесткой детали. Для этого необходимо решить совместно уравнения (7) – (9) и (5), (6). Система уравнений нелинейна. Ее можно решить только численным методом. В Excel это реализовано инструментом «Подбор параметра». На рис. 8 показан результат решения для  $\Delta = 0,4$  мм.

Необходимо отметить, что подача вдоль направления обработки не является постоянной. Поэтому для расчета координаты  $x$  необходимо использовать выражение:

$$x = x_0 + \frac{zn}{60} \int_0^{\tau} S_z d\tau$$

На рис. 9 показан результат использования полученного подхода.

Полностью компенсировать упругие отжатия невозможно – участок переходного процесса в начале траектории остался. При  $\tau > 1$  с упругие отжатия практически постоянны. Для



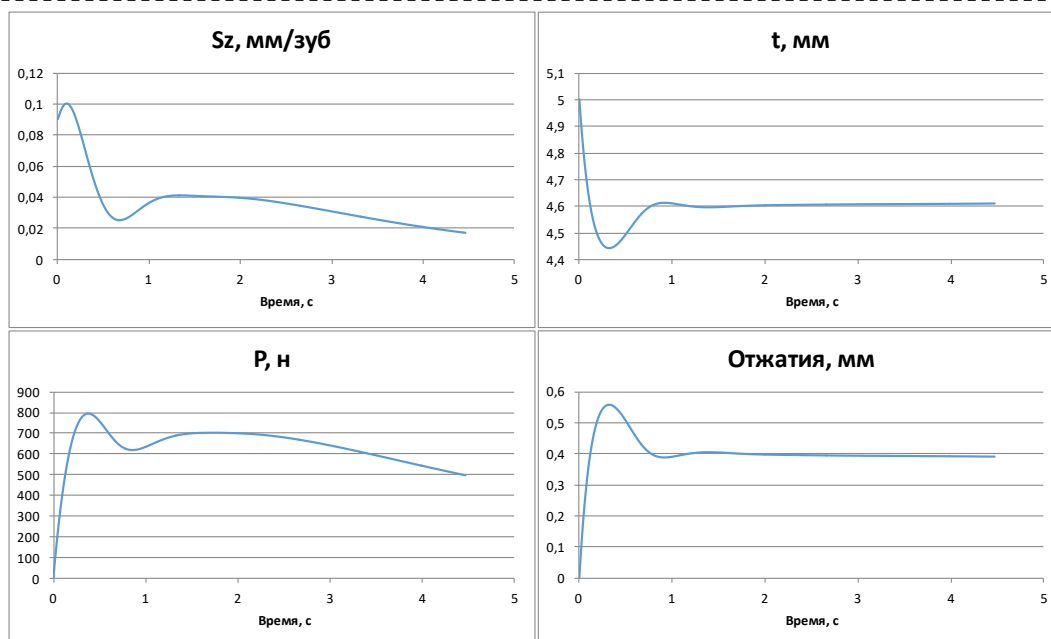


Рис. 9. Стабилизация упругих отжатий  
Fig. 9. Elastic squeezes stabilization



Рис. 10. Общий вид системы адаптивного управления станка ГФ2171С5  
Fig. 10. General view of the GF2171C5 machine's adaptive control system

компенсации переходного процесса возможно изменение на начальном участке номинальной глубины резания  $t_0$ .

Система стабилизации силы резания работает следующим образом: сигналом  $U_{вх}$  задается необходимая сила резания  $P$ , которая контролируется динамометром. При изменении силы резания (износ РИ, изменение глубины резания) в элементе сравнения изменяется величина сигнала рассогласования  $\epsilon$ , на которую реагирует микроконтроллер и передает сигнал на систему ЧПУ. ЧПУ, обрабатывая данный сигнал, увеличивает или уменьшает величину подачи.

Данная система была реализована на станке модели ГФ2171С5 (рис. 10).

