

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

**Е. Ю. Лапенков, С. В. Гайст, А. М. Марков, П. О. Черданцев**  
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
г. Барнаул, Россия

Рассмотрена принципиальная схема и алгоритм автоматического управления точностью процесса фрезерования в условиях нестабильного резания. Управление осуществляется путем контроля составляющих силы резания и изменении одного из режимных параметров (например, подачи) в зависимости от изменяющихся условий обработки. В качестве измерительного прибора используется конструкция трехкомпонентного динамометра с пьезоэлектрическими датчиками.

**Ключевые слова:** алгоритм управления, система автоматического регулирования, сила резания, динамометр

## **CONTROL SYSTEM FORMING FOR THE MACHINING OF COMPOSITE MATERIAL**

**E. Yu. Lapenkov, S. V. Gayst, A. M. Markov, P. O. Cherdancev**  
Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Considered a principal scheme and algorithm of automatic control of the accuracy of the milling process in unstable cutting. The operation is effected by control-stavlyayuschej cutting forces and change of operational parameters (e.g. feed), depending on the varying machining conditions. As a measuring device is used to design three-component dynamometer with piezoelectric sensors.

**Keywords:** control algorithm, system of automatic control, cutting force, dynamometer

Современные композиционные материалы, в частности стеклопластики, получили широкое распространение при изготовлении изделий различного назначения для машиностроения, космической и авиационной техники, геологоразведки, приборостроения, медицины и других отраслей народного хозяйства. Это связано, в первую очередь с их уникальными свойствами и относительно невысокой стоимости их производства. К уникальным свойствам композиционных материалов можно отнести их малый вес при высоких прочностных показателях, высокую коррозионную стойкость, устойчивость к значительным перепадам температуры, высокую электроизоляционную способность и радиопрозрачность [1].

При этом, несмотря на то, что при формовании детали из стеклопластика ее форма близка к требуемой по чертежу, технологический процесс, тем не менее, содержит операции механической обработки, обеспечивающие получение требуемой точности размеров, формы, шероховатости рабочих поверхностей.

Одной из распространенных операций механической обработки является фрезерование. Процесс фрезерования данных материалов часто затруднен, что объясняется влиянием таких факторов как низкая теплопроводность, высокие упругие свойства, абразивное воздействие наполнителя на режущий инструмент. Приводимые в справочной литературе рекомендации по проектированию операций фрезерования стеклопластиков часто носят противоречивый характер, что не позволяет при проектировании технологии правильно назначить режимы резания. Кроме того, анизотропия физико-механических свойств стеклопластика обуславливает нестабильность процесса резания, что также осложняет достижение требуемых показателей качества продукции.

Из практики управления нестабильными процессами известно, что в этих случаях успешно могут быть использованы системы автоматического регулирования, позволяющие стабилизировать процесс формообразо-

вания за счет изменения одного или нескольких параметров режимов резания в соответствии с условиями обработки [2].

Принципиальная схема системы автоматического регулирования процесса концевой фрезерования композиционного материала приведена на рисунке 1. В качестве контролируемого параметра системы регулирования (объект регулирования) может быть выбрана сила резания (одна или несколько ее составляющих). Именно изменение ее значения в полной мере характеризуется изменением условий резания. В качестве управляющего параметра (параметра, который система регулирования будет изменять в зависимости от воздействия внешних возмущений) может быть выбран любой из параметров режима резания (подача, частота вращения, глубина) либо их комбинация. При этом

наиболее часто в качестве управляющего параметра принимают подачу. Чаще всего это связано с относительной простотой реализации способа.

Процесс управления реализуется по следующему алгоритму (рисунок 2). Из справочников (укрупненных нормативов) в зависимости от вида обрабатываемого материала, требуемых параметров точности и качества обработанной поверхности, назначаются начальные режимы резания. Начинается процесс обработки, при этом постоянно контролируется значение одной или нескольких составляющих силы резания. По достижению максимально допустимого значения силы резания, осуществляется автоматическая корректировка величины подачи. Контроль силы осуществляется до завершения процесса фрезерования.

