

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Статьи в рубрике изданы по итогам  
X Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении»

УДК 658.511.4:621.9

Назаров Михаил Вадимович, аспирант, Киселев Евгений Степанович, доктор техн. наук, профессор

Ульяновский государственный технический университет, 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

E-mail: nazarov.mv@inbox.ru

## ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ УЧЕТЕ УСЛОВИЙ ЖЕСТКОСТИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

**Аннотация:** Существующая тенденция к снижению материалоемкости выпускаемых изделий, возрастающие потребности промышленности в упругих элементах различных устройств обусловили одновременно непрерывный рост объема производства нежестких корпусных деталей высокой точности. Помимо нежестких деталей, которые деформируются после изготовления до такой степени, что в свободном состоянии могут выходить за пределы допусков размеров и формы, в конструкциях современных машин и механизмов получили распространение детали, относящиеся в соответствии с ГОСТ 30987-2003 к жестким изделиям, но состоящие из большого количества сложно сочетаемых «нежестких элементов», обработка которых по отдельности вызывает существенные затруднения, а в сочетании с подобными по жесткости другими элементами делает технологию их изготовления весьма трудоемкой. При этом наиболее трудоемким процессом является не сама механическая обработка, а процесс технологической подготовки производства (ТПП), особенно проектирование управляющих программ для станков с ЧПУ. Данная публикация посвящена проблемам изготовления тонкостенных деталей на современных обрабатывающих центрах. Определены основные причины выхода за пределы поля допуска линейных размеров нежестких элементов обрабатываемой заготовки. Целью работы является разработка системы автоматизированного назначения режима резания при фрезеровании нежестких заготовок деталей машин. Предложена математическая модель расчета величины упругого отжатия тонкой стенки в процессе фрезерования, работоспособность которой подтверждается расчетами в САЕмодуле SiemensNX. Определены граничные условия, необходимые для поиска рационального режима резания. Предложен алгоритм расчета качественных показателей при всех доступных сочетаниях элементов режима резания с последующим выбором наиболее подходящего для рассматриваемого случая набора элементов. Критерии выбора задаются требованиями чертежа на изготавливаемую деталь. Представлен подход к автоматизации этого процесса. Продемонстрирован результат расчета рационального режима резания, учитывающего условия жесткости обрабатываемой заготовки.

**Ключевые слова:** нежесткие детали, фрезерование, режимы резания, алюминиевые сплавы, ЧПУ, автоматизация.

**Информация о статье:** принята 08 декабря 2019 г.  
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-42-46

### Введение

В настоящее время в авиационной, ракетно-космической промышленности и приборостроении все чаще используется большое количество деталей, представляющих собой сложное сочетание нежестких элементов (тонких стенок, панелей), обработка любого из них по отдельности вызывает существенные затруднения, а в сочетании с подобными по жесткости другими элементами делает технологии их изготовления в соответствии с требованиями

чертежа весьма затратными и трудоемкими (рис. 1). Чаще всего такие детали изготавливают из алюминиевых и алюминиево-литевых деформируемых сплавов, отличающихся сравнительно низкой температурой плавления, возможностью их обработки на высоких скоростях резания и меньшей прочностью по сравнению с другими авиационными материалами. Как правило, в этом случае температуры и силы резания в зоне контакта инструмента и заготовки достаточно высоки, что увеличивает вероятность

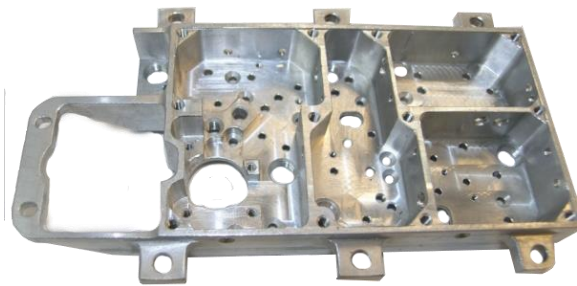


Рис. 1. Деталь, состоящая из ряда примыкающих друг к другу нежестких элементов.  
Fig. 1. Part consisting of a number of adjacent non-rigid elements.

