

УДК 621.9.011

DOI 10.22213/2410-9304-2018-3-17-21

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

С. Д. Кугультинов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

А. С. Жилиев, АО «Ижевский электромеханический завод «Купол», Ижевск, Россия

Многие предприятия приборостроительной, машиностроительной, авиакосмической отрасли сталкиваются с трудностями механической обработки крупногабаритных тонкостенных деталей сложной формы из алюминиевых сплавов, отвечающих за работоспособность всего изделия. К рассматриваемой группе деталей предъявляются повышенные требования по точности и качеству изготовления, к ним относятся несущие элементы конструкции летательных аппаратов, корпуса, волноводы, радиаторы. Зачастую допуск формы на поверхностях данных деталей не превышает 0,01 мм при площади поверхности 1–2 м². Для обеспечения выпуска качественной продукции без увеличения производственного цикла и затрат на обработку технологии необходимо применение численного инженерного анализа для моделирования сложных технологических процессов.

Статья содержит обоснование актуальности исследования взаимосвязи режимов механической обработки, схемы и усилия закрепления с технологическими остаточными напряжениями и деформациями детали. Представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего в процессе фрезерования под воздействием силы и температуры резания, методом конечных элементов (МКЭ). На основе расчетов методом МКЭ показано, что в процессе фрезерования под действием силы резания в детали формируются сжимающие остаточные напряжения, приводящие к короблению поверхностей деталей. Разработана имитационная модель механического воздействия концевой фрезы на обрабатываемую деталь. Полученные результаты в дальнейшем планируется применить для формирования управляющих воздействий на параметры технологического процесса с целью повышения качества обработки и минимизации цикла производства деталей.

Ключевые слова: имитационное моделирование, напряженно-деформированное состояние, тонкостенная деталь, метод конечных элементов.

Введение

В настоящее время у многих предприятий оборонно-промышленного комплекса возникают трудности в процессе механической обработки резанием не жестких крупногабаритных тонкостенных деталей высокой точности из-за возможного коробления в результате неравномерности НДС. Качество и точность изготовления данных деталей напрямую влияет на эффективность функционирования всего изделия, будь то изделия приборостроительной, авиационной или ракетной промышленности.

Имея высокопроизводительные обрабатывающие центры с ЧПУ, специалисты предприятий зачастую используют их возможности не более чем на 50 %. Происходит это по причине отсутствия взаимосвязи между режимами резания, усилиями закрепления деталей, силовыми нагрузками на деталь, деформациями в процессе обработки, остаточными деформациями и качеством обработанной детали. В связи с этим специалисты при помощи многочисленных корректировок управляющих программ в части режимов резания и траектории обработки, подбора

количества проходов и припусков, специальной технологической оснастки, термических обработок добиваются получения годной детали, удовлетворяющей всем требованиям конструкторской документации. И весь этот процесс производится эмпирически, без последующей систематизации накопленных знаний. Таким образом, отработка технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных деталей – крайне длительный и трудоемкий процесс, ведущийся в большинстве случаев «вслепую» непосредственно в процессе изготовления партии деталей. И когда после выполнения технологической операции возникает коробление поверхностей, режимы обработки уменьшают, хотя согласно гипотезе Соломона и ряду современных зарубежных исследований их стоит увеличивать до диапазона, в котором происходит снижение усилий резания [1–3].

На основе вышесказанного весьма актуальным является решение проблемы повышения качества и производительности механической обработки резанием не жестких крупногабаритных тонкостенных деталей и установление зависимостей

между условиями обработки и уровнем деформаций. Одним из эффективных способов ее решения является максимально возможное снижение величины остаточных напряжений благодаря регулированию силы и температуры резания в процессе механической обработки.

Влияние условий механической обработки на НДС

Исходя из предпосылки о равенстве сил, одновременно действующих на зуб фрезы в плоскости резания и положения, что сила резания равна сопротивлению материала обрабатываемой заготовки пластической деформации стружкообразования и силе трения на поверхностях рабочего клина инструмента [4–6], для определения силы резания используется выражение

$$P_z = \frac{a_z \cdot b \cdot \tau \cdot [(1 - f_1^2) \cdot \cos \gamma + 2 \cdot f_1 \cdot \sin \gamma]}{\sin \theta \cdot [(1 - f_1 \cdot f_2) \cdot \cos(\gamma - \theta) + (f_1 + f_2) \cdot \sin(\gamma - \theta)]},$$

где a_z – толщина срезаемого слоя в процессе фрезерования; b – ширина стружки; τ – касательные напряжения, возникающие в пластически деформируемом материале; f_1 – коэффициент внешнего трения скольжения обрабатываемого и инструментального материалов; f_2 – коэффициент внутреннего трения в пластически деформируемом материале детали; γ – передний угол режущего клина инструмента; θ – условный угол сдвига.

