ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

Научная статья
УДК 621.914
DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-42-50

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА С НЕЖЕСТКИМИ СТЕНКАМИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

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

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Позлунова

* для корреспонденции: sergei_gaist@mail.ru

Аннотация.
В работе представлена методика прогнозирования упругой деформации корпусной детали с нежесткими стенками из стеклопластика в процессе фрезерования с использованием безразмерных зависимостей. При широком внедрении композиционных материалов в машиностроительное производство значительное количество изделий требует механической обработки, в том числе корпусные детали. Одной из важных проблем, возникающих при резании стеклопластика, является его значительная упругая деформация от действия сил резания. Проблема усугубляется в случае обработки деталей с нежесткими элементами, в частности с нежесткими стенками. Решение можно найти в назначении рациональных режимов резания, характеризующихся изменением в процессе обработки для управления силой резания, таким образом обеспечив равенство срезаемого припуска и достаточную точность обработки. Для жестких участков режимы можно ужесточить, повысив благодаря этому производительность. Разумным подходом для выбора режимов резания является моделирование упругой деформации детали при механической обработке. Одним из методов моделирования, показывающих надежные результаты, является метод конечных элементов (МКЭ). Но его применение предполагает использование дорогостоящего программного обеспечения, значительных вычислительных мощностей и большого количества времени. В качестве альтернативы в работе предлагается использовать модель на основе безразмерных зависимостей, которые можно построить на основе экспериментальных данных или результатах моделирования МКЭ. Полученная модель позволяет прогнозировать упругую деформацию нежесткой стенки корпусной детали при заданных параметрах детали и режимов резания. Оценка адекватности модели показала, что погрешность результатов моделирования по сравнению с МКЭ не превышает 10%, что можно считать хорошим показателем для практического использования.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
21 мая 2025 г.

Одобрена после рецензирования:
10 июня 2025 г.

Принята к публикации:
20 июня 2025 г.

Опубликована:
26 июня 2025 г.

Ключевые слова:
моделирование; безразмерные зависимости; фрезерование стеклопластика; нежесткие стенки; деформация; точность обработки.

Для цитирования: Гайст С.В., Марков А.М., Леонов С.Л., Некрасов В.Н. Прогнозирование деформации корпусной детали из стеклопластика с нежесткими стенками при фрезеровании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 42-50. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-42-50, EDN: VRSCZP

Введение

Развитие машиностроения и приборостроения невозможно без применения новых конструкционных материалов. Одним из таких материалов является стеклопластик, относящийся к полимерным композиционным материалам, нашедшим широкое применение при изготовлении деталей различного назначения и конструкций. Значительную долю из общего объема деталей составляют корпусные

детали (до 30%). В особую группу можно выделить корпусные детали с нежесткими стенками [1].

Заготовительный этап при изготовлении изделий из стеклопластика позволяет получать детали с достаточно высокой точностью, но все же недостаточной для некоторых поверхностей, поэтому механическая обработка является неотъемлемой частью процесса при производстве изделий из стеклопластика [2, 3]. Поскольку стеклопластик состоит из разнородных компонентов, отличных по своей природе, то это проявляется в его структуре и физико-механических свойствах и вызывает определенные сложности при фрезеровании. К характерным свойствам можно отнести низкую теплопроводность, анизотропию, способность пропитываться жидкостями [4], склонность к разложению полимерного связующего при высоких температурах (более 300˚С [5]), абразивное воздействие на инструмент при механической обработке [6]. Особую проблему составляет фрезерование корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками [7, 8]. Так как стеклопластик отличается высокой податливостью к деформации в упругой зоне под действием сил резания, это неизбежно сказывается на точности обработанной поверхности [9, 10].

Анализ технических характеристик к типовым изделиям, относящихся к корпусным деталям с нежесткими стенками из стеклопластика, позволил составить перечень требований к показателям точности размеров (9 – 11 квалитет), точности формы поверхностей (отклонение от плоскостности не должно превышать 0,3 мм), по которым осуществляется сопряжение деталей.