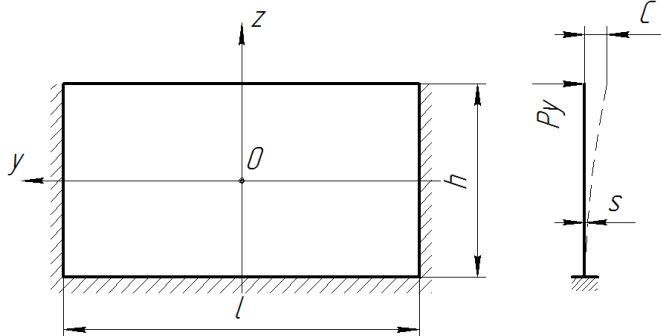


Рис. 2. Представление обрабатываемой стенки в виде пластины.  
Fig. 2. Representation of the machining wall in the form of a plate.

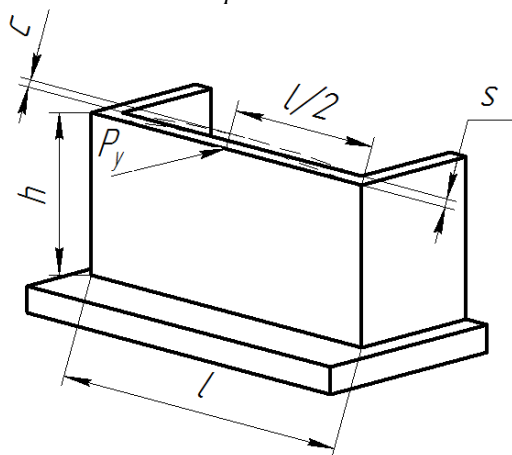


Рис. 3. Обрабатываемый элемент.  
Fig. 3. The processed element.

выхода за пределы поля допуска линейных и угловых размеров нежестких элементов изготавливаемых деталей.

Основной проблемой при механической обработке (МО) подобных заготовок является упругое отжатие стенок в процессе фрезерования, которое приводит к вибрации, отклонению формы и выходу за пределы поля допуска геометрических размеров обрабатываемого элемента. Причиной тому является отсутствие соответствующих рекомендаций по обработке подобных нежестких заготовок со стороны производителя режущего инструмента. Инженерам-программистам и технологам, как правило, доступна лишь информация о максимально допустимых элементах режима обработки (чаще всего фрезерования), которые представлены в

соответствующих каталогах для идеальной, абсолютно жесткой технологической системы. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]

Целью работы является разработка системы автоматизированного назначения элементов режима резания при фрезеровании нежестких заготовок деталей машин. Для достижения заданной цели необходимо решить следующие задачи: разработать математическую модель определения величины упругих отжятий обрабатываемого элемента в процессе фрезерования и разработать методику поиска наиболее производительного режима резания, обеспечивающего выполнение требований, заданных чертежом.

#### Описание теоретических исследований

Для реализации данного процесса обработки необходимо представить обрабатываемую стенку в виде пластины длиной  $l$ , высотой  $h$  и толщиной  $s$ , защемленной с одной стороны (рис. 2), или защемленной с трех сторон, на которую действует сосредоточенная сила  $P_y$  (рис. 3). Радиальная составляющая силы резания приводит к взаимному упругому отжатию обрабатываемого элемента заготовки и режущего инструмента (РИ). Фрезы, изготавливаемые из твердого сплава, имеют значительно большую жесткость в сравнении с тонкими стенками из алюминиевых, алюминий-литиевых и титановых сплавов, применяемых в авиационной промышленности. В связи с вышеизложенным необходимо пренебречь отжатием инструмента.

Наибольшее отклонение стенки  $C$  от заданного положения будет наблюдаться в точке, максимально отдаленной от всех заделок, которая расположена посередине обрабатываемого элемента и на расстоянии  $h$  от его основания.

Расчет максимального отжатия стенки производится по следующей формуле [10]:

$$C = k_w \times \frac{P_y \times h^2}{\pi D}; \quad (1)$$

где:

$k_w$  – коэффициент для середины стенки, равный 0,527;

$P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;

$h$  – высота стенки, мм;

$D$  – цилиндрическая жесткость стенки, кг\*см.