Основной вклад в формирование НДС вносят действующие в зоне резания сила и температура. Многочисленными исследованиями доказано, что элементы режима резания (скорость, подача и глубина резания) влияют на вышеуказанные параметры в разной степени, что подтверждается общеизвестными эмпирическими зависимостями [7]. Работ по исследованию остаточных напряжений в деталях машиностроения достаточно много [8, 9], однако данные о величине и распределении остаточных напряжений и деформаций, возникающих в результате обработки резанием, почти отсутствуют.

В данной работе оценка уровня деформаций, возникающих в процессе фрезерования, проводилась с помощью метода конечных элементов [10].

Вначале были проведены экспериментальные исследования и аналитические расчеты для определения силовых параметров процесса фрезерования [11]. На основе этих данных был проведен расчет НДС детали в рамках упругопластической модели среды.

Напряженное состояние деформируемого тела и условия равновесия описываются уравне-

ниями объемной деформации Бельтрами – Митчелла в декартовых координатах [12, 13]:

$$\begin{cases} \Delta \sigma_x + \frac{3}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = 0; \\ \Delta \sigma_y + \frac{3}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} = 0; \\ \Delta \sigma_z + \frac{3}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} = 0; \\ \Delta \tau_{xy} + \frac{3}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x \partial y} = 0; \\ \Delta \tau_{yz} + \frac{3}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y \partial z} = 0; \\ \Delta \tau_{zx} + \frac{3}{1 + \mu} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z \partial x} = 0. \end{cases}$$

Полученные условия совместности деформаций в напряжениях:

$$\begin{aligned} \Delta \tau_{xy} + \frac{3}{(1 + \mu)} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x \partial y} &= - \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right); \\ \Delta \tau_{yz} + \frac{3}{(1 + \mu)} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y \partial z} &= - \left(\frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right); \\ \Delta \tau_{zx} + \frac{3}{(1 + \mu)} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z \partial x} &= - \left(\frac{\partial Z}{\partial z} + \frac{\partial X}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

Современные пакеты прикладных программ при конечно-элементной постановке упругопластических задач дают возможность наблюдать возникновение деформаций и изменение напряженного состояния в объеме детали при механической обработке. Для проведения имитационного моделирования процесса фрезерования использовалась система прочностного и температурного анализа ANSYS в совокупности с представленными математическими моделями.

При решении задачи методом конечных элементов была создана модель детали. После создания геометрической модели детали при помощи модуля управления материалами был создан материал со свойствами, соответствующими материалу детали – алюминиевому сплаву АМг3 ГОСТ4784–97. Затем была создана сетка конечных элементов, которая в дальнейшем являлась основой для составления и решения системы уравнений в матричном виде. Генерация сетки проводилась со следующими установками: количество конечных элементов детали – 50116 и количество узлов – 93008.

Имитационное моделирование проводилось для процесса фрезерования пазов в детали. Исходными данными были:

- 1) внешние нагрузки, возникающие в процессе фрезерования;
- 2) значения силы и температуры резания, полученные эмпирически и с помощью численных расчетов;
- 3) схема закрепления обрабатываемой детали в приспособлении и расчетные значения усилий зажима;
- 4) теплофизические и физические свойства материалов фрезы и детали [14].

При расчетах были приняты следующие допущения:

- 1) износ фрезы не влияет на величину возникающих остаточных напряжений из-за его не-

значительности в процессе достаточно непродолжительного времени обработки алюминиевого сплава;

- 2) теплофизические и механические характеристики материала, инструмента постоянны;

- 3) анизотропия теплофизических и механических характеристик обрабатываемого материала отсутствует.

Анализ результатов

Представленные результаты конечно-элементного расчета отображают деформации ребер детали (рис. 1) и ее базовой плоскости (рис. 2), возникающие при контакте инструмента с деталью, без учета процесса стружкообразования.