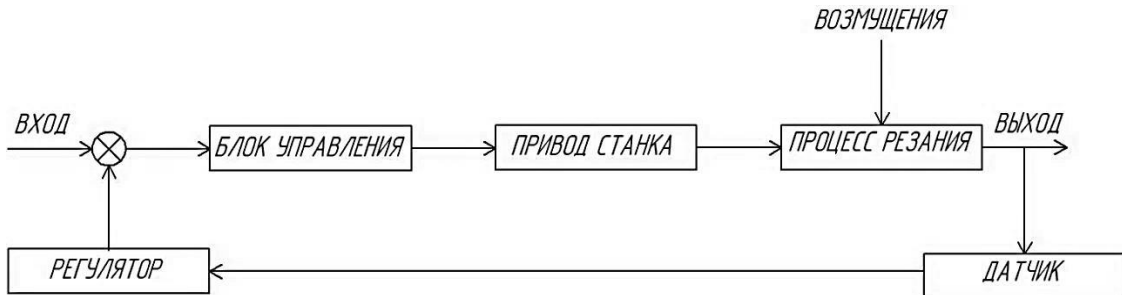


Рисунок 1 – Принципиальная схема САР процесса резания

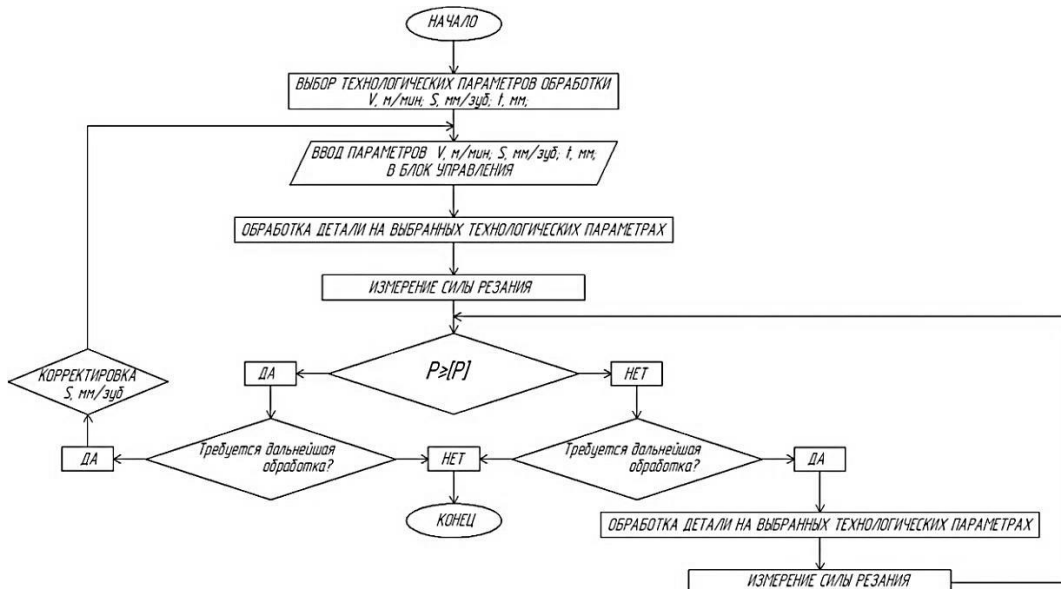


Рисунок 2 – Алгоритм управления точностью обработки

Схема реализации алгоритма управления процесса контурного фрезерования представлена на рисунке 3.

Зависимости, связывающие параметры качества обработанной поверхности и значение режимов резания, были получены по методике

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

планирования эксперимента (дробно - факторный эксперимент  $2^{3-1}$ ) при обработке заготовок из стеклопластика, изготовленного косослойной продольно-поперечной намоткой [3].

Материал стеклопластик – композит, состоящий из эпоксидной матрицы SWANCOR 901 (эпоксидной смолы винилового эфира бисфенола А с пониженным содержанием стирола) и стеклонитей (ГОСТ 8325-93), имеет следующие физико-механические свойства:

- предел прочности в тангенциальном направлении 460 МПа;
- предел прочности в осевом направлении 880 МПа;
- модуль упругости при растяжении 263 МПа;
- плотность  $1,97 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

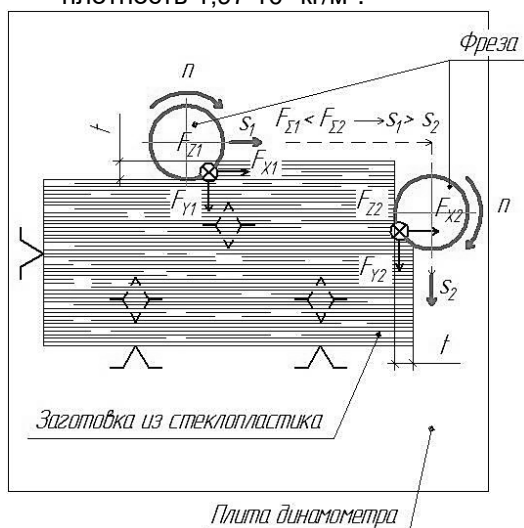


Рисунок 3 – Схема реализации алгоритма управления

Обработка производилась концевыми фрезами диаметром 10 мм, материал режущей части – твердый сплав ВК8. Режимы резания изменялись в следующих пределах:

- скорость резания  $V = 63 \dots 200$  м/мин;
- глубина резания  $t = 1 \dots 10$  мм;
- подача на зуб  $S_z = 0,02 \dots 0,1$  мм/зуб.

В качестве одного из параметров качества обработанной поверхности, который необходимо обеспечить в процессе фрезерования, в данной статье рассматривается шероховатость.

