

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-101-108

\*Дурыхин А.А., Хуртасенко А.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: durykhinandrey@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ДЕФОРМАЦИИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ НЕЖЕСТКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрены стратегии фрезерной обработки тонкостенных элементов деталей из алюминиевых сплавов и их влияние на статические деформации, возникающие в ходе резания.

Произведено моделирование нагружений заготовок в процессе обработки. При моделировании применены различные стратегии обработки для различных параметров тонкой стенки. Вариации стратегий обусловлены положением поддерживающего элемента относительно обрабатываемой поверхности или его отсутствием, а также геометрическими параметрами тонкостенного элемента. Предложен вариант модернизации стратегии обработки, заключающийся в использовании зигзагообразных рабочих проходов с наклоном фрезы по углу опережения в комплексе с обработкой с поддерживающими элементами. Изучены результаты конечно-элементного анализа, произведенного с использованием САПР Siemens NX. Проведено сравнение полученных данных между собой и с критическими справочными значениями механических свойств обрабатываемого материала.

Установлено, что использование стратегий с поддерживающими элементами и применение угла опережения инструмента способствует снижению статических деформаций материала заготовки в ходе процесса резания. Это приводит к сокращению количества чистовых проходов, и уменьшению времени обработки.

**Ключевые слова:** фрезерование, фрезерная обработка, нежесткий элемент, тонкая стенка, алюминиевый сплав, деформации, метод конечных элементов.

**Введение.** Оптимизация обработки резанием тонких перекрытий заключается в регулировании таких параметров как: остаточный припуск для чистового прохода, метод обработки углов и траектория инструмента.

Наиболее явно пронаблюдать оптимизацию обработки с целью сокращения отжатия стенки возможно при применении иной траектории инструмента, которая приведет к повышению стабильности заготовки.

Использование различных стратегий фрезерования дает возможность подбора оптимальной траектории резания для минимизации напряжений, деформаций и как следствие оптимизации времени обработки.

Целью данной работы являлось моделирование вариаций процессов фрезерной обработки и изучения деформаций обрабатываемого нежесткого элемента для определения зависимостей величин деформаций и геометрических параметров тонкой стенки.

**Методология.** Нежесткие стенки можно отнести к одной из 3-х групп. Группировка производится по отношению высоты к толщине элемента:

- Элементы с малым отношением высоты к толщине  $< 15:1$ ;
- Элементы со средним отношением высоты к толщине  $< 30:1$ ;
- Элементы с большим отношением высоты к толщине  $> 30:1$ .

Для каждой из групп предполагается использование различных схем обработки стенок-перегородок [1].

Для деталей, имеющих малое отношение высоты к толщине стенки  $< 15:1$  используют метод фрезерования с чередованием обработки сторон, с одинаковой глубиной резания, с перекрытием двух проходов обработки (рис. 1).

Метод обеспечивает поддержку материала в обрабатываемой точке. Припуск под последующую чистовую обработку оставляется с обеих сторон перегородки.

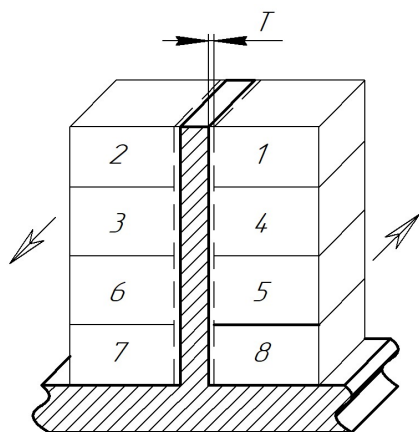


Рис. 1. Обработка с поддерживающими участками

Для деталей, со средним отношением высоты к толщине стенки  $< 30:1$  проходы следует выполнять по траектории с перекрытием проходов (рис. 2).

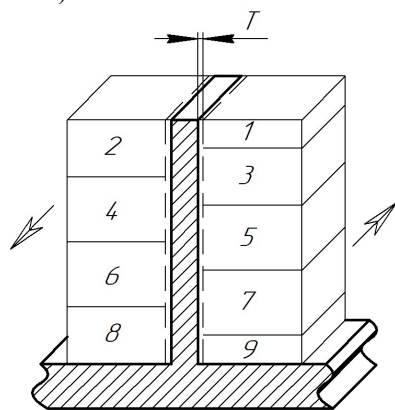


Рис. 2. Траектория обработки тонкой стенки с перекрытием проходов

Смысл метода в том, чтобы производить обработку проходами с разной начальной глубиной резания, перекрывающими друг друга относительно оси стенки, тем самым обеспечивая большую поддержку на последующий проход. Припуск для последующей чистовой обработки должен составлять не менее  $0,2-1$  мм на сторону.

При обработке стенки с большим отношением высоты к толщине  $> 30:1$  в дополнение к чередованию сторон при фрезеровании желаемая толщина стенки достигается поэтапно – «ёлочкой» (рис. 3).

В ходе обработки более тонкое сечение всегда опирается на расположенные ниже толстые сечения. Фрезерование выполняется сверху вниз по стенке.

В программе Siemens NX были созданы модели нагружения заготовки при обработке тонкостенных элементов для каждой из групп по отношению высоты к толщине. В качестве расчетного модуля используется NX Nastran для проведения конечно-элементного анализа процесса.

Для каждой группы смоделирована обработка с использованием двух стратегий – поочередная послойная обработка с обеих сторон

стенки и обработка с поддерживающими элементами.

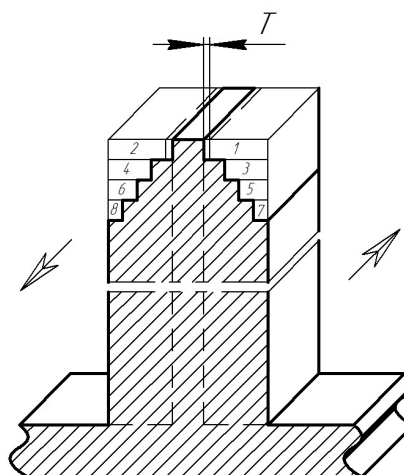


Рис. 3. Траектория обработки «Елочкой» с чередованием сторон стенки

Исследуемый конструктивный элемент – стенка с параметрами:  $W = 5$  мм,  $L = 200$  мм. Высота  $H$  варьируется для моделирования трех групп тонкостенных элементов –  $75$  мм,  $150$  мм и  $225$  мм. Боковые грани не зафиксированы, ограничение – заделка по нижней грани (рис. 4)

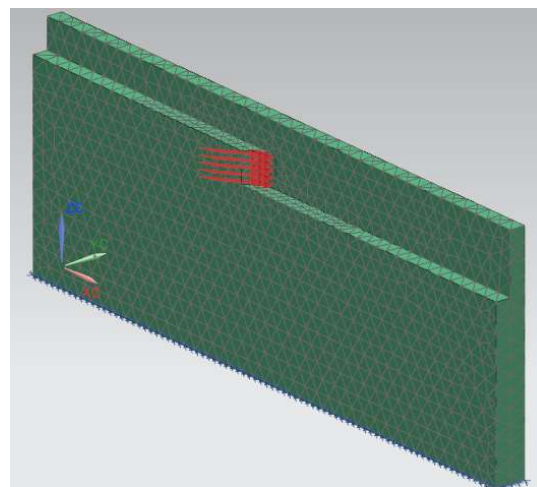


Рис. 4. Общая схема нагружки заготовок

Моделируется черновой сьем материала, т.к. при данной обработке на заготовку осуществляется максимальные силовые нагрузки, которые могут привести к деформации.

**Основная часть.** Актуальная схема чистовой обработки заключается в многопроходном поочередном фрезеровании каждой из сторон, и необходима для компенсации деформации и постепенного снятия внутренних напряжений [2–6].

Сокращение деформации и отжати на черновом этапе обработки, снижает необходимость в корректировке получаемых геометрических параметров элемента, что в свою очередь миними-

зирует количество чистовых проходов, производимых для получения необходимой точности готового элемента. Сокращение количества чистовых проходов приводит к сокращению общего времени обработки, что является основным параметром оптимизации процесса механической обработки.

Режимы резания для обработки каждой группы не изменяются:

Глубина резания  $t = 5$  мм, подача на зуб  $S_z = 0,05$  мм/зуб, кол-во зубьев  $z = 6$ , диаметр фрезы  $D = 12$  мм, частота вращения шпинделя  $n = 4500$  об/мин.

Для определения силы, действующей на заготовку в зоне резания при снятии стружки, необходимо рассчитать составляющие силы резания (рис. 5).

Тангенциальная составляющая силы резания определяется по формуле (1), справочная информация с формулами и коэффициентами [7]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^{xp} \cdot S_z^{yp} \cdot B_{\Phi}^{up} \cdot z}{D^q \cdot v^{wp}} \cdot K_{mp} \quad (1)$$

$$P_z = 911 \text{ Н}$$

Суммарная окружная, или касательная, сила  $P_z$  и радиальная сила  $P_y$  имеют равнодействующую  $R$ , которую можно разложить на две

силы – горизонтальную  $P_r$  и вертикальную  $P_v$  [8, 9].

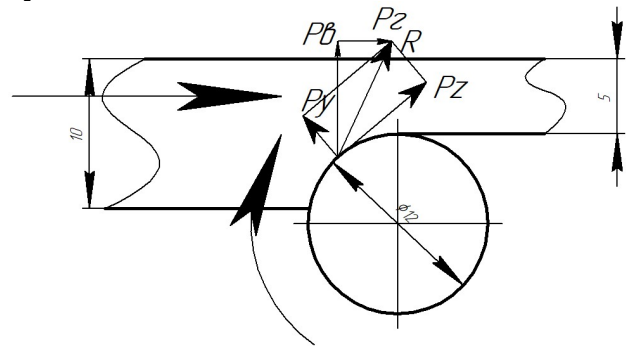


Рис. 5. Схема сил резания при попутном фрезеровании

При попутном фрезеровании, для усредненного расчета применяют соотношений (2) и (3):

$$P_r \approx (0,8 \div 0,9)P_z; \quad (2)$$

$$P_v \approx (0,75 \div 0,8)P_z; \quad (3)$$

Для моделирования приняты значения  $P_r \approx 819,9$  Н,  $P_v \approx 788,8$  Н, результирующая сила  $R \approx 1549$  Н.

Результаты моделирования (рис. 6–8).

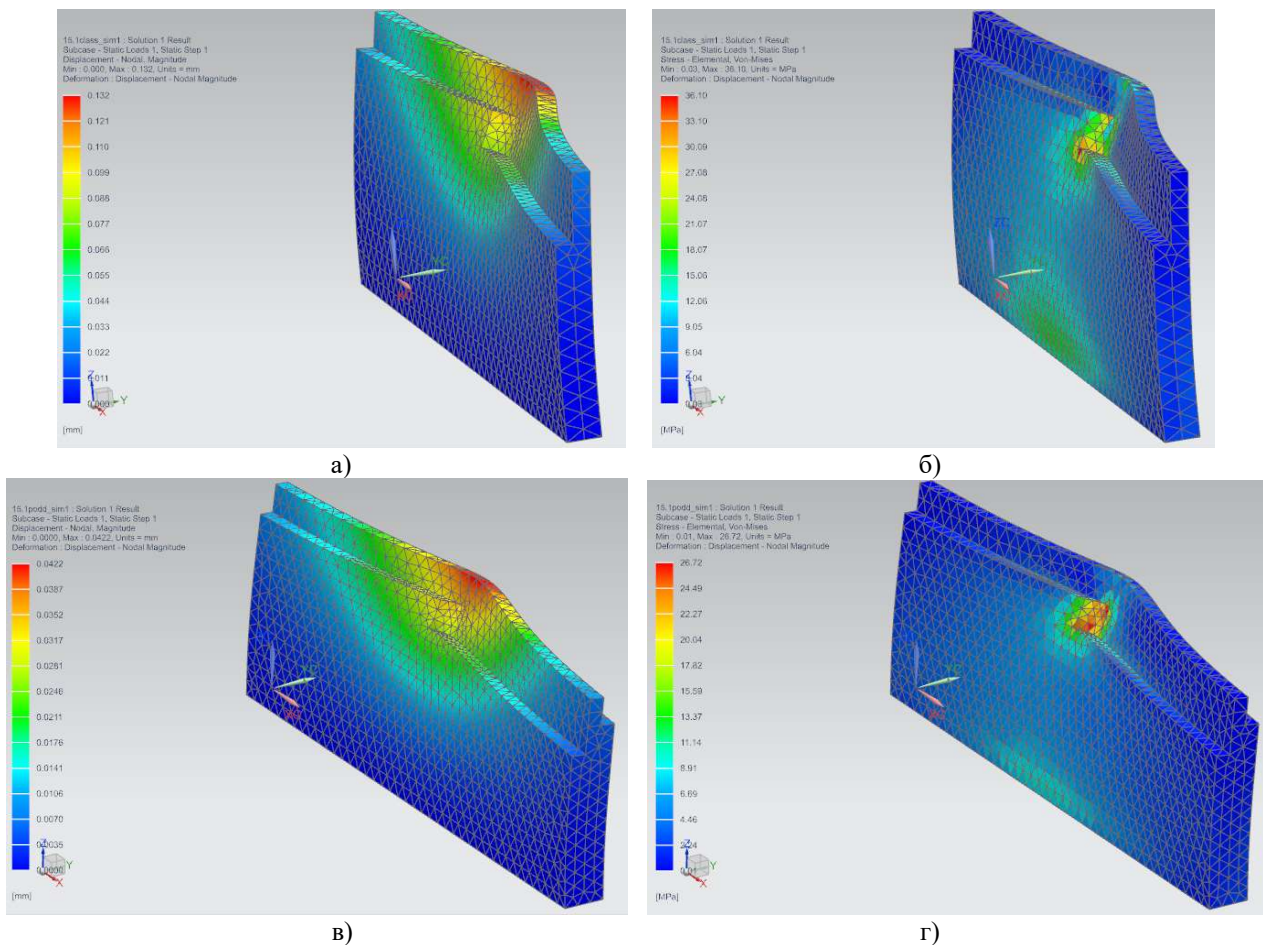


Рис. 6. Перемещение элементов и напряжения в узлах в процессе обработки стенки со средним отношением высоты к толщине  $< 15:1$ , а, б) – обработка без поддержек, в, г) – обработка с поддержкой

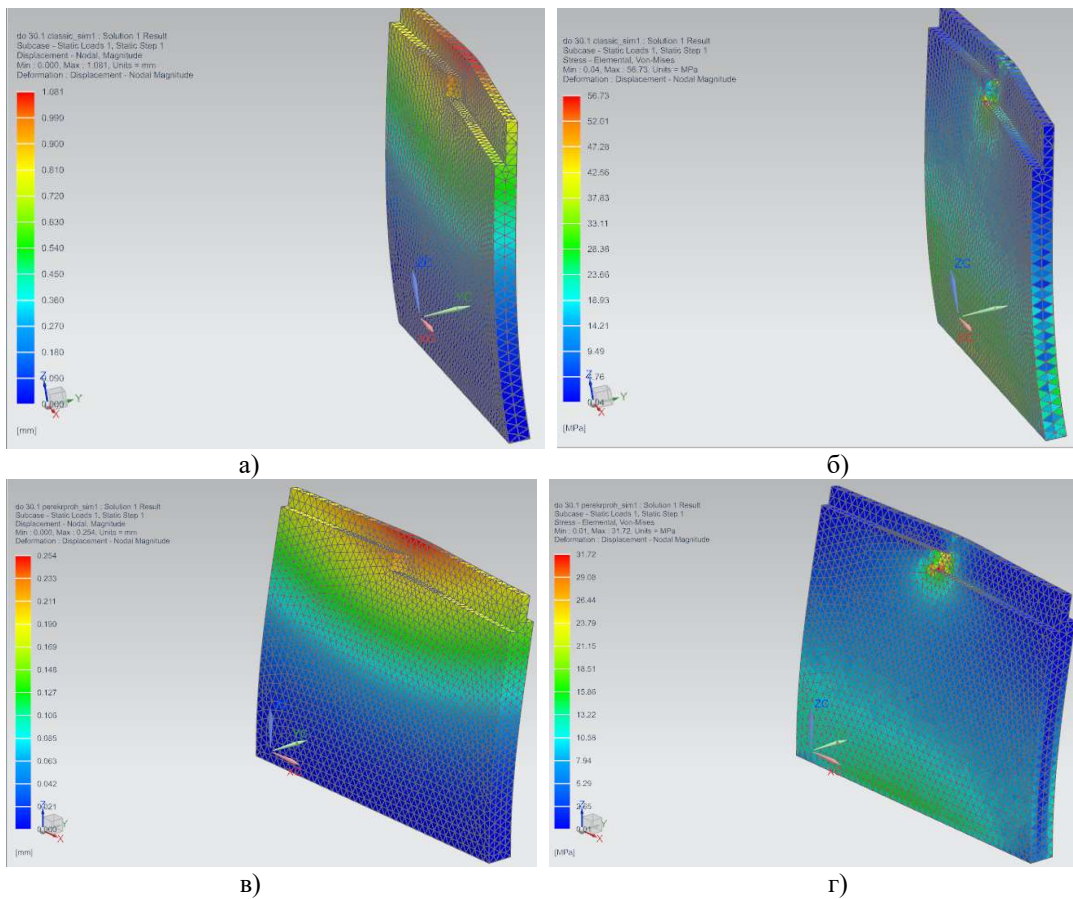


Рис. 7. Перемещение элементов и напряжения в узлах в процессе обработки стенки со средним отношением высоты к толщине  $< 30:1$ , а, б) – обработка без поддержек, в, г) – обработка с поддержкой

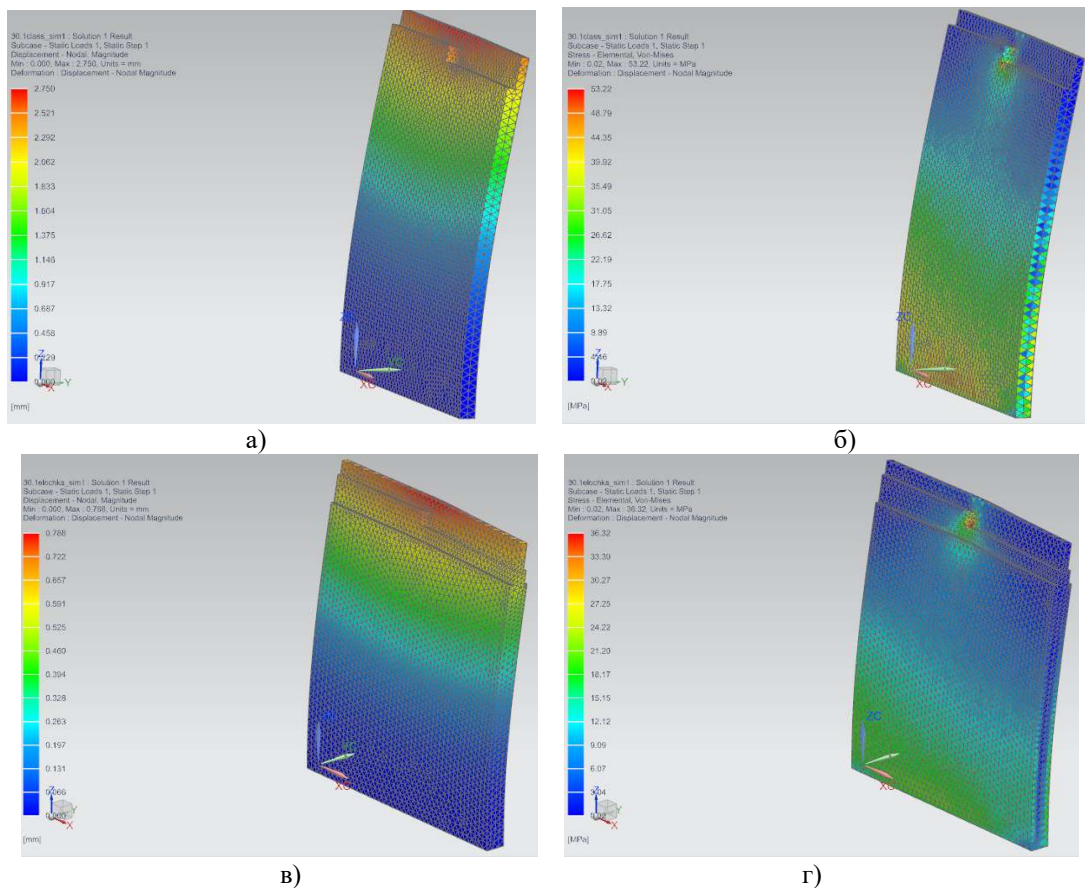


Рис. 8. Перемещение элементов и напряжения в узлах в процессе обработки стенки со средним отношением высоты к толщине  $> 30:1$ , а, б) – обработка без поддержек, в, г) – обработка с поддержкой

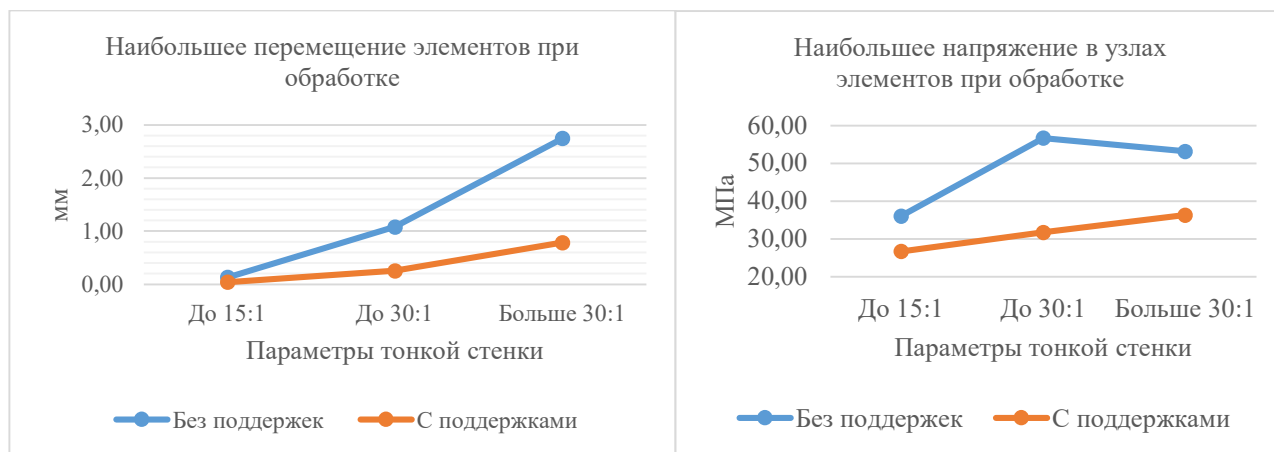


Рис. 9. Сравнение предельных значений перемещений элементов и напряжений в узлах по результатам КЭА разных стратегий фрезерования, для трех групп тонкостенных элементов

Для увеличения эффективности рассмотренных выше методов уменьшения деформаций, предполагается модернизация стратегий, заключающаяся в использовании зигзагообразных рабочих проходов, с наклоном

фрезы по углу опережения [10, 11] в комплексе с обработкой с поддерживающими элементами. Схема применена к тонкой стенке 2 группы, ежимы резания неизменны (рис. 10).

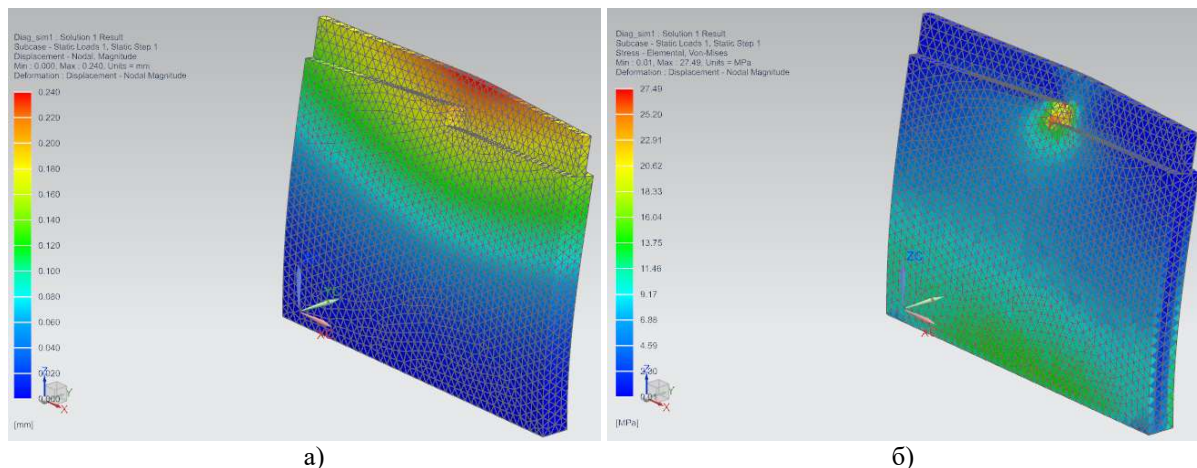


Рис. 10. Перемещение элементов (а) и напряжение в узлах (б) в процессе обработки стенки со средним отношением высоты к толщине <math>< 30:1</math> с зигзагообразной траекторией

Полученные в ходе КЭА результаты: предельное перемещение элементов 0,240 мм; предельное напряжения по элементам 27,49 МПа.

Сравнивая максимальные значения исследуемых параметров, можно сделать вывод, что применение зигзагообразной стратегии, в комплексе с использованием поддерживающего элемента позволило снизить деформации при обработке тонкой стенки группы до 30:1 дополнительно на 5,5 %, при том, что значения угла опережения фрезы и осевого врезание в данном случае не оптимизированы, так как являются темой для отдельной работы, это дает предположение, о том что эффективность метода может быть увеличена.

Для того, чтобы не допустить разрушения заготовки в ходе обработки, есть необходимость сравнить максимальные полученные значения

перемещений в узлах со справочными пределами механических свойств обрабатываемого материала [12].

Значение предела текучести 6000 серии алюминиевых сплавов равное 50 МПа, и являющееся наименьшим из представленных дает понимание того, что процесс резания с использованием поддержек будет происходить без риска разрушения материала заготовки в ходе возникновения упругих деформаций. При этом обработка классическим методом может приводить к пластическим деформациям обрабатываемого элемента, при использовании мягких или термически необработанных алюминиевых сплавов.

#### Выводы.

1. Показано, что обработка тонкой стенки с поддержками значительно снижает показатели

деформации материала заготовки во время обработки.

2. Снижение показателей деформации приводят к снижению количества чистовых проходов для удаления погрешности, что приводит к снижению времени обработки.

3. Применение зигзагообразной стратегии обработки с использованием угла опережения инструмента снижает деформации. В опытном варианте снижения составило 5,5 %. Прогнозируется, что оптимизация режимов обработки приведет к уменьшению значения деформаций. Оптимизация режимов резания обработки с использованием угла опережения является темой для отдельного исследования.

4. Обработка классическим методом, без использования поддерживающих элементов может приводить к пластическим деформациям заготовки в зоне резания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по эксплуатации Sandvik Coromant. Обработка титана. Техническое руководство. AB Sandvikens Tryckeri. AB Sandvik Coromant 2011. С. 91–94.

2. Arnaud, L., Gonzalo, O., Seguy, S. et al. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54. Pp. 479–488. DOI:10.1007/s00170-010-2976-9

3. Vincent Thévenot, Lionel Arnaud, Gilles Desein, Gilles Cazenave-Larroche. Influence of material removal on dynamic behavior of thin walled structure in peripheral milling. 7th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, ENSAM Cluny, May 2004, Cluny, France. Pp. 243-249. fahal-01449170

4. Vincent Thévenot, Lionel Arnaud, Gilles Desein, Gilles Cazenave-Larroche. Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006. No. 27. Pp. 638–644.

5. Herranz S, Campa FJ, López de Lacalle LN, Rivero A, Lamikiz A, Ukar E, Sánchez JA, Bravo U. The milling of airframe components with low rigidity: a general approach to avoid static and dynamic problems. P I Mech Eng B J Eng Manuf. 2005. No. 219 Pp.789–801.

6. Davies M.A., Balachandran B. Impact dynamics in milling of thin walled structures. Nonlinear Dyn. 2000. No. 22 Pp. 375–392.

7. Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г., Скрябин В.А. [и др.]. Резание материалов. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2012. С. 217–226.

8. Блюмберг В.А., Зазерский Е.И. Справочник фрезеровщика. Л.: Машиностроение, 1984. С. 68–72.

9. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. - 5-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2003. 944 с

10. Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Исследование динамики процесса пятикоординатного концевое фрезерования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019 № 7. С. 108–120. doi: 10.34031/article\_5d35d0b677dc74.960436396

11. Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. №3, С. 11–20. doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20

12. Davis J.R. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, 1993.

#### Информация об авторах

**Дурыхин Андрей Андреевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: durykhinandrey@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Хуртасенко Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 18.05.2020

© Дурыхин А.А., Хуртасенко А.В., 2020

\*Durykhin A.A., Hurtasenko A.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: durykhinandrey@mail.ru

## INFLUENCE OF MILLING STRATEGIES ON DEFORMATIONS OF NON-RIGID ELEMENTS OF ALUMINUM ALLOY PARTS

**Abstract.** The article considers strategies for milling thin-walled elements of aluminum alloy parts and their influence on static deformations that occur during cutting. The simulation of workpiece loading in the process of milling is produced. Different processing strategies for different parameters of the thin wall are applied in the simulation. Variations in strategies are caused by the position of the supporting element relative to the surface being machined or its absence, as well as by the geometric parameters of the thin-walled element. The modernization of the processing strategy is proposed, which consists in the use of zigzag working passes with the cutter tilt at the advance angle in combination with processing with supporting elements. The results of finite element analysis performed using the Siemens NX CAD system are studied. The obtained data are compared with each other and with critical reference values of the mechanical properties of the processed material. It is established that the use of strategies with supporting elements and use the applying of the tool lead angle allows to reduce the static deformation of the workpiece material during the cutting process. This leads to a decrease in the number of finishing passes and a reduction in processing time.

**Keywords:** milling, mill cutting, non-rigid element, thin wall, aluminum alloy, deformation, finite element method.

### REFERENCES

1. Sandvik Coromant user manual. Titanium processing. Technical manual. [Instrukciya po ekspluatatsii Sandvik Coromant. Obrabotka titana. Tekhnicheskoe rukovodstvo]. AB Sandvikens Tryckeri. AB Sandvik Coromant 2011. Pp. 91–94. (rus)
2. Arnaud L., Gonzalo O., Seguy S. et al. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54. Pp. 479–488. DOI:10.1007/s00170-010-2976-9
3. Vincent Thévenot, Lionel Arnaud, Gilles Desein, Gilles Cazenave-Larroche. Influence of material removal on dynamic behavior of thin walled structure in peripheral milling. 7th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, ENSAM Cluny, May 2004, Cluny, France. Pp. 243–249. fhal-01449170
4. Vincent Thévenot, Lionel Arnaud, Gilles Desein, Gilles Cazenave-Larroche. Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006. No. 27. Pp. 638–644.
5. Herranz S, Campa FJ, López de Lacalle LN, Rivero A, Lamikiz A, Ukar E, Sánchez JA, Bravo U. The milling of airframe components with low rigidity: a general approach to avoid static and dynamic problems. P I Mech Eng B J Eng Manuf. 2005. No. 219. Pp.789– 801.
6. Davies MA, Balachandran B. Impact dynamics in milling of thin walled structures. Nonlinear Dyn. 2000, No. 22 Pp. 375–392.
7. Grigoriev S.N., Skhirtladze A.G., Scriabin V.A. [et al.]. Cutting materials [Rezanie materialov]: textbook. Penza: Volga House of Knowledge, 2012. Pp. 217–226. (rus)
8. Blyumberg V.A., Zazersky E.I. Milling machine reference book. [Spravochnik frezerovshchika]. L.: Engineering, 1984. Pp. 68–72. (rus)
9. Handbook of a technologist-machine builder [Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya]: Vol. 2, ed. A. M. Dalsky, A. G. Kosilova, R. K. Meshcheryakova, A. G. Suslova. 5th ed., Rev. M.: Mechanical Engineering, 2003 . 944 p. (rus)
10. Ponomarev B.B., Nguyen Sy Hien. Dynamics of five-axis end milling process [Issledovanie dinamiki processa pyatikoordinatnogo koncevogo frezerovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7. Pp. 108–120. doi: 10.34031/article\_5d35d0b677dc74.960436396 (rus)
11. Ponomarev B.B., Nguyen Sy Hien. The influence of Tool Orientation on Cutting Forces during End Milling [Vliyanie orientatsii instrumenta na sily rezaniya pri koncevom frezerovanii]. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2019, No. 3. Pp. 11–20. doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20 (rus)
12. Davis J.R. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, 1993.

*Information about the authors*

**Durykhin, Andrey A.** Postgraduate student. E-mail: durykhinandrey@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Hurtasenko, Andrey V.** PhD. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 18.05.2020*

**Для цитирования:**

Дурьхин А.А., Хуртасенко А.В. Влияние стратегий фрезерования на деформации обрабатываемых нежестких элементов деталей из алюминиевых сплавов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 7. С. 101–108. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-101-108

**For citation:**

Durykhin A.A., Hurtasenko A.V. Influence of milling strategies on deformations of non-rigid elements of aluminum alloy parts. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 7. Pp. 101–108. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-101-108