Для проверки работоспособности приведенного метода произведем расчет. Рассмотрим случай: фрезеруется стенка, к которой по сторонам прилегают другие конструктивные элементы. Заготовка из алюминиевого сплава Д16Т, длина стенки  $l = 100$  мм, высота  $h = 30$  мм, толщина  $s = 3$  мм. Режущий инструмент – монолитная твердосплавная фреза диаметром  $D = 10$  мм, частота вращения  $n = 3000$  об/мин, подача на зуб  $S_z = 0,03$  мм/зуб, глубина фрезерования  $T = 5$  мм, ширина фрезерования  $B = 0,5$  мм. Радиальная составляющая силы резания будет равна [11, 12, 13]:

$$P_y = 0,3 \times \frac{10 \times C_P \times t^{ZP} \times S_z^{YP} \times B^{UP}}{D^{QP} \times n^{WP}} \times K_P; \quad (2)$$

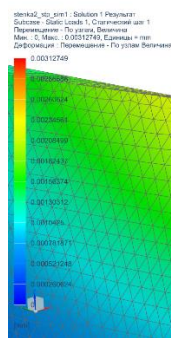
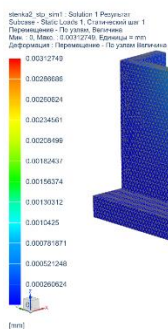


Рис. 5. Расчетная модель стенки с примыкающими конструктивными элементами  
Fig. 5. The design model of the wall with adjacent structural elements.

Таблица 1. Входные данные для расчета  
Table 1. Input data for calculation

Ср	D	n	Кр	НВ	zр	ур	up	qr	wp	h	E	I	np
261	10	12000	1,053	200	0,9	0,8	1,1	1,1	0,13	30	69000	520,8	1

$$P_y = 0,3 \times \frac{10 \times 261 \times 5^{0,9} \times 0,03^{0,8} \times 0,5^{1,1}}{10^{1,1} \times 3000^{0,13}} \times 1,05 = 2,777 \text{ Н}; \quad (3)$$

Используя это значение при расчете в пакете инженерного анализа Siemens NX CAE, получили следующие результаты: максимальное отклонение стенки  $C$  составило 0,0023 мм.

Рассчитаем величину  $C$  аналитически:

$$C = 0,527 \frac{2,777 \times 30^2}{3,14 \times 174222,87} = 0,0024 \text{ мм}; \quad (4)$$

Разница между аналитическим и CAE расчетами составила 4%. Таким образом, можно прийти к выводу, что предложенная математическая модель адекватно отражает исследуемый процесс.

#### Расчет режима резания.

Для принятия решения о допустимости использования того или иного режима фрезерования необходимо определить ряд ограничений: максимальная частота вращения шпинделя, максимально допустимое упругое отжатие обрабатываемого элемента, наибольшая производительность [14, 15].

Рекомендации производителей РИ по скорости резания не всегда допустимы. Каждый станок имеет определенное значение максимальной частоты вращения шпинделя, что накладывает ограничения на наиболее допустимую скорость резания. В связи с этим рекомендуемые производителем РИ значения скорости проверяются на применимость.

$$n = \frac{1000 \times V}{\pi D} \leq n_{\text{MAX}}; \quad (5)$$

где:

$n$  – рекомендуемая частота вращения РИ, об/мин;

$n_{\text{MAX}}$  – максимально допустимая частота вращения РИ, об/мин.

Если условие не выполняется, осуществляется пересчет максимально допустимого значения скорости резания  $V_{\text{max}}$ , применяемое в дальнейших расчетах.

$$V = \frac{\pi \times D \times n_{\text{MAX}}}{1000} \text{ м/мин}; \quad (6)$$

Рассмотрим применение фрезы YG-1Alu-Power диаметром 10 мм при фрезеровании заготовки из алюминиевого сплава Д16Т на обрабатывающем

центре DMG DMU 50 ecoLine. Рекомендуемые режимы резания для данной фрезы: скорость резания  $V = 610$  м/мин, максимальная подача на зуб  $S_z = 0,13$  мм. Максимальная частота вращения шпинделя выбранного станка  $n_{\text{max}} = 12000$  об/мин.

$$n = \frac{1000 \times 610}{3,14 \times 10} = 19427 \text{ об/мин}; \quad (7)$$

Рекомендуемая частота вращения – 19427 об/мин – больше максимально допустимой частоты 12000 об/мин. Определяем наибольшую скорость резания, допустимую характеристиками станка.

$$V = \frac{3,14 \times 10 \times 12000}{1000} \text{ м/мин}; \quad (8)$$

Для дальнейших расчетов принимаем  $V_{\text{max}} = 376$  м/мин.

