

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.160>**К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ**

Научная статья

Нестеренко Г.А.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-1528-4627;¹ Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nga112001[at]list.ru)

Аннотация

В статье описан механизм формирования погрешности токарной обработки нежестких дисков осевых компрессоров. Приведены основные расчетные зависимости силы резания от переменных условий обработки. Показаны результаты экспериментальных исследований и приведены эмпирические зависимости, позволяющие произвести расчет величины осевой составляющей силы резания, при точении полотна диска, изготовленного из титанового сплава VT3-1.

В работе представлены рекомендации по использованию расчетных зависимостей для корректировки управляющих программ для станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Кроме того, в работе рассмотрена возможность использования системы адаптивного управления процессом резания на станке с ЧПУ.

Ключевые слова: токарная обработка, нежесткие детали, сила резания, погрешность, точность обработки.

TO THE ISSUE OF DIMENSIONAL ACCURACY IN MANUFACTURING OF COMPRESSOR DISCS

Research article

Nesterenko G.A.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-1528-4627;¹ Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

* Corresponding author (nga112001[at]list.ru)

Abstract

The article describes the mechanism of error formation in turning of non-rigid discs of axial compressors. The basic calculation dependences of cutting force on variable processing conditions are given. The results of experimental studies are shown, and empirical dependences are presented, which allow to calculate the value of the axial component of the cutting force when turning a disc blade made of titanium alloy VT3-1.

The work presents recommendations on the use of computational dependencies for adjusting control programmes for numerically controlled machine tools (NCT). In addition, the paper examines the possibility of using a system of adaptive control of the cutting process on a numerically controlled machine tool.

Keywords: turning operation, non-rigid parts, cutting force, error, machining accuracy.

Введение

Заготовки для изготовления дисков осевых компрессора из титановых сплавов могут быть получены методами пластического деформирования материалов, а также методами порошковой металлургии.

Промышленные сплавы титана классифицируют по структуре, которую они получают после охлаждения на воздухе. Из титановых сплавов, используемых для изготовления дисков компрессора, OT4 относится к сравнительно малопластичным, которые не охрупчиваются при термической обработке, а VT6 и VT3-1 – к более прочным сплавам, хорошо куется и штампуются, поддаются термической обработке [1], [2].

Наряду с достоинствами титановые сплавы имеют и недостатки, такие как повышенная склонность к упрочнению в процессе деформирования, пониженная упругость (почти в два раза ниже, чем у стали). Это проявляется при лезвийной обработке заготовок во влиянии на точность в результате упругих деформаций от действия сил резания. Кроме того, титан и его сплавы имеют высокую склонность к контактному схватыванию при трении. Это свойство создает трудности при обработке титана резанием [3].

В связи с перечисленными свойствами титановых сплавов в процессе механической обработки дисков резанием возникают следующие проблемы:

- потеря геометрической точности полотна диска;
- остаточное коробление полотна диска после обработки.

В процессе обработки дисков энергетических машин возникают деформации торцевых поверхностей. Самое значительное влияние на процесс деформации оказывает осевая составляющая силы резания P_y . Данная сила приложена к торцевой поверхности в осевом направлении. Ее воздействие можно оценивать, как качественно, так и количественно, используя подходы и методы теории упругости [4], [5], [6]. Оценивая силу резания нужно учитывать, что ее величина является переменной, зависящей от режимов резания (скорости резания v , глубины резания t , подачи s) и величины износа резца h_z по задней поверхности [7], [8].

Целью исследования является установление закономерностей влияния технологических условий механической обработки на формирование прогибов полотна нежесткого диска осевого компрессора.

Методы и принципы исследования

Назначение режимов обработки основывается на параметрах шероховатости поверхности и заданной точности. При величине шероховатости обрабатываемой поверхности $Ra=3,2$ мкм, глубина резания должна варьироваться в пределах $t=0,1-0,4$ мм, а величина подачи инструмента в диапазоне $s=0,07-0,35$ мм/об. Основываясь на выбранных значениях глубины резания и подачи рассчитывается величина скорости резания.

Наиболее часто расчет величины силы резания производится по эмпирическим формулам, в которых присутствует коэффициент, зависящий от стойкости инструмента, однако, существуют и формулы, в которых расчеты производятся на основании величины износа инструмента по задней поверхности и известных пределов прочности обрабатываемого материала [9]. Для практического расчета требуется проводить экспериментальные исследования обрабатываемого материала для определения пределов прочности.

Следовательно, наиболее целесообразным является использование для расчетов силы резания эмпирических формул.

Стойкость зависит от материала инструмента, материала обрабатываемой детали, от геометрических параметров режущей части, особенно от величины переднего угла и заднего угла, режимов обработки [8]. Влияние скорости резания является определяющим при определении стойкости режущего инструмента, а, следовательно, силы резания.

