
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№4(24)
2021

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2021» (6 – 10 сентября 2021 года)*

Севастополь 2021

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – РОЩУПКИН С.И.

Научный редактор

к.т.н., проф. ХАРЧЕНКО А.О.

Отв. секретарь

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШОВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Братан С.М., Рощупкин С.И., Часовитина А.С. Взаимосвязь режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при внутреннем шлифовании.....	4
Кудрявцев С.В., Тарапанов А.С., Бурнашов М.А. Повышение стойкости развертки при применении нанопокровов	9
Харченко А.О., Владецкая Е.А. Исследование технологической надежности резбонарезных станочных модулей	14
Стреляная Ю.О. Анализ численных методов расчета шпиндельного узла на гидростатических опорах.....	21
Покинтелица Н.И., Братан М.И., Графова А.Е. Распределение контактных напряжений при термомфрикционной обработке	28
Левченко Е.А. Исследование режущей способности боковых сторон отрезного круга при абразивной разрезке.....	35

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

CONTENTS

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Associate Prof – ROSHCUPKIN S.I.

Scientific Editor

Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.

Executive Secretary

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Editorial team

ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHOV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc.Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

S.M. Bratan, S.I. Roshchupkin, Chasovitina A.S. The relationship of processing modes with the current parameters of the contact zone during internal grinding4	
Kudryavtsev S.V., Tarapanov A.S., Burnashov M.A. Increasing durability of reamer by application of nano coatings.....	9
A.O. Kharchenko, E.A. Vladetskaya Technological reliability study threading machine modules.....	14
Strelyanaya Yu. O. Analysis of numerical methods spindle assembly hydrostatic supports	21
Pokintelitsa N.I., Bratan M.I., Grafova A.E. Distri- bution of contact stresses during thermofrictional pro- cessing	28
Levchenko E.A. Investigation of the cutting ability of the side sides of the cut-off wheel in abrasive cutting	35

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 621.9

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ С ТЕКУЩИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЗОНЫ КОНТАКТА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ

С.М. Братан¹, С.И. Рошчупкин¹, А.С. Часовитина¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В статье приведены результаты исследования параметров качества точного отверстия, зависящих от размеров, пространственного расположения и состояния контактирующих поверхностей, параметров состояния зоны контакта, при чистовом шлифовании. Установлены взаимосвязи режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при внутреннем шлифовании. Разработано уравнение баланса перемещений для дискретных процессов обработки отверстий абразивными инструментами, при выполнении которых анализируемый участок поверхности вступает в контакт с абразивным инструментом периодически.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, зона контакта, уравнение баланса перемещений, абразивная обработка.

THE RELATIONSHIP OF PROCESSING MODES WITH THE CURRENT PARAMETERS OF THE CONTACT ZONE DURING INTERNAL GRINDING

S.M. Bratan¹, S.I. Roshchupkin¹, A.S. Chasovitina¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of a study of the quality parameters of the exact hole, depending on the size, spatial location and condition of the contacting surfaces, parameters of the state of the contact zone, during finishing grinding. The interrelationships of the processing modes with the current parameters of the contact zone during internal grinding are established. A displacement balance equation has been developed for discrete hole processing processes with abrasive tools, during which the analyzed area of the surface comes into contact with the abrasive tool periodically.

Keywords: internal grinding, contact zone, displacement balance equation, abrasive treatment.

Высокий уровень требований к современным машинам и приборам обусловил ряд проблем, связанных с созданием высокопроизводительных технологических процессов, обеспечивающих изготовление деталей с заданными параметрами качества. Параметры качества определяют функциональную пригодность деталей (возможность собираемости в сборочные единицы, узлы и агрегаты, обеспечение герметичности стыков и др.), их эксплуатационные характеристики (усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, контактную жесткость и др.) [1-5].

Окончательно такие параметры формируются на финишных операциях, в числе которых особое место по применимости принадлежит чистовому и тонкому шлифо-

ванию. К таким операциям относятся все виды абразивного, алмазного и комбинированного шлифования, обеспечивающие обработку изделий по 7-6 квалитету при чистовом и 6-5 квалитетам – при тонком шлифовании. В настоящее время в автомобильной и в подшипниковой промышленности ведущих капиталистических стран США, Германии, Италии, Франции, Японии более 40 % трудоемкости механической обработки приходится на долю чистового и тонкого шлифования и, по технико-экономическим прогнозам, ожидается дальнейший рост этого показателя [11].

При выполнении этих операций не всегда обеспечиваются параметры точности обработки и качества поверхности, которые формируются на всем протяжении техноло-

гического процесса [6]. На окончательных, финишных операциях, кроме этого, предъявляются высокие требования к стабильности показателей точности и качества обработки. Достижение эффекта повышения производительности, экономичности при стабилизации заданной точности и других показателей качества обработки любых поверхностей деталей машин за счет разработки новых технологических способов и методов обработки, совершенствования конструкции режущих инструментов, управления процессами обработки и т.д., всегда было и будет в дальнейшем одним из главных направлений развития технологии машиностроения [7-9].

Указанные общие проблемы обработки в значительной мере усугубляются в процессе получения точных отверстий в деталях из прогрессивных материалов, таких как титан и титановые сплавы, различного рода керамических материалов, например, ситаллов, минералокерамики и других хрупких неметаллических материалов. Среди технологических операций обработка отверстий является одной из наиболее распространенных и по объему не уступает обработке наружных поверхностей. Кроме того, обработка точных отверстий относится к числу наиболее трудоемких процессов, является более сложной, чем обработка, наружных поверхностей, что обусловлено более тяжелыми условиями протекания процесса и меньшей жесткостью обрабатываемых инструментов. При обработке отверстий, функционально являющихся исполнительными поверхностями деталей машин, необходимо обеспечивать не только точность размера и формы, точность взаимного расположения их осей по отношению к наружным базовым поверхностям, но и стабильность всех перечисленных показателей является внутреннее шлифование [11].

Математическое моделирование операции внутреннего шлифования позволит решить многие практические задачи по выбору и конструированию инструмента, назначению режимов и условий обработки и является актуальной задачей.

Весьма часто при моделировании операции рассматривается как динамическая система [3]. Одна из возможных схем декомпозиции операции как динамической системы рассматривается в работе [2]. По функциональным признакам операция разбита на подсистемы станка, приспособления, инструмента, заготовки, СОТС. Каждая из подсистем имеет свой набор свойств, параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, вектор возмущающих воздействий.

Центральной подсистемой является зона контакта заготовки с инструментом. К параметрам состояния зоны [2] относятся ее размеры, форма, параметры процесса стружкообразования, скорость съема материала, параметры изнашивания и разрушения абразивного материала. Размеры зоны находятся в прямой связи с размерами и пространственным расположением инструмента и заготовки, состоянием поверхностей сверла и заготовки. В связи с изменением размеров, пространственного расположения и состояния контактирующих поверхностей при каждом новом обороте инструмента будут изменяться и параметры состояния зоны контакта и как следствие – показатели качества и эффективности шлифования [10].

Поэтому целью данной работы является установление взаимосвязей режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при внутреннем шлифовании.

Для установления параметров зоны контакта рассмотрим схему процесса внутреннего шлифования (рис. 1).

При установке заготовки на станок шлифовальной головке сообщают подачу на врезание $S(t)$. Инструмент вращается с окружной скоростью V_k , заготовка – со скоростью V_u . Окружная скорость головки превышает скорость заготовки в 25...50 раз. При сближении инструмента и заготовки межцентровое расстояние A становится больше разности их радиус-векторов, появляется зона контакта, которая представляет собой область взаимного проникновения вершин зерен в обрабатываемый материал и выступов

образующейся шероховатости в промежутки между зёрнами.

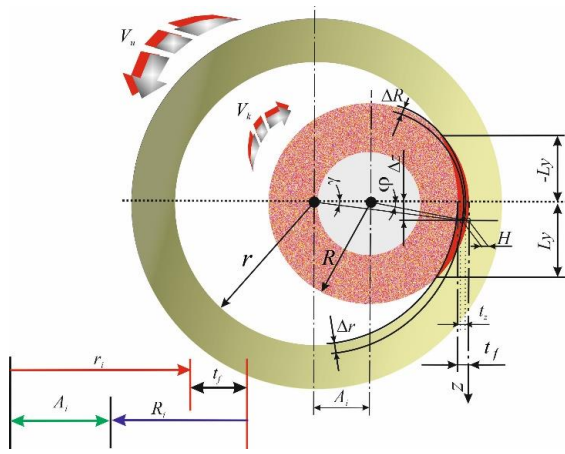


Рис. 1 - Схема процесса внутреннего шлифования

В соответствии размерной схемой процесса внутреннего шлифования, изображенной на рис. 1, величина межцентрового расстояния в момент касания заготовки и инструмента равна разности начальных радиусов заготовки и инструмента:

$$A_0 = r_0(\varphi, x) - R_1(\gamma, x), \quad (1)$$

где $r_0(\varphi, x)$ и $R_1(\gamma, x)$ — начальные радиусы инструмента и величины отверстия заготовки, соответственно, где φ и γ соответствующие углы.

При сближении инструмента и заготовки межцентровое расстояние A становится больше разности их радиус-векторов на расстояние ΔA_1 , появляется зона контакта, которая представляет собой область взаимного проникновения вершин зерен в обрабатываемый материал на глубину t_{fi} . Запишем уравнение (1) для первого оборота (прохода):

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 + \Delta A_1 = r_0(\varphi, x, \tau) - R_1(\gamma, x, \tau) + t_{f1} = \\ &= r_0(\varphi, x, \tau) - R_1(\gamma, x, \tau) + t_{f0} + \Delta t_{fi} . \end{aligned} \quad (2)$$

На основании уравнения (2) приводится математическое описание зоны при i -м контакте сечения поверхности заготовки с базовым участком инструмента, который с мо-

мента правки круга совершает i -й контакт, радиус-вектор базового участка заготовки после i -го контакта обозначим $r_i(\alpha, x, \tau)$, круга — $R_i(\gamma, x, \tau)$, где α и γ соответствующие углы. Для любого момента времени из геометрических построений справедлива зависимость:

$$t_{fi} = R_i(\gamma, x, \tau) - r_{i-1}(\alpha, x, \tau) + A_i, \quad (3)$$

где A_i - расстояние между центрами детали и шлифовальной головки при i -м контакте.

Текущий радиус инструмента с учетом его размерного износа во времени определяется:

$$R_l(\gamma, x, \tau) = R_0(\gamma, x, \tau) - \sum_{k=1}^n \Delta R_{ik}, \quad (4)$$

где $R_0(\gamma, x, \tau)$ – радиус средней окружности круга в начальный момент времени,
 $\sum_{k=1}^n \Delta R_{ik}$ – износ инструмента соответствующем обороте (проходе).

Текущий радиус заготовки

$$r_i(\varphi, x, \tau) = r_0(\varphi, x, \tau) + \sum_{k=1}^n \Delta r_{ik}, \quad (5)$$

где $r_0(\varphi, x, \tau)$ – исходный радиус заготовки; $\sum_{k=1}^n \Delta r_{ik}$ – радиальный съём материала.

Величина межцентрового расстояния может быть определена как:

$$A_i = A_0 + \sum_{k=1}^n \Delta A_i - \Delta R_q + \Delta R_y - \Delta r_q + \Delta r_y, \quad (6)$$

где A_0 – расстояние от базовой поверхности детали до центра вращения инструмента в момент первого касания круга с заготовкой; ΔA_f – значение номинальной подачи по лимбу подач станка; $\Delta R_g, \Delta R_v, \Delta r_g, \Delta r_v$

– соответственно температурные и упругие деформации заготовки и инструмента.

Анализ уравнения (6) показал, что максимальная глубина микрорезания является случайным (вероятностным) многомерным процессом. Следует отметить, что режим резания шлифования одной поверхности изменяется по циклу. Операция шлифования прогнозируема, т.е. при учете фактических координат элементов, величин переменных, возможно рассчитать все выходные данные переходного процесса функционирования системы, а также корректировать их при необходимости.

Рассмотрим изменение глубины резания в процессе обработки заготовки при отсутствии вибраций (внешних возмущений, так следует исключить из уравнения температурные деформации тоже), т.е. при $\Delta R_q = 0, \Delta R_y = 0, \Delta r_q = 0, \Delta r_y = 0$. Для этого подставим зависимости (4),(5),(6) в уравнение (3):

$$t_{fi} = R_0(\gamma, x, \tau) - \sum_{k=1}^n \Delta R_{ik} - r_0(\varphi, x, \tau) + \sum_{k=1}^n \Delta r_{(i-1)k} + A_0 + \sum_{k=1}^n \Delta A_i \quad (7)$$

Полученную зависимость запишем для двух последовательных контактов участка обрабатываемой поверхности с инструментом:

$$\begin{cases} t_{fi} = R_0(\gamma, x, \tau) - \sum_{k=1}^n \Delta R_{ik} - r_0(\varphi, x, \tau) + \\ + \sum_{k=1}^n \Delta r_{(i-1)k} + A_0 + \sum_{k=1}^n \Delta A_i; \\ t_{f(i-1)} = R_0(\gamma, x, \tau) - \sum_{k=1}^n \Delta R_{(i-1)k} - r_0(\varphi, x, \tau) + \\ + \sum_{k=1}^n \Delta r_{(i-2)k} + A_0 + \sum_{k=1}^n \Delta A_{i-1}. \end{cases} \quad (8)$$

Далее из первого уравнения системы (7) вычитаем второе. После приведения подобных слагаемых получим:

$$t_{fi} - t_{f(i-1)} = - \sum_{k=1}^n \Delta R_{ik} + \sum_{k=1}^n \Delta R_{(i-1)k} + \sum_{k=1}^n \Delta r_{(i-1)k} - \sum_{k=1}^n \Delta r_{(i-2)k} + \sum_{k=1}^n \Delta A_i - \sum_{k=1}^n \Delta A_{i-1} \quad (9)$$

Преобразовав уравнение (9), получим уравнение баланса при $(i-1)$ -м контакте:

$$\Delta t_{f(i-1)} = \Delta R_{(i-1)k} - \Delta r_{(i-2)k} + \Delta A_{i-1} \quad (10)$$

С учетом упругих и температурных деформаций для i -го контакта уравнение (10) примет вид:

$$\Delta t_{fi} = \Delta R_{ik} - \Delta r_{(i-1)k} + \Delta A_i - \sum_{k=1}^n \Delta y_{yik} - \sum_{k=1}^m \Delta y_{qik}, \quad (11)$$

где $\sum_{k=1}^n \Delta y_{yik}$ и $\sum_{k=1}^m \Delta y_{qik}$ – суммы приращений упругих и температурных деформаций элементов технологической системы.

Уравнение (11) описывает расход поперечной подачи на i -ом обороте на приращение глубины микрорезания, компенсацию радиального съема материала предшествующего оборота, износ круга, приращения упругих и температурных деформаций. При этом глубина микрорезания и приращение упругих, температурных деформаций влияют на величины радиального износа инструмента и радиального съема материала. В состав уравнения входит элемент последствия $\Delta r_{(i-1)}$, который определяется условиями выполнения предшествующего прохода. При выражении составляющих уравнения через t_{fi} оно решается методом итераций [11].