Следующим ограничивающим условием является максимально допустимое упругое отжатие стенки  $C_{\text{max}}$  [9, 10]:

$$C \frac{d_{\text{op}}}{2} \text{ мм}; \quad (9)$$

где:

$d_{\text{op}}$  – максимально допустимое отклонение линейного размера обрабатываемого элемента, мм; 0,8 – коэффициент, обеспечивающий запас в 20%.

При обработке стенки заготовки высотой 30h14 мм, толщиной 3h9<sub>(-0,025)</sub> мм определим максимально допустимое значение упругого отжатия стенки:

$$C \frac{0,025}{2} \text{ мм}; \quad (10)$$

Таблица входных данных для поиска рационального режима резания имеет следующий вид (табл. 1) где:

$D$  – диаметр фрезы, мм;  $N$  – частота вращения фрезы, об/мин;  $C_r$  – коэффициент, справочные данные;  $z_r$ ,  $u_r$ ,  $u_p$ ,  $q_r$ ,  $w_r$  – показатели степени, справочные данные;  $h$  – высота стенки, мм;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $I$  – момент инерции сечения, мм<sup>4</sup>.

Таблица 2. Результат расчета (выборка)  
Table 2. The result of the calculation (sampling)

№	<b>B</b> , мм	<b>T</b> , мм	<b>Sz</b> , мм/зуб	<b>C</b> , мм	<b>Q</b> , см <sup>3</sup> /мин
1	1,0	10,0	0,015	0,0099	3,6
2	1,0	7,8	0,027	0,0099	4,86
3	1,0	5,4	0,054	0,0098	6,99
4	1,0	3,8	0,120	0,0100	10,94

За определением вышеуказанных условий следует расчет всех возможных комбинаций параметров режима резания. Для каждого набора параметров рассчитывается величина радиальной составляющей силы резания **P<sub>r</sub>**, величина отжатия **C**, а также величина съема материала в минуту **Q**.

$$Q = \frac{T \times B \times Sz \times n \times Nz}{1000}, \text{ см}^3/\text{мин}; \quad (11)$$

где **Nz** – число зубьев фрезы.

Варируется глубина фрезерования **T**, ширина фрезерования **B**, а также подача на зуб **Sz**. Данные параметры изменяются в пределах, рекомендованных производителем РИ. Шаг варьирования для **Sz** – 0,002 мм/зуб, для **T** и **B** – 0,1 мм.

Для каждого шага рассчитанное отжатие стенки **C** сравнивается с допустимым **C<sub>max</sub>**. При невыполнении условия **C ≤ C<sub>max</sub>** набор данных исключается из дальнейшего расчета.

#### Результаты и обсуждение

Следующим этапом в определении рационального режима резания является поиск наиболее производительного набора параметров режима резания. В табл. 2 представлен пример рассчитанных наборов элементов режима резания.

Исходя из результата расчета, получаем набор элементов наиболее производительного режима резания: **V** = 376 м/мин, **Sz** = 0.12 мм/зуб, **T** = 3.8 мм, **B** = 1 мм, для которого известна величина вероятного упругого отжатия стенки **C** = 0,01.

Таким образом, уже на стадии ТПП можно скорректировать траекторию движения режущего инструмента, обеспечивающую получение размеров обрабатываемого элемента в пределах поля допуска, заданного чертежом. В рассматриваемом примере рекомендуется при использовании найденного режима резания сместить траекторию на 0,01 мм к обрабатываемой поверхности (задать отрицательную величину припуска), что позволит получить толщину обрабатываемой стенки в пределах 3<sub>-0,02</sub> мм. Это позволяет отказаться от дополнительного чистового прохода, необходимого для снятия припуска, оставшегося на поверхности в связи с упругими отжатиями, величина которых превышает допустимые значения.