Перспективным направлением по прогнозированию влияния режимов резания и конструкторско-геометрических параметров обрабатываемой детали является моделирование с использованием зависимостей в безразмерной форме [11].

Методика исследования

При определении деформации нежесткой стенки в процессе фрезерования корпуса под воздействием сил резания в зависимости от размеров стенки используются зависимости, выраженные в безразмерной форме [12, 13]. Такое преобразование дает расширение диапазона, в котором, во-первых, можно применять модель при адекватных результатах, а во-вторых, в значительной мере упростить ее.

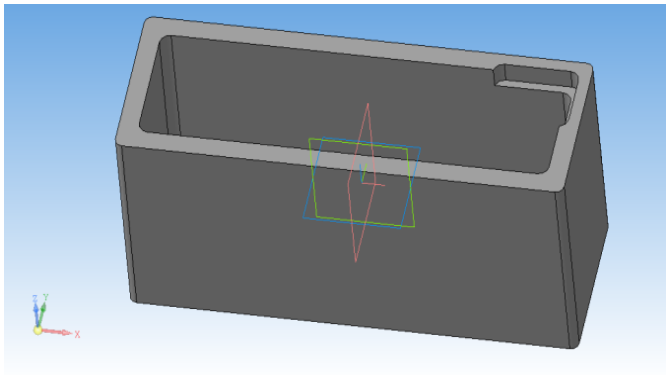

Рис. 1. Модель корпусной детали с нежесткими стенками из стеклопластика
Fig. 1. Model of a body part with non-rigid fiberglass walls

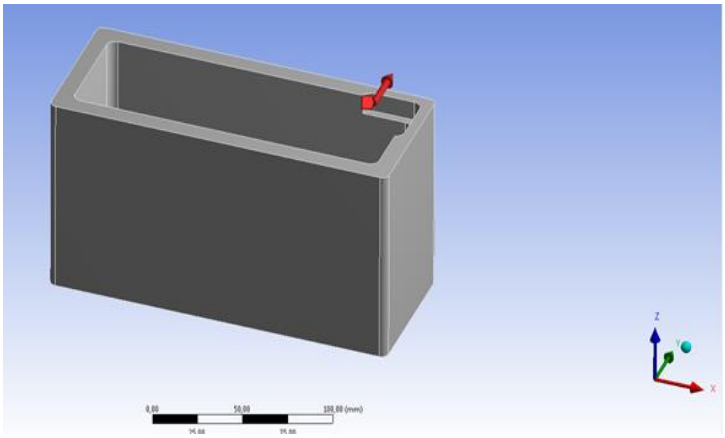

Рис. 2. Отрезок сечения приложения силы к модели детали
Fig. 2. Section section application of force to the part model

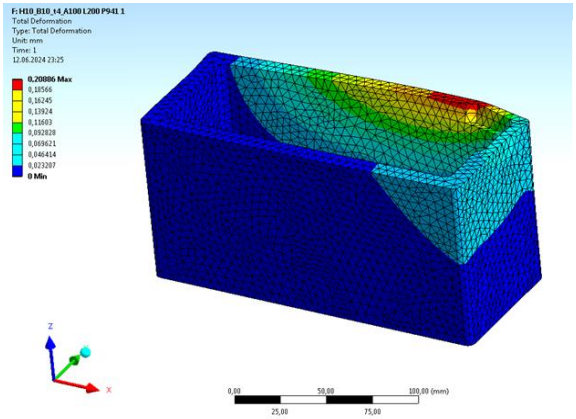

Рис. 3. Результат моделирования деформации стенки корпуса в программном комплексе МКЭ при черновом фрезеровании
Fig. 3. The result of modeling the deformation of the housing wall in the FEM software package during rough milling