Таким образом, выполненное описание показывает, что для прогнозирования пространственного положения элементов технологической системы необходимо иметь сведения о параметрах качества заготовки, исходного профиля инструмента и аналитические модели, определяющие связь с технологическими факторами глубины микрорезания, радиального съема материала, износа круга, сил резания, упругих и температурных деформаций.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К., Братан С.М., Каинов Д.А. Моделирование случайных компонент профиля абразивного круга //Тр. Одесского политехнического университета. Науч.произв.практ.сб. по техническим и естественным наукам. –Одесса, – 2001 – Вып.5 – С. 70–74.
2. Новоселов Ю.К., Братан С.М., Каинов Д.А. Влияние состояния рабочей поверхности инструмента на оценку параметров формирующего фильтра //Резание и инструмент в технологических системах.– Меж.нар.науч.тех.сб. – Харьков: ХГПУ, – 2002 – Вып.62 – С. 84–88.
3. Братан С.М., Новоселов Ю.К., Каинов Д.А. Оценка распределения длин стружек при чистовом и тонком шлифовании //Резание и инструмент в технологических системах.- Меж.науч.тех.сб.- Харьков: ХГПУ, - 2003 - Вып.64 - С. 31-36.
4. Malkin, S., Guo, C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.
5. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 1579–1593. – doi: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
6. Paweł Lajmert, Małgorzata Sikora, Dariusz Ostrowski, A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 148, P. 09004. – doi: org/10.1051/mateconf/20181480900.
7. Marco Leonesio, Paolo Parenti, Alberto Cassinari, Giacomo Bianchi, Michele Monn. A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation. // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 4, P. 166-171. – doi: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
8. Novoselov Y., Bratan S., Bogutsky V., Gutsalenko Y. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding // Fiabilitate si Durabilitate - fiability & Durability Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu, Supplement no.1, 2013. – P. 5-15.
9. S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129, P. 01079. doi: org/10.1051/mateconf/201712901079.
10. S. Bratan, Y. Novoselov, B. Bogutsky. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear. // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150, P. 809-814. doi: sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314254.
11. Bratan, S., Roshchupkin, S., Chasovitina, A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes (2021) Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384-389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384

References

1. Novoselov Yu.K., Bratan S.M., Kainov D.A. Modelirovanie sluchaynykh komponent profilya abrazivnogo kruga //Tr. Odesskogo politehnicheskogo un-ta. Nauch.proizv.prakt.sb. po tehnikeskim i estestvennyim naukam. –Odessa, – 2001 – Vip.5 – S. 70–74.
2. Novoselov Yu.K., Bratan S.M., Kainov D.A. Vliyanie sostoyaniya rabochey poverhnosti instrumenta na otsenku parametrov formiruyuschego filtra //Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah.– Mezh.nar.nauch.teh.sb. – Harkov: HGPU, – 2002 – Vyip.62 – S. 84–88.
3. Bratan C.M., Novoselov Yu.K., Kainov D.A. Otsenka raspredeleniya dlin struzhek pri chistovom i tonkom shlifovanii //Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah.- Mezh.nauch.teh.sb.- Harkov: HGPU, - 2003 - Vyip.64 - S. 31-36.
4. Malkin, S., Guo, C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.
5. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 1579–1593. – doi: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
6. Paweł Lajmert, Małgorzata Sikora, Dariusz Ostrowski, A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 148, P. 09004. – doi: org/10.1051/mateconf/20181480900.
7. Marco Leonesio, Paolo Parenti, Alberto Cassinari, Giacomo Bianchi, Michele Monn. A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation. // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 4, P. 166-171. – doi: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
8. Novoselov Y., Bratan S., Bogutsky V., Gutsalenko Y. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding // Fiabilitate si Durabilitate - fiability & Durability Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu, Supplement no.1, 2013. – P. 5-15.
9. S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129, P. 01079. doi: org/10.1051/mateconf/201712901079.
10. S. Bratan, Y. Novoselov, B. Bogutsky. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear. // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150, P. 809-814. doi: sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314254.
11. Bratan, S., Roshchupkin, S., Chasovitina, A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes (2021) Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384-389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384

УДК 621.9

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РАЗВЕРТКИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ НАНОПОКРЫТИЙ

С.В. Кудрявцев¹, А.С. Тарапанов¹, М.А. Бурнашов¹¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается влияние нанопокровтий на стойкость сравнительно низкоскоростного инструмента – развертки. Использование нанопокровтий позволяет снизить коэффициент трения, повышая износостойкость и способствует антикоррозийности в процессе развертывания. Рассмотрена одна из разновидностей нанопокровтий – эпиламы. Эпиламы – это фторсодержащие поверхностно активные вещества (фтор-ПАВ), которые позволяют в большей степени увеличить период стойкости для менее скоростных операций окончательной обработки. По результатам проведенных экспериментов было установлено, что применение нанопокровтий на рабочую поверхность развертки способствует удержанию СОТС (смазочно-охлаждающих технологических сред), что усиливает эффект повышения стойкости инструмента в 1,5-2 раза, также можно сделать вывод, что с увеличением скорости, припуска и подачи развертки эффективность применения нанопокровтий уменьшается, но с увеличением диаметра обрабатываемого отверстия и развертки эффективность применения нанопокровтий незначительно увеличивается.

Ключевые слова: нанопокровтие, развертка, стойкость, эксперименты

INCREASING DURABILITY OF REAMER BY APPLICATION OF NANO COATINGS

S.V. Kudryavtsev¹, A.S. Tarapanov¹, M.A. Burnashov¹¹ FSBEI HE «Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel, Russian Federation

Abstract

The article discusses the effect of nanocoatings on the durability of a relatively low-speed tool – reamers. The use of nanocoatings allows to reduce the coefficient of friction, increasing wear resistance and contributes to anti-corrosion in the process of reaming. One of the varieties of nanocoatings, epilam, is considered. Epilams are fluoride surfactants. Nanocoatings allow greater tool life for slower finishing operations. According to the results of the experiments, it was found that the use of nanocoatings on the working surface of the reamer promotes the retention of cutting fluids (lubricating and cooling technological media), which enhances the effect of increasing the tool life by 1.5-2 times, it can also be concluded that with an increase in speed, allowance and filing of reamer, the efficiency of using nanocoatings decreases, but with an increase in the diameter of the hole to be machined and reamer, the efficiency of using nanocoatings insignificantly increases.

Keywords: nanocoating, reamer, durability, experiments

Стойкость инструмента – это способность сохранять свое служебное назначение при работе до критериального износа [1].

Время T , в течение которого это происходит называется периодом стойкости. Под периодом стойкости в данном случае понимается время работы инструмента между двумя его заточками [2].

Стойкость – важный параметр для процесса развертывания. Чем она выше, тем

дольше новая или восстановительная оснастка может использоваться до необходимости замены или отправки на переточку [3].

На стойкость инструмента влияет достаточное количество факторов. Это и параметры резания, допустим при увеличении скорости резания повышается температура в зоне контакта развертки с обрабатываемым материалом и соответственно она

быстрее изнашивается, свойства используемых СОТС (смазочно-охлаждающих технологических сред) материал заготовки, инструмента и т.д.

Период стойкости развертки можно увеличить с помощью нанопокровтий.

Нанопокровтия знаменуют новый этап в развитии функциональных покровтий, наносящихся различными методами. Использование нанопокровтий позволяет снизить коэффициент трения, повышая износостойкость и способствует антикоррозийности. Все это актуально в области машиностроения. Толщина нанопокровтий составляет от 1 до 100 нм [4].

Они позволяют в большей степени увеличить период стойкости за счет снижения температурных факторов и трения для менее скоростных операций окончательной обработки.

При чистовой обработке отверстия разверткой можно получить более точные размеры (6...8 квалитет) и шероховатость обработанной поверхности ($Ra = 1,25...0,8$ мкм). Высокое качество обработки обеспечивается тем, что развертка имеет большое число режущих кромок (4-14), снимает малый припуск и позволяет снять тонкий слой материала (десятые-сотые доли миллиметра) с высокой точностью. Помимо цилиндрических отверстий развертывают конические отверстия (например, под инструментальные конусы) специальными коническими развертками [5].

Одним из перспективных нанопокровтий являются эпиламы.

Эпиламы – это фторсодержащие поверхностно активные вещества (фтор-ПАВ). Молекула эпилама представляет собой углеводородную цепочку, имеющую форму пространственной спирали, с атомом фтора на одном конце. При образовании плёнки происходит химическая реакция (хемосорбция), в которую вступают материал основы и состав фтор-ПАВ, поэтому адгезия пленки к поверхности основы настолько велика, что выдерживает удельные нагрузки до 300 кг/кв. мм и температуру до 450°C. Молекулы эпилама заполняют микронеровности и микротрещины, снижая поверхностную

хрупкость. Наиболее активно они взаимодействуют с молекулярной структурой основы именно в местах нарушения кристаллической решетки, залечивая дефекты и укрепляя взаимодействующие поверхности. Таким образом, сама пленка предотвращает износ взаимодействующих поверхностей, а ее структура в виде ворса удерживает смазывающие материалы в зоне контакта, исключая сухое трение [6].

Эпиламы обладают отличной проникающей способностью, заполняют поры и микротрещины, замещают единичные атомы кислорода и водорода, аккумулирующие напряжения, и активно противостоят проникновению молекул воды [7].

Одним из важных параметров данных нанопокровтий является предотвращение от адгезионной реакции обработанных поверхностей с другими материалами. Преобразование поверхностной энергии обуславливает повышение адгезии, концентрирует технические жидкости и смазки в точке непосредственного контакта трущихся и сопрягающихся поверхностей, способствует улучшению антикоррозийной стойкости металлов и снижению коэффициента трения в 2÷10 раз [7].

Применение эпиламов совместно с СОТС (смазочно-охлаждающих технологических сред) позволит добиться удержания пленки и соответственно повысить стойкость инструмента, уменьшив температуру за счет снижения трения и существенно снизить износ инструмента.

Тем самым эпиламы являются перспективными нанопокровтиями для сферы производства, в том числе для сравнительно низкоскоростного процесса развертывания и подходят под различные параметры режимов резания (развертывания).

Для проверки эффективности применения нанопокровтий и влияния их на стойкость инструмента были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования по применению нанопокровтий проводились при эксплуатации машинных разверток с режущей частью из стали Р6М5 (ГОСТ

1672-80). Критерием износа была величина полоски на задней поверхности зубьев.

Допустимая величина износа была установлена до 0,8 мм [8].

Величина полоски износа определялась лупой для прибора Бринелли.

Для измерения использовался микроскоп МПБ-2. Устанавливаем его основанием на испытуемый образец так, чтобы отверстие у основания было по возможности концентрично с измеряемым отпечатком, а окно в колонке находилось против внешнего источника света. Наблюдая в окуляр и вращая окулярное кольцо, устанавливаем резкое изображение шкалы сетки. Если при этом изображение отпечатка не будет резким, то вращением установочного кольца, добиваемся получения резкого изображения отпечатка в поле зрения окуляра [9].

На токарном станке 1К62 осуществлялась обработка с пятикратным дублированием каждого опыта. Обработке подвергалась конструкционная сталь 45 ГОСТ 4543-71.

Все поверхности инструмента тщательно очищались и обезжиривались. Эпиламы наносились с помощью кисти и сушились при температуре 100-150 °С не менее 60 минут. Использовался эпилам марки Эфрен-К ТУ 6-02-2-929-87 и СОЖ ГОСТ Р 50558-93.

В промышленности эпилам Эфрен-К приготавливают растворением фторсодержащего ПАВ в смесевом растворителе. Массовая доля ПАВ 5-7 %. Эпилам Эфрен-К – прозрачная бесцветная подвижная жидкость, негорючая, невзрывоопасная. Таким эпиламом обрабатывают поверхность с целью защиты от атмосферной коррозии и придания гидрофобности.

Данный эпилам выдерживает воздействие температуры от –80 °С до +270 °С без ухудшения эксплуатационных свойств с толщиной пленки до 100 нм, общий слой – до 1 мкм [10].

Ниже представлены результаты эксперимента:

При изменении скорости резания с 3 до 7 м/мин, припуске под развертывание 0,09 мм, диаметре развертки 15 мм, подаче по развертывание 0,5 мм/об были получены следующие результаты (рис. 1).

При увеличении скорости резания стойкость разверток с нанопокрытием повышается до 2 раз, а эффективность применения нанопокровтий снижается.

Увеличив диапазон задаваемых припусков с 0,08 до 0,12 мм, при скорости резания 3 м/мин и сохранении остальных вышеуказанных параметров получаем (рис.2).

При увеличении припуска эффективность нанопокровтий уменьшается незначительно.

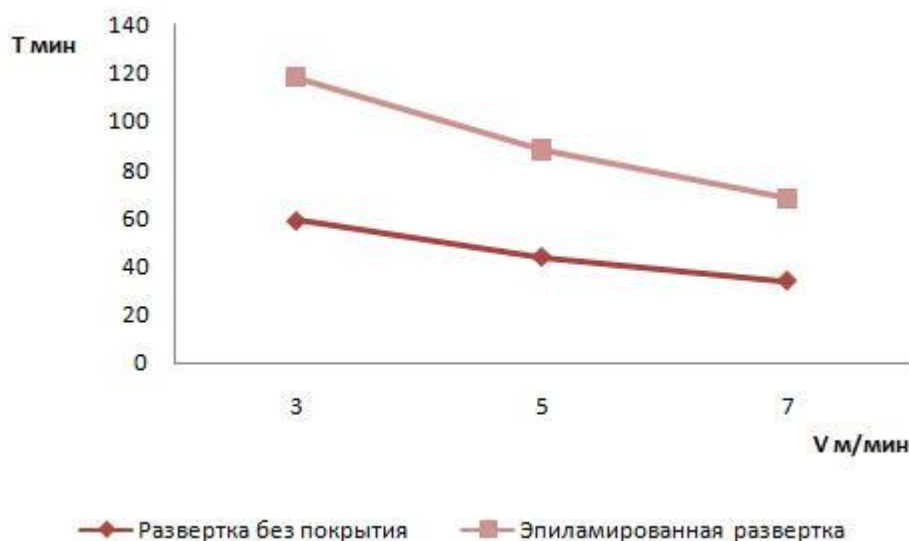


Рис. 1 - Изменение стойкости в зависимости от скорости резания для стали 45

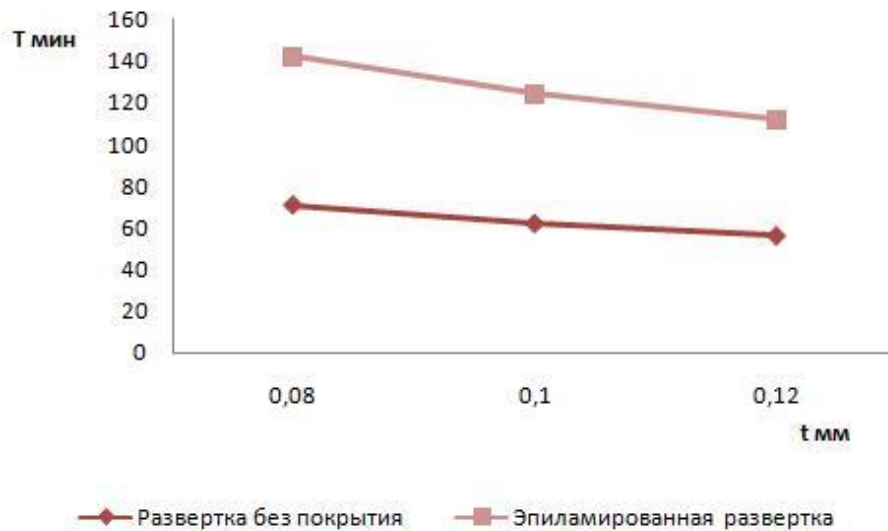


Рис. 2 - Изменение стойкости в зависимости от припуска развертывания для стали 45

При увеличении припуска эффективность нанопокровтий уменьшается незначительно.

