

УДК 621.91.01

КОНСТРУКТИВНАЯ ОЦЕНКА ДОСТИЖИМОЙ ТОЧНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОЛЕЦ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

С. В. Старовойтов¹, М. Э. Саттаров², С. Х. Хадиуллин³

¹sv_starov@mail.ru, ²sattarov@mail.ru, ³salavathh@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 14.11.2019

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения точности лезвийной обработки крупногабаритных тонкостенных колец. Предложена оценка технологичности конструкции таких деталей на основе оценки их геометрической податливости. Разработана математическая модель для оценки геометрической податливости крупногабаритных тонкостенных колец, используемых в качестве корпусных деталей авиационных двигателей. Проведена оценка полученных моделированием результатов путем сравнения с экспериментальными данными по обработке указанного типа деталей в производственных условиях.

Ключевые слова: точность; податливость; точение; кольцо; технологичность; моделирование; математическая модель; жесткость детали.

ВВЕДЕНИЕ

Основными задачами технического прогресса, стоящими перед машиностроением, являются повышение производительности и снижение себестоимости изготовления деталей на станочном оборудовании. Рыночная необходимость работы в условиях большой номенклатуры изготавливаемых изделий и высокой частоты смены выпускаемой продукции привели к тому, что гибкость, механическая точность и производительность металлорежущих станков в последние годы значительно возросла. Основной проблемой для производства стало отсутствие надежных и проверенных методов создания технологических процессов, позволяющих добиться необходимого качества обрабатываемых поверхностей и точ-

ности их размеров с минимальными затратами и в кратчайшие сроки.

Особенно остро данная проблема стоит при механической обработке деталей авиационных двигателей, повышенные требования к которым обуславливают высокую стоимость как серийного изготовления, так и повышенные затраты на стадии технологической подготовки производства [1]. Характерными особенностями большинства деталей авиационных двигателей являются малая жесткость и пространственно-сложная геометрия, что объясняется стремлением к снижению их массы при условии сохранения эксплуатационных характеристик. Помимо традиционно дорогих и сложных в производстве деталей газового тракта высокую стоимость в современных

авиационных двигателях приобретают и корпусные детали, имеющие форму крупногабаритных тонкостенных колец.

Точность формообразования при лезвийной обработке металлов в значительной степени определяется системой сил, действующей на заготовку в процессе резания. Это выражается в возникновении упругой деформации обрабатываемой поверхности при стружкообразовании, которая приводит к возникновению погрешности ее геометрических размеров. В случае обработки нежестких деталей упругая деформация от воздействия силы резания может достигать значения, соизмеримого с величиной поля допуска на выполняемый размер, что приводит к необходимости коррекции процесса чистовой обработки. Дополнительную трудность представляют процессы релаксации остаточных напряжений, которые приводят к потере геометрической точности обработанных поверхностей, что особенно сильно проявляется на тонкостенных деталях [2].

Оценка технологичности конструкции детали с точки зрения достижимой точности ее механической обработки очень важна на стадии освоения и запуска в производство новых изделий. Именно по этой причине моделирование процессов обработки крупногабаритных тонкостенных колец является важнейшим элементом технологической подготовки производства новых авиационных двигателей, результатом работы которой является гарантированное изготовление годной детали с минимальными затратами и в кратчайшие сроки.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ОЦЕНКИ КОНСТРУКЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОЛЕЦ

Основными трудностями механической обработки рассматриваемого типа деталей являются отгибы стенки кольца под действием силы резания, а также неудовлетворительное качество обработанной поверхности, обусловленное вибрациями. По сравнению с деталями иного типа, тонкостенные детали имеют склонность к появлению при лезвийной обработке пластических деформаций, которые в значительной степени усложняют процесс их изготовления. Применение специальной оснастки, которая

жестко фиксирует тонкостенные элементы, позволяет улучшить качество обрабатываемой поверхности, однако зачастую не позволяет обеспечить заданную точность обработки. Как правило, это выражается в релаксации остаточных напряжений, которая приводит к потере формы и геометрических размеров обработанной поверхности после снятия обработанной детали с такого приспособления.

Определение конструктивных критериев, которые в большей степени влияют на жесткость тонкостенной детали большого диаметра, позволит оперативно оценить технологичность изделия с точки зрения достижимой точности его механической обработки. Жесткость – способность изделия сопротивляться действию внешних нагрузок с деформациями, допустимыми без нарушения их работоспособности. Для удобства расчетов в исследовании использовался параметр геометрической податливости C , который по величине является обратным жесткости и выражающим меру способностей твердого тела или соединения к упругим или упругопластическим деформациям [3]:

$$C = \frac{\Delta}{F} \cdot E, 1/\text{мм} \quad (1)$$

где Δ – величина удлинения, мм; F – приложенная сила, Н; E – модуль упругости, Н/мм².

