

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА МЯГКИХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В.Д. Зарецкая

zaretskayavd@student.bmstu.ru  
SPIN-код: 3623-0198

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена проблема обработки тонкостенных деталей. Ребра таких деталей испытывают значительные деформации при механической обработке, что усложняет соблюдение заданного качества точности. Подбор правильного режима резания позволит снизить прогиб детали так, что размеры готового изделия не выйдут за пределы поля допуска. Расчет параметров режима резания может быть весьма трудоемким, а значит, необходимо предусмотреть его автоматизацию. Цель исследования — разработать алгоритм автоматизации расчетов режимов резания тонкостенных деталей, при котором размеры готового изделия будут входить в пределы поля допуска заданного качества точности. Методы исследования включают анализ существующих методов решения проблемы, анализ деформаций детали при обработке фрезерованием, поиск решений по интеграции различных программ для автоматизации расчетов. Проведено моделирование детали в программном комплексе ANSYS при обработке на стандартных режимах резания и на смягченных режимах, полученных при применении алгоритма. Результаты показывают существенное улучшение параметров готового изделия.

### Ключевые слова

Тонкостенные детали, фрезерование, мягкие режимы резания, точность обработки, вафельные конструкции, деформация, оптимизационный поиск, производство деталей в авиации

Поступила в редакцию 21.06.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

---

**Введение.** В современной промышленности возникает проблема обработки тонкостенных деталей. Детали типа вафельной конструкции состоят из множества пересекающихся тонких ребер, которые могут испытывать значительные деформации при обработке. Помимо этого на точность детали влияют остаточные напряжения и вибрации детали во время обработки. Нагруженное состояние стенок детали во время обработки напрямую зависит от силы резания, а значит, подбор правильного режима резания позволит снизить прогиб детали так, что размеры готового изделия не выйдут за пределы поля допуска.

**Выбор объекта исследования.** В качестве объекта исследования выбрана вафельная нервюра крыла самолета (рис. 1). Это несущий поперечный элемент крыла, передающий напряжения с внутренних элементов и агрегатов крыла на обшивку самолета. Данный тип конструкции состоит из множества пересекаю-

щихся ребер, которые повышают прочность детали при меньшей массе, что важно для авиационной промышленности [1, 2].

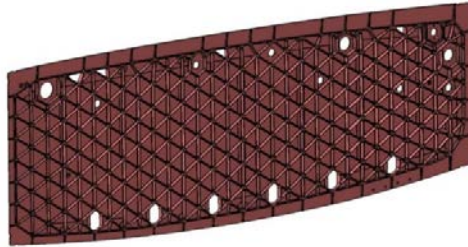


Рис. 1. Вафельная конструкция нервюры

**Аналитический расчет параметров режимов резания.** К основным расчетным параметрам режимов резания относятся глубина резания  $t$ , подача на зуб фрезы  $s_z$ , скорость резания  $v$  и частота вращения  $n$ .

Различают подачу на один зуб  $s_z$ , подачу на один оборот фрезы  $s$ , минутную подачу  $s_M$ , мм/мин, которые связаны формулой

$$s_M = sn = s_z zn,$$

где  $n$  — частота вращения фрезы, об/мин;  $z$  — число зубьев фрезы.

Непосредственно при расчетах подача входит только в формулу, по которой рассчитывают толщину среза:

$$a = s_z \sin \psi_0,$$

где  $\psi_0$  — угол контакта фрезы с поверхностью.

Скорость резания  $v$  для фрезерования рассчитывают по формуле

$$v = \frac{C_p d^q}{T^m t^x s_z^y B^u z^p} K_v,$$

где  $C_p$  — коэффициент, зависящий от материала обрабатываемой заготовки;  $T$  — период стойкости инструмента, мин;  $t$  — глубина резания, мм;  $s_z$  — подача на зуб фрезы, мм/об;  $m, x, y, u, p, q$  — показатели степеней;  $K_v$  — поправочный коэффициент;  $d$  — диаметр фрезы, мм.

Частоту вращения шпинделя рассчитывают по формуле

$$n = \frac{1000v}{\pi d}, \quad (*)$$

где  $v$  — скорость резания, мм/мин;  $d$  — диаметр фрезы, мм.