Изменение диапазона подачи от 0,5 до 1,2 мм/об, припуске под развертывание от 0,09 мм, скорости резания 3 м/мин, диаметре развертки 15 мм, получаем следующие данные (рис. 3). При увеличении подачи под развертывание эффективность применения нанопокровтий уменьшается.

Изменение диаметра развертки с 10 до 20 мм при скорости резания 3 м/мин, припуске под развертывание 0,09 мм, подаче

под развертывание 0,5 мм/об привело к незначительному повышению стойкости инструмента и эффективности применения нанопокровтий (рис. 4).

Применение нанопокровтий способствует удержанию СОТС (смазочно-охлаждающих технологических сред), что усиливает эффект повышения стойкости инструмента.

Проведенное исследование показало, что нанесение нанопокровтий на рабочую часть развертки повышает её стойкость в 1,5-2

раза.

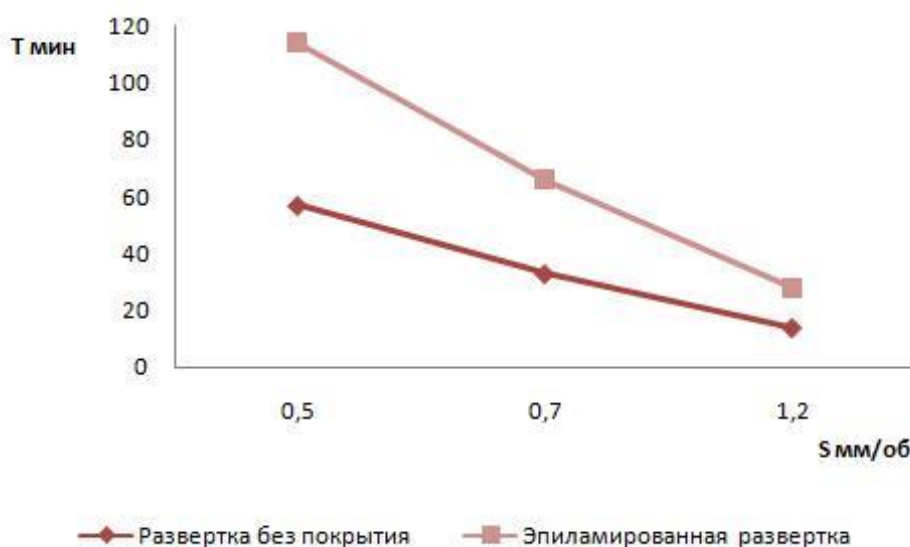


Рис. 3 - Изменение стойкости в зависимости от подачи при развертывании для стали 45

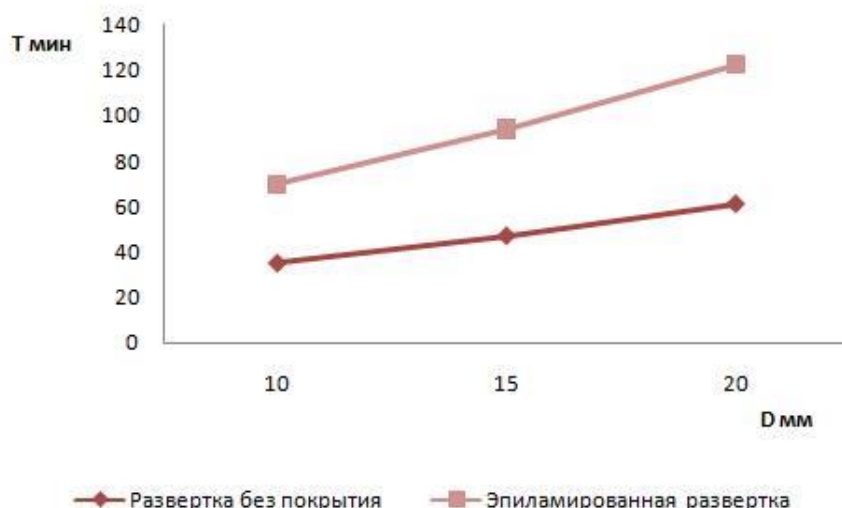


Рис. 4 Изменение стойкости в зависимости от диаметра при развертывании для стали 45

Уменьшение эффективности применения нанопокровтий наиболее заметно при увеличении подачи, затем скорости и припуска, что объясняется увеличением температуры, работы резания и тепловыделения, но с увеличением диаметра обрабатываемого отверстия и развертки эффективность применения нанопокровтий повышается, что объясняется увеличением площади контакта лезвий инструмента и заготовки, а также способствует большей теплоотдаче.

Список литературы

1. <https://libraryno.ru/10-3-stoykost-rezhushchego-instrumenta-rezmatnew/> (дата обращения 09.11.2021)
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов М.: «Машиностроение», 1975 г., 344 с.
3. <https://www.rinscom.com/articles/iznos-rezhushchikh-instrumentov/> (дата обращения 09.11.2021)
4. Мартыновская С. Н. Использование наноматериалов при проектировании деталей и узлов технологических машин и оборудования / Мартыновская С. Н., Снигерева А. В. // Машиностроение: новые концепции и технологии (г. Красноярск, 23–24 октября 2019 года) – Красноярск, 2019 – С. 21-24
5. <https://mydocx.ru/4-110939.html> (дата обращения 07.11.2021)
6. https://metallcheckiportal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/epilami/osnovi_tehnologii_epilamirovaniya_oborudovaniya (дата обращения 07.11.2021)
7. <https://termosmazki.ru/stati/epilamirovanie-kak-sposob-uluchsheniya-kharakteristik-instrumenta> (дата обращения 07.11.2021)

8. <https://epilam.com/goods/epilam-elektroniks/> (дата обращения 07.11.2021)
9. <https://scopica.ru/proj/mikroskop-otschetnyiy-tipa-mpb-2/> (дата обращения 07.11.2021)
10. <https://studfile.net/preview/1751554/page:15/> (дата обращения 07.11.2021)

References

1. <https://libraryno.ru/10-3-stoykost-rezhushchego-instrumenta-rezmatnew/> (date of access 09.11.2021)
2. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting M.: «Mechanical engineering», 1975, 344 p.
3. <https://www.rinscom.com/articles/iznos-rezhushchikh-instrumentov/> (date of access 09.11.2021)
4. Martynovskaya S.N. The use of nanomaterials in the design of parts and assemblies of technological machines and equipment / Martynovskaya S.N., Snigereva A.V. // Mechanical engineering: new and concepts of technology (Krasnoyarsk, 23–24 October 2019) - Krasnoyarsk, 2019 - P. 21-24
5. <https://mydocx.ru/4-110939.html> (date of access 07.11.2021)
6. https://metallcheckiportal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/epilami/osnovi_tehnologii_epilamirovaniya_oborudovaniya (date of access 07.11.2021)
7. <https://termosmazki.ru/stati/epilamirovanie-kak-sposob-uluchsheniya-kharakteristik-instrumenta> (date of access 07.11.2021)
8. <https://epilam.com/goods/epilam-elektroniks/> (date of access 07.11.2021)
9. <https://scopica.ru/proj/mikroskop-otschetnyiy-tipa-mpb-2/> (date of access 07.11.2021)
10. <https://studfile.net/preview/1751554/page:15/> (date of access 07.11.2021)

УДК 621. 923

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОНАРЕЗНЫХ СТАНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В статье представлены результаты анализа и исследований в направлении совершенствования технологического оборудования для внутренней резьбообработки деталей в условиях гибкого автоматизированного производства. Рассмотрены методы оценки технологической надежности резьбонарезных станочных модулей, которые могут быть положены в основу разрабатываемой методики синтеза его элементов. Технологическую систему модуля предложено рассматривать как систему, в которой переходы из состояния в состояние происходят под действием простейших потоков с параметрами вероятностей перехода непрерывной марковской цепи. Разработанная математическая модель, описывающая состояния модуля с учетом параметрических отказов его элементов, а также с учетом восстановлений после этих отказов, позволяет оценить влияние на работу модуля параметров потоков отказов по точности и потоков восстановлений инструмента, станка, приспособления, загрузочного устройства. Решение полученных систем уравнений финальных вероятностей позволяет на основе заданных или полученных интенсивностей потоков отказов для резьбонарезных станочных модулей получить значения вероятности безотказной работы, а также вероятностей нахождения системы в нерабочем состоянии по причине параметрических отказов её элементов. Такой подход позволяет решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации, определить уязвимые по выработанному критерию технологические элементы, усовершенствование которых приведет к созданию наиболее эффективной системы.

Ключевые слова: технологическая надежность, внутренняя мелкоразмерная резьбообработка, технологические элементы модуля, резьбонарезной станочный модуль, параметрические отказы, вероятность безотказной работы.

TECHNOLOGICAL RELIABILITY STUDY THREADING MACHINE MODULES

A.O. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of analysis and research in the direction of improving technological equipment for internal threading of parts in a flexible automated production. Methods for assessing the technological reliability of thread-cutting machine-tool modules are considered, which can be used as the basis for the developed method for the synthesis of its elements. It is proposed to consider the technological system of the module as a system in which transitions from state to state occur under the action of the simplest flows with the parameters of the transition probabilities of a continuous Markov chain. The developed mathematical model, which describes the state of the module, taking into account the parametric failures of its elements, as well as taking into account the recoveries after these failures, makes it possible to assess the influence on the module's operation of the parameters of the flows of failures in terms of accuracy and flows of recoveries of the tool, machine tool, fixture, loading device. The solution of the obtained systems of equations of the final probabilities allows, on the basis of the given or obtained rates of failure streams for thread-cutting machine tool modules, to obtain the values of the probability of failure-free operation, as well as the probabilities of finding the system in an inoperative state due to parametric failures of its elements. This approach makes it possible to solve the synthesis problem at the level of structural and layout optimization, to identify technological elements that are vulnerable according to the developed criterion, the improvement of which will lead to the creation of the most efficient system.

Keywords: technological reliability, internal small-sized thread processing, technological elements of the module, thread-cutting machine module, parametric failures, probability of failure-free operation.

Решение актуальной задачи создания эффективного технологического оборудования для условий гибкого автоматизированного производства, в частности, для мелкоразмерной резбобработки, связано с получением значительного экономического эффекта за счет повышения производительности обработки и улучшения качества изделий. При создании элементов резбонарезных станочных модулей следует учитывать помимо отказов функционирования, влияние потоков параметрических отказов, а также потоков переналадки на выходные показатели системы. Необходимо связать в единое целое параметры переналадки технологических элементов модуля с эксплуатационной и технологической надежностью, описать процесс формирования показателей как результат их взаимодействия в реальных условиях функционирования резбонарезного оборудования. Влияние эксплуатационной надежности на производительность и экономическую эффективность рассмотрено в работах многих авторов [1-9], где предложены модели производительности на основе учета внезапных отказов элементов технологической системы, предполагаются пуассоновские законы надежности и распределение времени восстановления по экспоненциальному закону. При этом установившиеся вероятности существуют и для их определения использованы известные результаты математической теории массового обслуживания [10]. Такой подход к построению математических моделей полезен на предварительном этапе синтеза системы, но для оценки эффективности модулей на последних этапах параметрического синтеза такого показателя явно недостаточно из-за допущений об однородности элементов системы в смысле отказов и обслуживания.

В основу методов аналитической оценки технологической надежности элементов обычно закладываются математические модели изменения точности обработки во времени [11, 12]. Большой вклад в развитие теоретических основ процессов формирования погрешностей обработки на много-

операционных станках внесли работы А.С. Проникова [1, 13]. Разработанные модели для анализа и прогнозирования надежности создают возможности поиска путей уменьшения влияния погрешностей на интенсивность параметрических отказов и воздействия на надежность организационными и конструкторскими методами. Такой подход целесообразно использовать при синтезе модулей на стадии оценки интенсивности параметрических отказов технологических элементов посредством выбора основных видов исходных погрешностей. Для процессов нарезания резьб необходимо при этом определить основные параметры точности обработки, разработать методику их оценки.

В работе В.В. Матвеева [14] на основе исследования технологической надежности резбонарезного оборудования предложена гипотеза о механизме образования размера резьбы при работе метчиком, согласно которой профиль на изделии образуется в результате «переноса» размера инструмента при резании. Автор доказал, что при достигнутом уровне точности исполнения технологической системы нарезание точных резьб может быть реализовано при условии использования оптимальных конструкций метчиков, резбонарезных патронов, несущих шпинделей и самих станков. Используемый исследователями [15, 16] подход позволяет прогнозировать точность резьбовых отверстий при обработке различных материалов и производить разработку практических рекомендаций. Методы определения точностных параметров резьбы могут быть приняты за основу при определении характеристик технологической надежности элементов резбонарезных станочных модулей.

В качестве мероприятий по повышению надежности инструмента следует увеличить его стойкость, прочность, большее внимание уделить выбору его конструкции, режимов эксплуатации. В настоящее время известно множество конструкций метчиков и схем резания [15, 16].

Рекомендации исследователей предназначены и эффективны в основном для узких областей, что затрудняет их использование в условиях гибкого автоматизированного производства. Эти особенности следует учитывать при создании элементов высоконадежных резьбонарезных станочных модулей.

Анализ литературных источников показывает, что резьбонарезные станочные модули обладают всеми признаками технических динамических систем, в частности: модуль состоит из отдельных взаимодействующих подсистем; состояние подсистем и модуля в целом изменяется во времени; каждая подсистема и модуль в целом характеризуется текущим состоянием, историей развития [17, 18].

На основе принятых допущений с учетом проведенного анализа для оценки вариантов выбранных структур необходимо рассмотреть особенности возникновения параметрических отказов, то есть технологическую надежность модуля. Каждый элемент технологической системы может иметь различные интенсивности восстановления μ , также, как и различные интенсивности отказов λ , т.е. разную надежность. При этом более сложный элемент при одинаковом λ может иметь меньшее значение μ (меньшую надежность), либо при одинаковом μ большее значение λ , чем менее сложный элемент. Это необходимо учесть при выборе критериев оценки эффективности модуля.

Технологическая система резьбонарезного станочного модуля как дискретная система вследствие параметрических отказов, возникающих в результате деформаций инструмента, погрешностей позиционирования загрузочного устройства, приспособления, биения шпинделя, изменения температуры станка и элементов устройства управления теряет исправность, не обеспечивая точности обработки.

Модуль вследствие этого может находиться в состояниях S'_{00} , S'_{10} , S'_{20} , S'_{30} , S'_{01} , S'_{02} , S'_{03} , S'_{11} , S'_{21} , S'_{31} , S'_{12} , S'_{22} , S'_{32} , S'_{13} , S'_{23} , S'_{33} .

Состояние S'_{00} характеризует исправную работу модуля при отсутствии параметрических отказов.

В состоянии S'_{10} наблюдаются параметрические отказы инструмента с интенсивностью λ_{01} . В этом случае $\lambda_{01} = 1/\overline{Tu''}$, где $\overline{Tu''}$ – среднее время между двумя параметрическими отказами инструмента, мин.

В состоянии S'_{20} требуется осмотр и подналадка станка, резьбонарезной головки вследствие потока отказов с интенсивностью λ_{02} . При этом $\lambda_{02} = 1/\overline{Tc''}$, где $\overline{Tc''}$ – среднее время между двумя параметрическими отказами станка, мин.