В качестве исследуемого материала был принят коррозионно-стойкий сплав на основе никеля AMS 5643, который часто применяется при изготовлении корпусных деталей газотурбинного двигателя [4]. Модуль упругости данного материала имеет значение $E=1,930 \cdot 10^{11}$ Н/мм². Поскольку кольцо является телом вращения, то в качестве метода лезвийной обработки деталей подобной конструкции, как правило, применяется токарная обработка. При этом величина силы резания на чистовых режимах обработки составляет порядка $F=1000$ Н. Анализ конструкторской документации рассматриваемой группы деталей новых авиационных двигателей средней размерности показал, что величина толщины стенки для них варьируется в пределах 0,7–2,2 мм, высоты стенки – 20–80 мм, диаметра – 600–1450 мм. Указанные значения и интер-

валы были приняты в качестве исходных данных и граничных условий при моделировании статичного силового воздействия при механической обработке.

Моделирование силового воздействия при механической обработке проводилось в системе Solidworks Simulation с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную величину (в нашем случае перемещение) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе элементов [5]. В качестве точки приложения нагрузки был выбран самый нежесткий участок детали, а именно верхняя точка тонкой стенки кольца, которая подвержена максимальным перемещениям в процессе механической обработки [6].

Результаты расчетов по МКЭ анализировались по методике планирования эксперимента, которая представляет собой комплекс мероприятий, состоящий в выборе числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Планирование экстремального эксперимента – частный случай, при котором ищутся оптимальные условия функционирования объекта [7]. В данном исследовании планирование эксперимента позволило определить критерий, который в наибольшей степени влияет на податливость детали.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОЛЕЦ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Расчетная схема для определения зависимостей геометрической податливости крупногабаритного тонкостенного кольца в зависимости от варьируемого конструктивного параметра при лезвийной обработке представлена на рис. 1. Согласно данной схеме нижняя торцевая плоскость кольца является заделкой и имитирует зажимное приспособление. К верхней точке кольца на цилиндрической поверхности кольца прикладывалась сосредоточенная нагрузка, имитирующая силовое воздействие резца при токарной обработке.

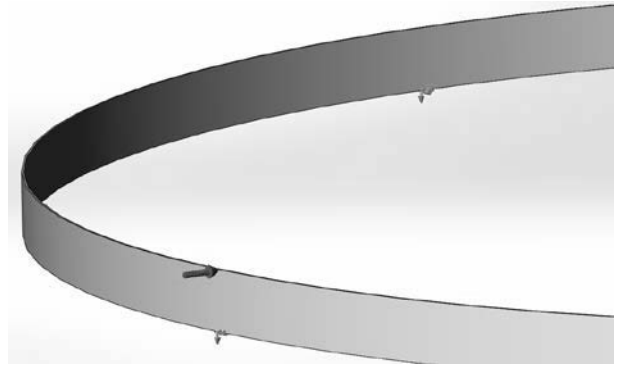


Рис. 1. Расчетная схема для определения зависимостей геометрической податливости

Характерная эпюра, полученная при расчете в программном комплексе SolidWorks, представлена на рис. 2. Результаты моделирования в программном комплексе *Solidworks Simulation* на основе данных о максимальном перемещении, полученных при анализе эпюр, были использованы для оценки геометрической податливости крупногабаритных тонкостенных колец в зависимости от трех конструктивных критериев:

- от толщины стенки S (рис. 3);
- от диаметра кольца D (рис. 4);
- от высоты стенки кольца h (рис. 5).



Рис. 2. Эпюра перемещений в области точки воздействия силы резания на обрабатываемую деталь

Графики, представленные на рис. 3–5, предполагают степенную зависимость геометрической податливости от каждого из критериев в исследуемой области. Указанный факт определил выбор математической модели для расчета податливости в следующей форме:

$$C = C_0 \cdot S^{a_1} \cdot h^{a_2} \cdot D^{a_3}, \text{ 1/мм.} \quad (2)$$

Следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне изменения толщины кольца величина геометрической податливости изменяется более чем в 10 раз. При этом резкий рост податливости наблюдается

при уменьшении толщины стенки меньше 1 мм, что позволяет говорить о возникновении значительных трудностей лезвийной обработки колец в указанном диапазоне толщины. По остальным критериям зависимости имеют более монотонный характер.