Математическая модель расчета шероховатости обработанной поверхности в зависимости от времени и режимов резания, полученная на основе ранее проведенных исследований, может быть представлена следующим образом [4]:

$$R_a = A + B \cdot \tau \quad (1)$$

где  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля (шероховатость), мкм;

$\tau$  – время обработки, сек;

$A$  и  $B$  параметры процесса, зависящие от режимов резания:

$$A = -0,24 + V \cdot 0,011714 + S_z \cdot 14,82813 + t \cdot 0,18125 \quad (2)$$

$$B = -1,7363 + 0,007202 + S_z \cdot 11,9712 + t \cdot 0,105367 \quad (3)$$

Задавшись постоянными значениями скорости резания  $V$  (частоты вращения фрезы) и глубиной резания  $t$ , можно рассчитать значение подачи  $S_z$ , обеспечивающей получение требуемой шероховатости.

Математические выражения, связывающие значения подачи, глубины и силы резания могут быть получены на основе методики, изложенной в работах [5, 6]. Общий вид зависимостей, представляется степенным произведением:

$$P = C_p S^x, \quad (4)$$

где  $P$  – сила резания (составляющая силы резания), Н;

$C_p, x$ , – коэффициент пропорциональности и показатель степени, определяемые экспериментальным путем.

Для однолезвийной обработки значения коэффициента и показателя степени могут быть рассчитаны исходя из жесткости технологической системы по данным работы [5]:

$$P = 847,9 S^{0,7132}, \quad (5)$$

Аналогичным образом могут быть определены зависимости и для других параметров точности фрезерования, таких как отклонения размеров, формы и расположения поверхностей, а также волнистости и параметров дефектного слоя.

При построении системы автоматического регулирования следует принимать во внимание, что процессы формообразования поверхностей при лезвийной обработке достаточно быстротечны. Поэтому для обеспечения надежности управления процессом фрезерования необходимо, чтобы контроль изменения силы резания осуществлялся с помощью быстродействующей измерительной системы. В качестве такого устройства может быть использован трёхкомпонентный динамометр на основе пьезоэлектрических датчиков, позволяющих контролировать вертикальную, продольную и поперечную составляющие силы резания. 3D модель трехкомпонентного динамометра представлена на рисунке 4.

Измерительными элементами являются восемь однокомпонентных пьезоэлектрических датчиков, модели AC20 фирмы ZETLAB (рисунок 5). Принципиальная схема работы динамометра приведена на рисунке 6.

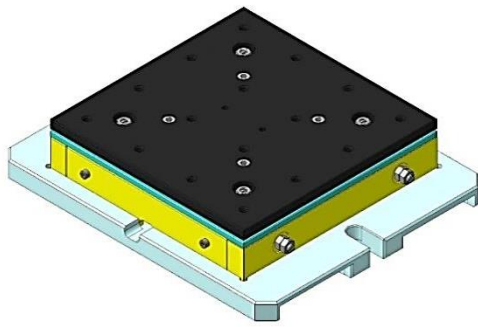


Рисунок 4 – Модель динамометра



Рисунок 5 – Пьезоэлектрический датчик AC20

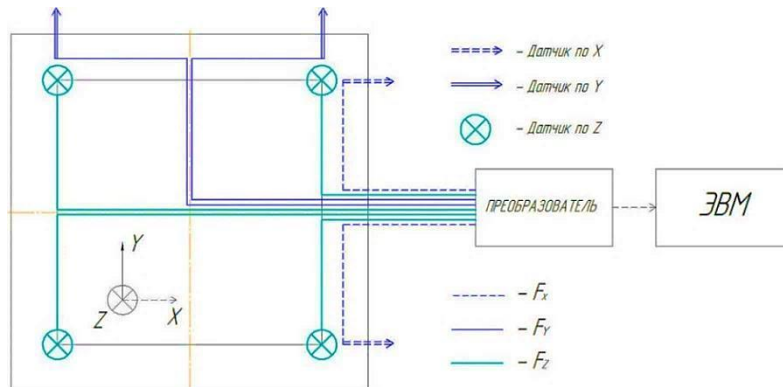


Рисунок 6 – Принципиальная схема работы динамометра

4. Марков, А.М. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов / Марков А.М., Черданцев П.О., Гайст С.В., Катаева С.А. // В сб: Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): Сб. трудов VII Международной науч.-практич. конф.: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский государственный технический университет, Бийский технологический институт, МИП Техмаш; Под ред. Блюменштейна В.Ю. Баканова А.А. Останина О.А. - 2015. - С. 99-104.

5. Мозговой, Н.И. Проектирование технологии изготовления отверстий для условий автоматизированного производства деталей из композиционных материалов / Мозговой Н.И., Марков А.М.,

Доц М.В. //Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2010. - № 3. - С. 14-16.

6. Мозговой, Н.И. Проектирование операций изготовления отверстий в деталях из стеклопластика / Мозговой Н.И., Марков А.М., Мозговая Я.Г. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2012. - № 1. - С. 45-49.

**Лапенков Евгений Юрьевич** – магистрант  
**Гайст Сергей Валерьевич** – аспирант  
**Марков Андрей Михайлович** – д. т. н., профессор  
**Черданцев Павел Олегович** – к. т. н., старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия