



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ISSN: 2618-8201

**№ 1(9)
2018**

Вестник Современных Технологий

Сборник научных трудов

В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки
и оборудования в машиностроении» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)

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

№ 1(9)
2018

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» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)*

Севастополь 2018

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н., проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШЕВ 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)
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)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯКУБОВ Ф.Я.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Абдульменова Е.В., Ваулина О.Ю., Кульков С.Н. Механическая активация и гранулометрический состав порошкового никелида титана.....	4
Бохонский А.И., Чалая Е.С., Шмидт Л.А. Экспериментальная проверка метода компенсации перемещений нежестких валов при токарной обработке	10
Богущий В.Б., Шрон Л.Б., Новосёлов Ю.К. Особенности управления качеством при шлифовании поверхностей, расположенных под углом к оси детали.....	18
Левченко Е.А. Вероятностно-статическая модель распределения зерен на периферийной поверхности отрезного круга при абразивной разрезке	25
Суслов А.Г. Формирование и развитие технологии машиностроения как науки	31
Ямников А.С., Чуприков А.О., Харьков А.И. Влияние параметров геометрии резца на утолщение стружки при точении высокопрочных сталей	36
Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Методика построения динамических соотношений, оценки отклонений формы изделия и шлифовального круга	42
Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Мулюхин Н.В. Этапы моделирования алмазного затачивания твердосплавного инструмента для обработки композитов	47
Широкожухова А.А., Шаров Ю.В., Стародубцев И.Г. Нетрадиционные технологии изготовления металлических фильтров, применяемых в двигателестроении аэрокосмической отрасли	53
Сидоров В.А. Диагностирование подшипников шпинделя станка с ЧПУ	58

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., Prof. – KHARCHENKO A.O.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.

Editorial team

ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHEV 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)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO 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)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Abdulmenova E.V., Vaulina O.Yu., Kulkov S.N. Mechanical activation and granulometric composition of powder niclide titanium **4**

Bokhonsky A.I., Chalaya E.S., Shmidt L.A. The experimental check of nonrigid shaft compensation method during turning **10**

Bogutsky V.B., Shron L.B., Novoselov Y.K. Features of quality management at grinding surfaces located under angle to the axis details **18**

Levchenko E.A. Probabilistic-static model of the distribution of grains on the peripheral surface of the cutting wheel in abrasive cutting **25**

Suslov A.G. Formation and development of technology of machine-building as a science **31**

Yamnikov A.S., Chuprikov A.O., Kharkov A.I. Influence of case geometry parameters for cutting the structure while ingesting high strength steel **36**

Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. The method of constructing dynamic relations, evaluation of deviations of the form of the product and grinding wheel **42**

Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Muliukhin N.V. Stages of modeling diamond grinding of a hard-alloy tool for processing composites **47**

Shirokzhukhova A.A., Sharov Y.V., Starodubtsev I.G. Non-traditional technologies for the production of metal filters used in engine aerospace industry **53**

Sidorov V.A. diagnosing the bearings of machine's spindle with CNC **58**

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 669;54-11

МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОШКОВОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА

Е.В. Абдульменова¹, О.Ю. Ваулина¹, С.Н. Кульков^{1,2}¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация² Институт Физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

Аннотация

В настоящий момент существует несколько методов оценки гранулометрического состава, которые имеют свои преимущества и недостатки. Например, метод сканирующей электронной микроскопии позволяет оценить размер и морфологию частиц (агломератов), метод Брунауэра, Эммета и Теллера позволяет оценить диаметр частиц в предположении их сферичности. Однако, оба этих метода требуют больших временных затрат на: подготовку пробы, процесс измерения и обработку полученных результатов. Перспективным методом определения гранулометрического состава является метод лазерной дифракции, благодаря экспрессности анализа и воспроизводимости результатов. В работе представлены результаты исследования морфологии частиц и гранулометрического состава металлического порошка никелида титана методами сканирующей электронной микроскопии, лазерной дифракции и методом Брунауэра, Эммета и Теллера в исходном состоянии и после механической активации. Проведен анализ влияния условий диспергирования пробы на результаты измерения гранулометрического состава металлического порошка никелида титана методом лазерной дифракции. Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что в процессе механической активации до 30 секунд средний диаметр частиц уменьшается за счёт разрушения агломератов. Более длительная механическая обработка порошка приводит к увеличению среднего диаметра частиц по сравнению с исходным состоянием – в 9 раз, за счёт избыточной поверхностной свободной энергии частиц порошка, образующейся при измельчении.

Ключевые слова: никелид титана, механическая активация, агрегация, гранулометрический состав, размер частиц, морфология частиц, удельная поверхность.

MECHANICAL ACTIVATION AND GRANULOMETRIC COMPOSITION OF POWDER NICLIDE TITANIUM

E.V. Abdulmenova¹, O.Yu.Vaulina¹, S.N. Kulkov^{1,2}¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation² Institute of strength physics and materials science SB RAS, Tomsk, Russian Federation

Abstract

At the moment, there are several methods for estimating the particle size distribution, which have advantages and disadvantages. For example, the scanning electron microscopy method makes it possible to estimate the size and morphology of particles (agglomerates), the Brunauer, Emmett and Teller method makes it possible to estimate the particle size under the assumption of their sphericity. However, both these methods require a lot of time to: sample preparation, measurement process and processing of the results. A promising method for determining the granulometric composition is the laser diffraction method, due to the rapidity of the analysis and the reproducibility of the results. In this research work presents the results of the investigation of the morphology of particles and the granulometric composition of a metal powder of nickel titanium by scanning electron microscopy, laser diffraction and the Brunauer, Emmett and Teller method in the initial state and after mechanical activation. The analysis of the influence of the dispersion conditions of the sample on the results of measuring the granulometric composition of a metal powder of titanium nickelide by the laser diffraction method is carried out. The scanning electron microscopy method shows that in the process of mechanical activation up to 30 seconds the average particle diameter due to the destruction of agglomerates. A longer mechanical treatment of the powder leads to an increase in the average particle diameter by 9 times in compared to the initial state from to the excess surface free energy of the powder particles formed during grinding.

Keywords: titanium nickelide, mechanical activation, aggregation, granulometric composition, particle size, particle morphology, specific surface area.

Введение

В современной промышленности широко используются в качестве сырья металлические порошки [1], с помощью которых можно изготовить изделия: 1) с высокими технико-экономическими показателями; 2) с точным соответствием заданному составу; 3) с контролируемой плотностью; 4) с размером и формой структурных элементов, которые недостижимы при производстве металлических изделий литьём.

В настоящее время широко используется механохимическая обработка [2, 3] порошков, в процессе которой происходит увеличение запаса внутренней и поверхностной энергии измельчённого продукта, что, в частности, можно использовать для увеличения адсорбции/десорбции водорода в процессе гидрирования. При этом в процессе подобного воздействия может значительно измениться дисперсность и морфология частиц, что отразится на свойствах конечных изделий. Таким образом, осуществляя мехактивацию порошков необходимо с достаточной точностью определить морфологические и размерные характеристики измельченных порошкообразных материалов.

На сегодняшний день существует несколько распространённых методов оценки гранулометрического состава [4, 5, 6]. В частности, метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) позволяет оценить размер и морфологию частиц (агломератов) [7, 8], метод Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ) [9] позволяет из удельной поверхности в предположении сферичности частиц оценить средний размер частиц. Однако, подготовка пробы, процесс измерения и последующая обработка полученных результатов двумя этими методами требует больших временных затрат. С помощью метода лазерной дифракции (ЛД) [10] можно измерить диаметр частиц в широком диапазоне размеров (0,01-300 мкм) за короткий промежуток времени [11, 12]. Однако на корректность полученных результатов методом ЛД, влияют как выбранная дисперсионная среда, так и время ультразвукового диспергирования [13, 14]. Кроме того, реализуя

разные методы измерения размеров частиц, результаты между этими методами могут значительно различаться. В связи с этим, цель работы – определить гранулометрический состав металлического порошка TiNi до и после механической активации методами сканирующей электронной микроскопии, лазерной дифракции и методом БЭТ, а так же изучить влияние условий диспергирования пробы на результаты измерения гранулометрического состава методом лазерной дифракции металлического порошка TiNi.

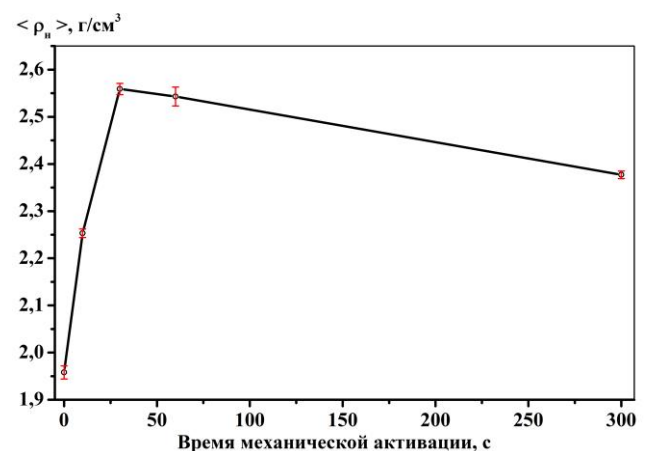


Рис. 1. Зависимость насыпной плотности порошкового ПН55Т45 от времени механической активации

Методики экспериментальных исследований

Объект исследования порошок никелида титана TiNi марки ПН55Т45 производства АО «Полема». Механоактивацию исходного порошка TiNi проводили с помощью планетарной шаровой мельницы «АГО-2». Скорость вращения барабана составляла 1820 об /мин. Для получения информации о временной зависимости эффекта влияния механической активации на свойства порошкового TiNi проводили при четырёх значениях времени: 10, 30, 60 и 300 секунд.

Таблица 1. Основные параметры гранулометрического состава, рассчитанные из СЭМ изображений

Информация об образце		Кол-во измерений	d ₁₀ , мкм	d ₅₀ , мкм	d ₉₀ , мкм	d _{ср} , мкм
Исходный		476	2,90	8,4	20,9	11,1
Активация	10	569	2,8	8,3	21	11
	30	692	1,5	5,1	15,5	7,8
	60	645	2,4	10	23,2	13,8
	300	266	2,2	26	64,8	33,2

Исследования морфологии частиц и гранулометрического состава порошкового TiNi выполняли методами СЭМ на оборудовании институт физики прочности и материаловедения СО РАН и лазерной дифракции (ЛД) на оборудовании Нано-Центра ТПУ.

Для получения электронных изображений порошкового TiNi использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) TESCAN VEGA 3SBH при ускоряющем напряжении 30 кВ.

Анализ размеров частиц порошка проводился вручную по СЭМ-изображениям.

Для определения гранулометрического состава порошкового TiNi методом ЛД использовали дифракционный анализатор размеров наночастиц SALD-7101 фирмы Shimadzu (Япония). При исследовании анализа размеров частиц методом ЛД навеска исследуемого порошка помещалась в ванну смесителя с дисперсионной жидкостью и в течение 5-15 минут диспергировалась при помощи ультразвуковой установки с целью разделения агломератов на самостоятельные частицы. Измерения были выполнены в проточные ячейки с интервалом 1 минута. В качестве дисперсионной жидкости использовались дистиллированная вода (H₂O), водно-спиртовой раствор с концентрацией изопропилового спирта 0,1 % масс, изопропиловый спирт (ИПС) (C₃H₈O), водный раствор цитрата натрия (ЦН) с концентрацией ЦН 0,2% масс. (Na₃C₆H₅O₇) [15].

Удельную поверхность порошка измеряли методом БЭТ на приборе серии «Sorbi». Из полученных значений удельной поверхности в предположении сферичности частиц был рассчитан средний размер.

Результаты и обсуждение

На первом этапе работы была измерена насыпная плотность на основе государственного стандарта [16], результаты представлены на рисунке 1. Из графика видно, что в процессе механической активации до 30 с исходного порошка TiNi дисперсность увеличивается, вследствие разрушения агломератов частиц. Более длительная обработка порошка, приводит к уменьшению насыпной плотности. Это связано с тем, что более мелкие частицы имеют избыточную поверхностную энергию, которая является движущей силой агрегации частиц.

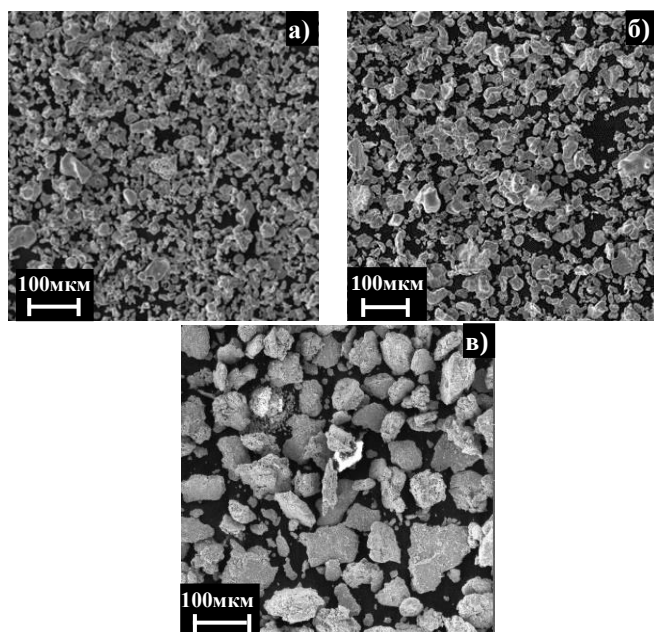


Рис.2. СЭМ изображения порошка в исходном состоянии (а) и после механической активации: 30 с (б) и 300 с (в)

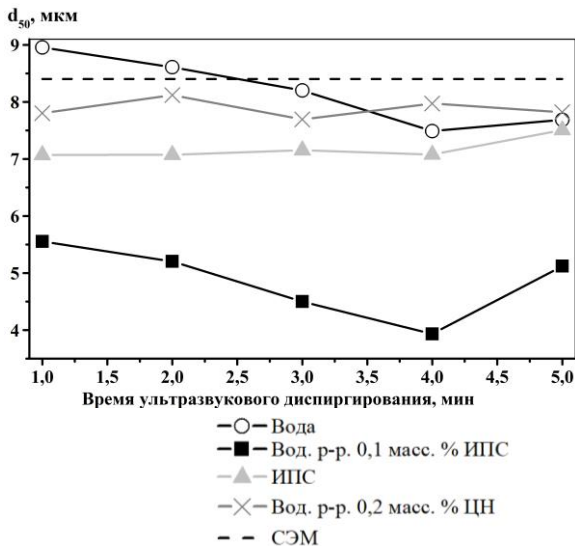


Рис.3. Зависимость медианного диаметра частиц порошкового ПН55Т45 в суспензии, измеренного методом лазерной дифракции, от времени ультразвукового диспергирования. Пунктирной линией показана величина медианного диаметра частиц порошкового ПН55Т45 по данным СЭМ

Этот вывод подтверждают результаты, полученные с помощью СЭМ (табл.1). Механоактивация порошка TiNi при использованных режимах приводит к уменьшению среднего размера частиц в 1,4 раза после 30 с активации по сравнению с исходным размером, при этом форма частиц стремится к сферической. Однако при активации 300 с размер частиц увеличился по сравнению с исходным состоянием, почти в 3 раза, а морфология частиц преимущественно характеризуется неправильной геометрической формой, что видно из (рис. 2).

На (рис. 3) представлена зависимость медианного диаметра частиц порошкового ПН55Т45 в разных суспензиях, измеренного методом лазерной дифракции, от времени ультразвукового диспергирования.

Из представленных данных видно, что в начальный момент диспергирования порошкового ПН55Т45 в водной суспензии и водном растворе ЦН величины медианных диаметров частиц составляют 8,9 мкм и 7,8 мкм, соответственно. Эти величины согласуются с данными СЭМ, где медианный диаметр составляет 8,4 мкм. Кроме того, в среде ИПС наблюдается агрегативная устойчивость так же, как и в водном растворе ЦН.

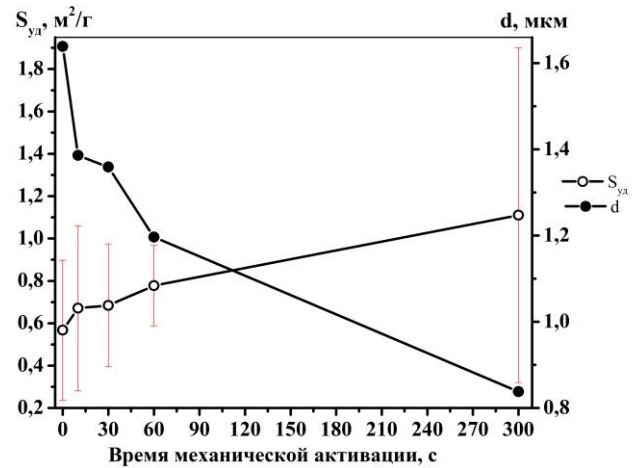


Рис.4. Зависимость площади удельной поверхности и размера частиц порошкового ПН55Т45 от времени механоактивации

С увеличением времени ультразвукового диспергирования в водной суспензии и в водном растворе ИПС до 4 минут, величины медианных диаметров плавно уменьшаются. Однако, было замечено, что в процессе диспергирования в этих средах, происходит седиментация агломератов частиц на стенки ванны смесителя. Следовательно, разбиение агломератов не происходит, и регистрируются более мелкие частицы.

Соответственно анализ результатов показал, что: 1) в водном растворе ЦН размер частиц составляет 7,8 – 8,1 мкм 2) при диспергировании в ИПС составляет 7,1 – 7,5 мкм. С увеличением времени ультразвукового диспергирования медианные диаметры в данных средах не изменяются, так как проявляется агрегативная устойчивость частиц порошка в этих суспензиях.

Величина удельной поверхности частиц после механоактивации в течение 300 с, больше ~ в 2 раза по сравнению с исходным состоянием, а величина размера частиц после механоактивации в течение 300 с уменьшается в сравнении с исходным размером более чем в 1,5 раза (рис.4).

Величина среднеобъемного размера частиц после механоактивации в течение 5 мин уменьшается по сравнению с исходным размером примерно в 1,3 раза (рис. 5).

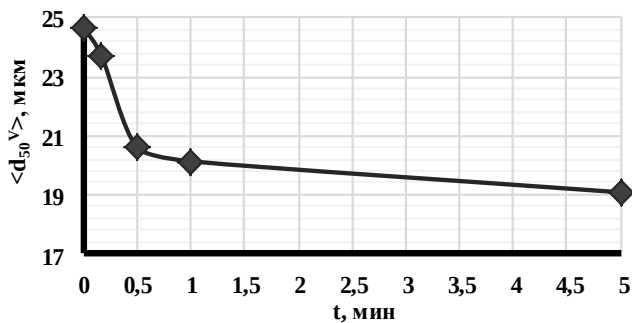


Рис. 5. Зависимость среднеобъемного размера частиц порошкового ПН55Т45 от времени механоактивации измеренных в среде: вод.р-р. 0,2 масс.% ЦН

Выводы

Таким образом, установлено, что в процессе механоактивации происходит не только изменение дисперсности порошка, но и меняется форма частиц.

Активация при 30 секундах является оптимальной, так как порошковый TiNi не агрегирует в дисперсионной среде – жидкость/воздух, а основные параметры гранулометрического состава имеют наименьшие значения по сравнению с исходным и составляют: $d_{10} = 1,5$ мкм; $d_{50} = 5,1$ мкм; $d_{90} = 15,45$ мкм; $d_{cp} = 7,83$ мкм.

Обнаружено, что на результаты измерения размеров частиц методом лазерной дифракции большое влияние оказывают условия диспергирования порошка, особенно свойства диспергирующей жидкости. В частности, увеличение времени ультразвукового диспергирования порошка TiNi в водной суспензии и в водном растворе изопропилового спирта приводит к оседанию частиц на стенках ванны. В водном растворе ЦН и в среде ИПС медианные диаметры не изменяются и лежат в диапазоне: 7,8 – 8,1 мкм и 7,1 – 7,5 мкм соответственно.

Методы БЭТ и ЛД позволяют измерить средний размер частиц, который для порошкового TiNi лежит в диапазоне от 8 мкм до 0,6 мкм, причем, чем мельче частицы, тем величины d_{cp} между двумя методами мало различимы.

Благодарность

Авторы благодарят А.А.Леонova за проведение анализа гранулометрического состава на лазерном анализаторе Нано-Центра ТПУ.

Список литературы

1. Кипарисов С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. М.: Металлургия, 1980. 496 с.
2. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твёрдых веществ // Успехи химии. – 2006. – №75 (3). – с. 203 – 216.
3. Григорьева Т.Ф., Баринаова А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах / Т.Ф. Григорьев, А.П. Баринаова, Н.З. Ляхов. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 311 с.
4. Буланов В.Я. Диагностика металлических порошков / В.Я. Буланов, Кватер Л.И. и др. – Москва: Наука, 1983. – 278. с.
5. Allen T. Particle Size Measurement / T. Allen 5th Ed.; Chapman and Hall: New York, 1997.
6. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987, 264 с.
7. Гоулдстейн Дж, Ньюбери Д. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский анализ / Дж. Гоулдстейн, Д Ньюбери, П. Эчлин и др. – Москва: Мир, 1984. – 98-189 с.
8. Bowen P. Particle size distribution measurement from millimeters to nanometers and rods to platelets / J. Disper. Sei. Technol, 2002. – Vol. 23. – №5. – p. 631 – 662.
9. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 310 с.
10. ГОСТ Р 8.777 – 2011. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения. М.:Стандартформ, 2011. 11 с. (Государственная система обеспечения единства измерений)
11. Домкин К.И. Физические основы гранулометрического анализа частиц методом лазерной дифракции / К.И. Домкин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет", 2011. – 2. том. – с. 150-152.
12. Aimable A., Bowen P. Nanopowder metrology and nanoparticle size measurement – Towards the development and testing of protocol / Processing and Application of Ceramics, 2010. – Vol. 4. – №3. – p. 157-166.
13. Миронов Р.А., Забежайлов М.О., Якушкина В.С., Русин М.Ю. Определение гранулометри-

ческого состава порошков на основе диоксида циркония методами статического лазерного рассеяния и оптической микроскопии / Р.А. Миронов, М.О. Забейайлов и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – №11. – том 82. – с. 32 – 36.

14. Новик А.А. Исследование процесса ультразвукового диспергирования керамических материалов в жидких средах: автореф. дис. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2013. – стр. 18.
15. Анализатор размеров наночастиц SALD – 7101: Руководство пользователя. – Shimadzu. – 2006. 64 с.
16. ГОСТ 19440-94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Часть1. Метод с использованием воронки. Часть 2. Метод волюмометра Скотта. М.: ИПК Издательство стандартов, 1994. с.15 (Межгосударственный стандарт).

References

1. Kiparisov S.S. Poroshkovaia metallurgii / S.S. Kiparisov, G.A. Libenson. M.: Metallurgii, 1980. 496 s.
2. Boldyrev V.V. Mehanohimii i mehanicheskaia aktivaciia tverdyh veshchestv // Uspehi himii. – 2006. – №75 (3). – с. 203 – 216
3. Grigor`eva T.F., Barinov A.P., Liahov N.Z. Mehanohimicheskii sintez v metallicheskih sistemah / T.F. Grigor`ev, A.P. Barinova, N.Z. Liahov. – Novosibirsk: Parallel, 2008. – 311 s.
4. Bulanov V.IA. Diagnostika metallicheskih poroshkov. / V.IA. Bulanov, Kvater L.I. i dr. – Moskva: Nauka, 1983. – 278. s.
5. Allen T. Particle Size Measurement / T. Allen 5th Ed.; Chapman and Hall: New York, 1997.
6. Kouzov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylei i izmel`chennnykh materialov. L.: 1987, 264 s.
7. Gouldstein Dzh, N`iuberi D. Rastrovaia elektronnaia mikroskopiia i rengenovskii analiz / Dzh. Gouldstein, D N`iuberi, P. E`chlin I dr. – Moskva: Mir, 1984. – 98-189 s.
8. Bowen P. Particle size distribution measurement

from milimeters to nanometers and rods to platelets / J. Disper. Sei. Technol, 2002. – Vol. 23. – №5. – p. 631 – 662

9. Greg C. Sing K. Adsorbtsiia, udel`naia poverhnost` : Per. S. angl. M.: Mir, 1984. 310 s.
10. GOST R 8.777 – 2011. Disperse composition of aerosols and suspensions. Determination of particle size by laser diffraction. M.:Standartform, 2011. 11 s. (State system for ensuring the uniformity of measurements)
11. Domkin K.I. Fizicheskie osnovy granulometricheskogo analiza chastits metodom lazernoi difraktsii / K.I. Domkin // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». – Federal'noe gosudarstvennoe biudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia "Penzenskii gosudarstvennyi universitet", 2011. – 2. tom. – s. 150-152.
12. Aimable A., Bowen P. Nanopowder metrology and nanoparticle size measurement – Towards the development and testing of protocol / Processing and Application of Ceramics, 2010. – Vol. 4. – №3. – p. 157-166
13. Mironov R.A., Zabezhailov M.O., Iakushkina B.S., Rusin M.Iu. Opredelenie granulometricheskogo sostava poroshkov na osnove dioksida tserkonii metodami staticheskogo rasseianiia i opticheskoi mikroskopii / R.A. Mironov, M.O. Zabezhailov I dr. // Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov. – 2016. – №11. – еще 82. – с.32 – 36
14. Novik A.A. Isledovanie protsessa ul`trazvukobogo dispergirovaniia keramicheskikh materialov v zhidkikh sredah: avtoref. dis. kand. tehn. nauk. – Sankt-Peterburg, 2013. – str. 18.
15. Analizator razmerov nanochastits SALD – 7101: Rukovodstvo pol`zovatelia. – Shimadzu. – 2006. 64 с.
16. .GOST 19440-94. Poroshki metallicheskie. Opredelenie nasypnoi plotnosti. Chast` 1. Metod s ispol`zovaniem voronki. Chast` 2. Metod voliumometra Skotta. IPK Izdatel'stvo standartov, 1994. s.15 (Mezhgosudarstvennyi standart).

УДК 621+658.012+531

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

А.И. Бохонский¹, Е.С. Чалая¹, Л.А. Шмидт¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Результаты моделирования деформированного состояния нежестких заготовок (валов) при токарной обработке с использованием компенсирующего локального воздействия подтверждают практическую возможность устранения упругих перемещений по направлению силы резания. При таком подходе возможна не только компенсация упругих перемещений при обработке заготовки на малом участке, но и непрерывное оптимальное деформирование при движении силы резания вдоль обрабатываемой нежесткой заготовки.

Для нежесткого вала, закрепленного в патроне и центре, выполнена экспериментальная проверка компенсации упругих перемещений в зоне резания. Доказано, что использование компенсатора приводит к существенному снижению погрешности обработки.

Ключевые слова: токарная обработка, нежесткая заготовка (вал), компенсация упругих перемещений, экспериментальная проверка.

THE EXPERIMENTAL CHEK OF NONRIGID SHAFT COMPENSATION METHOD DURING TURNING

A.I. Bokhonsky¹, E.S. Chalaya¹, L.A. Shmidt¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The using both concurrently of non-rigid pars deformity modeling results and local compensating action confirms the possibility of practical removal of part resilient movements in a direction of a the cutting force. With this approach, it is possible not only to compensate the resilient displacements when processing is on the small area workpiece, but also during continuously optimal deformation when the cutting force moves along the workpiece being machined.

The experimental chek of resilient displacement compensation during processing was carried out for a nonrigid fixed part in a chuck and center. It is proved that the using of compensator leads to a significant reduction of processing error.

Keywords: turning, nonrigid workpiece (shaft), part, compensation of elastic displacements, experimental verification.

Введение

Помимо дальнейшего совершенствования математических моделей автоматической токарной обработки нежестких заготовок при использовании их непрерывного оптимального управления деформированием представляет интерес экспериментальная проверка метода компенсации упругих перемещений как частного случая непрерывного управления.

Цель исследований – проверка практической реализации компенсации упругих перемещений при токарной обработке шейки нежесткого вала с закреплением в патроне и центре.

1. Экспериментальные исследования компенсации упругих перемещений при токарной обработке валов

Для уменьшения погрешности формы детали при токарной обработке используется компенсирующее локальное силовое воздействие. Приведены результаты экспериментальных исследований компенсации упругих перемещений в сечении, находящемся под воздействием силы резания. На (рис. 1) представлена схема обработки нежесткой заготовки, закрепленной в патроне и центре. Компенсатор расположен на рас-

стоянии $b = \frac{3L}{4}$ от начала заготовки и создает усилие U . Для один раз статически неопределимой системы с использованием метода начальных параметров и условия равенства нулю перемещения по направлению силы резания находится выражение для компенсирующего воздействия.

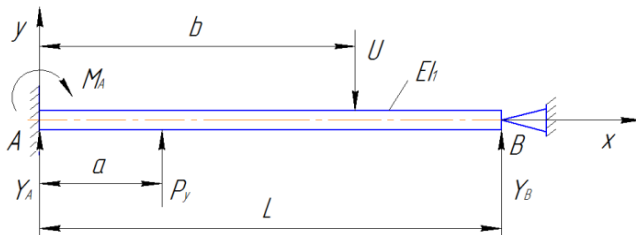


Рис. 1. Схема обработки нежесткой заготовки

При $U = 0$ (обработка без компенсации) график $W(x)$ при $a = L/2$, т.е. точение по середине заготовки, изображен на (рис. 2). Максимальное перемещение заготовки – на расстоянии $x = 3L/4$.

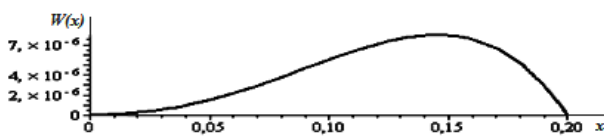


Рис. 2. График деформирования заготовки (при $a = L/2, U = 0$)

Координата компенсатора принимается $b = 3L/4$. В эксперименте предусмотрено точение шейки по середине заготовки (на участке $\Delta L = 0,02m$).

При $b = \frac{3L}{4}$ выражение для компенсирующего воздействия имеет вид:

$$U(a) = -\frac{64P_y a(4L^3 - 9L^2 a + 6La^2 - a^3)}{47aL^3 - 45L^4},$$

где a – координата силы резания; P_y – сила резания; b – координата компенсирующего усилия ($b = 3L/4$).

Из графика (рис. 3) следует, что при $a = L/2$ компенсирующая сила максимальна; при $a = 3L/4$ она по модулю равна значению P_y . В случае $a = L/2$ компенсирующее воздействие $U = 455H$ при подаче

$s = 0,25 \text{ мм/об}$ и $U = 215H$ при подаче $s = 0,08 \text{ мм/об}$.

В каждой точке с координатой a перемещение по направлению силы P_y равно нулю. Для $a = L/2$ уравнение прогиба $W(x)$

на участке $a \geq x \geq 0$ имеет вид: если

$$P_y = 350H, \text{ то}$$

$$W(x) = 0,00571x^2 - 0,05711x^3; \text{ если}$$

$$P_y = 350H, \text{ то}$$

$$W(x) = 0,00269x^2 - 0,02692x^3.$$

Как известно, силу резания раскладывают на составляющие [1]: тангенциальную P_z , радиальную P_y и осевую P_x . При точении эти составляющие рассчитывают по формуле:

$$P_{z,y,x} = 10C_p t^x S^y v^n K_p,$$

где T – период стойкости инструмента; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об. Постоянная C_p (эмперический коэффициент) и показатели степени x, y, n для конкретных (расчетных) условий обработки по каждой составляющей силы резания приняты согласно таблицам [2]. Поправочный коэффициент K_p представляет собой произведение ряда коэффициентов ($K_p = K_{mp} K_{fp} K_{gp} K_{lp} K_{rp}$), учитывающих фактические условия резания. Скорость резания рассчитывается по эмперической формуле [3]:

$$v_{T0} = \frac{C_v}{T^m t^x s^y} \cdot K_v.$$

где K_v – произведение ряда коэффициентов.

Важнейшими из них являются: K_{mv} – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала; K_{nv} – коэффициент, отражающий состояние поверхности заготовки; K_{uv} – коэффициент, учитывающий качество материала инструмента. Значения коэффициента C_v и показателей степени, в том числе периода стойкости T инструмента выбраны из таблиц.

График компенсирующего воздействия $U(a)$ построен в пределах $b \geq a \geq 0$ и изоб-

ражен на (рис. 3 а) в случае $P_y=350\text{ Н}$ и на (рис. 3 б) в случае $P_y=165\text{ Н}$.

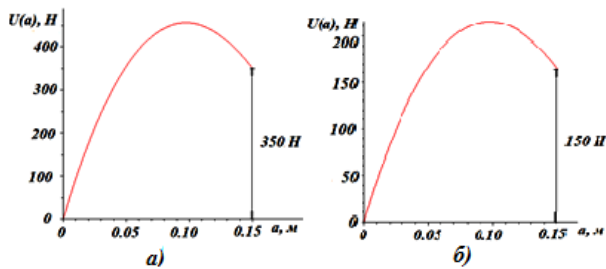


Рис. 3. а) График компенсирующего воздействия при $P_y=350\text{ Н}$
б) График компенсирующего воздействия при $P_y=165\text{ Н}$

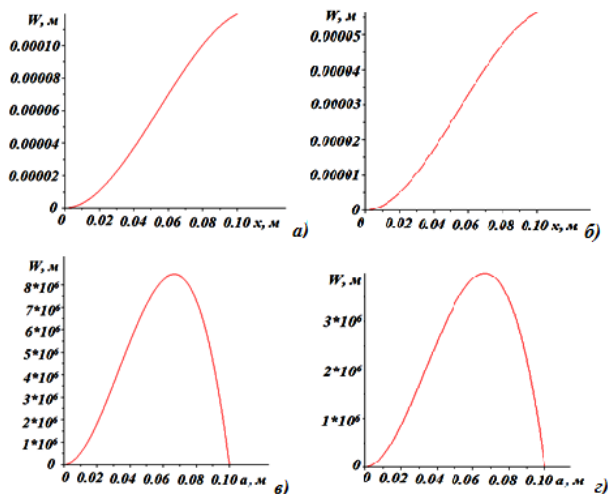


Рис. 4. График деформирования вала при $a=L/2$ и $d=12\text{ мм}$
а) при $P_y=350\text{ Н}$ без компенсации; б) при $P_y=165\text{ Н}$ без компенсации; в) при $P_y=350\text{ Н}$ с компенсацией; г) при $P_y=165\text{ Н}$ с компенсацией.

Цель эксперимента – исследование деформирования нежесткой заготовки с учетом компенсатора.

2. Описание установки

Исследования проводились в учебной лаборатории на кафедре технологии машиностроения СевГУ. Использовалось оборудование: универсальный токарно-винторезный станок мод. 1М61П; устройство для передачи силового воздействия – компенсатор, установленный на станке на расстоянии $b=3L/4$ от начала заготовки; резец проходной отогнутый, материал Т15К6; комплект нежестких заготовок дли-

ной 200 мм и $\varnothing 14\text{ мм}$; микрометр гладкий типа МК25-1 с ценой деления 0,01 мм; индикатор часового типа ИЧ25 с ценой деления 0,01 мм.

Токарно-винторезный станок повышенной точности предназначен для выполнения токарных работ в механических цехах (в условиях мелкосерийного и единичного производства). Он позволяет производить: проточку и расточку цилиндрических и конических поверхностей, подрезку торцов, отрезку, нарезание метрических резьб (дюймовой, модульной, питчевой), сверление и ряд других работ. Изменение скорости вращения производится переключением шестерен, реверсирование – реверсом электродвигателя [6].

Для измерения перемещения применен индикатор часового типа ИЧ-25 ГОСТ 577-68, преобразующий линейное перемещение мерного штифта в круговое вращение стрелки циферблата. Индикаторы применяются там, где необходимо измерять небольшие (обычно в пределах до 10 мм) отклонения от заданного размера. Предназначен – для измерения линейных размеров абсолютным и относительным методами, отклонений от заданной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей.

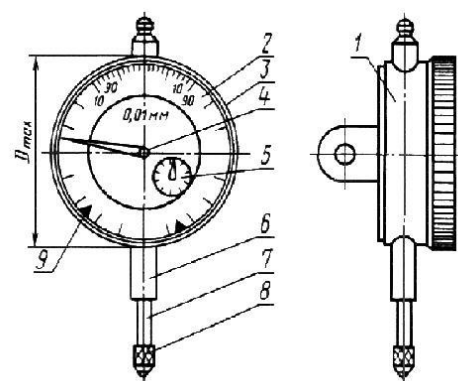


Рис. 5. Индикатор часового типа ИЧ-25
1 – корпус; 2 – циферблат; 3 – ободок; 4 – стрелка; 5 – указатель; 6 – гильза; 7 – измерительный стержень; 8 – измерительный наконечник; 9 – указатель поля допуска

Для измерения диаметра заготовки и детали использовался микрометр гладкий типа МК – средство измерения наружных

линейных размеров изделий с классами точности 1 и 2, который применяется в единичном, серийном и массовом производстве, в цеховых условиях.

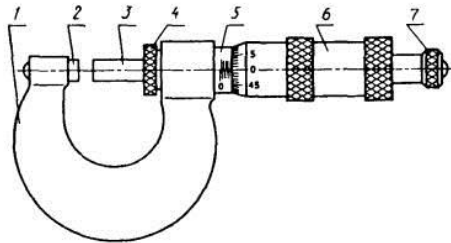


Рис. 6. Микрометр гладкий типа МК25-1
1 – скоба; 2 – пятка; 3 – микрометрический винт;
4 – стопор; 5 – стебель; 6 – барабан; 7 – трещотка (фрикцион)

Результат измерения микрометром отсчитывается как сумма отсчётов по шкале стебля и шкале барабана. Цена деления шкалы стебля равна 0,5 мм, а шкалы барабана – 0,01 мм.

Устройство для передачи силового воздействия. На (рис. 7) изображен компенсатор. Силовое воздействие U обеспечивается сжатием пружины 8. Ролики 9, связанные с валом 1, представляют [4] собой подшипники качения, взаимодействующие с вращающейся деталью; создаваемое пружиной усилие ролики передают в направлении, противоположном радиальной составляющей силы резания P_y .

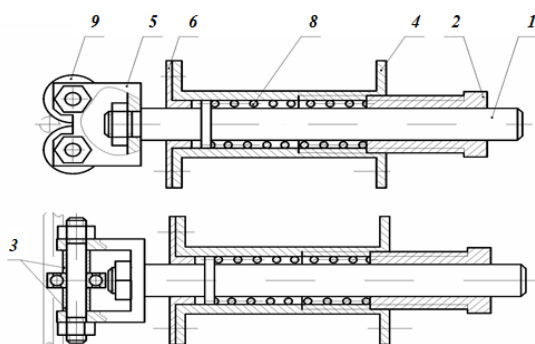


Рис. 7. Компенсатор: 1 – вал; 2 – втулка; 3 – втулка распорная; 4 – гильза; 5 – кронштейн;
6 – крышка; 7 – ось; 8 – пружина; 9 – ролики

Расчет приспособления предполагал определение параметров пружины, в частности удлинение пружины (осадка) равна

$$\lambda = 8 \frac{P_u D_{cp}^3 n}{G d_{np}^4},$$

где n – число витков пружины; d_{np} – диаметр проволоки пружины; G – модуль упругости II рода, модуль сдвига; P_u – усилие, которое необходимо развивать в процессе компенсации; D_{cp} – средний диаметр витка пружины; λ – удлинение (или осадка пружины). Коэффициент жесткости $c = G d_{np}^4 / 8 D_{cp}^3 n$.

Перед началом эксперимента проводилась настройка компенсатора, поджималась пружина на рассчитанную величину, зависящую от режимов резания. Выполнялось требование – ролики, во избежание радиального биения, должны одновременно соприкасаться с поверхностью детали.

Режимы резания выбирались из соображений «получистового» точения (под шлифование): подача $s = 0,25$ мм/об, частота вращения шпинделя $n = 800$ об/мин, глубина резания составила 1 мм. В статическом режиме производилось нагружение нежесткой заготовки при помощи компенсатора, создающего усилие за счет сжатия оттарированной пружины; при этом контролировалась величина прогиба в центре заготовки.

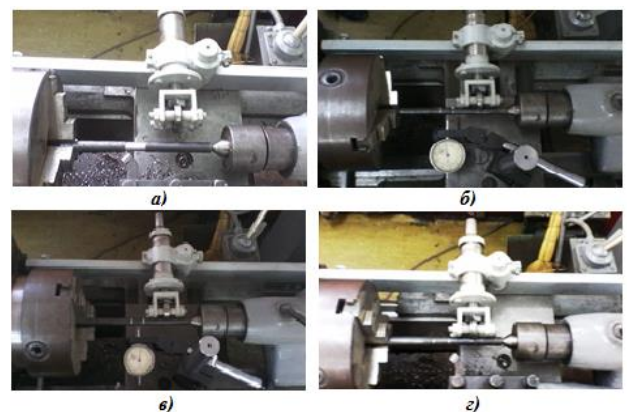


Рис. 8. Фотографии экспериментальной установки и этапов эксперимента

а) обработанная заготовка без использования компенсатора; б) установка микрометра для настройки компенсирующего устройства; в) настройка компенсирующего устройства с использованием индикатора на $W=0,065$ мм; г) закрепленная заготовка в патроне и центре с компенсатором, создающем усилие.

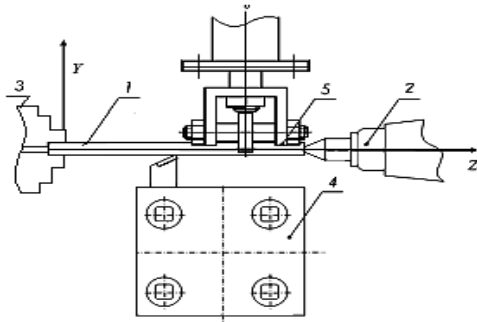


Рис. 9. Схема обработки заготовки с компенсирующим усилием: 1 – нежесткая заготовка ($L = 200$ мм, $d_3 = \text{Ø}14$ мм); 2, 3 – центры; 4 – суппорт с резцом проходным отогнутым; 5 – компенсатор

3. Этапы экспериментальных исследований

1. Подготовка заготовок ст.3 длиной рабочей поверхности 200 мм (рис. 10), диаметром $d_3 = 14$ мм заготовка с закреплением в патроне и в центре.

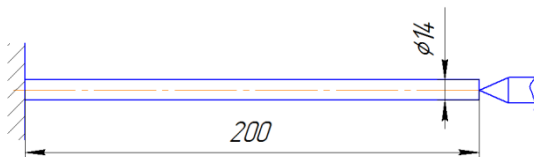


Рис. 10. Схема обработки поверхностей детали типа вал

2. Обработка шейки вала длиной $\Delta l = 20$ мм, диаметром $d = 12$ мм без компенсатора (рис. 11).

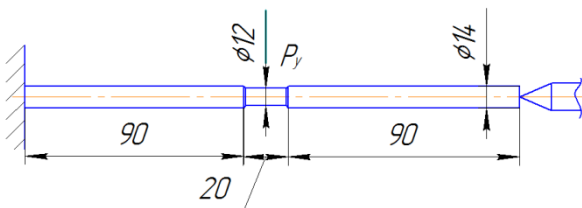


Рис. 11. Обработка заготовки без компенсатора

3. Настройка компенсатора с помощью индикатора.

4. Обработка шейки вала длиной $\Delta l = 20$ мм, диаметром $d = 12$ мм с компенсатором (рис. 12).

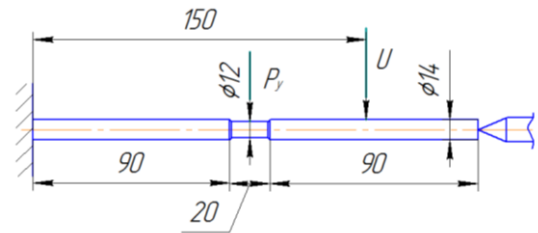


Рис. 12. Точение шейки вала с использованием компенсатора

5. Проверка обработанных деталей с помощью микрометра.

6. Сравнение результатов обработки заготовок с использованием компенсирующего воздействия и без него. На (рис. 8) показаны фотографии обработки вала с компенсирующим воздействием и без.

Настройка проводилась следующим образом. До начала обработки производилось нагружение нежесткой заготовки диаметром $d_3 = 14$ мм при помощи компенсатора, создающего усилие за счет сжатия оттарированной пружины. При этом измерялась величина прогиба в центре заготовки с использованием индикатором часового типа. Выполнен расчет прогиба заготовки.

Система алгебраических уравнений для определения реакций и компенсирующего воздействия (без учета силы резания) имеет вид:

$$\sum_{k=1}^4 P_{ky} = Y_A - U + Y_B = 0,$$

$$\sum_{k=1}^4 M_B = -Y_A \cdot L - M_A + U \cdot (L - b) = 0,$$

$$W_B = \frac{M_A \cdot L^2}{2} + \frac{Y_A \cdot L^3}{6} - \frac{U \cdot (L - b)^3}{6} = 0.$$

В третьем уравнении множитель $\frac{1}{EJ}$

опущены; E – модуль упругости первого рода; J – осевой момент инерции круглого поперечного сечения заготовки.

Выражение для перемещения среднего сечения заготовки при $d_3 = 14$ мм:

$$W_b = \frac{\frac{M_A \cdot a^2}{2} + \frac{Y_A \cdot a^3}{6}}{E \cdot J},$$

где $a = L/2$; $d = 0.014$ м;
 $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Па; $J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$; $L = 0.2$ м.

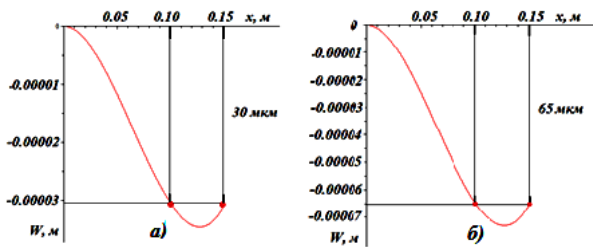


Рис. 12. Перемещение сечения заготовки под действием компенсирующего усилия (без силы резания): а) при подаче $S=0.08$ мм/об; б) при подаче $S=0.25$ мм/об

В статическом режиме перемещение на индикаторе должно составлять $Wb = -0.030$ мм, что соответствует усилию $U = 214.88$ Н с радиальной составляющей силой резания $P_y = 165$ Н при $S = 0.08$ мм/об и $Wb = -0.065$ мм при $S = 0.25$ мм/об, что соответствует усилию $U = 455$ Н и $P_y = 350$ Н.

Исходные данные для эксперимента:
 $l_3 = 200$ мм, $d_3 = \varnothing 14$ мм,
 $S = 0.25/0.08$ мм/об, $t = 1$ мм; $n = 800$ об/мин.

Обрабатывалась партия $N = 22$ шт. при подаче $S = 0.25$ мм/об и компенсирующем усилии $U = 455$ Н и без; $N = 8$ шт. при подаче $S = 0.08$ мм/об и компенсирующем усилии $U = 215$ Н и без компенсации.

4. Результаты измерений

Обработка нежестких заготовок с использованием компенсации позволяет повысить точность изготавливаемых деталей с 13-12 квалитета до 10-9 (согласно таблице квалитетов). Использование подачи $S = 0.25$ ускоряет процесс резания, т.е. повышает производительность.

Таблица 1. Сводная таблица результатов измерений и анализа результатов при точении шейки вала, подаче $S = 0.25$ мм/об и $S = 0.08$ мм/об, с компенсацией и без компенсации

N п/ п	Номинальный Ø12(S=0,25)	
	с компенса- цией	без компенсации
1.	12.05	12.10
2.	12.18	12.30
3.	12.15	12.24
4.	12.10	12.24
5.	12.13	12.23
6.	12.05	12.30
7.	12.12	12.25
8.	12.09	12.25
9.	12.08	12.25
10	12.06	12.27
Номинальный Ø12(S=0,08)		
	с компенсацией	без компенсации
1.	12.11	12.24
2.	12.08	12.20
3.	12.06	12.21
4.	12.09	12.19
Среднеарифметическая величина диаметра (оценка математического ожидания) $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$.		
Без ком- пенсации	Ø12(S=0,25) $\bar{d} = 12,240$ мм, Ø12(S=0,08) $\bar{d} = 12,210$ мм,	
с ком- пенсаци- ей	Ø12(S=0,25) $\bar{d} = 12,103$ мм, Ø12(S=0,08) $\bar{d} = 12,085$ мм.	
Средний квадрат погрешности (оценка дисперсии) $\Delta \hat{S}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2$		
Без ком- пенсации	Ø12(S=0,25) $\Delta \hat{S}^2 = 0,00292$ мм, Ø12(S=0,08) $\Delta \hat{S}^2 = 0,00047$ мм,	
с ком- пенсаци- ей	Ø12(S=0,25) $\Delta \hat{S}^2 = 0,00175$ мм, Ø12(S=0,08) $\Delta \hat{S}^2 = 0,00043$ мм.	
Абсолютная погрешность $\delta = \frac{t_\alpha \Delta \hat{S}}{\sqrt{n}}$, где n – число обрабатываемых заготовок; t_α – коэффициент Стьюдента. Для $n = 11$ штук и $\alpha = 0,95$ $t_\alpha = 2,201$, где α – доверительная вероятность. Для $n = 4$ штук и $\alpha = 0,95$ $t_\alpha = 2,776$. [5]		
Без ком- пенсации	Ø12 (S=0,25) $\delta = 0,036$ мм; Ø12 (S=0,08) $\delta = 0,030$ мм,	
с ком- пен- сацией	Ø12 (S=0,25) $\delta = 0,028$ мм; Ø12 (S=0,08) $\delta = 0,029$ мм.	

Продолжение таблицы 1

Истинное значение с надежностью $\alpha = 0,95$ находится в пределах $\bar{d} - \delta < d_i < \bar{d} + \delta$.	
Без компенсации	$\varnothing 12(S=0,25) 12,203 < d_i < 12,277$ $\varnothing 12(S=0,08) 12,180 < d_i < 12,230$
с компенсацией	$\varnothing 12(S=0,25) 12,075 < d_i < 12,131$; $\varnothing 12(S=0,08) 12,056 < d_i < 12,114$
Относительная погрешность $\varepsilon = \pm \frac{\delta}{\bar{d}} \cdot 100\%$.	
Без компенсации	$\varnothing 12(S=0,25) \varepsilon = 0,294\%$, $\varnothing 12(S=0,08) \varepsilon = 0,246\%$
с компенсацией	$\varnothing 12(S=0,25) \varepsilon = 0,231\%$, $\varnothing 12(S=0,08) \varepsilon = 0,239\%$.
Отклонение от номинального размера: $ \Delta d = d_{ном} - \bar{d} $	
без компенсации	$\varnothing 12(S=0,25) \Delta d = 0,240\text{мм}$; $\varnothing 12(S=0,08) \Delta d = 0,210\text{мм}$
с компенсацией	$\varnothing 12(S=0,25) \Delta d = 0,103\text{мм}$; $\varnothing 12(S=0,08) \Delta d = 0,085\text{мм}$

Выводы

Экспериментальные исследования подтверждают достоверность результатов моделирования и эффективность использования компенсирующего устройства, что обеспечивает повышение точности обработки на 3 квалитета, с увеличением производительности.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований представляется возможность обоснования проектирования специальных САУ ДНЗ (система автоматического управления деформациями нежестких заготовок), реализующих непрерывное оптимальное управление деформируемым состоянием нежестких заготовок при автоматической токарной обработке.

Список литературы

1. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированным состоянием твердых тел и систем // тез. докл. VII Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике, 12.09.91 г. – М.: 1991. – С.60-61.

2. Бохонский А.И. Построение управлений деформациями твердых тел при медленно движущейся внешней нагрузке // Изв. Вузов. Машиностроение. 1989. – № 10. – С. 124-128.
3. Бохонский А.И., Рыжкова Н.П. Управление линейными и угловыми деформациями нежестких заготовок при токарной обработке // Станки и инструменты. –1985. – №4. – С. 28-31.
4. Бохонский А.И., Вохмянин А.Н. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке: Монография. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. – 240 с.
5. Бохонский А.И. Оптимальное управление в некоторых задачах механики/ А.И. Бохонский. «Сб.» Сопротивление материалов и теория сооружений. №41. К: Будівельник, 1982. – С. 21-26.
6. Бохонский А.И. Построение управлений деформациями твердых тел при медленно движущейся внешней нагрузке. /А.И. Бохонский. – Известия вузов. Машиностроение. №10. Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 1989. – С. 124-128.
7. Бохонский А.И., Вохмянин А.И. Повышение точности токарной обработки нежестких заготовок // Станки и инструменты. №9, 1994. – С. 27 – 31.
8. Бохонский А.И., Шмидт Л.А. Вариационные методы поиска управлений деформированием нежестких заготовок при токарной обработке. //Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк ДонТТУ, 2002. – № 20. – С. 56 – 60.
9. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Вариационное и реверсионное исчисление в механике: монография. Под ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, СевНТУ, 2012. – 212 с.
10. Бохонский А.И., Шмидт Л.А. Вариационные методы поиска управлений деформированием нежестких заготовок при токарной обработке/ А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт //Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк. – № 11. – С. 115 – 119.
11. Бохонский А.И. Система автоматического управления медленными и быстрыми перемещениями при токарной обработке нежестких заготовок/ А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт// Машиностроение и техносфера XXI века: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк, 2007. – С. 130 – 133.
12. Бохонский А.И. Свойства деформационных критериев качества при управлении деформированием объектов / Бохонский А.И., Шмидт Л.А. // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – Вып. 11. – С. 44 – 47.
13. Бохонский А.И. Методы Ритца и множителей лагранжа в задачах оптимального управления деформированием стержней / Бохонский А.И., Шмидт Л.А. // Вестник СевГТУ. Механика,

энергетика, экология : сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – Вып. 97. – С. 11 – 15.

14. Кудинов В.К., Тараненко В.А. К проблеме оптимизации режимов резания на металлорежущих станках/ Приборостроение: Сб. науч. Тр. – Киев.: Техника, 1979.Л. – Вып. 26 – С. 82-84
15. Соколовский А.П. Расчет точности обработки на металлорежущих станках. – Л: Машгиз, 1952. – 286 с.

References

1. Bokhonsky A.I. Motion-compensation and control a deformation of solids states and systems. *tez. dokl. VII Vsesoiuznyi s"ezd po teoreticheskoi i prikladnoi mekhanike*, 12.09.91 g., 1991, pp. 60-61.
2. Bokhonsky A.I. Control construction a deformation of solids states with a slowly moving external load. *Izv. Vuzov. Mashinostroenie*, 1989, № 10. pp. 124-128.
3. Bokhonsky A.I., Ryzhkova N.P. Control a deformation of linear and angular nonrigid parts during turning. *Stanki i instrumenty*, 1985. №4. pp. 28-31.
4. Bokhonsky A.I., Vokhmianin A.N. Control a deformation of unrigid details in turning: The monography. – Sevastopol: Publishing SevGTU, 1999. – 240 p.
5. Bokhonsky A.I. Optimal control in some problems of mechanics. «Sb.» *Soprotivlenie materialov i teoriia sooruzhenii. K: Budivel'nik*, 1982, №41. pp. 21-26.
6. Bokhonsky A.I. Construction of rigid parts deformation control with a slowly moving external load. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie. Izdanie MGTU im. N.E. Bauman. M.*, 1989, №10. pp. 124-128.
7. Bokhonsky A.I., Vokhmianin A.N. Substantially improving of nonrigid parts during turning. *Stanki i instrumenty*, 1994, №9. pp. 27 – 31.

8. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Variational methods of control searching a deformation of nonrigid parts during turning. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia: Mezhdunar. sb. nauchnykh trudov. Donetsk DonTTU*, 2002, № 20. pp. 56 – 60.
9. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Variational and reversion calculus in mechanics: monographia; Under gen. edit. A.I. Bokhonsky. – Sevastopol: SevNTU Publishing, 2012. – 212 p.
10. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Variational methods of searching the control of nonrigid parts deformations during turning. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia: Mezhdunar. sb. nauchnykh trudov. Donetsk. № 11*. pp. 115 – 119.
11. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Automatic control system for slow and fast movements when non-rigid workpieces are turning. *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: Mezhdunar. sb. nauchnykh trudov. Donetsk*, 2007. pp. 130 – 133.
12. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Properties of deformation criterion quality during control of object deformation. *Optimizatsiia proizvodstvennykh protsessov: sb. nauch. tr. Sevastopol: SevNTU*, 2009. № 11. pp. 44 – 47.
13. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Ritz and Lagrange multiplier methods in optimal control tasks of rods deformation. *Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiia: sb. nauch. tr. Sevastopol: SevNTU*, 2009. № 97. pp. 11 – 15.
14. Kudinov V.K., Taranenko V.A. To the problem of cutting conditions optimization on metal-cutting machines. *Priborostroenie: Sb. nauch. Tr. – Kiev.: Tekhnika*, 1979. № 26. pp. 82-84.
15. Sokolovskii A.P. Calculation of the machining accuracy on metal-cutting machines. – L: Mashgiz, 1952. – 286 p.

УДК 621.952

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПОД УГЛОМ К ОСИ ДЕТАЛИ

В.Б. Богущкий¹, Л.Б. Шрон¹, Ю.К. Новосёлов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

При шлифовании поверхностей, расположенных под углом к оси детали, в поверхностном слое возникают дефекты в виде прижогов, шлифовочных трещин и др. При обработке ответственных поверхностей деталей необходимо подбирать такие режимы и характеристики круга, чтобы температура в зоне контакта была ниже точек структурных превращений. Предложено формализованное описание процесса шлифования и разработан алгоритм управления качеством обработки, который позволит при проектировании технологии шлифования при получении положительного результата перейти к анализу процесса обработки следующей поверхности, а при отрицательном выполняется анализ причин несоответствия и даются рекомендации по их устранению. Таким образом появляется возможность обеспечить качество обрабатываемых поверхностей деталей как непосредственно после правки инструмента, так и в любой момент времени периода его стойкости.

Ключевые слова: шлифование, скрещенные оси, формализованное описание, алгоритм, оценка параметров качества поверхности.

FEATURES OF QUALITY MANAGEMENT AT GRINDING SURFACES LOCATED UNDER ANGLE TO THE AXIS DETAILS

V.B. Bogutsky¹, L.B. Shron¹, Y.K. Novoselov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

When grinding surfaces at an angle to the axis of the workpiece, defects occur in the surface layer in the form of burns, grinding cracks, etc. When processing the critical surfaces of parts, it is necessary to select such modes and characteristics of the circle so that the temperature in the contact zone is below the points of structural transformations. A formalized description of the grinding process is proposed, and an algorithm for processing quality control is developed that will allow, when designing a grinding technology, when a positive result is obtained, to proceed to an analysis of the processing of the next surface, and if negative, the causes of the nonconformity are analyzed and recommendations for their elimination are given. Thus, it becomes possible to ensure the quality of the machined surfaces of the parts both immediately after straightening the tool and at any time during the period of its durability.

Keywords: grinding, crossed axes, formalized description, algorithm, estimation of surface quality parameters.

Введение

В процессе круглого наружного шлифования поверхностей, расположенными под углом к оси заготовок из высокоуглеродистых легированных сталей, в зоне резания создаются неблагоприятные термодинамические условия, вызывающие значительные структурные изменения в материале обрабатываемой детали [1, 2, 3 4 и др.]. Часто структурные изменения сопровождаются появлением на поверхности детали дефектов в виде прижога и шлифовочных

трещин, проявляющихся в дальнейшем при работе деталей вызывая неоправданные затраты простои оборудования и производственные затраты. Поэтому при обработке ответственных поверхностей деталей необходимо подбирать такие режимы и характеристики круга, чтобы температура в зоне контакта не достигла критических точек структурных превращений. Для достижения заданного качества приходится снижать режимы резания, осуществлять частую правку шлифовальных кругов, что неизбежно приводит к снижению производительности обработки [5, 6, 7, 8 и др.].

Результаты и обсуждение

В работах [9, 10, 11] разработано формализованное описание процесса шлифования поверхностей расположенными в одной плоскости под углом к оси заготовок (на примере заточки зубьев круглых протяжек по передней поверхности) тарельчатыми кругами с прерывистой поверхностью.

Формализованное описание обеспечивает численный расчет параметров качества и эффективности процесса как непосредственно после правки инструмента, так и в любой момент времени периода его стойкости. На рис. 1 приведен алгоритм анализа процесса круглого шлифования поверхностей, который содержит блоки: 1 – исходных данных, 2 – определения параметров системы на обороте, 3 – оценки параметров ТС после j – го оборота; 5 – оценки качества обработанной поверхности и эффективности операции шлифования, 12 – анализа причин неудовлетворительного качества обработки, 9 – учета номера оборота, 7 – учета номера цикла, 11 – учета номера обрабатываемой поверхности заготовки, 4, 8, 10 – блоки сравнения.

В исходные данные включается информация о точности, жесткости станка, начальном положении его исполнительных механизмов, параметрах заготовки, СОТС, технических требованиях на деталь, начальном состоянии рабочей поверхности инструмента, режиме резания. Параметры рабочей поверхности инструмента после правки либо вычисляются по зависимостям, приведенным в литературе [12, 13, 14, 15, 16 и др.], либо определяются экспериментально. Остальные данные берутся из технической документации. Для возможности оценки результатов процесса после этапов цикла в блок исходных данных вносится

массив P_j . При $j=P_m$ производится вычисление показателей процесса.

Анализ начинается с вычисления параметров состояния подсистем после j -го оборота при обработке первой поверхности заготовки, установленной на станок после правки инструмента. Число оборотов изменяется от единицы до N , где N определяется по времени обработки детали. Для выполнения расчетов устанавливаются значения элементов режима на j -м обороте, коэффициенты формы зерна C_m , m и показатель χ распределения зерен по глубине инструмента.

В блоке 3 методом итерации решается уравнение баланса перемещений в технологической системе уравнение (1) [17, 18]. На первом шаге полагается, что вся врезная подача идет на приращение глубины микрорезания и сьем металла на $j-1$ – м обороте. Вычисляется приращение Δt_{f_j} и $t_{f_j} = t_{f_{j-1}} + \Delta t_f$.

$$\Delta A_{s_j} = \Delta t_{f_j} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk} + \sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk} \quad (1)$$

где t_{f_j} – фактическая глубина микрорезания наиболее выступающим зерном шлифовального круга на i -м обороте; Δt_{f_j} – приращение фактической глубины резания; ΔR_j – радиальный износ инструмента в принятом интервале времени; Δr_{j-1} – радиальный сьем материала в принятом интервале времени; $\sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk}$ – сумма приращений упругих деформаций элементов технологической системы; $\sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk}$ – сумма приращений температурных деформаций элементов технологической системы.

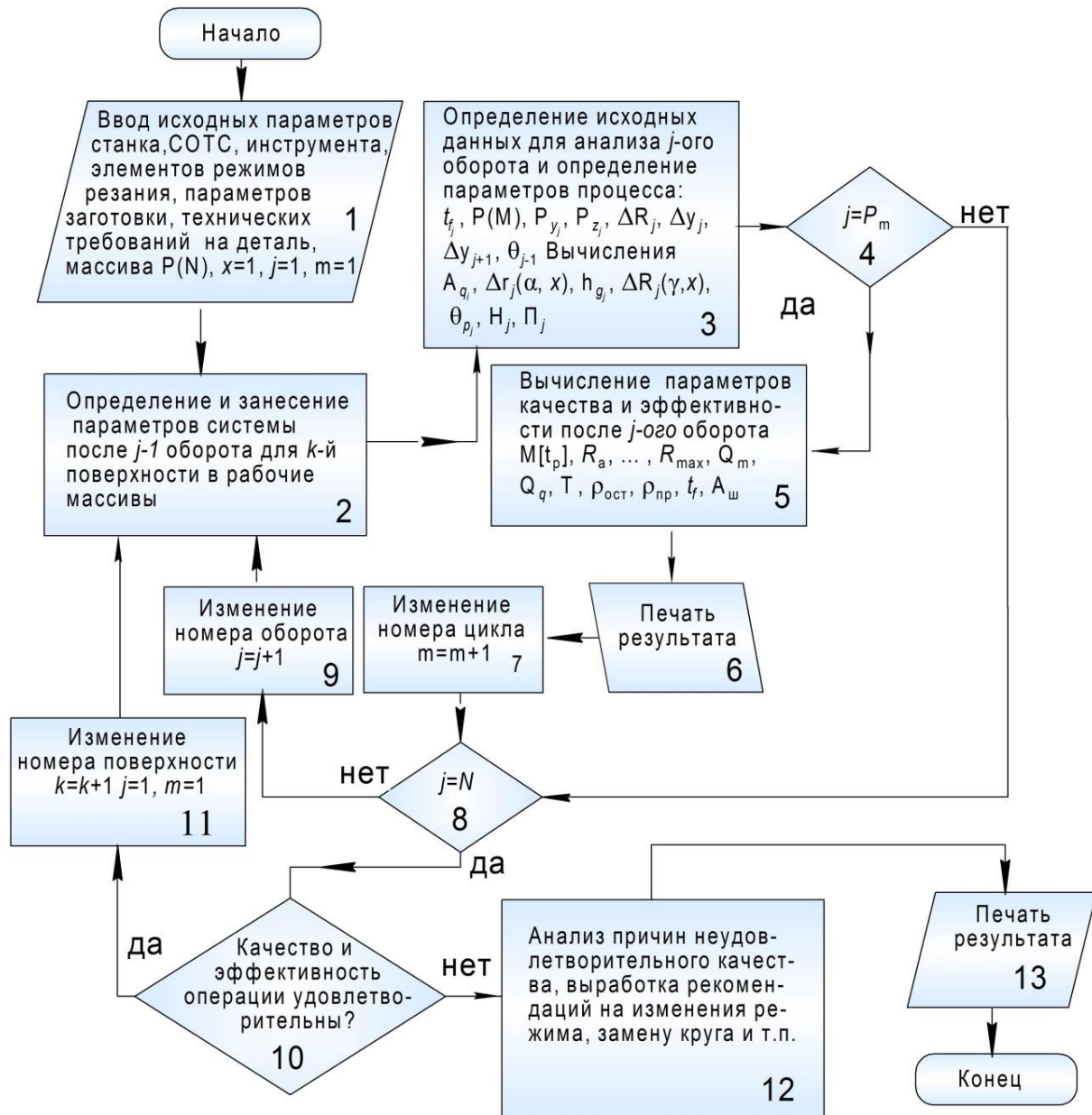


Рис. 1. Алгоритм анализа процесса круглого шлифования поверхностей

По глубине микрорезания определяются силы резания, уравнения (2) и (3), износ круга по зависимости (4). Для случая шлифования образцов из стали Р6М5 кругами из электрокорунда белого 25А средней струк-

туры, зернистостью в диапазоне F90...F46 и твердостью – М, N, О, Р, Q на керамической связке эти характеристики определяются по зависимости (5) [19].