Таким образом, исходя из данной теории, величина силы резания является постоянной для заданных режимов резания, что является неточным вследствие изменения величины силы резания под влиянием переменных факторов: износа инструмента, скорости резания (для торцевого точения) и фактической глубины резания.

Основные результаты

После проведенных экспериментальных исследований была получена эмпирическая формула для определения величины осевой составляющей силы резания при торцевой обработке полотна диска из титанового сплава ВТЗ-1:

$$P_y = 351 \times t^{0,91} \times s^{1,74} \times v^{0,49} \times k \quad (1)$$

Здесь t – глубина резания, мм; s – подача, мм/об; v – скорость резания, об/мин; $k = (h_3)^m$ – коэффициент, зависящий от износа инструмента h_3 ; $m = -0,26(h_3/s)$ – показатель степени.

Кроме того, что величина составляющей силы резания будет изменяться в зависимости от величины износа инструмента, как видно из выражения (1), на ее изменение будут влиять переменная скорость резания и глубина резания.

Для случая цилиндрического точения величина диаметра обработки является постоянной, следовательно, величина скорости $v=const$. В случае торцевого точения путь резания представляет собой спираль Архимеда, а, следовательно, скорость резания не является постоянной величиной вследствие постоянного изменения диаметра обработки D . Следовательно, рассчитывать скорость резания при торцевом точении необходимо с использованием выражения (2):

$$V_i = 3,14 \cdot r_i \cdot n / 500 \quad (2)$$

Здесь $r_i = r_{i-1} - s$ – текущий радиус полотна обрабатываемого диска; i – изменяется в пределах от 1 до r_n/s ; r_n – наружный радиус полотна обрабатываемого диска.

В процессе расчета силы резания глубину резания принимают постоянной и не учитывают влияния на нее величины износа инструмента и упругих деформаций поверхности детали и инструмента. При обработке торцевой поверхности диска осевого компрессора происходит его упругая деформация.

Реальная величина глубины резания при обработке торцевой поверхности будет переменной, т.к. происходит его упругая деформация на величину w от воздействия сил и напряжений, а также происходит нормальное изнашивание режущего инструмента на величину h_n . Величина фактической глубины резания находится из выражения (3):

$$t_{\text{фак}} = t_{\text{расч}} - h_n - w \quad (3)$$

Величина изменения фактической глубины резания относительно расчетной $t_{\text{расч}}$ является непосредственно погрешностью обработки $D_{\text{об}}$, которая определяется из выражений (4, 5):

$$D_{\text{об}} = t_{\text{расч}} - t_{\text{фак}} \quad (4)$$

или

$$D_{\text{об}} = w + h_n \quad (5)$$

Определив, из выражения (1), величину силы резания, необходимо оценить ее воздействие на деформацию обрабатываемой детали, а, следовательно, на величину погрешности.

Допуски на изготовление торцевой поверхности дисков осевых компрессоров составляют 0,01-0,05 мм, значит расчет можно производить при помощи уравнения метода начальных параметров [10], которое будет выглядеть следующим образом:

$$w = \left(Eh^3 / [12 (1 - m^2)] \right)^* w_0 - r^{2*} M_{r0} * y_{wr} - r^{2*} M_{q0} * y_{wq} - P_i * r^{2*} y_{wP} \quad (6)$$

Здесь w – величина искомого прогиба; w_0 – прогиб на внутреннем радиусе диска, определяется из граничных условий [8]; M_{r0} , M_{q0} – моменты, действующие на внутреннем радиусе в радиальном и тангенциальном направлениях, соответственно, определяются из граничных условий; r – текущий радиус, на котором рассчитывается прогиб; m_i – момент, действующий на i – м радиусе, возникающий в результате действия различных факторов; P_i – осевая сила, приложенная на i – м радиусе; q_k – распределенная нагрузка между некоторыми радиусами; y_{wr} , y_{wq} , y_{wP} , –

сопровождающие функции; $D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]$ – жесткость; E – модуль упругости; h – толщина полотна диска; ν – коэффициент Пуассона.

Сопровождающие функции для уравнения (7) находятся при решении уравнений описанных в работе [12]. Для нахождения w_0 , M_{r0} , $M_{\phi 0}$ необходимо задаться граничными условиями, определяемыми выбором расчетной схемы. В зависимости от профиля сечения диска возможно рассматривать несколько таких схем [13].

Заключение

В процессе токарной обработки нежестких дисков можно использовать системы адаптивного управления, которые позволяют отслеживать изменяющиеся во времени величины силы резания [14]. Однако при обработке на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) необходимо заранее внести соответствующие коррективы в программу обработки.