**Факторы, влияющие на точность обработки.** На современном производстве существует множество способов решения проблемы деформации тонко-

стенных деталей при обработке [3, 4], однако все они в основном подразумевают привлечение дополнительных технологических средств: разработку новой оснастки и специальных материалов, подбор инструмента и оборудования и прочее (рис. 2). Такие методы требуют дополнительных финансовых затрат и трудовых ресурсов, поэтому наиболее приемлемым решением является обработка деталей на мягких режимах резания [5]. Это режимы рассчитаны с помощью цифрового моделирования процесса резания и оптимизационных математических расчетов так, чтобы деформация заготовки не превышала установленных пределов.



Рис. 2. Методы уменьшения деформации при обработке тонкостенных деталей

Чистота поверхности при фрезеровании зависит от таких параметров фрезы, как точность изготовления, точность ее установки и число зубьев фрезы [6]. Концевые фрезы с большим числом зубьев обеспечивают более точную обработку, поскольку на каждый зуб приходится меньшее количество срезаемого материала.

К технологическим параметрам, влияющим на точность обработки, относят подачу, число оборотов и глубину резания, в меньшей мере и скорость резания [6].

Чистота обработанной поверхности значительно улучшается при увеличении температуры. Увеличение скорости резания оказывает меньшее влияние на чистоту обработанной поверхности. При увеличении подачи и глубины резания чистота обработанной поверхности ухудшается. Температура обрабатываемой детали оказывает значительно большее влияние на чистоту обработанной поверхности, чем на стойкость инструмента [7].

Нагрузки на тонкие стенки деталей при обработке можно снизить также в результате подбора стратегии обработки — траектории хода фрезы и стратегии врезания. Правильное соотношение глубины и ширины резания позволяет снизить радиальную силу резания [8].

**Исследования зависимости силы резания от параметров режимов резания.** Анализ математических соотношений между параметрами режима резания и факторами, влияющими на степень деформации детали, показал, что значение силы резания зависит от подачи и глубины резания (рис. 3, 4).

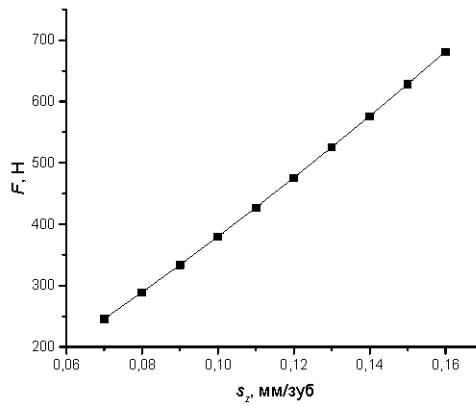


Рис. 3. График зависимости силы резания от подачи на зуб

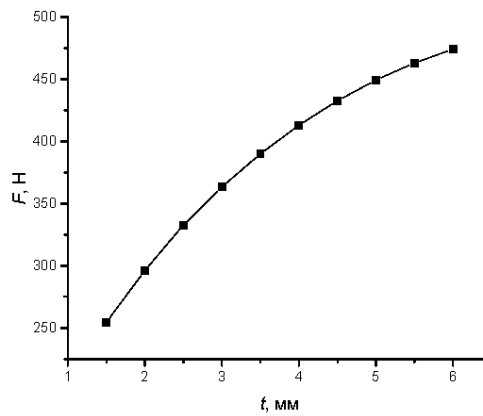


Рис. 4. График зависимости силы резания от глубины резания

Вторым варьируемым параметром является износ инструмента. Степень износа по задней поверхности зуба инструмента возрастает со временем. Поэтому требуется определить такое значение скорости резания, при котором за время обработки износ инструмента не превысит максимально допустимого значения (рис. 5) [1].

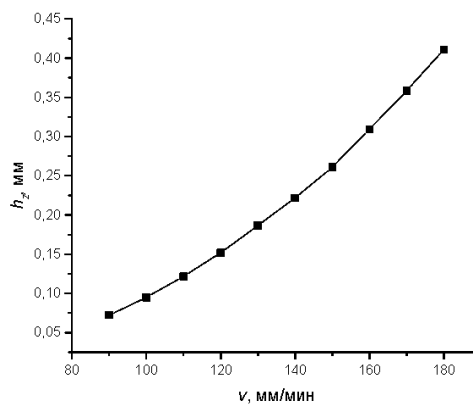


Рис. 5. Зависимость износа инструмента от скорости резания

**Общий алгоритм работы подсистемы определения режимов резания.** Все вышеперечисленные выкладки требуют значительных затрат времени и труда при ручных расчетах. Однако можно предусмотреть систему автоматизации вычислений, подобных тем, что уже реализованы для точения [9]. Составлена блок-схема алгоритма, охватывающего все этапы нахождения максимально допустимой силы резания детали (рис. 6).