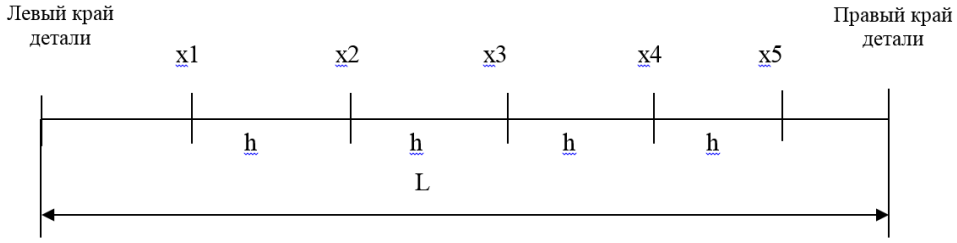

Рис. 4. Схема разделения стенки детали на участки для определения деформации
Fig. 4. The scheme of dividing the wall of the part into sections for determining the deformation

Для этого вместо размерных параметров используют безразмерные комплексы. Количество комплексов меньше количества размерных параметров на величину независимых размерностей. За счет этого количество исследуемых параметров уменьшается, и за счет этого упрощаются зависимости. Кроме того, если в дальнейшем строить зависимости между безразмерными параметрами, то за счет аппроксимации можно дополнительно их упростить.

Модель строилась на основе результатов, которые были получены с использованием метода конечных элементов. Для этого предварительно была создана 3D-модель корпусной детали с нежесткими стенками (Рис. 1). При моделировании МКЭ инструмент принимался абсолютно жестким [14, 15]. Закрепление детали осуществлялось в абсолютно жесткой опоре. Для имитации воздействия инструмента на деталь (модель инструмента) сила прикладывалась в сечении, соответствующем положению инструмента на отрезке, равном ширине фрезерования (Рис. 2). При контактном взаимодействии моделей инструмента и обрабатываемой детали величина силы устанавливалась равной силе резания в направлении возможной деформации детали, то есть в направлении, перпендикулярном поверхности нежесткой стенки [16]. Для исследования деформации нежесткой стенки корпуса из стеклопластика при осуществлении операции концевого фрезерования использовался программный комплекс, реализующий метод конечных элементов. Материал детали задавался путем указания физико-механических свойств стеклопластика. Модель корпуса менялась исходя из положения инструмента с учетом уже снятого материала. Для оценки величины деформации стенки корпуса был проведен статический анализ в нескольких сечениях (Рис. 3).

Рассматривается черновое фрезерование нежесткой стенки корпусной детали из стеклопластика. При принятых режимах чернового фрезерования (V=150 м/мин; S=0,1 мм/зуб; t=4 мм) сила резания в направлении оси Y составляет P_y=223 Н. В качестве размерных параметров в разрабатываемой модели используются: H – толщина стенки (мм); B – ширина фрезерования (мм); t – глубина фрезерования (мм); A – высота детали (мм); L – длина детали (мм); h – шаг между рассчитанными деформациями стенки (мм); Δ – деформация стенки (мм).

Введем безразмерные параметры:

x – безразмерная координата вдоль стенки. (x = 0 – средняя точка) (Рис. 4);

D – безразмерная деформация стенки.

Для расчета безразмерной деформации используется соотношение:

$$D = \Delta / H. \quad (1)$$

Таблица 2. Безразмерная деформация стенки при черновом фрезеровании
Table 2. Dimensionless deformation of the wall during rough milling

x	L = 230 мм.			x	L = 200 мм.			x	L = 150 мм		
	D				D				D		
	A=50	A=100	A=150		A=50	A=100	A=150		A=50	A=100	A=150
-0,304	0,018	0,024	0,031	-0,324	0,012	0,018	0,022	-0,232	0,017	0,02	0,024
-0,152	0,030	0,043	0,047	-0,14	0,023	0,0332	0,035	0	0,021	0,026	0,027
0	0,035	0,051	0,055	0	0,026	0,037	0,04	0,232	0,014	0,018	0,021
0,152	0,032	0,045	0,049	0,14	0,024	0,034	0,037				
0,304	0,019	0,027	0,033	0,324	0,015	0,02	0,024				