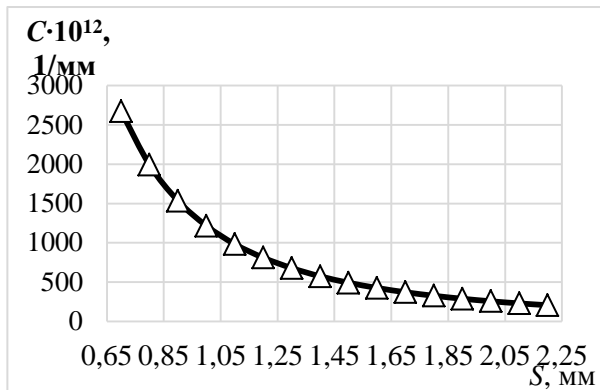


Рис. 3. График зависимости геометрической податливости крупногабаритного тонкостенного кольца диаметром $D=1000$ мм и высотой стенки $h=50$ мм от толщины стенки S

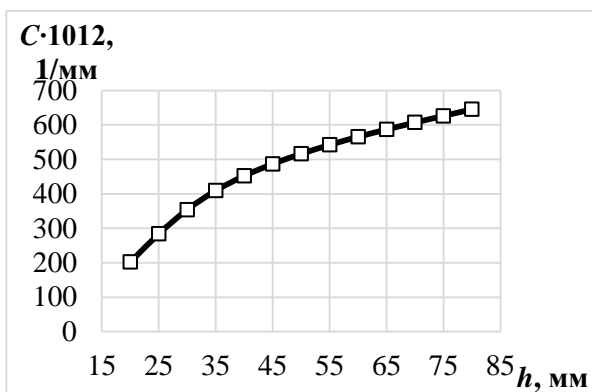


Рис. 4. График зависимости геометрической податливости крупногабаритного тонкостенного кольца диаметром $D=1000$ мм и толщиной стенки $S=1,5$ мм от высоты стенки h

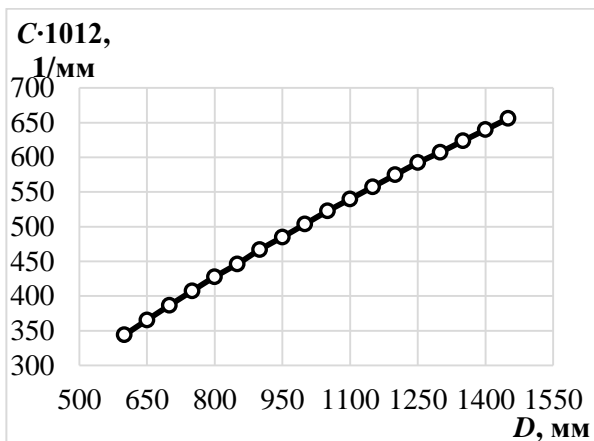


Рис. 5. График зависимости геометрической податливости крупногабаритного тонкостенного кольца с толщиной стенки $S=1,5$ мм и высотой стенки $h=1,5$ мм от диаметра D

Для оценки степени влияния каждого конструктивного критерия на точность лезвийной обработки детали была составлена матрица планирования математического эксперимента в натуральной форме, которая представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования математического эксперимента в натуральной форме и его результаты

№ опыта	Диаметр, мм $X1$	Высота, мм $X2$	Толщина, мм $X3$	Перемещение, мм Y
1	1450	80	2,2	1,798
2	600	80	2,2	0,9195
3	1450	20	2,2	0,3469
4	600	20	2,2	0,3159
5	1450	80	0,7	21,99
6	600	80	0,7	11,46
7	1450	20	0,7	8,776
8	600	20	0,7	5,765

На основании представленного плана эксперимента проведен анализ МКЭ с помощью системы *Solidworks Simulation* для вычисления величины перемещения при заданных условиях. Результаты математического эксперимента также представлены в табл. 1.