Рассматривалось фрезерование заготовки, конфигурация которой представлена на рис. 11. Обработка производилась в две стадии: черновая и чистовая. Припуск на черновую обработку менялся 0 до 19,5 мм, поэтому она осуществлялась в 2 прохода. Глубина резания первого прохода менялась от 0 до 10 мм., что вызывало соответствующие изменения силы резания. Для стабилизации силы резания с помощью описанной выше системы рассматривался участок с изменением глубины резания от 0 до 10 мм.

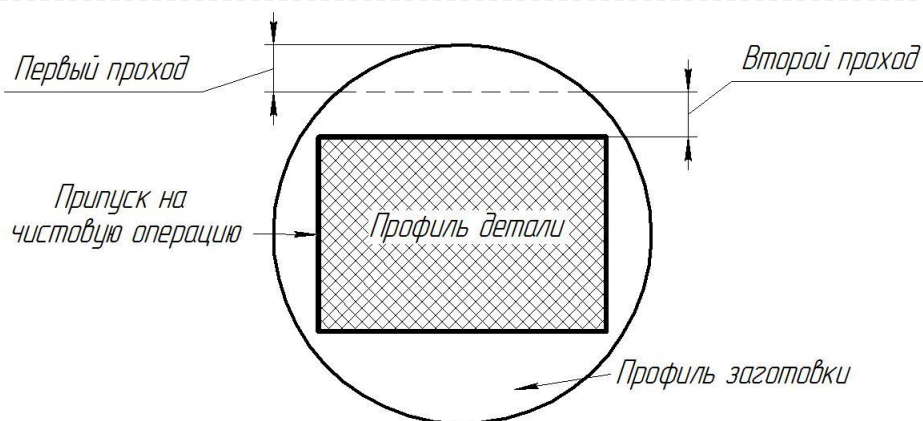


Рис. 11. Профиль заготовки и детали  
Fig. 11. Profile of a workpiece and a part

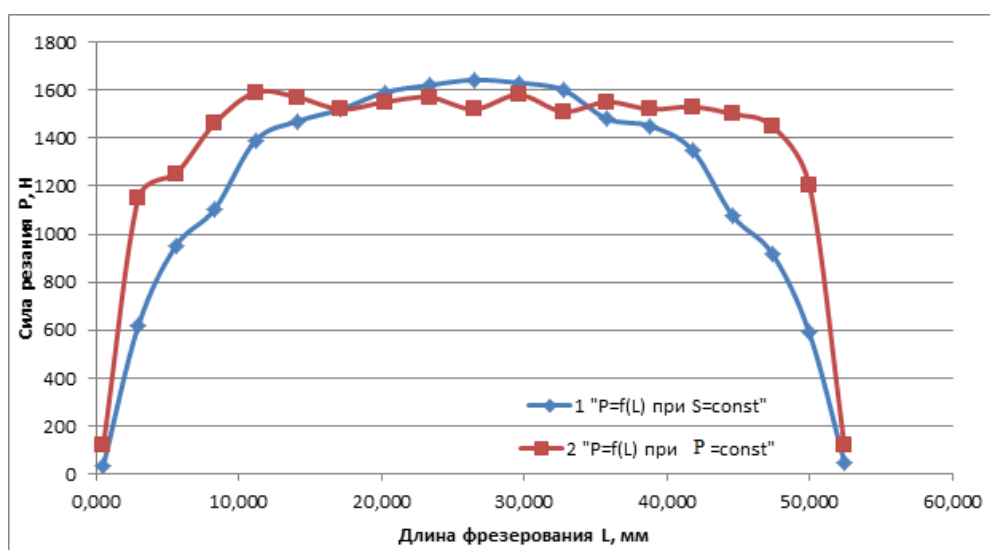


Рис. 12. График изменения силы резания при черновой обработке на первом проходе (длина обработки 53 мм): 1 – обработка без стабилизации силы резания; 2 – обработка со стабилизацией силы резания

Fig. 12. Graph of cutting force change during roughing in the first passage (length of processing – 53 mm): 1 – processing without cutting force stabilization; 2 – processing with cutting force stabilization

В ходе экспериментов при изменении глубины резания в пределах  $0 \div 10$  мм значения силы резания находились в пределах от 1450 до 1590 Н (разница между максимальным и минимальным значением 8,8%). Без использования системы стабилизации от 1105 до 1642 Н (разница между максимальным и минимальным значением 33%), рис. 12.

Для оценки показателей точности формы после черновой обработки деталей как в базовом технологическом процессе (без использования системы стабилизации), так и в предлагаемом (с использованием системы стабилизации) проводился контроль размера по схеме, представленной на рис. 13. Контроль осуществлялся в 5-ти сечениях по 20 точкам в каждом.

Результаты представлены на графике (рис. 14), который показывает, что за счет стабилизации силы резания было достигнуто постоянство формы. Таким образом, была обеспечена равномерность припуска под последующую чистовую обработку.

На втором черновом проходе участок с увеличением глубины резания длиной 4 мм находится в начале рабочего хода, участок с уменьшением глубины резания длиной 4 мм находится в конце рабочего хода. В связи с этим использование системы стабилизации силы резания не целесообразно.



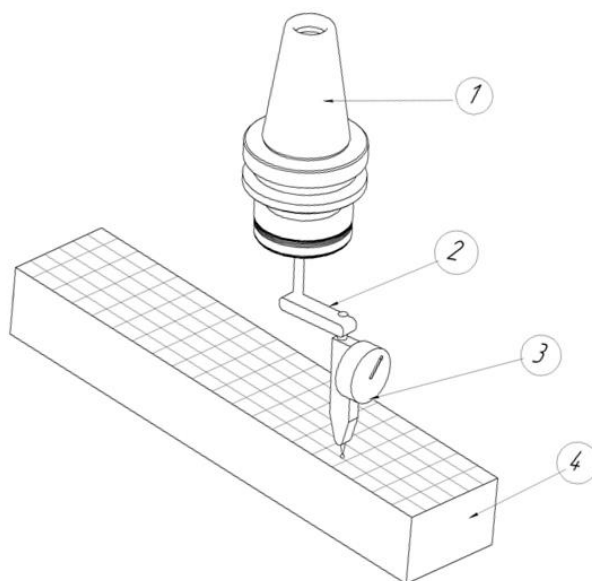


Рис. 13. Схема контроля показателей точности  
Fig. 13. Scheme of accuracy indicators monitoring

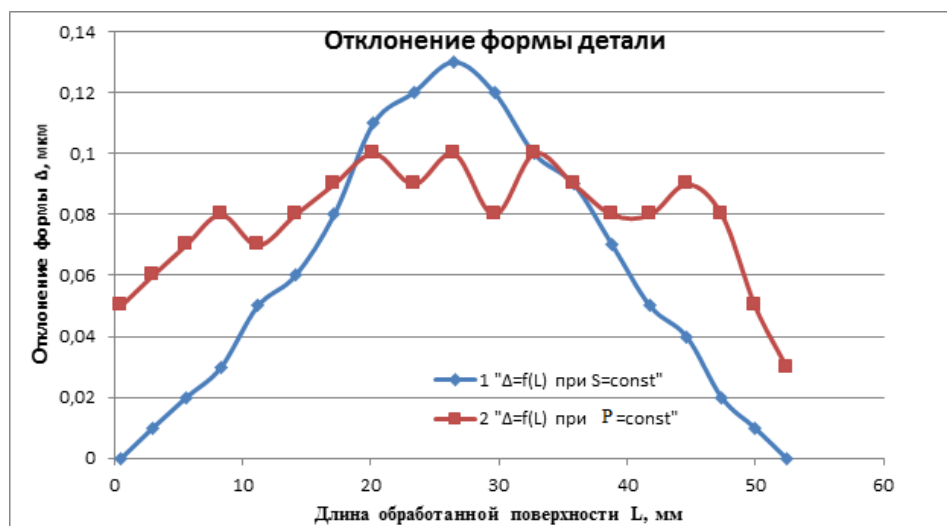


Рис. 14. Отклонение формы детали: 1 – без использования системы стабилизации;  
2 – с использованием системы стабилизации