Таблица 3. Значения коэффициентов для детали длиной 230мм
Table 3. Coefficient values for a part with a length of 230mm

	A=50	A=100	A=150
a0	0,0000919	0,0001042	0,0001034
a1	0,4578993	0,4390524	0,4590981
a2	-0,4420131	-0,4314263	-0,46105254
a3	-6,8942532	-11,2015234	-10,812633
a4	264,008847	264,1225862	263,518849

Таблица 4. Коэффициенты для расчета a0…a4
Table 4. Coefficients for calculating a0…a4

a01	a02	a21	a22	a41	a42
3,4122E-07	1,4966E-05	2,09714E-06	-0,472212	-0,0034031	227,259
b31	c31	b32	c32	b33	c33
5,02E-06	-0,00064735	-0,00140136	0,160740	0,045132	-12,304

Таким образом, для пяти точек расчета деформации их координаты рассчитываются по формулам:

x1 = -2h/L.
x2 = -h/L.
x3 = 0.
x4 = h/L.
x5 = 2h/L.

Результаты и обсуждение

На основе результатов (Таблица 1) рассчитаны деформации стенки в безразмерной форме по формуле 1 и сведены в Таблицу 2.

Для аппроксимации D(x) использовано выражение:

$$D=a_0\ (x-a_1)(x-a_2)(x-a_3)(x-a_4). \quad (2)$$

Коэффициенты a0…a4 рассчитаны по методу наименьших квадратов. Для детали длиной 230 мм получены значения этих коэффициентов (Таблица 3).

На Рис. 5 приведен график зависимости (2) при рассчитанных коэффициентах, на которых точками отмечены данные из Таблицы 3.

Анализ графика позволяет сделать вывод, что полученные безразмерные зависимости весьма точно повторяют результаты, полученные методом конечных элементов. Таким же образом получены данные о деформации и для стенок другой длины L. При этом установлено, что коэффициенты ai зависят от высоты детали A и длины стенки L. Для учета влияния этих параметров были использованы зависимости:

$$\begin{aligned} &a0 = a01\cdot L + a02;\\ &a1=0{,}4390524\\ &a2 = a21\cdot L + a22;\\ &a4 = a41\cdot L + a42;\\ &a3 = a31\cdot A2 + a32\cdot A + a33; \quad (3)\\ &a31 = b31\cdot L + c31;\\ &a32 = b32\cdot L + c32;\\ &a33 = b33\cdot L + c33. \end{aligned}$$

В Таблице 4 приведены значения коэффициентов зависимостей (3), полученных методом наименьших квадратов.

Результаты моделирования позволяют оценить погрешность аппроксимации деформации стенки в безразмерном виде и адекватность модели. Деформация нежесткой стенки корпуса при различных значениях ее длины (L) и высоты (A) в среднем составила 4,6%. Самая большая погрешность моделирования, которая составила 7,8%, проявилась при расчете на длине детали L – 150мм. Такие показатели погрешности в целом говорят о хорошей сходимости результатов численного эксперимента и предлагаемой модели, ее надежности и возможности использования в практических целях для

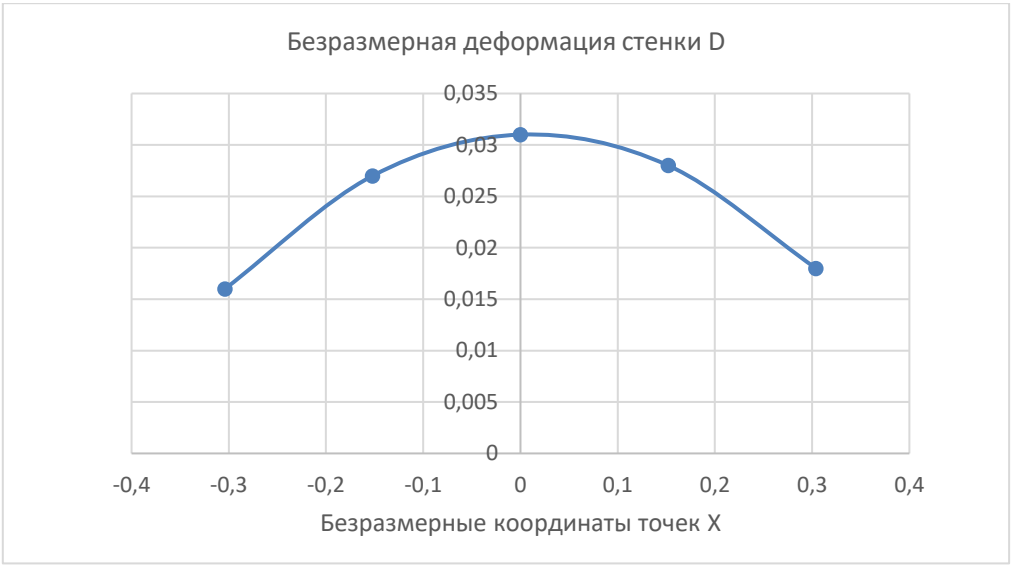

Рис. 5. Аппроксимация деформации в безразмерной форме для чернового фрезерования корпусной детали длиной L= 230мм и высотой A=100 мм

Fig. 5. Approximation of deformation in dimensionless form for rough milling of a body part with a length L= 230 mm and a height A=100 mm

определения деформации обрабатываемой детали. Преимущества модели заключаются в ее относительной простоте, невысокой требовательности к мощности компьютерного оборудования и легкости освоения для решения производственных задач.

Выводы

1. Использование безразмерных комплексов позволяет значительно сократить трудоемкость проведения расчетов деформации нежестких стенок корпусной детали при фрезеровании по сравнению с использованием МКЭ.

2. Разработанная модель оценки влияния схемы нагружения детали (расположение точки приложения силы резания), ее габаритных размеров на значение величины деформации на основе безразмерных комплексов позволяет с погрешностью менее 10% прогнозировать параметры точности фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками.

3. Полученные в статье результаты могут найти применение в технологической подготовке производства для определения режимов резания, выбора параметров инструмента, обеспечения точности изготовления детали корпусных деталей с нежесткими стенками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Баранчиков В. И., Тарапанов А. С., Харламов Г. А. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. М. : Машиностроение, 2002. 264 с.

3. Еренков О. Ю. Технология получения и обработка резанием полимерных композиционных материалов. Комсомольск-на-Амуре : Изд-во ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. 143 с.

5. Гайст С. В., Марков А. М., Черданцев П. О., Катаева С. А., Лапенков Е. Ю. Исследование температуры при фрезеровании стеклопластика // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 123–128.

6. Марков А. М., Некрасов В. Н., Цзянь Су, Салман А. М. С., Гайст С. В., Андреев М. В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании // Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2020. Том 22. № 4. С. 31–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40.

7. 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.

8. Балашов А. В., Потапов И. С., Жидецкая А. С. Выбор способа фрезерования нежестких корпусных деталей в условиях группового производства // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов: Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции (19-20 июня 2015 года) / редкол.: Гречухин А. Н. (отв. редактор). Курск : Юго-Западный гос. ун-т, 2015. С. 32–36.

9. Rao G. V. G., Mahajan P., Bhatnaga N.

Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism // Composites Science and Technology. 2007. № 67. Pp. 2271–2281.

10. Макаров В. Ф., Мешкас А. С., Ширинкин В. В. Оптимизация процесса обработки высокотехнологичных композиционных материалов методом фрезерования // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. ФГБОУ «Уфимский государственный авиационный технический университет». Уфа : РИК УГАТУ, 2017. С. 9–17.