Состояние S'_{30} характеризуется одновременным наличием потоков параметрических отказов инструмента λ_{01} и станка λ_{02} .

В состоянии S'_{01} требуется осмотр и подналадка приспособления с интенсивностью поступающих параметрических отказов λ'_{01} . При этом $\lambda'_{01} = 1/\overline{Tn''}$, где $\overline{Tn''}$ – среднее время между двумя параметрическими отказами приспособления, мин.

Состояние S'_{02} характеризуется наличием параметрических отказов загрузочного устройства вследствие потока с интенсивностью заявок λ'_{02} . В этом случае $\lambda'_{02} = 1/\overline{Tz''}$, где $\overline{Tz''}$ – среднее время между двумя параметрическими отказами загрузочного устройства, мин.

В состоянии S'_{03} требуется осмотр и подналадка приспособления и загрузочного устройства вследствие потоков поступающих параметрических отказов с интенсивностями λ'_{01} и λ'_{02} .

Состояние S'_{11} характеризуется одновременным наличием потоков параметрических отказов инструмента с интенсивностью λ_{01} и приспособления с интенсивностью λ'_{01} .

В состоянии S'_{21} требуется осмотр и подналадка станка и приспособления, вызванных соответственно потоками отказов с интенсивностями λ'_{02} и λ'_{01} .

Состояние S'_{31} характеризуется одновременным наличием потоков параметрических отказов инструмента λ_{01} , станка λ_{02} и приспособления λ'_{01} .

В состоянии S'_{12} требуется осмотр и подналадка инструмента и загрузочного устройства вследствие потоков параметрических отказов с интенсивностями λ_{01} и λ'_{02} .

Состояние S'_{22} характеризуется одновременным наличием параметрических отказов станка с интенсивностью λ_{02} и загрузочного устройства с интенсивностью λ'_{02} .

В состоянии S'_{32} требуется осмотр и подналадка инструмента, станка и загрузочного устройства, вызванные соответственно потоками отказов с интенсивностями λ_{01} , λ_{02} и λ'_{02} .

Состояние S'_{13} характеризуется наличием потоков параметрических отказов инструмента с интенсивностью λ_{01} , приспособления с интенсивностью λ'_{01} и загрузочного устройства с интенсивностью λ'_{02} .

В состоянии S'_{23} требуется осмотр и подналадка станка, приспособления и загрузочного устройства из-за потоков параметрических отказов с интенсивностями соответственно λ'_{02} , λ'_{01} и λ'_{02} .

Состояние S'_{33} характеризуется наличием потоков параметрических отказов инструмента с интенсивностью λ_{01} , станка с интенсивностью λ_{02} , приспособления с интенсивностью λ'_{01} и загрузочного устройства с интенсивностью λ'_{02} .

Величины $\overline{Tu''}$, $\overline{Tc''}$, $\overline{Tn''}$, $\overline{Tz''}$ определяют по общей формуле:

$$\overline{T''} = \sum_{j=1}^k t_j / k,$$

где k – число параметрических отказов соответствующего технологического элемента в процессе эксплуатации станочного модуля; t_j – интервал времени между $(j-1)$ -й и j -й отказами.

Каждый технологический элемент модуля подвергается восстановлению сразу после параметрического отказа. Интенсивности восстановления соответственно для каждого технологического элемента $\mu_{01}, \mu_{02}, \mu'_{01}, \mu'_{02}$. При этом $\mu_{01} = 1/\overline{Tvu''}$, $\mu_{02} = 1/\overline{Tvc''}$, $\mu'_{01} = 1/\overline{Tvn''}$, $\mu'_{02} = 1/\overline{Tvz''}$, где $\overline{Tvu''}$ – среднее время восстановления (осмотра и подналадки) инструмента, мин; $\overline{Tvc''}$ – среднее время осмотра и подналадки станка, мин; $\overline{Tvn''}$ – среднее время осмотра и подналадки приспособления, мин; $\overline{Tvz''}$ – среднее время осмотра и подналадки загрузочного устройства, мин.

Для описания размеченного графа состояний технологической системы резбонарезного станочного модуля с учетом параметрических отказов (рис. 1) приняты следующие обозначения:

P'_{00} – вероятность работы модуля при отсутствии параметрических отказов, $P'_{00} = P(S'_{00})$;

$P'_{10}, P'_{20}, P'_{30}$ – соответственно вероятности параметрических отказов инструмента, станка, инструмента и станка одновременно;

$P'_{01}, P'_{02}, P'_{03}$ – вероятности параметрических отказов соответственно приспособления, загрузочного устройства, приспособления и загрузочного устройства одновременно;

$P'_{11}, P'_{21}, P'_{31}$ – соответственно вероятности параметрических отказов инструмента и приспособления; станка и приспособления; инструмента, станка и приспособления одновременно;

$P'_{12}, P'_{22}, P'_{32}$ – вероятности параметрических отказов инструмента и загрузочного устройства; станка и загрузочного устройства; инструмента, станка и загрузочного устройства;

$P'_{13}, P'_{23}, P'_{33}$ – вероятности параметрических отказов инструмента, приспособления и загрузочного устройства; станка, приспособления и загрузочного устройства; одно-

временно всех технологических элементов – инструмента, станка, приспособления и загрузочного устройства.

Уравнения для финальных вероятностей

$P'_{00}, P'_{10}, P'_{20}, P'_{30}, P'_{01}, P'_{02}, P'_{03}, P'_{11}, P'_{21}, P'_{31}, P'_{12}, P'_{22}, P'_{32}, P'_{13}, P'_{23}, P'_{33}$ состояний представляются в виде системы уравнений А.Н. Колмогорова:

$$\left. \begin{aligned} P_{00}(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda'_{01} + \lambda'_{02}) &= P'_{10}\mu_{01} + P'_{20}\mu_{02} + P'_{01}\mu'_{01} + P'_{02}\mu'_{02} \\ P'_{10}(\lambda_{02} + \lambda'_{01} + \lambda'_{02} + \mu_{01}) &= P'_{00}\lambda_{01} + P'_{30}\mu_{02} + P'_{11}\mu'_{01} + P'_{12}\mu'_{02} \\ P'_{20}(\lambda_{01} + \lambda'_{01} + \lambda'_{02} + \mu_{02}) &= P'_{00}\lambda_{02} + P'_{30}\mu_{01} + P'_{21}\mu'_{01} + P'_{22}\mu'_{02} \\ P'_{30}(\lambda'_{01} + \lambda'_{02} + \mu_{01} + \mu_{02}) &= P'_{20}\lambda_{01} + P'_{10}\lambda_{02} + P'_{31}\mu'_{01} + P'_{32}\mu'_{02} \\ P'_{01}(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda'_{02} + \mu'_{01}) &= P'_{11}\mu_{01} + P'_{21}\mu_{02} + P'_{00}\lambda'_{01} + P'_{03}\mu'_{02} \\ P'_{11}(\lambda_{02} + \lambda'_{02} + \mu'_{01} + \mu_{01}) &= P'_{01}\lambda_{01} + P'_{10}\lambda'_{01} + P'_{31}\mu'_{02} + P'_{13}\mu'_{02} \\ P'_{21}(\lambda_{01} + \lambda'_{02} + \mu_{02} + \mu'_{01}) &= P'_{01}\lambda_{02} + P'_{20}\lambda'_{01} + P'_{31}\mu_{01} + P'_{23}\mu'_{02} \\ P'_{31}(\lambda'_{02} + \mu_{01} + \mu_{02} + \mu'_{01}) &= P'_{30}\lambda'_{01} + P'_{21}\lambda_{01} + P'_{11}\lambda_{02} + P'_{33}\mu'_{02} \\ P'_{02}(\lambda_{01} + \lambda'_{01} + \lambda_{02} + \mu'_{02}) &= P'_{00}\lambda_{02} + P'_{03}\mu'_{01} + P'_{22}\mu_{02} + P'_{12}\mu'_{01} \\ P'_{12}(\lambda'_{01} + \lambda_{02} + \mu_{01} + \mu'_{02}) &= P'_{02}\lambda_{01} + P'_{10}\lambda'_{02} + P'_{32}\mu_{02} + P'_{13}\mu'_{01} \\ P'_{22}(\lambda_{01} + \lambda'_{01} + \mu_{02} + \mu'_{02}) &= P'_{02}\lambda_{02} + P'_{20}\lambda'_{02} + P'_{33}\mu_{01} + P'_{23}\mu'_{01} \\ P'_{32}(\lambda'_{01} + \mu_{01} + \mu_{02} + \mu'_{02}) &= P'_{22}\lambda_{01} + P'_{12}\lambda_{02} + P'_{30}\lambda'_{02} + P'_{33}\mu'_{01} \\ P'_{03}(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \mu'_{01} + \mu'_{02}) &= P'_{02}\lambda'_{01} + P'_{01}\lambda'_{02} + P'_{13}\mu_{01} + P'_{23}\mu_{02} \\ P'_{13}(\lambda_{02} + \mu_{01} + \mu'_{01} + \mu'_{02}) &= P'_{03}\lambda_{01} + P'_{11}\lambda'_{02} + P'_{12}\lambda'_{01} + P'_{33}\mu_{02} \\ P'_{23}(\lambda_{01} + \mu_{02} + \mu'_{01} + \mu'_{02}) &= P'_{03}\lambda_{02} + P'_{22}\lambda'_{01} + P'_{31}\lambda'_{02} + P'_{33}\mu_{01} \\ P'_{33}(\mu_{01} + \mu_{02} + \mu'_{01} + \mu'_{02}) &= P'_{23}\lambda_{01} + P'_{13}\lambda_{02} + P'_{32}\lambda'_{01} + P'_{31}\lambda'_{02} \end{aligned} \right\}$$

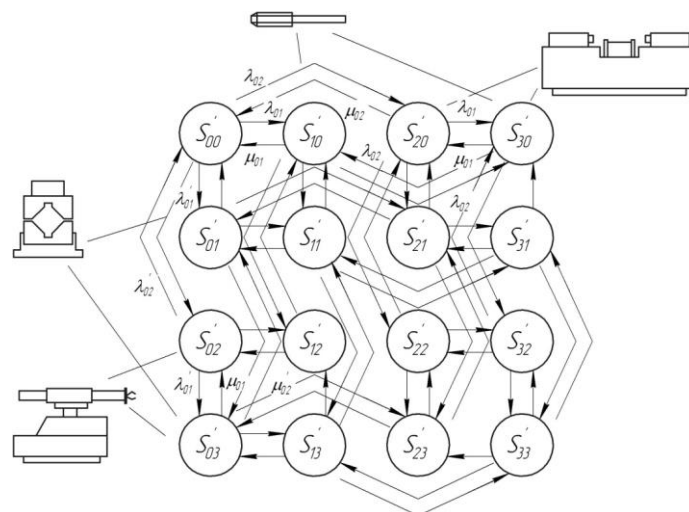


Рис. 1. Размеченный граф состояний технологической системы резьбонарезного станочного модуля с учетом параметрических отказов

Решение данной системы уравнений с помощью условия нормировки $P'_{00} + P'_{10} + P'_{20} + P'_{30} + P'_{01} + P'_{02} + P'_{03} + P'_{11} + P'_{21} + P'_{31} + P'_{12} + P'_{22} + P'_{32} + P'_{13} + P'_{23} + P'_{33} = 1$ позволяет получить выражения для вероятности безотказно-параметрической работы (P'_{00}), а также вероятностей нахождения системы в неисправном состоянии по причине соответствующих параметрических отказов одного или нескольких (в разных сочетаниях) технологических элементов резьбонарезного станочного модуля (инструмента – P'_{10} , элементов станка – P'_{20} , приспособления – P'_{01} , загрузочного устройства – P'_{02}).

Разработанная математическая модель описывает состояния резьбонарезного станочного модуля с учетом параметрических отказов и восстановлений после указанных отказов. Она позволяет учесть технологическую надежность инструмента, силовой резьбонарезной головки, базовых элементов станка, приспособления, загрузочного устройства при выборе оптимальной структуры модуля. Структура модели и размеченный граф состояний системы могут совершенствоваться по мере уточнения числа параметров и характеристик. Для более полной и объективной оценки предпочтительного для использования в условиях ГПС варианта модуля необходим учет стохастических процессов, происходящих в системе в реальных условиях функционирования, а также выработка критерия оптимальности и интегральной оценочной функции. Такой критерий должен учитывать наряду с надежностью (эксплуатационной и технологической) также гибкость (переналаживаемость) и экономическую эффективность модуля [19,20]. Такой подход позволяет решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации, определить уязвимые по разработанному критерию технологические элементы, усовершенствование которых приведет к созданию наиболее эффективной системы.

Список литературы

1. Проников А.С. Металлорежущие станки и автоматы / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1981. – 479 с.
2. Пуш В.Э. Автоматические станочные системы / В.Э. Пуш, Р. Пигерт, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
3. Вопросы теории и техники гибких автоматизированных производственных систем // Сборник научных трудов: Труды ЛПИ, 1984. – №400. – 104 с.
4. Грудов А.А. Пути увеличения точности нарезаемой резьбы и стойкости метчиков / А.А. Грудов. – М.: МСИП, ВНИИ, 1971. – 128 с.
5. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
6. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
7. Меламед Г.И. Гибкое автоматическое производство. Станки с ЧПУ и роботы / Г.И. Меламед, Б.М. Турсунов. – Минск: Беларусь, 1986. – 159 с.
8. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкогабаритных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
9. Рыжов Э.В. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Шешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
11. Григорьян Г.Д. Элементы надежности технологических процессов / Г.Д. Григорьян. – Киев-Одесса: Вища школа, 1984. – 214 с.
12. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 380 с.
13. Проников А.С. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1982. – 279 с.
14. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
15. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
16. Ямников А.С. Определение динамических погрешностей при нарезании резьб мерным инструментом / А.С. Ямников // Исследования в области технологии образования наружных и внутренних резьб, резьбообразующих инструментов, станков и методов контроля резьб: Межвуз. сб. – Тула: ТПИ, 1974. – С.68-72.
17. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48-52.

18. Харченко А.О. Разработка гибких производственных модулей с учетом надежности технологических систем / А.О. Харченко. – К.: Общество «Знание», 1989. – 20 с.

19. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.

20. Харченко А.О. Исследование показателей надежности при формообразовании мелкоразмерных резьб метчиками / А.О. Харченко, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2020. – Вып.4(20). – С.14-18.

References

1. Pronikov A.S. Metalloreshushchiye stanki i avtomaty (Metal-cutting machines and automatic machines) / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 479 s.
2. Push V.E. Avtomaticheskiye stanochnyye sistemy (Automatic machine tools) / V.E. Push, R. Pigert, V.L. Sosonkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 319 s.
3. Voprosy teorii i tekhniki gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem (Questions of theory and technology of flexible automated production systems) // Sbornik nauchnykh trudov: Trudy LPI, 1984. – №400. – 104 s.
4. Grudov A.A. Puti uvelicheniya tochnosti narezayemoy rez'by i stoykosti metchikov (Ways of increasing the accuracy of the cut thread and the resistance of taps) / A.A. Grudov. – M.: MSIP, VNII, 1971. – 128 s.
5. Men'shakov V.M. Besstruzhechnyye metchiki (Shaving taps) / V.M. Men'shakov, G.P. Uralpov, V.S. Sereda. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 167 s.
6. Yakukhin V.G. Optimal'naya tekhnologiya izgotovleniya rez'b (Optimal technology for the manufacture of threads) / V.G. Yakukhin. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 184 s.
7. Melamed G.I. Gibkoye avtomaticheskoye proizvodstvo. Stanki s ChPU i roboty (Flexible automatic production. CNC machines and robots) / G.I. Melamed, B.M. Tursunov. – Minsk: Belarus', 1986. – 159 s.
8. Bratan S.M. Povysheniye tochnosti formoobrazovaniya melkorazmernykh rez'b metchikami v aluminievyykh splavakh: monografiya (Improving the accuracy of forming small-sized threads with taps in aluminum alloys) / S.M. Bratan, F.N. Kanareyev, P.A. Novikov, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 164 s.
9. Ryzhov E.V. Raskatyvaniye rez'b (Thread rolling) / E.V. Ryzhov, O.S. Andreychikov, A.Ye. Steshkov. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 122 s.

10. Venttsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya (Probability theory and its engineering applications) / Ye.S. Venttsel', L.A. Ovcharov. – M.: Vysshaya shkola, 2000. – 480 s.

11. Grigor'yan G.D. Elementy nadezhnosti tekhnologicheskikh protsessov (Elements of reliability of technological processes) / G.D. Grigor'yan. – Kiyev-Odessa: Vishcha shkola, 1984. – 214 s.

12. Matalin A.A. Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki i proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov (Accuracy of mechanical processing and design of technological processes) / A.A. Matalin. – M.: Mashinostroyeniye, 1970. – 380 s.

13. Pronikov A.S. Tochnost' i nadezhnost' stankov s chislovym programmnyim upravleniyem (Accuracy and reliability of numerical control machines) / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 279 s.

14. Matveyev V.V. Narezaniye tochnykh rez'b (Precision thread cutting) / V.V. Matveyev. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 88 s.

15. Frumin Yu.L. Vysokoproizvoditel'nyy rez'boobrazuyushchiy instrument (High-performance thread-forming tool) / Yu.L. Frumin. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 183 s.

16. Yamnikov A.S. Opredeleniye dinamicheskikh pogreshnostey pri narezanii rez'b mernym instrumentom (Determination of dynamic errors when cutting threads with a measuring instrument) / A.S. Yamnikov // Issledovaniya v oblasti tekhnologii obrazovaniya naruzhnykh i vnutrennykh rez'b, rez'boobrazuyushchikh instrumentov, stankov i metodov kontrolya rez'b: Mezhev. sb. – Tula: TPI, 1974. – S.68-72.

17. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48-52.

18. Kharchenko A.O. Razrabotka gibkikh proizvodstvennykh moduley s uchetom nadezhnosti tekhnologicheskikh sistem (Development of flexible production modules taking into account the reliability of technological systems) / A.O. Kharchenko. – K.: Obshchestvo «Znaniye», 1989. – 20 s.

19. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov: praktikum (Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines: practical) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – M.: Tsentrkatolog, 2018. – 144 s.

20. Kharchenko A.O. Issledovaniye pokazateley nadezhnosti pri formoobrazovanii melkorazmernykh rez'b metchikami (Investigation of reliability indicators in shaping small-sized threads by taps) / A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko, Ye.A. Vladetskaya // Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol': SevGU, 2020. – №.4(20). – S.14-18.

УДК 621.9.06.

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Ю.О. Стреляная¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Анализируется применение численных методов при моделировании шпиндельных узлов тяжелых токарных станков на гидростатических опорах. Приведена линейная постановка алгоритма расчета методом конечных элементов и рассмотрен прямой метод построения уравнений, связывающих факторы состояний в пределах конечного элемента в линейной постановке. В статье проанализированы сложности решения методом Галеркина и показаны пути решения методом конечных элементов, позволяющие построение локальных полиномиальных базисных функций, удовлетворяющих главным граничным условиям с использованием сетки конечных элементов. Так же приведены и бессеточные методы построения базисных функций и удовлетворения граничных условий.

Ключевые слова: шпиндельный узел, математическая модель, конечные элементы, гидростатическая опора, смазка, сетка.

ANALYSIS OF NUMERICAL METHODS SPINDLE ASSEMBLY HYDROSTATIC SUPPORTS

Yu. O. Strelyanaya¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The application of numerical methods in modeling the spindle units of heavy lathes on hydrostatic supports is analyzed. A linear formulation of the algorithm for calculating by the finite element method is presented and a direct method for constructing equations linking the factors of states within a finite element in a linear formulation is considered. The article analyzes the complexity of the solution by the Galerkin method and shows the ways of solving by the finite element method, allowing the construction of local polynomial basis functions that satisfy the main boundary conditions using a finite element mesh. Meshless methods for constructing basic functions and satisfying boundary conditions are also given.

Keywords: spindle assembly, mathematical model, finite elements, hydrostatic support, lubrication, mesh.

При функционировании гидравлических опор имеет место рабочий процесс, обусловленный упругими деформациями элементов конструкции под воздействием внешних силовых факторов и давлений, возникающих в слое жидкости, течением жидкости (смазочного материала) между взаимосопрягаемыми поверхностями опор и тепловыми явлениями вследствие вязкого трения и прокачки смазочного материала под давлением [1-9]. Для выявления рациональных и оптимальных конструктивных параметров опор, необходимо применение численных методов расчета этих явлений.

Математические модели сплошной среды приводят к уравнениям в частных производных, которым удовлетворяют средние

величины. К уравнениям в частных производных приводят задачи гидродинамики, теплопроводности, теории упругости, и многие другие [10-12].

В случае решения обыкновенных дифференциальных уравнений имеется ряд уравнений, интегрируемых в квадратурах. Решение большинства уравнений можно получить, используя только численные методы. Принципиально различных постановок задач довольно немного: в основном это задача Коши, краевая задача для линейных уравнений, краевая задача для нелинейных уравнений. Имеется небольшое количество теоретически исследованных и практически отработанных алгоритмов, позволяющих эффективно решать существенную часть за-

дач, связанных с численным решением обыкновенных дифференциальных уравнений.

Большое количество различных постановок задач, связанных с решением уравнений в частных производных, привело к тому, что теория численных методов в этом направлении дробится на большое число направлений. Использование численных методов с применением ЭВМ сильно расширило возможности в исследовании подобных задач. Разработанные алгоритмы дают возможность решать с приемлемой затратой машинного времени подавляющее большинство краевых задач, связанных с решением одно- и многомерных уравнений параболического типа с переменными коэффициентами, в частности с коэффициентами, зависящими от решения [7,8].

Целью данной статьи, является анализ методов построения, которые наиболее целесообразно использовать при моделировании шпиндельных узлов тяжелых токарных станков на гидростатических опорах.

В настоящее время, наряду с вариационно- и проекционно-разностными (метод конечных элементов) сеточные методы решения уравнений с частными производными являются наиболее распространенными. При решении задач сеточными методами мы получаем совокупность приближенных значений решения в некоторой конечной базисной системе точек.

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет семейство проекционных методов с кусочно-полиномиальными финитными пробными функциями, носителями которых являются окрестности узлов нерегулярной сетки ячеек (конечных элементов). Суть метода конечных элементов заключается в том, что заданная система разбивается для расчета на отдельные элементы конечных размеров — конечные элементы. Эти элементы могут быть как плоскими, так и пространственными, иметь весьма разнообразную геометрическую форму, но обязательно такую, которая позволяет исследовать напряженное состояние элемента, находящегося под действием внешних нагрузок и сил, обусловленных взаимодействием со-

седних элементов. Условия равновесия и уравнения совместности деформаций и перемещений в местах сочленения конечных элементов (узлах) позволяют осуществить обратный переход от некоторой совокупности конечных элементов к заданной конструкции. Таким образом, непрерывная система условно заменяется системой с конечным числом определяемых перемещений (с конечным числом степеней свободы). При этом целью является анализ сил и перемещений узлов сопряжения конечных элементов. Такой подход позволяет выполнять расчет не только стержневых систем, но и пластин, оболочек, тонкостенных стержней, массивов, т.е. любых конструкций с самой сложной геометрией. С математической точки зрения и метода конечных элементов задача сводится к решению систем алгебраических уравнений вместо дифференциальных.

Для определения коэффициентов разложения решения по базисным функциям в методе конечных элементов применяются вариационные формулировки начально-краевых задач. В нелинейных задачах применяется вариационная формулировка Галеркина

$$\int_V (\partial_1 Y + G(Y)) \Psi dV - \sum_{i=1}^3 \left(\int_V F_i \partial_{x_i} \Psi dV + \int_S F_i(Y) n_i \Psi dS \right) = 0$$

$$t = 0, x \in V : Y = Y_0(x)$$

$$t \geq 0, x \in S_Y : Y = Y_g(x, t) \quad , \quad (1)$$

$$t \geq 0, x \in S_F : F_i(Y) n_i = F_n(x, t)$$

где Ψ - произвольная достаточно гладкая функция $S_F = S \setminus S_Y$, $S = \partial V$. Здесь выписаны вариационное уравнение Галеркина, начальные условия, граничные главные и граничные естественные условия.

Решение (1) ищется в виде разложения по кусочно-полиномиальным финитным пробным функциям аппроксимационного базиса связанных с узлами и ячейками конечно-элементной сетки.

$$Y = \sum_{i=1}^N a_i(t) \phi_i(x)$$

Основным преимуществом метода конечных элементов для решения задач гидродинамической теории смазки является его органическая способность реализовать граничные условия, полагающие равенство нулю искомой функции и первой производной от нее в соответствующем направлении. По теореме Эйлера решение исходного дифференциального уравнения эквивалентно требованию минимизации соответствующего функционала, что реализуется методом конечных элементов при линейной вариации давления по элементу. В пределах конечного элемента назначаются свойства, ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики жесткости и прочности материала, плотность и т. д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике твердого тела это перемещения, деформации, напряжения и т. д.). Параметры из второй группы назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, как правило, перемещения и усилия. В качестве конечных элементов используются согласованные и несогласованные треугольники и прямоугольники. Установлена предпочтительность применения последних при решении рассматриваемых задач. Обеспечив удовлетворение интерполяционных функций формы требованиям полноты, функционал минимизируется приближенно, при этом расходы через узлы, не лежащие на границах исследуемой области, принимаются равными нулю. Учет ленточного вида матрицы текучести в сочетании с оптимальным порядком нумерации узлов позволяет минимизировать объем массива для хранения указанной матрицы. Для повышения точности результатов и сокращения времени счета поле узловых давлений и расходов вначале определяется для грубой схемы дискретизации (как и при конечно-разностном методе), после чего вводятся дополнительные узлы та-

ким образом, чтобы их концентрация в области решения была пропорциональна градиенту искомой функции, например, давления. В качестве первого приближения для нового ансамбля узловых точек используется решение, полученное для грубой схемы.

Однако при реализации системы конечно-элементных уравнений, аппроксимирующих исходное дифференциальное уравнение, обеспечивается очень малая скорость сходимости, а во многих случаях процесс является вообще расходящимся. Необходимость реализации, вообще говоря, нелинейной системы уравнений снижает преимущества конечно-элементного метода решения исходных уравнений по сравнению с конечно-разностным.

Учитывая вышеизложенные обстоятельства, можно констатировать, что для рассматриваемого класса задач метод конечных элементов еще требует доработки и особых преимуществ по сравнению с методом конечных разностей не дает, тем более, что решения, получаемые методом конечных элементов с разбиением двумерной области на треугольные либо прямоугольные элементы, и методом конечных разностей с аппроксимацией исходных уравнений согласно схеме центральной пятиточечной звезды, дают практически одинаковые результаты. Здесь следует лишь отметить, что в случае, когда ожидается резкий градиент изменения исследуемой функции, необходимо локально измельчить шаг конечно-разностной сетки в зоне ожидаемого явления. [13,14]

Линейная постановка алгоритма расчета

Имея математический аппарат для получения матриц жесткости конечных элементов, приведения нагрузок, приложенных к поверхности или в объеме элемента к усилиям в узлах, а также решения обратных задач: вычисления полей деформаций и напряжений в объеме элемента на базе перемещений в узлах, можно построить алгоритм МКЭ.

1. Производится дискретизация объема, занимаемого деталью или сборкой на элементы, или, другими словами, строится сетка конечных элементов. Для объемного тела

область разбивается (в рамках функциональности Autodesk Inventor) на тетраэдры с гранями, аппроксимируемыми линейными (линейная зависимость от координат) или параболическими функциями координат. Для поверхностных моделей — на плоские (линейная) или криволинейные (параболическая зависимость) треугольники.

2. Для пространственных конечных элементов степенями свободы являются перемещения в направлении осей локальной системы координат элемента. Для конечных элементов оболочек к трем перемещениям в каждом узле добавляются по три угла поворота нормали к срединной поверхности области, аппроксимируемой элементом, относительно тех же осей.

3. Определяются зависимости для преобразования перемещений и углов поворота в узлах к глобальной системе координат.

4. Вычисляются матрицы жесткости конечных элементов. В формулы для расчета компонентов матриц жесткости конечных элементов помимо координат узлов входят модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов. То есть если анализируется сборка, то в зависимости от принадлежности элемента детали при расчете матриц жесткости элементов используются соответствующие характеристики жесткости материала.

5. Полученные матрицы жесткости с использованием зависимостей для перехода от локальных систем координат элемента в глобальные преобразуются в глобальную систему координат.

6. Матрицы жесткости, представленные в глобальных координатах, объединяются в глобальную матрицу жесткости $[k]$.

7. Назначенные граничные условия, статические и кинематические, приводятся к нагрузкам и перемещениям в узлах, выраженным в глобальной системе координат, и включаются в столбец усилий $[F]$.

8. Полученная линейная система уравнений вида

$$[K] \cdot [\Delta] = [F] \quad (2)$$

решается относительно столбца перемещений. Это наиболее трудоемкий этап расчета. Для решения используются итерационные или прямые методы. Матрица жесткости $[K]$, как правило, хранится в компактной форме, структура которой определяется до этапа ее заполнения матрицами жесткости элементов.

9. Для каждого конечного элемента, имея перемещения (углы поворота) в узлах и аппроксимирующие функции, рассчитываются деформации. Если элементы линейные — деформации в пределах элементов постоянные, если элементы параболические — деформации изменяются линейно. На основе деформаций вычисляются напряжения в элементах. При необходимости (функция программы) напряжения в узлах смежных элементов усредняются (это также весьма ответственный этап, по-разному решаемый в различных программах) с последующим пересчетом напряжений в пределах каждого элемента.

10. На основе компонентов напряженно-деформированного состояния и параметров прочности материала (материалов) производится вычисление эквивалентных напряжений по какому-либо критерию прочности. [4]

Прямой метод построения уравнений, связывающих факторы состояний в пределах конечного элемента в линейной постановке

1. Поле перемещений A в пределах элемента (для пространственной задачи $\Delta = [u, v, w]$) посредством интерполяционных функций (в так называемых изопараметрических конечных элементах, используемых, в частности, в Autodesk Inventor), собранных в матрицу $[N]$, выражается через узловые перемещения $\{\Delta\}$. Зная такие величины, например, перемещений в узлах, можно получить их значения, линейную интерполяцию, в любой точке рассматриваемого элемента в зависимости от координат. В матричном виде соотношения имеют вид:

$$\Delta = N \cdot \{\lambda\}$$

Для пространственной задачи,

$$\{\lambda\} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_k, v_k, w_k]$$

где k — число узлов конечного элемента.