Fig. 14. Deviation of the part shape: 1 – without stabilization system use; 2 – with stabilization system use

#### Выводы:

1. Адаптивное управление процессом резания на станках с ЧПУ позволяет по новому подойти к обработке композиционных материалов. Несмотря на возникающие трудности при лезвийной обработке, приводящие к искажению формы обработанной поверхности, при использовании системы стабилизации удалось снизить отклонение от плоскостности в 1,86 раза;
2. Предложенная модель на основе метода конечных элементов позволяет прогнозировать значения упругих деформаций в обрабатываемой заготовке и рассчитать в дальнейшем режимы обработки, обеспечивающие заданные параметры качества, в частности точность формы;
3. Несмотря на стабилизацию силы резания, достичь постоянств, упругих отжатий не удастся, так как жесткость технологической системы в процессе обработки меняется. По этой причине меняется и точность получаемого размера. Поэтому для обеспечения стабилизации упругих отжатий необходимо изменение входного сигнала системы автоматического регулирования;

4. В ходе исследования разработана система стабилизации силы резания. Система сравнивает текущую силу резания, контролируемую через динамометр с заданной, и через микроконтроллер передающий сигнал в систему ЧПУ изменяет величину подачи для обеспечения постоянства силы резания;

5. График, представленный на рис. 13, свидетельствует о достижении равномерного профиля обработанной поверхности за счет стабилизации силы резания, что обеспечит равный припуск при дальнейшей чистовой обработке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
2. Буланов И. М., Воробей В. В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998 г. 518 с.
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с.
4. Гриб В. В., Зорин В. А., Баурова Н. И. Определение ресурса деталей машин, изготовленных из полимерных композиционных материалов, по совокупности показателей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 4. С.13–19.
5. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. 3-е испр. изд. / под ред. Берлина А. А. СПб. : ЦОП «Профессия», 2011. 560 с.
6. Баранчиков В. И., Тарапанов А. С., Харламов Г. А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. М. : Машиностроение, 2002. 264 с.
7. Баурова Н. И., Зорин В. А. Технологическая наследственность при производстве деталей машин из полимерных композиционных материалов: Монография. М. : МАДИ, 2018. 220 с.
8. Дрожжин В. И., Сустан П. И. Качество обработки и прочность слоистых пластиков // Станки и режущие инструменты. Харьков : Издательство Харьковского университета, 1969. №10. С. 15–16.
9. Карасов Т. А., Храмовских В. В., Жихарев В. С. Проблемы резания композитов с высокопрочными наполнителями // Механики XXI века. Братск : Издательство Братского государственного университета, 2017. № 16. С. 93–97.
10. Макаров В. Ф., Мешкас А. Е., Ширинкин В. В. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17, № 2 г. С. 30–38.
11. Марков А. М., Некрасов В. Н., Андреев М. В., Гайст С. В., Су Цзянь, Салман А. М. Исследование влияния показателей качества обработанной поверхности на прочностные характеристики деталей из композиционного материала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 6. С.5–12. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-5-12
12. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2005. 736 с.
13. Марков А. М., Некрасов В. Н., Цзянь Су, Салман А. М., Гайст С. В. Исследование механизма резания армированных стекловолокнистых композиционных материалов при фрезеровании и анализ их микрофотографий // ООО «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением» (Москва). 2020. Т.8, С. 11–16.
14. Ефанов А. В., Ярош В. А. Теория автоматического управления. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 160 с. — ISBN 978-5-507-45647-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/277061>.
15. Марков А. М., Некрасов В. Н., Цзянь Су, Салман А. М., Гайст С. В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 6-17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Гайст Сергей Валерьевич, ассистент, Алтайский государственный технический университет им. И. И.