11. Алабужев И. Д. Теория подобия и размерностей. Моделирование. М. : Высшая школа, 1968. 166 с.

12. Безъязычный В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М. : Машиностроение, 2012. 320 с.

13. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. М. : Машиностроение, 1979. 152 с.

14. Chang Deborah D. L. Composite materials: science and applications. 2th ed. London : Springer, 2004. 355 p.

14. Горбунов И. В., Ефременков И. В., Леонтьев В. Л., Гисметулин А. Р. Особенности моделирования процессов механической обработки в CAE системах // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4. С. 846–852.

15. Iliescu D., Gehin D., Iordanoff I. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting // Composites Science and Technology. 2010. № 70. Pp. 73–80.

16. Mkaddem A., Demirci I., Mansori M. E. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis // Composites Science and Technology. 2008. № 68. Pp. 3123–3127.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Гайст Сергей Валерьевич, старший преподаватель, ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И. И. Ползунова, (656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8697-6263, e-mail: sergei_gaist@mail.ru

Марков Андрей Михайлович, профессор, ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И. И. Ползунова, (656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46), доктор техн. наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3101-9711, e-mail: andmarkov@inbox.ru

Леонов Сергей Леонидович, профессор, ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И. И. Ползунова, (656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46), доктор техн. наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0000-0000-0000, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Некрасов Вячеслав Николаевич, доцент, ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И. И. Ползунова, (656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46), канд. техн. наук., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8122-4641, e-mail: sla44@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Гайст Сергей Валерьевич – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Марков Андрей Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Леонов Сергей Леонидович – научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Некрасов Вячеслав Николаевич – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

PREDICTION OF DEFORMATION OF A FIBERGLASS BODY PART WITH NON-RIGID WALLS DURING MILLING

Sergey V. Gaist *, Andrey M. Markov, Sergey L. Leonov, Vyacheslav N. Nekrasov

Polzunov Altai State Technical University (AltSTU)

* for correspondence: sergei_gaist@mail.ru

Abstract.
The paper presents a method for predicting the elastic deformation of a body part with non-rigid fiberglass walls during milling using dimensionless dependencies. With the widespread introduction of composite materials into machine-building production, a significant number of products require mechanical processing, including body parts. One of the important problems that arise when cutting fiberglass is its significant elastic deformation from the action of cutting forces. The problem is compounded in the case of processing parts with non-rigid elements, in particular with non-rigid walls. The solution can be found in the assignment of rational cutting modes, characterized by a change in the processing process to control the cutting force, thus ensuring equality of the cut allowance and sufficient processing accuracy. For hard sections, the modes can be tightened, thereby increasing productivity. A reasonable approach for choosing cutting modes is to simulate the elastic deformation of a part during machining. One of the modeling methods showing reliable results is the finite element method (FEM). But its application involves the use of expensive software, significant computing power and a lot of time. As an alternative, the paper suggests using a model based on dimensionless dependencies, which can be built on the basis of experimental data or FEM modeling results. The obtained model makes it possible to predict the elastic deformation of the non-rigid wall of the body part at specified parameters of the part and cutting modes. The assessment of the adequacy of the model showed that the error of the simulation results compared to the FEM does not exceed 10%, which can be considered a good indicator for practical use.

Article info
Received:
21 May 2025

Accepted for publication:
10 June 2025

Accepted:
20 June 2025

Published:
26 June 2025

Keywords: *modeling; dimensionless dependencies; fiberglass milling; non-rigid walls; deformation; precision machining.*

For citation: Gaist S.V., Markov A.M., Leonov S.L., Nekrasov V.N. Prediction of deformation of a fiberglass body part with non-rigid walls during milling. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):42-50. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-42-50, EDN: VRSCZP

REFERENCES

1. 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.

2. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. Processing of special materials in mechanical engineering: a handbook. M.: Mashinostroenie; 2002. 264 p.