2. Поле деформаций ε выражается через степени свободы $\{\Delta\}$ посредством дифференцирования поля перемещений (а, фактически, интерполяционных функций) согласно соотношениям, собранным в матрицу $[D]$ и связывающим деформации с перемещениями:

$$s = [D] \cdot \{\Delta\}$$

3. С учетом уравнений состояния, на основе закона Гука, и коэффициенты которых образуют матрицу $[E]$, устанавливается связь сначала между полем напряжений и полем деформаций: $\sigma = [E] \cdot \varepsilon$, а затем и между напряжениями и степенями свободы в узлах:

$$\sigma = [E] \cdot [D] \cdot \{\lambda\}$$

4. Формулируются выражения для сил $\{F\}$, действующих в вершинах элемента, в зависимости от поля напряжений $[A]$, для чего используется матрица преобразования напряжений в узловые силы $[A]$:

$$\{F\} = [A] \cdot \sigma$$

5. Связываются выражения для узловых сил и перемещений в узлах:

$$\{F\} = [k] \cdot \{\Delta\},$$

где $[k] = [A] \cdot [E] \cdot [D]$ — матрица жесткости конечного элемента.

6. Для придания матрице $[k]$ свойства симметрии добиваемся замены матрицы преобразования жесткости матрицей, транс-

понированной к матрице преобразования перемещений в деформации $[D]$. [15] Тогда:

$$[k] = [D]^T \cdot [E] \cdot [D].$$

Перечисленные зависимости позволяют, зная перемещения в узлах, получить величины сил, а также решить обратную задачу: по силам найти перемещения, затем деформации и напряжения в пределах конечного элемента.

Прямая формулировка, как правило, используется для получения матриц жесткости конечных элементов стержней, балок и пластин, а также для описания процесса теплопроводности.

Аналитический расчет интегралов в выражении для матрицы жесткости невозможен даже для треугольников с криволинейными сторонами. Поэтому прибегают к численному интегрированию. Оно заключается в замене интеграла суммой произведений подынтегральных выражений, вычисленных в точках Гаусса или в некоторой другой системе точек на соответствующие весовые коэффициенты. Этот процесс сопровождается расчетом величины определителя якобиана. Отрицательная величина является следствием вырожденности данного конечного элемента. Как правило, информация о данном обстоятельстве помещается в диагностические сообщения программ.

К перспективам, можно отнести преодоление сложности расчета объекта с помощью сложность разработки специализированного программного обеспечения.

Классический метод Галеркина, использующий глобальные базисные функции, испытывает трудности, связанные с удовлетворением граничным условиям в случае областей решения сложной геометрии. В методе конечных элементов упомянутые трудности, связанные со сложной геометрией, преодолеваются путем построения локальных полиномиальных базисных функций, удовлетворяющих главным граничным условиям с использованием сетки конечных элементов. Однако, разработаны и бессеточные методы построения базисных функций и

удовлетворения граничных условий. Перечислим ниже основные такие методы.

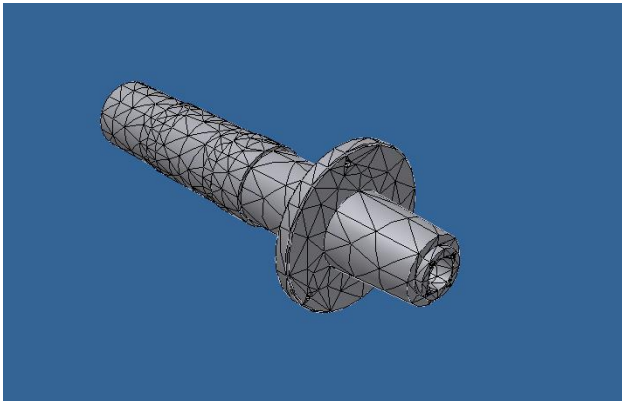


Рис. 1. Сетка конечных элементов шпиндельного узла на гидростатических опорах

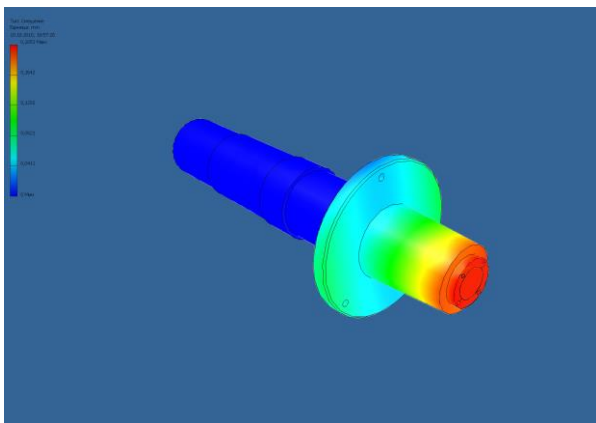


Рис.2. Пример расчета напряженно-деформированного состояния шпиндельного вала на гидростатических опорах в Autodesk Inventor

В бессеточных методах Галеркина применяются финитные базисные функции, связанные со свободными узлами (частицами). Такие базисные функции строятся без объединения узлов в ячейки (то есть, без построения сетки), что позволяет использовать подвижные узлы для описания сложных движений сплошной среды и при этом исключить трудности, связанные с искажениями ячеек подвижных сеток.

В бессеточных спектральных методах Галеркина в качестве пробных функций используется набор собственных функций приближенного оператора задачи. Такой выбор базиса обеспечивает ускоренную сходимость приближенных решений с ростом числа базисных функций.

Список литературы

1. Проников А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник – учебник. В 3-х т. Т.2 Ч.1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А.С. Проников – М.: Машиностроение, 1995.-371 с.
2. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин – М.: Машиностроение, 1969. – 359с.
3. Чернянский, П.М. Проектирование и ремонт шпиндельных узлов: учеб. пособие / П.М. Чернянский, А.Г. Схиртладзе. – М.: ИНФРА –М, 2018. – 272 с.
4. Ковалев В.Д. Опоры и передачи жидкостного трения станочного оборудования: составление и анализ / Ковалев В.Д., Бабин О.Ф. Учебное пособие. – Краматорск: ДГМА, 2005. – 188с.
5. Стреляная Ю.О. Управление точностью шпиндельного узла при помощи адаптивных гидростатических опор с обратной связью / Ю.О. Стреляная // Вестник современных технологий: сборник научных трудов. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2017. – Вып.7. – С. 43–49.
6. Ковалев В.Д. Исследование точности тяжелых станков с гидростатическими направляющими с учетом жесткости несущих систем / В.Д. Ковалев, О.Ф. Бабин, А.И. Донченко, С.А. Кузьменко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк, 2000. – Вып. 12.– С.111–115.
7. Батищев Д.И. Поисковые методы оптимального проектирования. / Д.И. Батищев – М.: Сов.радио, 1975. – 216 с.
8. Бушуев В.В. Гидростатическая смазка в тяжелых станках / В.В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 1989.- 162с.
9. Бушуев В.В. Тепловые явления в гидростатических опорах/ В.В. Бушуев, О.К. Цыпунов // Станки и инструмент. – 1987. – № 11. – С. 27–29.
10. Численное решение задач в гидромеханике: Механика. Новое в заруб. науке / Под ред. Р.Рихтмайера. – М.: Мир, 1997. – Сер. 14.- 208 с.
11. Кудинов А.В. Синтез коррекции гидравлических систем методом решения обратных задач / А.В. Кудинов // Математическое обеспечение многомерных систем с мини-ЭВМ. – М.: Энергомашиздат, 1986. – С 77–85.
12. Громадка Т.В. Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах / Т.В. Громадка, Ч. Лей. – М: Мир, 1990. – 304 с.
13. Бахвалов Н.С. Численные методы/ Н.С. Бахвалов – М: Наука, 1973. – 631с.
14. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Г. М. Кобельков. — 6-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008 — 636 с.: ил.
15. Калиткин Н.Н. Численные методы / Калиткин Н.Н. – М: Наука, 1978. – 512 с.

References

1. Pronikov A.S. Design of metal-cutting machine tools and machine-tool systems: Handbook - textbook. in 3-vol. V.2 part.1. Calculation and design of units and elements of machine tools / A.S. Pronikov – M.: Mechanical engineering, 1995.- p.371
2. Balakshin B.S. Fundamentals of mechanical engineering technology / B.S. Balakshin – M.: Mechanical engineering, 1969. – p.359
3. Chernyanskiy P.M. Design and repair of spindle nodes: textbook. allowance / P.M. Chernyanskiy, A.G. Shirladze. – M.: INFRA –M, 2018. – p. 272
4. Kovalev V.D. Supports and transmission of fluid friction of a hundred-night equipment: compilation and analysis / Kovalev V.D., Babin O.F. Tutorial. – Kramatorsk: DSMA, 2005. – p.188
5. Strelyanaya Yu.O. Controlling the precision of the spindle assembly using adaptive hydrostatic bearings with feedback / Yu.O. Strelyanaya // Bulletin of modern technologies: collection of scientific papers. - Sevastopol: FSAEI of HE SevSU, 2017. – Ed.7. – p. 43–49.
6. Kovalev V.D. Investigation of the accuracy of heavy machine tools with hydrostatic guides, taking into account the rigidity of the bearing systems / Kovalev V.D., O.F. babin, A.I. Donchenko, S.A. Kuzmenko // Progressive technologies and systems of machine building. – Donetsk, 2000. – Ed. 12.– p.111–115.
7. Batish`ev D.I. Search methods for optimal design. / Д.И. Batish`ev – M.: Sov.radio, 1975. – p.216.
8. Bushuev V.V. Hydrostatic lubrication in heavy machines / Bushuev V.V – M.: Mechanical engineering, 1989.- p. 162.
9. Bushuev V.V Thermal phenomena in hydrostatic supports / Bushuev V.V, O.K. Cipunov // Machine tools and tools. – 1987. – № 11. – p. 27–29.
10. Numerical solution of problems in hydromechanics: Mechanics. New in foreign science / Ed. by R.Rihtmayer. – M.: World, 1997. – vol. 14.- p. 208
11. Kudinov A.V. Synthesis of correction of hydraulic systems by solving inverse problems / A.V. Kudinov // Software for multidimensional systems with minicomputers. – M.: Energomashizdat, 1986. – p 77–85.
12. Gromadka T.V. Complex Boundary Element Method in Engineering Problems / T.V. Gromadka, Ch. Ley. – M: World, 1990. – p.304.
13. Bahvalov N.S. Numerical Methods / N.S. Bahvalov – M: Science, 1973. – p.631.
14. Bahvalov N.S. Numerical Methods / N.S. Bahvalov, G. M. Kobel`kov. — 6 vol. — M.: BINOM. Knowledge laboratory, 2008 — p.636: pic.
15. Kalitkin N.N. Numerical Methods / Kalitkin N.N. – M: Science, 1978. – p.512.

УДК 621.914.02

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Н.И. Покинтелица¹, М.И. Братан¹, А.Е. Графова¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Представлены расчетные зависимости для определения контактных напряжений при термофрикционной обработке, которые с учетом закономерностей деформированного состояния срезаемого слоя могут быть использованы для разработки научно-обоснованной системы оптимизации процесса термофрикционного резания. Установлено, что в процессе термофрикционного резания срезаемый слой претерпевает значительное формообразование, при котором не соблюдаются условия простого нагружения, однородности и монотонности протекания пластической деформации. Определено, что при термофрикционном резании в условиях значительных деформаций нагретого до высокопластичного состояния материала в зоне резания, когда угол сдвига, и практически применяемыми скоростями резания, и передним углом, близким к нулю, боковые границы контакта расположены таким образом, что максимальный его размер по ширине находится на режущей кромке диска, очертания контура которого близки к эллипсу.

Ключевые слова: резание, контакт, заготовка, термофрикционный, слой, сдвиг, напряжение, контур, трение

DISTRIBUTION OF CONTACT STRESSES DURING THERMOFRICTIONAL PROCESSING

N.I. Pokintelitsa¹, M.I. Bratan¹, A.E. Grafova¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Calculated dependences to define contact tensions in the process of thermofrictional treatment have been given. These dependences can be used to develop scientifically-based system of optimization of thermofrictional cutting process when appropriateness of deformed state of cut layer have been taken in to consideration. It was found that in the process of thermo-frictional cutting, the cut layer undergoes significant form-formation, in which the conditions of simple loading, homogeneity and monotonicity of plastic deformation flow are not met. It was determined that during thermal friction cutting under conditions of significant deformations of the material heated to a highly plastic state in the cutting zone, when the shear angle, and practically applied cutting speeds, and the rake angle close to zero, the lateral boundaries of the contact are located in such a way that the maximum its width is at the cutting edge of the disc, the contour of which is close to an ellipse.

Keywords: cutting, contact, workpiece, thermofrictional, layer, shear, stress, contour, friction

К одному из эффективных направлений улучшения обрабатываемости металлов резанием относится предварительный нагрев срезаемого слоя, что приводит к уменьшению сопротивления деформированию обрабатываемого материала, определяет повышение режимов резания, стойкости инструмента и рост производительности труда. Термофрикционное резание (ТФР) представляет собой комбинированный метод, сочетающий тепловое и механическое воздействие на обрабатываемый металл, осуществляемое путем непосредственного контакта

заготовки и вращающегося с большой окружной скоростью (до 80 м/с) стального режущего диска (РД).

Данный вид обработки характеризуется высокотемпературным нагревом контактного участка зоны стружкообразования и неразрывно связанным с ним термическим разупрочнением обрабатываемого материала, значительным снижением его механических свойств и сил трения на передней поверхности РД. Образованная в таких условиях сливная стружка имеет, как правило, отрицательную усадку и углы скалывания (сдви-

га) величиной, превышающей 45° , что установлено металлографическими исследованиями.

Проведенные ранее исследования позволили создать математические модели энергосиловых и тепловых явлений. Были изучены особенности процесса стружкообразования и стойкости, а также предложены перспективные конструкции дисков [1].

Способ термофрикционной обработки (ТФО) специфичен, а исследование контактных явлений в зоне стружкообразования связано с большими трудностями. Характер процессов, происходящих в зоне резания, можно установить, прежде всего, на основе анализа косвенных показателей и зависимостей (температура и давление в зоне резания, скорость деформации, вид стружки и др.).

Целью настоящей работы является определение деформированного и напряженного состояния контактной зоны при ТФО, что является важным и необходимым этапом для изучения особенностей процесса обработки заготовок РД.

В процессе ТФР срезаемый слой претерпевает значительное формообразование, при котором не соблюдаются условия простого нагружения, однородности и монотонности протекания пластической деформации. Тем не менее, для рассматриваемой материальной частицы, занимающей весьма малый объем деформируемого тела, можно гарантировать монотонность процесса деформации, когда известны направления главных осей напряженного состояния в этой элементарной частице, которые согласно условию монотонности должны совпадать с главными осями скорости деформации и главными осями результирующей деформации. При этом вид напряженного состояния будет соответствовать виду конечной деформации [2].

На рис. 1. приведена схема разложения равнодействующей силы R_n , приложенной в точке A контакта на режущей кромке инструмента, на нормальную силу N и силу трения F_N , на силы P_S и P_N , действующие, соответственно, по направлению максимальных касательных напряжений Au и пер-

пендикулярно к нему, а также силы P_{Z_0} и P_{N_0} , которые представляют собой часть главной и нормальной составляющих равнодействующей силы, соответствующей данной точке режущей кромки на передней поверхности инструмента. Согласно этой схеме, угол ρ между равнодействующей силой R_n и силой P_S , а также дополнительный к нему угол ψ_2 , могут быть представлены зависимостями

$$\begin{aligned}\rho &= \omega + \chi = \eta_n - \gamma + \chi; \\ \psi_2 &= 90^\circ + \gamma - (\eta_n + \chi),\end{aligned}\quad (1)$$

где ω – угол действия для точки A на режущей кромке инструмента; η_n – угол трения для указанной точки; χ – угол, определяющий направление действия максимальных касательных напряжений.