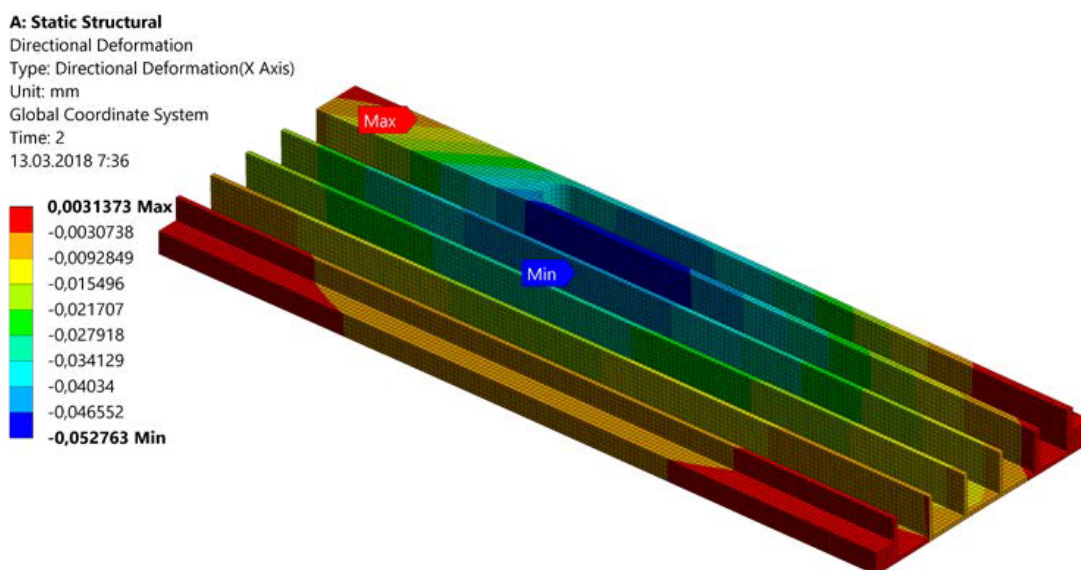


Рис. 1. Эпюра деформаций ребер детали «Корпус» в процессе механической обработки

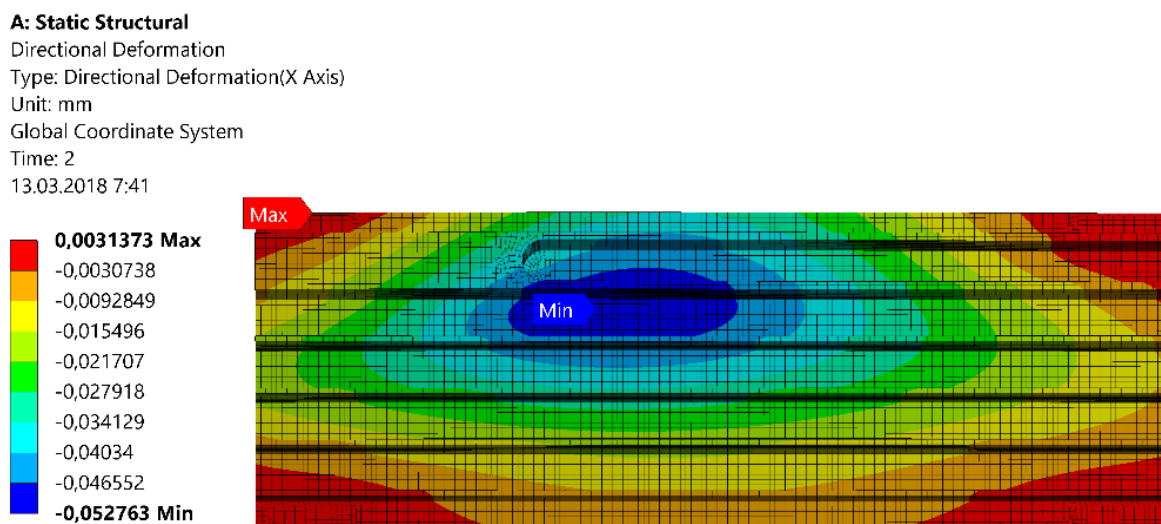


Рис. 2. Эпюра деформации основания детали «Корпус» в процессе механической обработки

Пластические деформации в процессе резания приводят к образованию внутренних и поверхностных напряжений. Как видно из резуль-

татов численного анализа, тангенциальные напряжения первого рода в поверхностном слое детали являются растягивающими, причем они

имеют максимальное значение вблизи поверхностного слоя детали. Внутри обработанной детали имеются небольшие сжимающие тангенциальные напряжения. Совокупность действия этих напряжений приводит к короблению.

Выводы

В процессе работы проведен численный анализ процесса концевой фрезеровки методом конечных элементов при следующих режимах обработки: глубина резания $t = 3$ мм; минутная подача $S = 3000$ мм/мин; скорость резания $v = 300$ м/мин.

На основании полученных результатов расчетов установлено: возникающие технологические напряжения в процессе механической обработки приводят к деформациям поверхностей, значительно превышающих допуски формы, заложенной в конструкторской документации на изделие.

Кроме того, при высоких значениях возникающих напряжений в изделиях может происходить растрескивание и хрупкое разрушение. Напряжения, выявленные в поверхностном слое детали, особенно вредны для рассматриваемых деталей, работающих при знакопеременной нагрузке, так как такие напряжения способствуют усталостному разрушению [15].

Расчеты, проведенные в данной работе, демонстрируют, что при концевой фрезеровке остаточные напряжения формируются в результате действия силы резания и тепловыделения, происходящего в зоне резания. Кроме того, вредное действие остаточных напряжений сказывается в повышении общей химической активности металла. В то же время в результате исследований установлено, что благоприятное распределение остаточных напряжений в изделиях может повысить их вибрационную и усталостную прочность [16]. Поверхность изделий наиболее подвержена воздействиям нагрузок, возникающих при механической обработке, что приводит к возникновению и росту поверхностных напряжений, сказывающихся на эксплуатационных свойствах изделий.

На основе полученных результатов численного анализа влияния механической обработки на напряженно-деформированное состояние становится возможным управлять величиной и распределением остаточных напряжений в процессе изготовления детали за счет регулирования силы резания. Механизм управления технологическими напряжениями и, как следствие, деформациями требует проведения дополнительных экспериментальных работ и аналитических расчетов. Технологический процесс, раз-

работанный с учетом этих данных, позволит сократить трудоемкость и цикл изготовления крупногабаритных деталей сложной формы подверженных короблению путем сокращения числа операций термической обработки. Разработка таких технологических процессов является необходимой, но трудоемкой задачей ввиду неоднородности полей деформаций, фазовых превращений в обрабатываемом материале и сложности проведения замеров остаточных напряжений в обрабатываемой детали.

Библиографические ссылки

1. Цейтлин А. Л. Высокая скорость обработки: антикризисные советы от CSoft // CADmaster. 2009. № 2-3. С. 46–55.
2. Abele E. and Fiedler U. (2004) Creating stability lobe diagrams during milling. *Annals of the CIRP*, 53(1). Pp. 309-312.
3. Vijay S., Kxishnaraj V. (2013) Machining parameters optimization in end milling of Ti-6Al-4V, *Procedia Engineering* 64. 1079-1088.
4. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов : учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. М. : Высш. шк, 1985. 304 с.
5. Сенькин Е. Н., Истомин В. Ф., Журавлев С. А. Основы теории и практики фрезерования материалов. Л. : Машиностроение 1989. 103 с.
6. Кугультинов С. Д., Ковальчук А. К., Портнов И. И. Технология обработки конструкционных материалов : учебник для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 672с. : ил.
7. Там же.
8. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев, И. И. Пономарев. М. : Наука. Физматлит, 1996. 240 с.
9. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрикова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.
10. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого; под общ. ред. В. А. Залого. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
11. Кугультинов С. Д., Жиляев А. С. Совершенствование процесса фрезерования деталей сложной формы из алюминиевых сплавов благодаря управлению величиной силы резания // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 21. С. 75–78.
12. Изменение напряженного состояния задней поверхности зуба фрезы при торцевом фрезеровании / Д. Ю. Пименов, В. И. Гузев, А. А. Кошин, П. П. Переверзев // Вестник машиностроения. 2012. № 7. С. 78–81.
13. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. М. : Металлургия, 1982. 584 с.

14. Промышленные алюминиевые сплавы / под ред. Ф. И. Квасова и И. Н. Фридляндера. М. : Металлургия, 1984. 528 с.

15. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев, И. И. Пономарев. М. : Наука. Физматлит, 1996. 240 с.

16. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андриукова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.

References

1. Tseytlin A. L. [High-speed processing: anti-crisis tips from CSoft]. *CADmaster*: 2009, no. 2-3, pp. 46-55 (in Russ.).

2. Abele E. and Fiedler U. (2004) Creating stability lobe diagrams during milling. *Annals of the CIRP*, 53(1). Pp. 309-312.

3. Vijay S., Kxishnaraj V. (2013) Machining parameters optimization in end milling of Ti-6Al-4V, *Procedia Engineering* 64. 1079-1088.