Матрица планирования в логарифмической форме, которая позволит получить степенную модель геометрической податливости крупногабаритных тонкостенных колец, представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования математического эксперимента в логарифмической форме и его результаты

№ опыта	$\log(X1)$	$\log(X2)$	$\log(X3)$	$\log(Y)$
1	0,34242	1,90309	3,161368	14,5403
2	0,34242	1,90309	2,77815125	14,2491
3	0,34242	1,30103	3,161368	13,8258
4	0,34242	1,30103	2,77815125	13,7851
5	-0,1549	1,90309	3,161368	15,6278
6	-0,1549	1,90309	2,77815125	15,3447
7	-0,1549	1,30103	3,161368	15,2289
8	-0,1549	1,30103	2,77815125	15,0464

Линейная логарифмическая регрессионная модель в натуральной форме, полученная на основе проведенного эксперимента, имеет следующий вид:

$$\log(Y) = \log(a_0) + a_1 \cdot \log(s) + a_2 \cdot \log(h) + a_3 \cdot \log(D), \quad (3)$$

где $\log(a_0) = C_0$ из выражения (2).

В результате расчетов была получена следующая математическая модель зависимости геометрической податливости крупногабаритного тонкостенного кольца от диаметра, высоты и толщины:

$$C = 0,99 \cdot S^{0,34} \cdot h^{1,88} \cdot d^{3,12}, \quad (4)$$

Данные коэффициенты указывают на степень влияния критериев на податливость детали, а это значит, что диаметр обрабатываемой детали имеет наибольшее влияние на величину податливости, а толщина стенки – наименьшее.

ТОЧНОСТЬ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОЛЕЦ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В производственных условиях НПА «Технопарк АТ» была проведена токарная обработка ряда крупногабаритных корпусных колец (рис. 6) с различными диаметрами, толщинами и высотами тонкостенных элементов, номинальные величины которых отражены в табл. 3. Статистика отклонений размеров при обработке указанных деталей собиралась путем сравнения номинального и фактически полученного диаметра рассматриваемого тонкостенного элемента на основании выборки из 10 обработанных колец каждого шифра.

Из представленной табл. 3 видно, что наибольшее отклонение имеет деталь

с наибольшей геометрической податливостью элемента. При этом для колец с соразмерными значениями геометрической податливости, для которых применяются сравнимые величины элементов режима резания, наблюдается практически линейная зависимость точности обработки от рассчитанной по модели (2) геометрической податливости. Отсутствие пропорционального роста погрешности обработки при сравнении колец с отличающимися на порядок значениями геометрической податливости объясняется использованием иных технологических параметров резания, которые позволяют снизить усилия резания и повысить точность обработки до приемлемых значений.



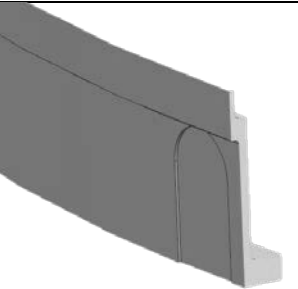
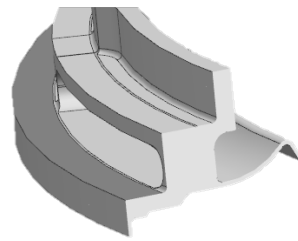


Рис. 6. Деталь типа «Крупногабаритное тонкостенное кольцо»

Так, при обработке тонкостенных заготовок большого диаметра для снижения сил резания и, соответственно, уменьшения величин отгиба детали рекомендуется использовать наименьший радиус режущей кромки пластины, острую геометрию режущего клина и т.д. [8].

Таблица 3

Результаты экспериментальной обработки крупногабаритных тонкостенных колец

№	Эскиз сечения кольца	Толщина элемента S , мм	Высота элемента h , мм	Диаметр элемента D , мм	Геометрическая податливость C элемента по (4), $\cdot 10^{12}$, 1/мм	Среднее отклонение, мм
1.		0,863	12,5	1381,252	0,677	0,120
2.		1,752	10	1306,322	0,475	0,097
3.		0,939	6	843,127	0,0376	0,051
4.		1,143	5,3	748,538	0,0219	0,035

Указанные данные свидетельствуют о достоверности проведенного математического эксперимента. Предварительная оценка геометрической податливости ответственных элементов крупногабаритного тонкостенного кольца на основе моделирования МКЭ позволяет оценить технологичность конструкции с точки зрения лезвийной обработки уже на стадии технологической подготовки производства и принять соответствующие меры для исключения брака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постнов В. В., Хадиуллин С. Х., Старовойтов С. В. Повышение эффективности изготовления деталей ГТД на основе прогнозирования режущих свойств инструментальных твердых сплавов // СТИН. 2015. № 11. С. 20–26. [V. V. Postnov, S. Kh. Khadiullin, S. V. Starovoytov, "Improving the efficiency of manufacturing parts of gas turbine engines based on prediction of the cutting properties of instrumental hard alloys", (in Russian), in *STIN*, no. 11, pp. 20-26, 2015.]
2. Анализ причин и источников возникновения остаточных напряжений / Р. Р. Башаров и др. // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 4 (82). С. 3–11. [R. R. Basharov, et. al., "Analysis of causes and sources of residual stresses", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 22, no. 4 (82), pp. 3-11, 2018.]

3. **Способ** определения жесткости металлообрабатывающего станка с ЧПУ / Р. Г. Кудояров и др. // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста (Уфа, 3–6 марта, 2018): тр. Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2018. С. 260–265. [R. G. Kudayarov, et al., "The method of determining the rigidity of a metal-working machine with CNC", (in Russian), in *Machine tool industry and innovative machine building. Problems and growth points*, 2018, pp. 260-265.]

4. **SAE AMS5643U-2016 Steel, Corrosion-Resistant, Bars, Wire, Forgings, Mechanical Tubing, and Rings 16Cr - 4.0Ni - 0.30Cb (Nb) - 4.0Cu Solution Heat Treated, Precipitation Hardenable - UNS S17400.**

5. **A 2D computer** model of cutting of the A2024 aluminum alloy / G. R. Khalikova, et. al. // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, No. 5. Pp. 24-28.

6. **Theoretical** and experimental stress-strain analysis of machining gas turbine engine parts, which made of the high energy structural efficiency alloys / V. V. Postnov, et. al. // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, No. 5. Pp. 47-50.

7. **Using** experiments to construct mathematical models for machinability characteristics of a heat resistant aluminum alloy / B. F. Usmanov, et. al. // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, No. 5. Pp. 51-54.

8. **Postnov V. V., Khadiullin S. K., Starovoitov S. V.** Predicting the cutting properties of hard alloys for the manufacture of components used in gas-turbine engines // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36, No. 6. Pp. 496-501.

ОБ АВТОРАХ

СТАРОВОЙТОВ Семен Владимирович, доц. каф. АТП, нач. отд. инновационной деятельности НПА «Технопарк АТ». Дипл. инж. по спец. «Мехатроника» (УГАТУ 2012). Канд. техн. наук по тех-гии и оборудов. механической и физико-технической обработки (МГТУ «СТАНКИН», 2017). Иссл. в обл. точности механической обработки.

САТТАРОВ Марк Эдуардович, инж.-исследователь каф. АТП, Спец. НПА «Технопарк АТ». Бакалавр по напр. «Мехатроника и робототехника» (УГАТУ, 2018). Иссл. в обл. моделирования технологических процессов.

ХАДИУЛЛИН Салават Хакимович, доц. каф. АТП, зам. директора ИАТМ по научной работе. Дипл. инж. по спец. «Мехатроника» (УГАТУ 2005). Канд. техн. наук по тех-гии и оборудов. механической и физико-технической обработки (РГАТА, 2011). Иссл. в обл. физико-механических свойств и механики контактных процессов при резании материалов.

METADATA

Title: Constructive assessment of achievable accuracy of blade treatment large-sized thin-wall rings by modeling method forces during cutting.

Authors: S. V. Starovoytov¹, M.E.Sattarov², S. Kh. Khadiullin³

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹sv_starov@mail.ru, ²sattarov@mail.ru, ³salavathh@gmail.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 50-56, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The issues of ensuring the accuracy of blade cutting of large-sized thin-walled rings are considered. An assessment of the manufacturability of the design of such parts based on an assessment of their geometric compliance is proposed. A mathematical model has been developed to evaluate the geometric compliance of large-sized thin-walled rings used as body parts for aircraft engines. The results obtained by modeling are evaluated by comparison with experimental data on the processing of the specified type of parts under production conditions.

Key words: accuracy; flexibility; turning; ring; manufacturability; modeling; mathematical model; part rigidity.

About authors:

STAROVOYTOV, Semion Vladimirovich, Associate Professor, Head of Innovation Department «Technopark» Dipl. Of Mechatronics (USATU 2012), PhD on technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (MSTU «Stankin», 2017).

SATTAROV, Mark Eduardovich, Research engineer dep.of ATP, specialist «Technopark». Bachelor in Mechatronics and Robotics (USATU, 2018).

KHADIULLIN, Salavat Khakimovich, Associate Professor, IATM Deputy Director for Research. Engineer Diploma in Mechatronics (USATU, 2005), PhD on technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (RSATU, 2011).