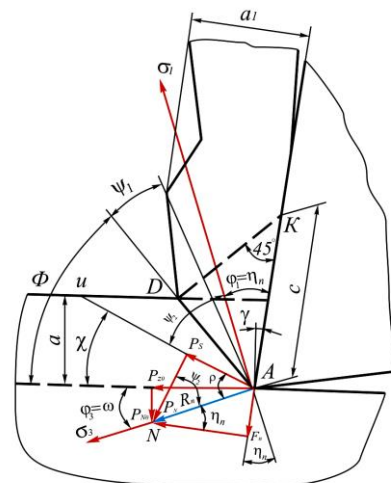


Рис. 1. Схема разложения равнодействующей силы R_n в точке контакта на режущей кромке инструмента

Учитывая, что $\psi_2 = 45^\circ$, значение χ может быть записано в следующем виде

$$\chi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\eta_n + \omega}{2}.$$

На основании формулы (1) можно заключить, что угол φ_1 между направлением главного напряжения σ_1 и передней поверх-

ностью инструмента равен углу трения η_n , который в свою очередь является углом между перпендикуляром, опущенным из данной точки контакта на направление равнодействующей силы R_n , и передней поверхностью. Из этого вытекает весьма важное следствие о том, что главное напряжение $\sigma_3 = 0$. Действительно, нормальное напряжение σ и полное касательное напряжение τ_n , действующее в произвольно наклоненной площадке с направляющими косинусами l , m и n , определяются уравнениями

$$\sigma = l^2 \sigma_1 + m^2 \sigma_2 + n^2 \sigma_3. \quad (2)$$

$$\tau_n^2 = l^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2 + n^2 \sigma_3^2 - \sigma^2. \quad (3)$$

Применительно к передней поверхности инструмента, если принять $\sigma_3 = 0$, получим

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \varphi_1.$$

$$\begin{aligned} \tau_n^2 &= \sigma_1^2 \cos \varphi_1 - \sigma_1^2 \cos^4 \varphi_1 = \\ &= \sigma_1^2 \cos^2 \varphi_1 \sin \varphi_1. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\tau_n = \sigma_1 \cos \varphi_1 \sin \varphi_1. \quad (5)$$

При этом

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \eta_n &= \frac{\tau_n}{\sigma} = \frac{\sigma_1 \cos \varphi_1 \sin \varphi_1}{\sigma_1 \cos^2 \varphi_1} = \operatorname{tg} \varphi_1 \\ &\text{и } \eta_n = \varphi_1. \end{aligned}$$

Гидростатическое давление в данном случае (при $\sigma_3 = 0$) рассчитывается по формуле

$$p = \sigma'_3 = -\frac{2}{3} \sigma_i \cos(60^\circ - \Phi). \quad (6)$$

Можно также показать, что $p = \sigma'_3$, когда $\sigma = \tau_n$. Это имеет место на площадке, расположенной под углом 45° к направлению главных напряжений σ_1 и σ_3 , где действуют максимальные касательные напряжения. Для этой площадки

$$\sigma_\chi = \sigma_1 \cos^2 45^\circ + \sigma_3 \cos^2 45^\circ = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2},$$

$$\tau_{31} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

Выразив σ_χ и τ_{31} через девиаторные напряжения σ'_1 , σ'_3 и гидростатическое давление p , получим

$$\begin{aligned} \sigma_\chi &= \frac{\sigma'_1 - p + \sigma'_3 - p}{2} = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - p = -\frac{\sigma'_2}{2} - p, \\ \tau_{31} &= \frac{\sigma'_1 - p - \sigma'_3 + p}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}. \end{aligned}$$

При $\sigma_\chi = \tau_{31}$

$$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - p = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \text{ и } p = \sigma'_3.$$

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в точке A на режущей кромке инструмента имеет место плоское напряженное состояние при $\sigma_3 = 0$. Можно утверждать, что это относится также и к другим точкам пластического контакта на передней поверхности инструмента. При этом на девиатор накладывается отрицательный шаровой тензор (гидростатическое давление растяжения).

С учетом выражения (6) формулы для расчета главных напряжений будут иметь вид

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{2}{3} \sigma_i \cos \Phi + \frac{2}{3} \sigma_i \cos(60^\circ - \Phi) = \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ), \\ \sigma_2 &= \frac{2}{3} \sigma_i \sin(\Phi - 30^\circ) + \\ &+ \frac{2}{3} \sigma_i \cos(60^\circ - \Phi) = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_i \sin \Phi, \\ \sigma_3 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Максимальное касательное напряжение τ_{31} , действующее в направлении Au под углом χ к плоскости резания (рис. 1), а также нормальное напряжение σ_χ , перпендикулярное к этому направлению, можно рассчи-

тать по формуле

$$\tau_{31} = \sigma_{\chi} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ).$$

В направлении AD под углом сдвига Φ касательное и нормальное напряжения определяются выражениями

$$\tau_{\Phi} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ) \sin 2(\xi - \Phi),$$

$$\sigma_{\Phi} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ) \cos^2(\xi - \Phi).$$

Согласно формулам (4) и (5), при $\varphi_1 = \eta_n$ нормальное σ_n и касательное τ_n напряжения в точке A на передней поверхности инструмента выражаются зависимостями

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_1 \cos^2 \eta_n = \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ) \cos^2 \eta_n, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tau_n &= \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\eta_n = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ) \sin 2\eta_n, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\eta_n = 45 + \gamma - \chi.$$

Из формулы (9)

$$\sin 2\eta_n = \frac{2\tau_n}{\sigma_1} = \frac{\sqrt{3}\tau_n}{\sigma_i \cos(\Phi - 30^\circ)}.$$

Анализ этой формулы показывает, что угол трения η_n на передней поверхности инструмента у режущей кромки всегда меньше, чем 45° . В пределах возможного изменения угла сдвига $0 < \Phi < 60^\circ$ максимальное значение угла η_n будет при $\Phi = 0$ и $\Phi = 60^\circ$. В указанных пределах

$$\sin 2\eta_n < \frac{2\tau_n}{\sigma_i}.$$

Так как при крайних значениях угла сдвига согласно формулам (2), (3), (7)

$$\tau_n = \frac{1}{2} \sigma_i, \text{ то } \sin 2\eta_n < 1 \text{ и } \eta_n < 45^\circ.$$

Важным вопросом в теории напряженного состояния срезаемого слоя является определение закономерности распределения нормальных и касательных напряжений на передней поверхности инструмента. Многочисленными экспериментальными исследованиями, выполненными различными авторами установлено, что в зоне пластического контакта на передней поверхности инструмента касательные напряжения τ_n изменяются весьма незначительно и могут быть в первом приближении приняты постоянными для данных условий резания (рис. 2). В связи с этим касательные напряжения, рассчитанные по формуле (9), действительны для всех точек пластического контакта [3]. Что касается нормальных напряжений σ_n , то они, как показывают исследования, уменьшаются в направлении от режущей кромки диска к противоположной границе пластического контакта.

Для определения закона изменения нормальных напряжений необходимо рассмотреть конфигурацию пластического контакта на передней поверхности диска при ТФР. Анализ показал, что в зависимости от физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемых материалов и условий резания, а, следовательно, и степени деформации, изменяется не только длина C , но и очертания контура пластического контакта. При ТФР в условиях значительных деформаций нагретого до высокопластичного состояния материала в зоне резания, когда угол сдвига $\Phi \geq 45^\circ$, и практически применяемыми скоростями резания, и передним углом γ , близким к нулю, боковые границы контакта расположены таким образом, что максимальный его размер по ширине находится на режущей кромке диска, очертания контура которого близки к эллипсу.

Следует отметить, что указанное изменение формы пластического контакта соответствует известному в теории пластичности принципу наименьшего периметра, согласно которому при осадке (сжатии) призматического или цилиндрического тела с наличием контактного трения его поперечное сечение стремится принять форму с наименьшим пе-

чина ε_{ix} возрастает и достигает максимума в конце пластического контакта.

Таким образом, определены все необходимые данные для расчета в любой точке контакта нормального напряжения σ_{nx} , формулу для которого на основании зависимости (9) можно представить в виде

$$\sigma_{nx} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_{ix} \cos(\beta_{ex} - 30^\circ) \cos^2 \eta_{nx}.$$

Интенсивность напряженного состояния σ_{ix} находится по определенному значению интенсивности деформации ε_{ix} , а угол трения η_{nx} – по формуле

$$\sin 2\eta_{nx} = \frac{\sqrt{3}\tau_n}{\sigma_{ix} \cos(\beta_{ex} - 30^\circ)}.$$

Анализ расчетных значений параметров напряженного состояния деформируемого элементарного объема вблизи режущей кромки инструмента показывает, что как на передней, так и на задней поверхностях они в малой степени зависят от скорости резания. Значительное влияние на величину контактных напряжений оказывают прочностные и теплофизические характеристики обрабатываемого материала. Так, с увеличением предела прочности и уменьшением теплопроводности величины интенсивности напряжений, главных и касательных напряжений, а также гидростатическое давление – увеличиваются.

Расчеты показали, что на передней и задней поверхностях имеет место плоское напряженное состояние с равенством нулю главных напряжений, соответственно σ_{1n} и σ_{23} . Анализируя данные расчетов можно сделать вывод, что напряженное состояние элементарного объема вблизи режущей кромки можно рассматривать как результат наложения гидростатического давления на схему простого сжатия.

Характер изменения нормальных напряжений и гидростатического давления со всей очевидностью подтверждает гипотезу

о постоянстве гидростатического давления в зоне резания.

В результате проведенных исследований с использованием теории пластичности получены расчетные зависимости для определения контактных напряжений и сил на режущих поверхностях диска, которые с учетом закономерностей деформированного состояния срезаемого слоя могут быть использованы для разработки научно-обоснованной системы оптимизации процесса ТФР.

Список литературы

1. Зарубицкий Е.У. Исследование конструкций режущих дисков при термофрикционной обработке плоскостей / Е.У. Зарубицкий, Н.И. Покинтелица // Высокие технологии в машиностроении. — Харьков: ХГПУ, 1998. — С. 121–122.
2. Pokintelitsa N. The Study of the Kinetics of the Protective Coating Formation in the Mechanochemical Vibrational / N. Pokintelitsa, E. Levchenko/ Materials Today: Proceedings Volume 11, Part 1, 2019, Pages 543-547 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.026>.
3. Pokintelitsa N. Thermophysical processes in thermofriction working of surfaces / N. Pokintelitsa, E. Levchenko/ Materials Today: Proceedings IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 022008 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/2/022008

References

1. Zarubickij E.U. Issledovanie konstrukcij rezhushchih diskov pri termofrikcionnoj obrabotke ploskostej / E.U. Zarubickij, N.I. Pokintelica // Vysokie tekhnologii v mashinostroenii. — Har'kov: HGPU, 1998. — S. 121–122.
2. Pokintelitsa N. The Study of the Kinetics of the Protective Coating Formation in the Mechanochemical Vibrational / N. Pokintelitsa, E. Levchenko/ Materials Today: Proceedings Volume 11, Part 1, 2019, Pages 543-547 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.026>.
3. Pokintelitsa N. Thermophysical processes in thermofriction working of surfaces / N. Pokintelitsa, E. Levchenko/ Materials Today: Proceedings IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 022008 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/2/022008.

УДК 621.01

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БОКОВЫХ СТОРОН ОТРЕЗНОГО КРУГА ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ

Е.А. Левченко¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Производственное применение отрезных кругов с боковыми режущими поверхностями для обработки различных материалов представляет значительный интерес для всех металлообрабатывающих предприятий, производящих разрезание труб. В статье рассмотрены вопросы моделирования режущей способности боковых поверхностей, исходя из требований, предъявляемых к отрезному кругу. Представлены результаты эмпирического расчета элементов конструкции торцов отрезных кругов с определением величины изменения относительной режущей способности круга при абразивной разрезке с постоянной производительностью и постоянной силой. Предложена методика, которая дает возможность легко воссоздать характер изменения относительной режущей способности круга при обработке поверхностей сложной геометрической формы, для которых непосредственный подсчет количества обработанного материала затруднителен.

Ключевые слова: отрезной круг, абразивная разрезка, режущая способность, моделирование, качество разрезки.

INVESTIGATION OF THE CUTTING ABILITY OF THE SIDE SIDES OF THE CUT-OFF WHEEL IN ABRASIVE CUTTING

E.A. Levchenko¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The industrial use of cutting wheels with side cutting surfaces for processing various materials is of considerable interest for all metalworking enterprises that cut pipes. The article discusses the issues of modeling the cutting ability of the side surfaces, based on the requirements for the cut-off wheel. The results of the empirical calculation of the structural elements of the ends of cutting wheels with the determination of the magnitude of the change in the relative cutting ability of the wheel during abrasive cutting with constant productivity and constant force are presented. A technique is proposed that makes it possible to easily recreate the nature of the change in the relative cutting ability of a wheel when processing surfaces of complex geometric shapes, for which direct calculation of the amount of processed material is difficult.

Keywords: cut-off wheel, abrasive cutting, cutting ability, modeling, cutting quality.

Введение

Абразивную разрезку можно представить как разновидность процесса врезного шлифования. Абразивный отрезной круг можно представить как дисковую фрезу с множеством режущих зубьев, которые в процессе разрезки совершают массовое микрорезание-царапание (рис. 1). Периферийная поверхность отрезных кругов работает в режиме самозатачивания. По мере работы затупившиеся зерна вырываются из связки, обнажая новые, с острыми кромками [1, 15].

Процесс резания периферией круга сопровождается снятием стружек [6].

Основной отличительной особенностью данного процесса по сравнению с другими разновидностями абразивной обработки является то, что взаимодействие круга с разрезаемой заготовкой происходит не только по периферии, но и по двум боковым его поверхностям [3, 14, 18]. Роль этой особенности возрастает при разрезании крупногабаритных трубных заготовок, так как площадь контакта боковых сторон круга с заготовкой возрастает пропорционально квадрату диаметра разрезаемых труб.



Рис. 1. Боковая режущая поверхность отрезного круга

Большое количество работ [1 – 20] было посвящено вопросу трения на боковых поверхностях круга при отрезке. Было установлено, что на боковых поверхностях отрезных кругов происходит быстрое затупление абразивных зерен, что в свою очередь, вызывает возрастание торцевого трения и потребляемой мощности. Как показал анализ ряда работ [3, 6, 12, 18, 19], боковое трение обусловлено, кроме того, торцевым биением круга из-за погрешностей геометрических параметров, неизбежных при его изготовлении и защемляющего эффекта от теплового расширения разрезаемых трубных заготовок. Установлено, что при разрезке вулканическим кругом с гладкой боковой поверхностью в среднем до 50 % энергии затрачивается на преодоление сил трения боковых сторон о поверхность реза и на вредный нагрев заготовки [8].