#### Выводы

Разработанная методика определения величины упругого отклонения обрабатываемого элемента в процессе фрезерования, а также методика учета результатов расчета в назначении рационального режима резания позволяют значительно сократить длительность ТПП и уменьшить себестоимость изготовления подобных деталей. Последнее подтверждено результатами внедрения данных методик в действующее производство ряда предприятий,

изготавливающих панели авиационных приборов летательных аппаратов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ezugwu, E & Bonney, J & Yamane, Yasuo. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology – J MATTER PROCESS TECHNOL, 2003, vol. 134, pp. 233-253.
2. M. Svinin, V. Savilov. Application of variable teeth pitch face mill as chatter suppression method for non-rigid technological system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 327, pp. 314-321.
3. Савилов А.В. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования / А.В. Савилов, А.С. Пятых, С.А. Тимофеев // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №6-2. С. 42-54.
4. Campa Francisco, Lacalle Luis. Definition of Cutting Conditions for Thin-to-Thin Milling of Aerospace Low Rigidity Parts. Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2008, pp. 1011-1015.
5. Qi Houjun, Tian Yanling, Zhang Dawei. Machining forces prediction for peripheral milling of low-rigidity component with curved geometry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012, pp. 63-71.
6. Svetan Ratchev, Evan Govender. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. Journal of Materials Processing Technology, 2003, pp. 143-144.
7. Богачев А.Н. Фрезерование деталей нежесткой технологической системой / А.Н. Богачев, С.Н. Мухина С. // Вологдинские чтения. 2010. №78. С. 34-39.
8. Башаров Р.Р. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка / Р.Р. Башаров, Р.Г. Кудояров // Вестник УГАТУ. 2012. №4 (49). С. 78-84.
9. Балашов А.В. Технологическое обеспечение точности фрезерования нежестких деталей / А.В. Балашов, А.С. Жидецкая, И.С. Потапов и др. // Вестник ПГУ им. Шолом-Алейхема. 2015. №2 (19). С. 65-73.
10. Вайнберг Д.В. Расчет пластин. / Д.В. Вайнберг, Е.В. Вайнберг – Киев, «Будівельник», 1970. 360 с.
11. Грановский Г.И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1985. 303 с.
12. Федосьев В.И. Сопrotивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. С. 568

13. Барановский Ю.В. Режимы резания металлов. Справочник. Изд. 3-е. М., «Машиностроение», 1972. 258 с.

14. Назаров М.В., Попович, Е.С. Киселев Е.С. Автоматизированный выбор технологии изготовления деталей летательных аппаратов / М.В. Назаров, А.В. Попович, Е.С. Киселев // Известия Тульского

государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-1. С. 147-153.

15. Nazarov M.V., Kiselev E.S., Popovich A.V. Using of machine parts abstract elements in nc-programs developing for the cnc machines. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 224, pp. 1-4.

**Mikhail V. Nazarov**, post-graduate student, **Evgeny S. Kiselev**, Dr. Sc. in Engineering, Professor

Ulyanovsk state technical University,  
432027, 32 Severny Venets Street, Ulyanovsk, Ulyanovsk region, Russian Federation

## **MILLING OF THIN WALLED COMPONENTS FROM ALUMINUM ALLOYS BY CONSIDERING THE CONDITIONS OF RIGIDITY AND AUTOMATION ASSIGNMENT ELEMENTS OF A CUTTING MODE ON CNC MACHINES**