Задача расчета состоит в последовательном нахождении оптимального значения силы резания, затем выбора значений подачи на зуб и глубины резания, а также значения скорости резания. На основании полученных данных по формуле (\*) определяется значение частоты вращения фрезы.

**Оптимизационный поиск параметров режима резания по силе резания и степени износа инструмента.** В лучшем случае необходимо провести многокритериальный анализ параметров режимов резания и с помощью их вариации добиться оптимального значения силы резания [10]. Однако с учетом приведенных в предыдущем пункте зависимостей расчеты можно свести к оптимизационному поиску значения подачи и глубины резания на основе смоделированного значения силы резания, а также значения скорости на основе заданной предельно допустимой величины износа инструмента.

Значение максимальной силы резания определяется в результате работы генетического алгоритма, встроенного в программный комплекс ANSYS (инструмент Response Surface). Алгоритм выдает некоторую популяцию подходящих значений сил резания, которые удовлетворяют заданному в модуле Optimization значению поля допуска. Наиболее пригодное значение силы резания участвует в дальнейших расчетах [11, 12].

Задача поиска значения подачи на зуб и глубины резания при фиксированном максимальном значении силы резания решается по алгоритму проведения многомерной оптимизации. Для этого необходимо записать функцию погрешности — отклонения расчетных значений силы резания от соответствующего смоделированного значения:



Рис. 6. Блок-схема работы алгоритма

$$f(s_z, t) = \left( \frac{F(s_z, t) - F_{\max}}{F_{\max}} \right)^2,$$

где  $F_{\max}$  — максимальное значение режущей силы, при котором отклонения не выходят за пределы поля допуска, полученное в результате предварительного;  $F(s_z, t)$  — зависимость силы резания от величины подачи на зуб и глубины резания.

Для поиска подходящего значения скорости резания по износу инструмента выбран алгоритм для проведения одномерной оптимизации. Необходимо определить и затем минимизировать целевую функцию, чтобы подобрать удовлетворительное значение скорости:

$$f(v) = \left( \frac{h_z(v) - h_{z\max}}{h_{z\max}} \right)^2,$$

где  $h_{z\max}$  — максимальное допустимое значение износа по задней поверхности зуба фрезы, представленное в исходных данных, взятое из характеристик инструмента;  $h_z(v)$  — зависимость износа задней поверхности зуба от скорости резания.



Рис. 7. Схема программной и технологической реализации алгоритма определения режимов резания

**Выбор средств реализации.** Для реализации полученного алгоритма необходимо выбрать программные средства, отвечающие требованиям решения задачи. Расчет и поиск значения силы резания можно выполнять в программном комплексе ANSYS, в котором есть встроенные механизмы оптимизации по за-

данным параметрам модели нагружения и величине допуска размеров, а также проведения моделирования результатов и расчет деформаций [12]. Помимо этого, в нем предусмотрен внутренний механизм интеграции с Excel, который является наиболее простым и доступным инструментом для математических вычислений. Таким образом, исходные данные вводятся в Excel и импортируются в ANSYS. Пользователю необходимо задать параметры нагружения и закрепления заданной модели ребра детали. Далее значения, полученные в данном блоке, передаются в блок решения задачи оптимизации. Необходимо задать условие, по которому будет осуществляться оптимизационный поиск. В данном случае для нахождения максимально допустимого значения силы необходимо максимизировать отклонение стенок, не превышающее значения, определенно-го полем допуска.

**Результаты применения алгоритма.** Проанализирована применимость алгоритма для расчета режима резания для обработки конструкции тонкостенной нервюры. Расчет режима резания был проведен двумя способами: с помощью стандартного калькулятора фирмы Sandvik и приведенного в статье алгоритма. Результаты обоих вычислений приведены в таблице, а моделирование результатов в ANSYS показано на рис. 8, 9.