3. Yerenkov O.Y. Technology of obtaining and cutting polymer composite materials. Komsomolsk-on-Amur: Publishing House of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "KnAGTU"; 2014. 143 p.

5. Gaist S.V., Markov A.M., Cherdantsev P.O., Kataeva S.A., Lapenkov E.Yu. Investigation of temperature during fiberglass milling. *Actual problems in mechanical engineering.* 2016; 3:123–128.

6. Markov A.M., Nekrasov V.N., Jian Su, Salman A.M.S., Gaist S.V., Andreev M.V. Technological quality assurance of the surface layer of fiberglass composites during end milling. *Metalworking (technology • equipment • tools).* 2020; 22(4):31–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40.

7. Gaist S.V., Leonov S.L., Markov A.M., Nekrasov V.N. Method of adaptive control of the cutting process during machining of parts made of composite materials. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University.* 2023; 2(156);15–27. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-15-27.

8. Balashov A.V., Potapov I.S., Zhidetskaya A.S. The choice of milling method for non-rigid body parts in group production. *Metalworking complexes and robotic systems are promising areas of research for young scientists and specialists: Collection of scientific papers*

of the International Scientific and Technical Conference. June 19-20, 2015. Editorial board.: Grechukhin A.N. (editor-in-chief). Kursk: South-Western State University; 2015. Pp. 32–36.

9. Rao G.V.G., Mahajan P., Bhatnaga N. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism. *Composites Science and Technology.* 2007; 67:2271–2281.

10. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Optimization of the process of processing high-tech composite materials by milling. *Modern trends in metalworking technologies and structures of metalworking machines and components: materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Journal. conf.* Ufa State Aviation Technical University. Ufa: RIK UGATU; 2017. Pp. 9–17.

11. Alabuzhev I.D. Theory of similarity and dimensions. Modeling. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1968. 166 p.

12. Bezyazychny V.F. Method of similarity in mechanical engineering technology. M.: Mashinostroenie; 2012. 320 p.

13. Silin S.S. Method of similarity in cutting materials. M.: Mashinostroenie; 1979. 152 p.

14. Chang Deborah, D.L. Composite materials: science and applications. 2th ed. London: Springer; 2004. 355 p.

14. Gorbunov I.V., Efremenkov I.V., Leontiev V.L., Gismetulin A.R. Features of modeling of mechanical processing processes in SAE systems. *Izvestiya Samarskogo nauki tsentra RAS.* 2013; 15(4):846–852.

15. Iliescu D., Gehin D., Iordanoff I. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting. *Composites Science and Technology.* 2010; 70:73–80.

16. Mkaddem A., Demirci I., Mansori M.E. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis. *Composites Science and Technology*. 2008; 68:3123–3127.

© 2025 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:

Sergey V. Gaist, Senior Lecturer, Polzunov AltSTU, (46 Lenin Ave., Barnaul, 656038, Russia), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8697-6263, sergei_gaist@mail.ru

Andrey M. Markov, Professor, Polzunov AltSTU, (656038, Barnaul, Russia, Lenin ave. 46), Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3101-9711, andmarkov@inbox.ru

Sergey L. Leonov, Professor, Polzunov AltSTU, (46 Lenin Ave., Barnaul, 656038, Russia), Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0000-0000-0000, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Vyacheslav N. Nekrasov, Associate Professor, Polzunov AltSTU, (46 Lenin Ave., Barnaul, 656038, Russia), Candidate of Technical Sciences, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8122-4641, sla44@mail.ru

Contribution of the authors:

Sergey V. Gaist – formulation of the research problem, review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Andrey M. Markov – formulation of the research problem, scientific management, conceptualization of the study, collection and analysis of data, conclusions, writing the text.

Sergey L. Leonov – scientific management, conceptualization of the study, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

Vyacheslav N. Nekrasov – review of relevant literature, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing of text.

All authors have read and approved the final manuscript.