4. Granovskiy G. I., Granovskiy V. G. *Rezaniye metallov*: Uchebnik dlya mashinostr. i priborostr. spets. vuzov [Cutting mettals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985 (in Russ.).

5. Senkin E. N. *Osnovy teorii i praktiki frezerovaniya materialov* [Fundamentals of the theory and practice of milling materials] (eds. E.N. Senkin, V.F. Istomin, S. A. Zhuravlev.) – Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1989 (in Russ.).

6. Kugultinov S. D., Kovalchuk A. K., Portnov I. I. *Tekhnologiya obrabotki konstruktsionnykh materialov* [Technology of processing of structural materials]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana, 2006 (in Russ.).

7. Ibid.

8. Chernyshev G. N., Popov A. L., Kozintsev V. M., Ponomarev I. I. *Ostatochnyye napryazheniya v deformiruyemykh tverdykh telakh* [Residual stresses in deformable solids]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 1996 (in Russ.).

9. Burkin S. P., Shimov G. V., Andryukova Y. A. (eds.). *Ostatochnyye napryazheniya v metalloproduksii* [Residual stresses in metal products]. Yekaterinburg: Ural Publ., 2015 (in Russ.).

10. Zalogi V. A., Krivoruchko D. V. (eds.). *Modelirovaniye protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov* [Modeling of cutting processes by the finite element method]. Sumy, Universitetskaya kniga, 2012 (in Russ.).

11. Kugultinov S. D., Zhilyaev A. S. [Perfection of the process of milling of complex parts from aluminum alloys due to the control of the amount of cutting force] *Intellektualnyye sistemy v proizvodstve*, 2013, no. 21, pp. 75-78 (in Russ.).

12. Pimenov D. YU., Guzeyev V. I., Koshin A. A., Per-everzev P. P. [Changing the stressed state of the back surface of the tooth of the milling cutter at face milling]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2012, no. 7, pp. 78-81 (in Russ.).

13. Polukhin P. I., Gorelik S. S., Vorontsov V. K. *Fizicheskiye osnovy plasticheskoy deformatsii* [Physical basis of plastic deformation] Moscow: Metallurgiya Publ., 1982 (in Russ.).

14. Kvasova F. I., Fridlyandera I. N. (eds.). *Pro-myshlennyye alyuminiyevyye splavy* [Industrial aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, (in Russ.).

15. Chernyshev G. N., Popov A. L., Kozintsev V. M., Ponomarev I. I. *Ostatochnyye napryazheniya v deformiruyemykh tverdykh telakh* [Residual stresses in deformable solids]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 1996 (in Russ.).

16. Burkin S. P., Shimov G. V., Andryukova Y. A. (eds.). *Ostatochnyye napryazheniya v metalloproduksii* [Residual stresses in metal products]. Yekaterinburg: Ural Publ., 2015 (in Russ.).

Numerical Analysis of Influence of Mechanical Processing Conditions on Stress-Deformed State of Large-Size Thin-Wall Complex Parts

S. D. Kugultinov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

A. V. Shchenyatskii, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

A. S. Zhilyaev, Deputy head technologist, JSC «Izhevsk electromechanical plant «Kupol»

Many enterprises of instrumentation, machine-building, aerospace industries face difficulties in machining large-sized thin-walled components of complex shape made of aluminum alloys, which are responsible for operability of the entire product. The group of details under consideration is restricted by requirements of the accuracy and quality of manufacture, including supporting elements of construction aircraft, hulls, waveguides, radiators. Often, the shape tolerance on surfaces of these parts does not exceed 0.01 mm with a surface area of 1 ... 2 m². To ensure the production of quality products without increasing production cycle and costs of technology development it is necessary to use numerical engineering analysis to model complex technological processes.

The paper contains substantiation relevance study of interrelation between machining regimes, fixing scheme and cutting force with technological residual stresses and deformations of part. Results are presented for the stress-strain state analysis which is formed in the milling process due to the action of the cutting force and temperature. The results are obtained by finite element method (FEM). Based on calculations by FEM method, it is shown how force and temperature cutting affect formation of compressive residual stresses, which lead to warping of surfaces parts. The simulation model of mechanical action of the end mill on the workpiece is developed. The results obtained in the future are planned to be used to form control actions on the parameters of the technological process in order to improve the quality of processing and minimize the cycle of production of parts.

Keywords: simulation modeling, stress-strain state, thin-walled part, finite element method.

Получено: 20.06.18