Представленная методика прогнозирования возникновения прогибов полотна диска позволит обеспечить точность изготовления деталей и снизит возможные потери (брак) еще на этапе технологической подготовки производства. Ранее использовавшиеся методики не учитывали действие переменных сил резания. В литературе описана сила резания как постоянная, не зависящая от изменения диаметра обработки и динамического изменения глубины резания.

Расчеты, проведенные согласно представленной методике, можно использовать при проектировании деталей осевых компрессоров и разработке технологических процессов их изготовления, а также, для написания программ для станков с числовым программным управлением учитывающих динамическое изменение силы резания и геометрии движения режущего инструмента.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Канарейкин А.И., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.160.1>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Kanareikin A.I., Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.160.1>

Список литературы / References

1. Польшин И. С. Легирование, фазовый состав и механические свойства титановых сплавов / И. С. Польшин, Ю. Б. Егорова, Л. В. Давыденко // *Технология легких сплавов*. — 2022. — № 2. — С. 4-13. — DOI 10.24412/0321-4664-2022-2-4-13. — EDN EKNYXJ.
2. Бубнов В. А. Титан и его сплавы в машиностроении / В. А. Бубнов, А. Н. Князев // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. — 2016. — № 3(42). — С. 92-96. — EDN XHLFQR.
3. Моисеев В. Н. Высокопрочные титановые сплавы в авиационных конструкциях / В. Н. Моисеев, Ю. А. Грибков, Ю. И. Захаров // *Авиационные материалы и технологии*. — 2007. — № 1. — С. 46-51. — EDN QYXRFT.
4. Нестеренко Г.А. Расчет прогиба полотна диска осевой газоперекачивающей машины / Г.А. Нестеренко, И.С. Нестеренко, А.А. Орлов // *Вестник машиностроения*. — 2022. — № 11. — С. 64–65. — DOI: 10.36652/0042-4633-2022-11-64-65.
5. Nesterenko G. A. Flexure of Disk Blade in an Axial Gas Pump / G. A. Nesterenko, I. S. Nesterenko // *Russian Engineering Research*. — 2023. — Vol. 43, no. 1. — P. 47–48.
6. Свирщев В. И. Прогнозирование величины прогиба лопаток ГТД по аналитическим моделям технических и геометрических исходных данных при поперечном строчном фрезеровании на многоосевых станках с ЧПУ / В. И. Свирщев, С. В. Тарасов, В. В. Мережников // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2022. — № 8. — С. 234-243. — DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-234-243. — EDN LFZTBI.
7. Вивденко Ю.Н. Влияние износа инструмента на точность токарной обработки нежестких элементов деталей из высокопрочных материалов. / Ю.Н. Вивденко // *Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов*. Межвуз. сб. — УФА, 1986 — с.134–140.
8. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1969. — 288 с.
9. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / В.С. Кушнер. — Иркутск; Изд-во Иркутского университета, 1982. — 180 с.
10. Подгорный А.Н. Основы и методы теории упругости / А.Н. Подгорный, Г.А. Марченко, В.И. Пустынников. — Киев: Выща школа, 1981. — 328 с.
11. Nesterenko G.A. Calculation-experimental Method of Determining the Propensity for Warping Non-rigid Disks of Hydraulic Machine / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // *Procedia Engineering: "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016"*. — 2017. — P. 278-283.
12. Нестеренко Г. А. Влияние технологических параметров обработки на точность изготовления диска осевого компрессора / Г. А. Нестеренко, И. С. Нестеренко // *Вестник машиностроения*. — 2023. — № 6. — С. 492-494. — DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-6-492-494. — EDN JYCHCH.
13. Nesterenko G.A. Accuracy Forecasting Disks Manufacturing of Axial Power Machines Considering the Forces at the Industrial Process System / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, E.A. Lysenko // *Procedia Engineering*. — 2016. — Vol. 152. — P. 487-492.