Основная часть

Режущей способностью боковых сторон отрезного круга называют объем или массу материала заготовки, удаляемую с ее поверхности в единицу времени. Работу боковой поверхности отрезного круга можно представить как процесс шлифования детали торцом круга. Своеобразное непрерывное перемещение боковых поверхностей детали и круга во встречном направлении, т.е. процесс происходит за счет разогревания детали, наличия неравномерности высоты круга, коробления, вогнутости и выпуклости кругов в пределах допусков, торцевого биения и образующейся в процессе работы конусности круга. При этом подразумевается, что

качество обработки полностью соответствует требованиям, предъявляемым к разрезаемым деталям.

В настоящей работе режущая способность рассматривается исключительно как параметр, определяющий качество боковых режущих сторон круга, поэтому стандартное определение нуждается в некотором уточнении, так как количество срезаемого материала зависит не только от режущих свойств инструмента, но и от установленного режима резки.

По этому поводу профессор Г. Б. Лурье писал [10]: «Так как точность и шероховатость поверхности, износ круга функционально связаны с силой, прижимающей круг к обрабатываемой поверхности, режущую способность круга можно характеризовать объемом металла в единицу времени и радиальной силой, возникающей при шлифовании. Это соотношение является количественной характеристикой режущей способности круга» [1].

Добавим, что эту характеристику удобно назвать «относительной режущей способностью круга», чтобы она и по названию отличалась от стандартной.

В процессе эксплуатации отрезной круг изнашивается, в результате чего его относительная режущая способность может существенно изменяться.

Лурье предложил описывать это изменение уравнением [10]:

$$\omega = \omega_0 \cdot e \cdot x \cdot p \cdot (-\lambda \cdot \tau). \quad (1)$$

Более точно эта зависимость описывается уравнением, предложенным Л.Н. Филимоновым [16]:

$$\omega = \omega_0 \cdot e \cdot x \cdot p \cdot (-\alpha \cdot \tau + \beta \cdot \tau^2). \quad (2)$$

где ω , мм³/мин Н – относительная режущая способность круга;

ω_0 мм³/мин Н – начальная относительная режущая способность круга;

α , 1/мин, β , 1/мин – показатели интенсивности изменения относительной режущей способности;

τ , мин – время непрерывной работы круга.

В производственных условиях резка ведется обычно с примерно равной режущей способностью круга (производительностью процесса), но при изменяющейся величине нормальной составляющей силы резания, что приводит к соответствующим изменениям относительной режущей способности. При этом уровень качества обработки также изменяется.

Для оценки качества круга можно использовать специальный измерительный процесс резки с постоянной силой [3], при котором качество обработанной поверхности поддерживается постоянно на заданном уровне, а относительная режущая способность круга изменяется по закономерности резки с постоянной производительностью.

В общем случае параметры ω_0 , α и β , уравнения (3) процесса резки могут быть вычислены по трем любым частным значениям относительной режущей способности этого процесса (относительной режущей способности в три определенных момента времени), но целесообразно выбрать частные значения по определенной системе.

Практика подсказывает, что наиболее резко относительная режущая способность изменяется в начале периода стойкости. Это явление легко объяснимо: в первый момент резки удаляются зерна, непрочные удерживаемые связкой, и активно изнашиваются наиболее острые вершины и кромки зерен с образованием площадок износа (рис. 2).

Представляет интерес относительная режущая способность, измеренная в середине периода стойкости круга, которая, как всякая средняя величина, дает представление о средней величине относительной режущей способности.

Наконец, интересна относительная режущая способность круга в конце периода стойкости, так как именно эта режущая способность является базой для нормативных режимов процесса абразивной резки.



Рис. 2. Образование площадок износа отрезного круга

На основании сказанного было принято решение опытным путем определять частные значения относительной режущей способности процесса резки в моменты времени: $0,25 T$, $0,5 T$ и T , где T – период стойкости круга.

Определение параметров процесса проводилось в следующей последовательности. Изучение основных параметров процесса резки материалов, связанных с выполнением различных видов исследований, проводилось на трубах круглого сечения стали 1пс диаметром 42,4 мм.

Для увеличения достоверности результатов экспериментов при исследовании каждого технологического фактора выполнялось не менее пяти резов.

Заготовки разрезались на режимах, установленных для этой операции технологическим процессом, в течение $0,25 T$. Методом врезного шлифования с постоянной силой прижима, равной примерно 1 Н на 1 мм толщины круга, разрезалась стенка трубы в течение одной минуты, после чего процесс возобновлялся и продолжался до момента времени $0,5 T$ и т. д.

По результатам резки контрольных образцов определяли частные значения относительной режущей способности круга, по которым параметры процесса режущей способности отрезного могут быть подсчитаны по приведенным ниже зависимостям:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \omega_1 \cdot \omega_2^{-2} \cdot \omega_3^{1/3}, \\ \alpha &= \frac{2}{T} \ln(\omega_1^4 \cdot \omega_2^{-5} \cdot \omega_3), \\ \beta &= \frac{8}{3T^2} \ln(\omega_1^2 \cdot \omega_2^{-3} \cdot \omega_3^3).\end{aligned}\quad (3)$$

Опытная проверка выдвинутой рабочей гипотезы проверялась в лаборатории кафедры «Технология машиностроения» СевГУ.

В качестве основного оборудования был использован станок модели 3В641, оснащенный динамометрической аппаратурой и адаптивной системой управления. Помимо этого было установлено специальное приспособление, позволяющее разрезать контрольные образцы с постоянной силой прижима к отрезному кругу (рис. 3).

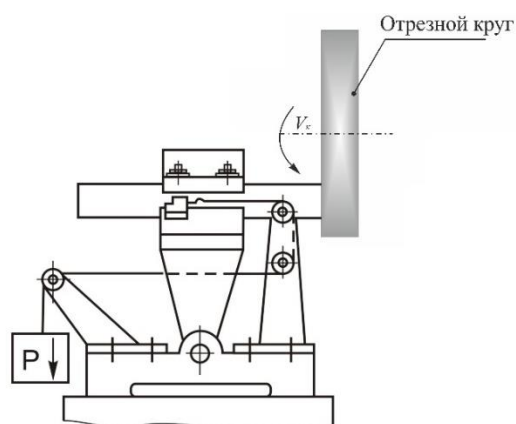


Рис. 3. Общий вид приспособления для исследования режущей способности боковых поверхностей отрезных кругов

Были проведены две серии опытов, направленных на получение численной характеристики качества отрезного круга 63C24P5BF1C80.

Обработка велась на режиме: скорость круга $V_{кр} = 80$ м/с.

В первой серии опытов круг прижимался с силой 10 Н к контрольному образцу, в результате была измерена шероховатость разрезанной поверхности в конце серии опыта. Оказалось, что она находится в пределах $R_a = 3,8$ мкм.

Для второй серии опытов был подобран режим шлифования с постоянной силой прижима круга к заготовке, который обеспечивал разрезку заготовок с той же шероховатостью.

При сохранении значений скорости круга, детали и осевой подачи этому условию отвечал процесс разрезки с силой $P_y = 40$ Н. Каждая заготовка разрезалась в течение 3 минут, и через каждую минуту измерялся их диаметр.

В результате опытов первой и второй серий удалось подсчитать значения относительной режущей способности круга и её

изменение в процессе разрезки с постоянной производительностью (первая серия опытов), постоянной силой P_y (вторая серия опытов). Опытные совокупности данных были аппроксимированы зависимостью (2), параметры которой определялись по методу наименьших квадратов. В результате были установлены зависимости, указанные ниже. При разрезке с постоянной производительностью:

$$\omega = 14,4 \exp(-0,07569\tau + 0,001372\tau^2),$$

мм³/мин Н

При разрезке с постоянной силой:

$$\omega = 18,16 \exp(-0,09809\tau + 0,001121\tau^2),$$

мм³/мин Н.

Используя аппроксимирующие зависимости подсчитаны средние значения относительной режущей способности круга в различные моменты периода стойкости. Результаты внесены в (табл. 1).

Таблица 1. Изменения относительной режущей способности круга при абразивной разрезке с постоянной производительностью, постоянной силой

Процессы	ω , мм ³ /мин Н	τ , мин				
		0	5	10	15	20
$W = \text{const}$	ω_w	14,4	10,82	7,75	6,3	5,49
$P_y = \text{const}$	ω_p	18,16	11,44	7,62	5,37	4,0

Выводы

1. Сравнимые процессы абразивной разрезки – с постоянной производительностью, с постоянной силой – обуславливают примерно равную относительную режущую способность круга в момент времени, равный половине периода стойкости.
2. Отношение начальной относительной режущей способности к конечной в процессе шлифования с постоянной производительностью 2,62 близко по величине и существенно отличается от этого соотношения в процессе разрезки с постоянной силой, равного 4,54.
3. Определение параметров процесса разрезки возможно по ограниченному чис-

лу замеров, для проведения которых легко создать аппаратуру, применимую в любых производственных условиях.

4. Используя описанную методику, легко воссоздать характер изменения относительной режущей способности круга при обработке поверхностей сложной геометрической формы, для которых непосредственный подсчет количества обработанного материала затруднителен.

Список литературы

1. Богомолов Н.И. Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна. / Н.И. Богомолов Труды ВНИИАШ. – М.–Л.: Машиностроение, № 7, 1968. – С. 74–87.
2. Бокучава Г.В. О влиянии скорости шлифования на стойкость абразивного инструмента / Г.В. Бокучава // Абразивы и алмазы. – 1964. – № 1. – С.47–53.
3. Богомолов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла. автореф. дис. на соиск. науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Н.И. Богомолов. – Киев, 1967, – 46 с.
4. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Геометрические параметры режущих элементов абразивных зерен шлифовального круга. / А.М. Вульф, А.В. Мурдасов // Науч. техн. реф. сб. «Абразивы», – М.: НИИМАШ, – 1968, вып. 1.
5. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С.Н. Корчак // – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
6. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
7. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.03.01 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Е.П. Калинин. – Рыбинск, 2006. – 414 с.
8. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
10. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 173 с.
11. Левченко Е.А. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса абразивной резки труб/ Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – Вип. 140. – С. 52 – 57.
12. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами/ Е.А. Левченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 40. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2013. – С. 70 – 75.
13. Левченко Е.А. Расчет боковой режущей поверхности отрезного круга с учетом износа абразивных зерен/ Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – Вип. 151. – С. 74 – 80.
14. Левченко Е.А. Пути повышения эффективности процесса абразивной резки труб с учетом износа вершин зерен отрезного круга/ Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – Вип. 152. – С. 145– 151.
15. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами / Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Вып. № 3. – С. 46 – 51.
16. Братан С.М. Определение вероятности изнашивания вершины зерна отрезного круга в процессе резки труб / С.М. Братан, Е.А. Левченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 6 (59) частина 1. – С. 40–43.
17. Левченко Е.А. Кинематический анализ условий процесса абразивной резки труб / Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. – 2010. – Вип. 26. – С.324–330.
18. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 114 – 117.
19. Новоселов Ю.К. Аналитический расчет элементов конструкции боковых поверхностей отрезных кругов / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С.27–31.
20. Левченко Е.А. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2011. – Вип. 118. – С. 57 – 61.

References

1. Bogomolov N.I. Issledovanie deformacii me-talla pri abrazivnyh processah pod dejstviem edinichnogo zerna. / N.I. Bogomolov Trudy VNIASH. – M.–L.: Mashinostroenie, № 7, 1968. – S. 74–87.
2. Bokuchava G.V. O vliyani skorosti shlifovaniya na stojkost' abrazivnogo instrumenta / G.V. Bokuchava // Abrazivy i almazy. – 1964. – № 1. – S.47–53.
3. Bogomolov N.I. Osnovnye processy pri vzaimodejstvii abrazi-va i metalla. avtoref. dis. na soisk. nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spec. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya» / N.I. Bogomolov. – Kiev, 1967, – 46 s.
4. Vul'f A.M., Murdasov A.B. Geometricheskie parametry rezhushchih elementov abrazivnyh zeren shlifoval'nogo kruga. / A.M. Vul'f, A.V. Murdasov // Nauch. tekhn. ref. sb. «Abrazivy», – M.: NIIMASH, – 1968, vyp. 1.
5. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' processa shlifovaniya stal'nyh detalej. / S.N. Korchak // – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s.
6. Loladze T.N. Iznos almazov i almaznyh krugov / T.N. Loladze, G.V. Bokuchava. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 112 s.
7. Kalinin E. P. Teoriya i praktika upravleniya proizvoditel'nost'yu abrazivnoj obrabotki s ucheto zatupleniya instrumenta: dis. na soska-nie nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spec. 05.03.01 «Tekhnologiya i oborudovanie mekhanicheskoy i fi-ziko-tekhnicheskoy obrabotki» / E.P. Kalinin. – Rybinsk, 2006. – 414 s.
8. Filimonov L.N. Vysokoskorostnoe shlifovanie / L.N. Filimonov. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 248 s.
9. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke / Yu.K. Novoselov. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 s.
10. Lur'e G.B. Shlifovanie metallov / G.B. Lur'e. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 173 s.
11. Levchenko E.A. Eksperimental'nye issledovaniya energosilovyh parametrov processa abrazivnoj razrezki trub/ E.A. Levchenko, Yu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'kij nacional'nij tekhnichnij universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 140. – C. 52 – 57.
12. Levchenko E.A. Teplofizicheskaya model' processa abrazivnoj razrezki trub otreznymi krugami/ E.A. Levchenko // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vypusk 40. Tekhnicheskie nauki. – Simferopol': NIC KIPU, 2013. – S. 70 – 75.
13. Levchenko E.A. Raschet bokovoj rezhushchej poverh-nosti otreznogo kruga s ucheto iznosa abrazivnyh zeren/ E.A. Levchenko, N. I. Pokintelica, Yu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'kij nacional'nij tekhnichnij universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 151. – C. 74 – 80.
14. Levchenko E.A. Puti povysheniya effektivnosti processa abrazivnoj razrezki trub s ucheto iz-nosa verhin zeren otreznogo kruga/ E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'kij nacional'nij tekhnichnij universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 152. – C. 145– 151.
15. Levchenko E.A. Teplofizicheskaya model' processa abrazivnoj razrezki trub otreznymi krugami / E.A. Levchenko, N. I. Pokintelica // Vestnik sovremennyh tekhnologij: sb. nauch. tr. Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet. – Sevastopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2016. – Vyp. № 3. – C. 46 – 51.
16. Bratan S.M. Opredelenie veroyatnosti iznashivaniya verhinny zerna otreznogo kruga v processe razrezki trub / S.M. Bratan, E.A. Levchenko // Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politekhnicheskogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo. – Kremenchuk: KDPU, 2009. – Vip. 6 (59) chastina 1. – S. 40–43.
17. Levchenko E.A. Kinematicheskij analiz uslovij processa abrazivnoj razrezki trub / E.A. Levchenko // Nadijnist' in-strumentu ta optimizaciya tekhnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k. – 2010. – Vip. 26. – S.324–330.
18. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie oso-bennostej raboty bokovyh poverhnostej otreznogo kruga pri abrazivnoj razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'kij nacional'nij tekhnichnij universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. – Vip. 107. – C. 114 – 117.
19. Novoselov Yu.K. Analiticheskij raschet elementov konstrukcii bokovyh poverhnostej otreznych krugov / Yu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadijnist' instrumentu ta optimizaciya tekhnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k: DDMA, 2011. – Vip. 28. – S.27–31.
20. Levchenko E.A. Analiz zakonornostej udaleniya metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoj razrezke trub / E.A. Levchenko, Yu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'kij nacional'nij tekhnichnij universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – C. 57 – 61.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №4(24) 2021

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.