Ползунова, пр. Лени-на, 46, г. Барнаул, 656038, Россия), e-mail: sergei-gaist@mail.ru

Леонов Сергей Леонидович, доктор техн. наук, профессор, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, пр. Лени-на, 46, г. Барнаул, 656038, Россия), e-mail: sergey\_and\_nady@mail.ru

Марков Андрей Михайлович, доктор техн. наук, профессор, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, пр. Лени-на, 46, г. Барнаул, 656038, Россия), e-mail: andmarkov@inbox.ru

Некрасов Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, пр. Лени-на, 46, г. Барнаул, 656038, Россия), e-mail: sla44@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Гайст Сергей Валерьевич – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Леонов Сергей Леонидович – научный менеджмент, выводы, написание текста.

Марков Андрей Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, выводы, написание текста.

Некрасов Вячеслав Николаевич – обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### ADAPTIVE CONTROL METHOD OF CUTTING IN MACHINING COMPOSITE MATERIALS PARTS

Sergei V. Gayst, Sergei L. Leonov,  
Andrei M. Markov, Vyacheslav N. Nekrasov

Polzunov Altai State Technical University

\*for correspondence: sergei-gaist@mail.ru



#### Article info

Received:

14 March 2023

Accepted for publication:

10 May 2023

Accepted:

25 May 2023

Published:

15 June 2023

**Keywords:** machining, composite material, adaptive control, shape accuracy, cutting modes

#### Abstract.

*The paper describes an adaptive control method in machining fiberglass parts made of composite polymeric materials. Composites have a number of significant advantages over conventional structural materials; they are characterized by low specific weight, high strength, corrosion resistance, transparency to electromagnetic radiation. But at the same time there are also disadvantages: anisotropy, difficulties in machining, tendency to delamination, low rigidity, etc. A non-rigid part under the cutting force deforms, which leads to a deviation of the machined surface shape. In this regard, the aim of the work is to develop a science-based adaptive control method of the cutting process in machining composite materials parts. The research is performed using the basics of automatic control theory, finite element method, methods of mathematical analysis and experiment. The adaptive control method is based on the technique of ensuring constancy of cutting force on the whole section of the machining surface. The proposed method allows the choice of machining mode and its change by controlling the working bodies of the machine tool on the basis of stabilization of elastic squeezes in the technological system through the controlled cutting force to ensure acceptable values of the deviation of the shape of the machined surface*

**For citation:** Gayst S.V., Leonov S.L., Markov A.M., Nekrasov V.N. Adaptive control method of cutting in machining composite materials parts. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 2(156):15-27. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-15-27, EDN: GGCGYX

## REFERENCES

1. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A. Polimernye kompozitsionnye materialy [Polymeric composite

materials] Dolgoprudny: Publishing House "Intellect"; 2010. 352 p.

2. Bulanov I.M., Vorobey V.V. Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktсий iz kompozitsionnykh materialov [Technology of rocket and aerospace structures from composite materials]. Moscow: Moscow State Technical University Publisher; 1998. 518 p.

3. Vasiliev V.V. Mekhanika konstruktсий iz kompozitsionnykh materialov [Mechanics of Structures from Composite Materials]. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 272 p.

4. Grib V.V., Zorin V.A., Baurova N.I. Opredelenie resursa detaley mashin, izgotovlennykh iz polimernykh kompozitsionnykh materialov, po sovokupnosti pokazateley [Determination of the resource of machine parts made of polymeric composite materials on the set of indicators]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik [All materials. Encyclopedic reference book]*. 2018; 4:13-19.

5. Berlin A.A., Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobie. 3-e ispr. izd. [Polymeric composite materials: structure, properties, technology: textbook. 3rd revised edition]. Saint Petersburg: Central Education Center "Professia"; 2011. 560 p.

6. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A., Obrabotka spetsial'nykh materialov v mashinostroenii: Spravochnik. [Processing of special materials in mechanical engineering: Handbook]. Technologist Library. Moscow: Mashinostroenie; 2002. 264 p.

7. Baurova N.I., Zorin V.A. Tekhnologicheskaya nasledstvennost' pri proizvodstve detaley mashin iz polimer-nykh kompozitsionnykh materialov: Monografiya [Technological heredity in the production of machine parts from polymer composite materials: Monograph]. Moscow: MADI; 2018. 220 p.

8. Drozhzhin V.I., Sustan P.I., [Processing quality and strength of layered plastics]. Machine tools and cutting tools, Khar'kov, Khar'kov University Publisher. 1969; 10:15-16.

9. Karasov T.A., Khramovskikh V.V., Zhiharev V.S. Problemy rezaniya kompozitov s vysokoprochnymi napolnitelyami [Problems of cutting composites with high-strength fillers]. *Mekhaniki XXI veku [Mechanics of the XXI century]*. Bratsk : Bratsk State University Publisher. 2017; 16: 93-97.

10. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. [Research Problems Machining High Strength Composite Materials Used for the Production of Details of Aviation and Space-Rocket Technicians]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science]*. 2015; 17(2):30-38.

11. Markov A.M., Nekrasov V.N., Andreev M.V., Gayst S.V., Su Jian, Salman A.M. Issledovanie vliyaniya pokazateley kachestva obrabotannoy poverkhnosti na proch-nostnye kharakteristiki detaley iz kompozitsionnogo materiala [The influence of quality of cut surface on the strength characteristics of parts made o composite materials]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*. 2020; 6:5-12. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-5-12

12. Bazrov B.M. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: Uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of engineering technology: a textbook for universities]. – Moscow. Mashinostroenie, 2005. 736 p.

13. Markov A.M., Nekrasov V.N., Jian Su, Salman A.M., Gayst S.V. Issledovanie mekhanizma rezaniya armirovannykh steklovoloknistykh kompozitsionnykh materialov pri frezerovanii i analiz ikh mikrofotoografiy [Investigation of the cutting mechanism of reinforced fiberglass composite materials during milling and analysis of their micrographs]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]*. 2020; 8:11-16.

14. Efanov, A.V., Yarosh V.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. 2-nd ed. Saint-Petersburg: Lan', 2023. 160 p. - ISBN 978-5-507-45647-5. - Text: electronic Lan': electronic library system. URL: <https://e.lanbook.com/book/277061> (accessed: 21.03.2023).

15. Markov A.M., Nekrasov V.N., Jian Su, Salman A.M., Gayst S.V. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnostnogo sloya steklovolokonnykh kompozitov pri kontsevom frezerovanii [Technological assurance of fiberglass composites surface layer quality during end milling]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) [Metal Working and Material Science]*. Novosibirsk State Technical University Publisher. 2020; 22(4):6-17. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

#### About the authors:

Sergei V. Gayst, Assistant, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation), e-mail: sergei-gaist@mail.ru

Sergei L. Leonov, Dr. Sc.in Engineering, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation), e-mail: sergey\_and\_nady@mail.ru

---

Andrei M. Markov, Dr. Sc.in Engineering, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation), e-mail: andmarkov@inbox.ru

Vyacheslav N. Nekrasov, C. Sc. In Engineering, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation), e-mail: sla44@mail.ru

*Contribution of the authors:*

Sergei V. Gayst – formulation of a research task, review of relevant literature, conclusions, writing a text.

Sergei L. Leonov – scientific management, conclusions, text writing.

Andrei M. Markov – formulation of a research problem, scientific experiment, conclusions, writing a text.

Andrei M. Markov – review of relevant literature, conclusions, writing of the text.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