14. Жданов А.А. Подходы к измерению сил резания на токарных станках с ЧПУ с применением СОТС / А. А. Жданов, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2023. — № 3(274). — С. 11-14. — DOI 10.35211/1990-5297-2023-3-274-11-14. — EDN DXALUP.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Polkin I. S. Legirovanie, fazovyy sostav i mekhanicheskie svoystva titanovykh splavov [Alloying, Phase Composition and Mechanical Properties of Titanium Alloys] / I. S. Polkin, Yu. B. Egorova, L. V. Davydenko // Tekhnologiya legkikh splavov [Technology of Light Alloys]. — 2022. — No. 2. — p. 4-13. — DOI 10.24412/0321-4664-2022-2-4-13. — EDN EKNYXJ. [in Russian]
2. Bubnov V. A. Titan i ego splavy v mashinostroyeni [Titanium and Its Alloys in Mechanical Engineering] / V. A. Bubnov, A. N. Knyazev // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences]. — 2016. — № 3(42). — p. 92-96. — EDN XHLFQR. [in Russian]
3. Moiseev V. N. Vysokoprochnye titanovye splavy v aviacionnykh konstrukciyakh [High-strength Titanium Alloys in Aviation Structures] / V. N. Moiseev, Yu. A. Gribkov, Yu. I. Zakharov // Aviacionnye materialy i tekhnologii [Aviation Materials and Technologies]. — 2007. — No. 1. — p. 46-51. — EDN QYXRFT. [in Russian]
4. Nesterenko G.A. Raschet progiba polotna diska osevoj gazoperekachivayushchej mashiny [Calculation of the Deflection of the Disk Blade of an Axial Gas Pumping Machine] / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, A.A. Orlov // Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. — 2022. — No. 11. — P. 64–65. — DOI: 10.36652/0042-4633-2022-11-64-65. [in Russian]
5. Nesterenko G. A. Flexure of Disk Blade in an Axial Gas Pump / G. A. Nesterenko, I. S. Nesterenko // Russian Engineering Research. — 2023. — Vol. 43, no. 1. — P. 47–48.
6. Svirshchev V. I. Prognozirovaniye velichiny progiba lopatok GTD po analiticheskim modelyam tekhnicheskikh i geometricheskikh iskhodnykh dannykh pri poperechnom strochnom frezerovanii na mnogoosevykh stankah s CHPU [Prediction of the Deflection Value of Gas Turbine Engine Blades Using Analytical Models of Technical and Geometric Initial Data during Transverse Line Milling on Multi-axis CNC Machines] / V. I. Svirshchev, S. V. Tarasov, V. V. Merezhnikov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Science]. — 2022. — No. 8. — P. 234-243. — DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-234-243. — EDN LFZTBI. [in Russian]
7. Vivdenko Yu.N. Vliyaniye iznosa instrumenta na tochnost' tokarnoy obrabotki nezhestkiykh elementov detaley iz vysokoprochnykh materialov [The Influence of Tool Wear on the Accuracy of Turning Non-rigid Elements of Parts Made of High-strength Materials] / Yu.N. Vivdenko // Optimizatsiya processov rezaniya zharo- i osoboprochnykh materialov. Mezhevuz. sb. [Optimization of Cutting Processes of Heat- and High-strength Materials. Interuniversity. Coll.]. — UFA, 1986 — p. 134–140. [in Russian]
8. Reznikov A.N. Teplofizika rezaniya [Thermophysics of Cutting] / A.N. Reznikov. — M.: Mashinostroyeniye, 1969. — 288 p. [in Russian]
9. Kushner V.S. Termomekhanicheskaya teoriya processa nepreryvnogo rezaniya plastichnykh materialov [Thermo-mechanical Theory of the Process of Continuous Cutting of Plastic Materials] / V.S. Kushner. — Irkutsk; Publishing House of Irkutsk University, 1982. — 180 p. [in Russian]
10. Podgorny A.N. Osnovy i metody teorii uprugosti [Fundamentals and Methods of the Theory of Elasticity] / A.N. Podgorny, G.A. Marchenko, V.I. Pustynnikov. — Kyiv: Vyshcha Shkola, 1981. — 328 p. [in Russian]
11. Nesterenko G.A. Calculation-experimental Method of Determining the Propensity for Warping Non-rigid Disks of Hydraulic Machine / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Procedia Engineering: "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". — 2017. — P. 278-283.
12. Nesterenko G. A. Vliyaniye tekhnologicheskikh parametrov obrabotki na tochnost' izgotovleniya diska osevoogo kompressora [Influence of Technological Processing Parameters on the Manufacturing Accuracy of an Axial Compressor Disk] / G. A. Nesterenko, I. S. Nesterenko // Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. — 2023. — No. 6. — P. 492-494. — DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-6-492-494. — EDN JYCHCH. [in Russian]
13. Nesterenko G.A. Accuracy Forecasting Disks Manufacturing of Axial Power Machines Considering the Forces at the Industrial Process System / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, E.A. Lysenko // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 152. — P. 487-492.
14. Zhdanov A.A. Podhody k izmereniyu sil rezaniya na tokarnykh stankah s CHPU s primeneniem SOTS [Approaches to Measuring Cutting Forces on CNC Lathes Using SOTS] / A. A. Zhdanov, D. V. Krainev, E. M. Frolov [et al.] // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [News of the Volgograd State Technical University]. — 2023. — No. 3(274). — p. 11-14. — DOI 10.35211/1990-5297-2023-3-274-11-14. — EDN DXALUP. [in Russian]