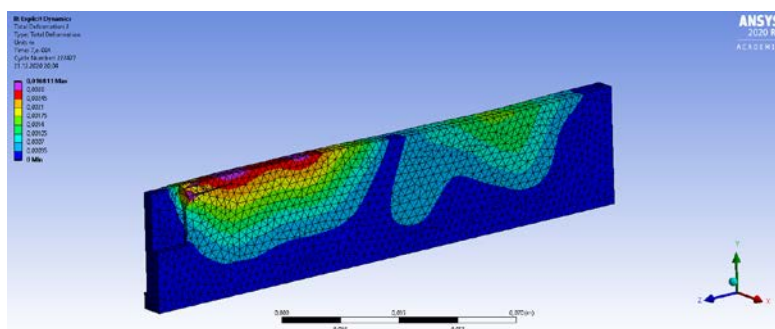


Рис. 8. Результат моделирования обработки в ANSYS на основании режимов резания, полученных при применении алгоритма

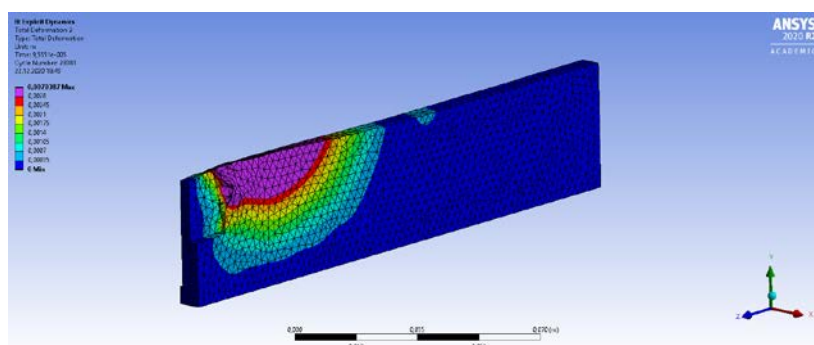


Рис. 9. Результат моделирования обработки в ANSYS на основании режимов резания, полученных с помощью калькулятора Sandvik

## Сравнение режимов резания, полученных различными способами

Параметр	Алгоритм	Sandvik
Ширина резания, мм	4	16
Глубина резания, мм	1,1124	4,02
Подача на зуб, мм/зуб	0,0613	0,216
Скорость резания, мм/мин	107	409
Частота вращения, об/мин	2129,7	8140
Максимальная деформация, м	0,016	0,007
Основное время, мин	14,7	1,19

**Заключение.** В данной статье был рассмотрен метод расчета мягких режимов резания [5] для регулирования деформации стенок детали при обработке, что позволяет повысить точность готового изделия. Результаты показывают, что стандартный калькулятор может позволить снизить время обработки за счет повышенной подачи и частоты вращения, однако разработанный алгоритм учитывает заданный допуск размеров и подбирает соответствующую допустимую силу резания, поэтому больше подходит для высокоточной обработки тонкостенных деталей.

## Литература

- [1] Грубый С.В., Зайцев А.М. Оптимизация режимных параметров фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов. *Наука и образование. Научное издание*, 2015, № 7. URL: <http://engineering-science.ru/doc/780928.html>
- [2] Maslov A.R., Tivirev E.G. Study of machineability of high strength aluminum alloy in end-milling processes. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, no. 1, art. 150036. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0036076>
- [3] Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2019, т. 21, № 3, с. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27>
- [4] Гаврюшин С.С., Жаргалова А.Д., Лазаренко Г.П. и др. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 11, с. 53–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-11-53-61>
- [5] Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С., Лазаренко Г.П. и др. О «мягких» режимах резания для обработки тонкостенных деталей. *Наукоедение*, 2016, т. 8, № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/117TVN616.pdf>
- [6] Честнов А.Л. Технология изготовления измерительных инструментов и приборов. М., Машгиз, 1952.
- [7] Итоги науки и техники: Серия "Резание металлов, станки и инструменты". Гос. ком. Совета Министров СССР по науке и технике. Т. 3. М., АН СССР. ВИНТИ, 1975.
- [8] Руководство по металлообработке: точение, фрезерование, сверление. Sandvik Coromant, 2010.



- [9] Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Лазаренко Г.П. Интегрированная система поддержки принятия решения о выборе режимов механической обработки тонкостенных деталей. Свид-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2016663071. Зарег. 09.09.2016, опубл. 28.11.2016.
- [10] Богданова Л.М., Васильева Л.В., Гузенко Д.Е. и др. Программный комплекс решения задачи многокритериальной оптимизации со стохастическими ограничениями. *Кибернетика и системный анализ*, 2018, т. 54, № 6, с. 181–188.
- [11] Путинцева А.В. Оптимизация элементов конструкции с помощью генетического алгоритма в существующих программных продуктах. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*, 2016, № 94, с. 137–142.
- [12] Perng YY., Will J. Optimization in ANSYS Workbench. ANSYS, Inc., 2011.