**Abstract:** *The current tendency to reduce the material consumption of manufactured products, the growing industry needs for the elastic elements of various devices have led to a continuous increase in the production of non-rigid body parts of high accuracy. In addition to non-rigid parts, which are deformed after manufacture to such an extent that in a free state they can go beyond the tolerances of size and shape, but consisting of a large number of difficult to combine "non-rigid elements", the processing of which individually causes significant difficulties, and in combination with similar the rigidity of the elements, make the technology of their manufacture is very time-consuming. The most laborious process is not the machining itself, but the process of technological preparation of production, especially the design of control programs for CNC machines. The work is devoted to the problems of manufacturing thin-walled parts on modern CNC machines. The main reasons for going beyond the tolerance range of the linear dimensions of non-rigid elements of the workpiece are determined. The aim of the work is to develop a system for the automated appointment of the cutting mode when milling non-rigid blanks of machine parts. A mathematical model proposed for calculating the elastic squeezing of a thin wall during the milling process, the operability of which confirmed by the calculations in the Siemens NX CAE module. The boundary conditions necessary for the search for a rational cutting mode are determined. An algorithm proposed for calculating quality indicators for all available combinations of elements of the cutting mode, with the subsequent selection of the most suitable set of elements for the case in question. The selection criteria set by the requirements of the drawing for the manufactured part. An approach to automating this process presented. The result of calculation of a rational cutting mode taking into account conditions of rigidity of a preparation shown.*

**Keywords:** *non-rigid parts, milling, cutting modes, aluminum alloys, CNC, automation.*

**Article info:** *received December 08, 2019*

**DOI:** *10.26730/1816-4528-2019-6-42-46*

### REFERENCES

1. Ezugwu, E & Bonney, J & Yamane, Yasuo. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL, 2003, vol. 134, pp. 233-253.

2. M. Svinin, V. Saviolov. Application of variable pitch teeth face mill as a chatter suppression method for non-rigid technological system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 327, pp. 314-321.

3. Saviolov A.V., Fifth A.S., Timofeev S.A. Modern methods of optimization of milling operations // proceedings of the Samara scientific center of RAS. 2013. No. 6-2.

4. Francisco Campa, Luis Lacalle. Definition of Cutting Conditions for Thin-to-Thin Milling of Aerospace Low Rigidity Parts. Proceedings of the ASME

International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2008, pp. 1011-1015.

5. Houjun Qi, Yanling Tian, Dawei Zhang. Machining forces prediction for peripheral milling of low-rigidity component with curved geometry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012, pp. 63-71.

6. SvetanRatchev, Evan Govender. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. Journal of Materials Processing Technology, 2003, pp. 143-144.

7. Bogachev A. N., Mukhina S. N. milling of parts by non-rigid technological system. Vologda readings. 2010. No. 78.

8. Basharov, R. R., Kudoyarov, R. G. a Study of the process of milling end mill high speed spindle // Vestnik USATU. 2012. No. 4 (49).

9. Balashov A. V., Zhidetskaya A. S., Potapov I. S., Svetlova T. G. Technological support of precision milling of non-rigid parts. Vestnik PSU. Sholem Aleichem. 2015. No. 2 (19).

10. Weinberg D. V., Weinberg E. V. Calculation of plates. Kiev, "Budivelnik", 1970. 360 pp.

11. Granovsky G.I. Metal Cutting: A Textbook for Engineering and instr. spec. universities. - M.: Higher School, 1985.330 s.

12. Fedoseev V. I. Resistance of materials. Moscow: MGTU publishing House. N. E. Bauman, 1999.

13. Baranovsky Yu. V. metal cutting Modes. Handbook. Ed. 3-E. M., "mechanical engineering", 1972. 258 pp.

14. Nazarov M. B. Popovic, E. S. Kiselev, E. S. Automated selection of technology for the manufacture of parts of aircraft // proceedings of the Tula state University. Technical science. 2017. No. 8-1. Pp. 147-153.

15. Nazarov M.V., Kiselev E.S., Popovich A.V. Using of machine parts abstract elements in nc-programs developing for the cnc machines. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 224, pp. 1-4.

#### **Библиографическое описание статьи**

Назаров М.В., Киселев Е.С. Фрезерование тонкостенных заготовок из алюминиевых сплавов при учете условий жесткости и автоматизации назначения элементов режима обработки на станках с ЧПУ // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 6 (146). – С. 42-46.

#### **Reference to article**

Kiselev E.S., Nazarov M.V. Milling of thin walled components from aluminum alloys by considering the conditions of rigidity and automation assignment elements of a cutting mode on CNC machines. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 6 (146), pp. 42-46.