**Зарецкая Виктория Дмитриевна** — студентка кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Научный руководитель** — Жаргалова Аягма Дашибалбаровна, старший преподаватель кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Зарецкая В.Д. Алгоритм расчета мягких режимов фрезерной обработки тонкостенных деталей. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 07(60). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-07-715>

---

## COMPUTATION ALGORITHM FOR SOFT MODES OF MILLING THIN-WALLED PARTS

V.D. Zaretskaya

zaretskayavd@student.bmstu.ru

SPIN-code: 3623-0198

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

The problem of processing thin-walled parts is considered. The ribs of such parts undergo significant deformation during machining, which complicates the observance of the specified quality of accuracy. The selection of the correct cutting mode will reduce the deflection of the part so that the dimensions of the finished product will not go beyond the tolerance range. The calculation of the parameters for the cutting mode can be very laborious, which means it is necessary to provide for its automation. The purpose of the study is to develop an algorithm for automating the calculations for cutting modes for thin-walled parts, in which the dimensions of the finished product will be within the tolerance range of a given quality of accuracy. Research methods include the analysis of existing methods for solving the problem, the analysis of the deformations of the part during milling, the search of solutions for the integration of various programs for the automation of calculations. The part was modeled in the ANSYS software package when processing at standard cutting conditions and at softened modes obtained by applying the algorithm. The results show a significant improvement of the parameters of the finished product.

**Keywords**

Thin-walled parts, milling, soft cutting conditions, machining accuracy, wafer structures, deformation, optimization search, production of parts in aviation

Received 21.06.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

**References**

- [1] Grubby S.V., Zaytsev A.M. Best cutting conditions for pocket milling in aluminium alloy body parts. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 7. URL: <http://engineering-science.ru/doc/780928.html> (in Russ.).
- [2] Maslov A.R., Tivirev E.G. Study of machineability of high strength aluminum alloy in end-milling processes. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, no. 1, art. 150036. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0036076>
- [3] Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavryushin S.S. Problem of technological deformations of thin-walled workpieces during milling. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2019, vol. 21, no. 3, pp. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27> (in Russ.).
- [4] Gavryushin S.C., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P., et al. The method of determining the conditions for machining thin-walled parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*.

- Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2015, no. 11, pp. 53–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-11-53-61> (in Russ.).
- [5] Zhargalova A.D., Gavryushin S.C., Lazarenko G.P., et al. About soft modes of cutting for processing thin-walled parts. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/117TVN616.pdf> (in Russ.).
- [6] Chestnov A.L. Tekhnologiya izgotovleniya izmeritel'nykh instrumentov i priborov [Production technology for measuring tools and devices]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952 (in Russ.).
- [7] Itogi nauki i tekhniki: Seriya "Rezanie metallov, stanki i instrumenty". Gos. kom. Soveta Ministrov SSSR po nauke i tekhnike. T. 3 [Outcomes of science and technologies: Ser. "Metal cutting, machines and tools" of USSR Ministry Government Office on science and technics. Vol. 3]. Moscow, AN SSSR. VINITI Publ., 1975 (in Russ.).
- [8] Rukovodstvo po metalloobrabotke: tochenie, frezerovanie, sverlenie [Handbook on metal processing: turning, milling, drilling]. Sandvik Coromant Publ., 2010 (in Russ.).
- [9] Eremykin P.A., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P. Integrirovannaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya o vybore rezhimov mekhanicheskoy obrabotki tonkostennykh detaley. Svid-vo o gos. reg. progr. dlya EVM 2016663071 [Integrated system for decision making support on choice of mechanical processing regimes for thin-walled parts. Software registration certificate no. 2016663071]. Reg. 09.09.2016, publ. 28.11.2016 (in Russ.).
- [10] Bogdanova L.M., Vasil'yeva L.V., Guzenko D.E., et al. A software complex for solving the multi-criteria optimization problem with stochastic constraints. *Kibernetika i sistemnyy analiz* [Cybernetics and Systems Analysis], 2018, vol. 54, no. 6, pp. 181–188 (in Russ.).
- [11] Putintseva A.V. Optimization of structural elements by means of genetic algorithms in existing software products. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashi3nostroenie*, 2016, no. 94, pp. 137–142 (in Russ.).
- [12] Perng YY., Will J. Optimization in ANSYS Workbench. ANSYS, Inc., 2011.

**Zaretskaya V.D.** — Student, Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Zhargalova A.D., Senior Lecturer, Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Zaretskaya V.D. Computation algorithm for soft modes of milling thin-walled parts. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 07(60). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-07-715.html> (in Russ.).