$$P_z = \frac{\sigma \cdot S_{xy}}{4K_c(\Lambda\Psi^3)^{0.5}} \cdot \left[4(\Lambda\Psi^3)^{0.5} + \mu \cdot (6\Lambda + 5\Psi - 2h_n) \cdot (h_n(\Psi - h_n))^{0.5} - 3\mu \cdot (2\Lambda\Psi + \Psi^2) \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin(h_n/\Psi)^{0.5} \right) \right] \quad (2)$$

$$1. \quad P_{yx} = \frac{\sigma \cdot S_{xy}}{K_c} \left[1.67 \left(\frac{\Lambda}{2\Psi_x} \right)^{0.5} + \frac{\mu \cdot \Psi_x - h_n}{\Psi_x} \right]. \quad (3)$$

$$\text{где } \Lambda = 0.107 \cdot K_{\rho_g} \cdot B_g^{0.955}; \quad \Psi = H + \frac{0.68 \cdot t_f^2 K_c K_{n_g} (V_k - V_u)(K_{\rho_g} D_e)^{0.5}}{64.45 \cdot V_u B_g^{1.51} + t_f K_c K_{n_g} (V_k - V_u)(K_{\rho_g} D_e)^{0.5}}.$$

$$\dot{h}_g = V_k \int_{-L_g}^{L_g} h_0 \exp \left\{ - \frac{\pi \cdot K_c n_g (V_k - V_u) \sqrt{2 \rho_g}}{V_u H_u^{3/2}} \cdot \left[\frac{2}{5} D_e^{0.5} \cdot \sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i \Delta r)^{2.5} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{8} (t_f - y_j - \Delta r)^2 \left(z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right] \right\} dz \quad (4)$$

$$S_{Rx} = 1,49 B_g^{-1.019} h_0^{-0.295} V_u^{0.272} S_{yx}^{1.401}, \quad (5)$$

где P_z , P_{yx} – составляющие силы резания; σ – эмпирический коэффициент; h_n – высота зоны проскальзывания; μ – коэффициент трения зерна о металл; V_u – окружная скорость заготовки; V_k – окружная скорость шлифовального круга; t_f – глубина микро-резания; K_c – коэффициент стружкообразования; B_g – основной размер абразивного зерна по ISO 8486–1,2:1996(E); K_{ρ_g} – коэффициент учитывающий изменение радиуса округления зерна в процессе работы абразивного инструмента; S_{xy} – суммарное сечение стружки; D , d – диаметр шлифовального круга и заготовки; H – слой, в котором распределена шероховатость поверхности; n_g – количество зерен в единице площади инструмента; K_{n_g} – коэффициент учитывающий изменение количества абразивных зерен на рабочей поверхности круга в период между правками; Δr – радиальный съем металла; H_u – величина слоя рабочей поверхности шлифовального круга, в пределах которой подсчитывается n_g ; y_i – расстояние от наружной поверхности заготовки до рассматриваемого уровня; z – расстояние сечения заготовки до основной плоскости; L_y – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня y с траекторией движения наиболее удаленной от центра режущей кромкой; h_0 – величина относительного износа абразивного зерна; δ – угол наклона оси круга; γ – угол наклона обрабатываемой поверхности;

$D_e = \frac{Dd \cos \delta}{(D \sin \gamma - d \sin(\delta - \gamma))}$ – эквивалентный диаметр.

По приращениям сил и температур – приращения упругих и температурных деформаций. На втором, третьем и т.д. этапах циклы расчета повторяются до получения требуемой точности результата.

После решения уравнения баланса перемещений вычисляются величина перемещения инструмента в направлении подачи, линейный съем металла Δr (6), износ инструмента ΔR (4), вероятность разрушения единичной режущей кромки P_k (7), шероховатость поверхности R_a (8); величина слоя шероховатости поверхности H (9), глубина дефектного слоя h_d (10) и величина удаленной части припуска L_j (11) [9, 10, 20]. Если цикл обработки не закончен, то переходят к анализу последующего оборота, полагая $j = j + 1$. Данные вычислений заносят в блок 2, в котором по зависимостям (12), (13), (14) определяются текущие значения радиуса округления вершин зерен $\rho_g(\tau)$, число кромок на рабочей поверхности инструмента $n_g(\tau)$ и их распределение по глубине $f(u)$, текущий радиус-вектор обработанной поверхности $r_j(\alpha)$ (15) (вычисляется после j -го оборота по его значению после $j-1$ -го оборота и величине радиального съема материала $\Delta r_j(\alpha)$ [17]); и радиус-вектор круга $R_j(\varphi)$. (16).

$$\Delta r = \frac{K_c t_f^2 n_g (V_k - V_u) \cdot (\rho_g D_e)^{0.5}}{13.66 V_u + 1.478 K_c t_f n_g (V_k - V_u) \cdot (\rho_g D_e)^{0.5}}. \quad (6)$$

$$P_k = P(\bar{M}) = \exp \left\{ - \frac{\pi \cdot K_c n_g (V_k - V_u) \sqrt{2 \rho_g}}{V_u H_u^{3/2}} \cdot \left[\frac{2}{5} D_e^{0.5} \times \sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i \Delta r)^{2.5} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{8} (t_f - y_j - \Delta r)^2 \left(z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

$$R_a = \frac{0,544 V_u^{0.4} t_f^{0.6} B_g^{0.605}}{K_c^{0.4} K_{n_g}^{0.4} K_{\rho_g}^{0.2} (V_k - V_u)^{0.4} D_e^{0.20.2}} \quad (8)$$

$$H = t_f - \frac{0.68 \cdot t_f^2 K_c K_{n_g} (V_k - V_u) (K_{\rho_g} D_e)^{0.5}}{64.45 \cdot V_u B_g^{1.51} + t_f K_c K_{n_g} (V_k - V_u) (K_{\rho_g} D_e)^{0.5}} \quad (9)$$

$$h_d = \alpha_q \xi (q - q_0) \left(\frac{1}{2V_k} (t_f D_e)^{0.5} \right)^\beta. \quad (10)$$

$$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j. \quad (11)$$

$$\rho_g(\tau) = K_{\rho_g} \cdot \rho_{g_0} \quad (12)$$

$$n_g(\tau) = K_{n_g} \cdot n_{g_0}. \quad (13)$$

$$f(u) = \frac{\chi}{H_u^\chi} \cdot u^{\chi-1}. \quad (14)$$

$$r_j(\alpha) = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha). \quad (15)$$

$$R_j(\phi) = R_{j-1}(\phi) - \Delta R_j(\phi). \quad (16)$$

где Π_j – текущий припуск после j -го оборота; ρ_{g0} – исходный радиус округления вершины зерна; n_{g0} – исходное количество абразивных зерен на 1 мм² рабочей поверхности круга; α_q – коэффициент, зависящий от теплофизических свойств круга и заготовки; ξ – коэффициент, учитывающий влияние теплового поля на глубину дефектного слоя; q – интенсивность теплового потока; q_0 – бездефектная интенсивность теплового потока; u – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины зерна; $r_{j-1}(\alpha)$, $r_j(\alpha)$ радиальный съем материала после предыдущего и на текущем обороте.

После окончания цикла обработки ($j = N$) выполняется оценка соответствия параметров качества поверхности и эффектив-

ности операции, требуемым по техническим условиям. При получении положительного результата переходят к анализу процесса обработки следующей поверхности (или следующей заготовки), полагая $k = k + 1$. При получении отрицательного результата выполняется анализ причин несоответствия, даются рекомендации по их устранению.

Выводы

Предложенный алгоритм позволяет использовать формализованное описание процесса шлифования для обеспечения гарантированного качества обрабатываемых поверхностей деталей при проектировании финишных технологических операций.

Список литературы

1. Инженерия поверхности деталей. / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
2. George E. Totten Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. / Totten G., Inoue T., Howes M. //ASM International, 2002. – 550 p.
3. Бутенко В.И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин: моногр. Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – 481 с.
4. CRC Materials Science and Engineering Handbook, Third Edition. Edited By William Alexander, James F. Shackelford. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. – 1980 p.
5. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении/З.И. Кремень. СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
6. W. Brian Rowe. Principles of modern grinding technology. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK 2009. – 421 p.
7. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press, New York, 2008. – 372 p.
8. Кальченко В. В. Научные основы эффективного шлифования со скрежывающимися осями абразивного инструмента и обрабатываемой детали. дисс...д-ра техн. наук. – Чернигов, 2006. – 488 с.
9. Богуцкий В.Б. Определение глубины микрорезания при шлифовании со скрежываемыми в одной плоскости осями абразивного инструмента и заготовки/ В.Б. Богуцкий, Л.Б. Шрон // Вестник современных технологий. 2017. № 2 (6). – С. 4-8.
10. Novoselov Y. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact area/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // Procedia Engineering. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017», 2017. – С. 991-996.
11. Novoselov Y. Forecasting the surface roughness of the workpiece in the round external grinding/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017», 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901080.
12. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. Резникова А.Н. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
13. Handbook of Machining with Grinding Wheels/ Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner, Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe, Ichiro Inasaki. CRC Press, 2006. – 632 p.
14. Hassan Abdel-Gawad El-Hofy. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. CRC Press, 2006. – 562 p.
15. Королев А.В. Прогрессивные процессы правки шлифовальных кругов / А.В. Королев, Р.А. Березняк. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1984. – 112 с.
16. Robert I. King, Robert S. Hahn. Handbook of Modern Grinding Technology. Springer Science & Business Media, 2012 г. – 360 p.
17. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: моногр. – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304с.
18. Novoselov Y. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear/ Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering 2. «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016», 2016. – P. 809-814.
19. Богуцкий В.Б. Обеспечение качества поверхности зубьев протяжек при их шлифовании профилированными прерывистыми кругами. Дисс. ... канд. техн. наук. – Севастополь, 2014. – 163 с.
20. Новоселов Ю.К. Прогнозирование параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке/ Ю.К. Новоселов, В.Б. Богуцкий, Р.Н. Дзюбаба // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-1. – С. 262-269.

References

1. Inzheneriya poverhnosti detalej/ Koll. avt.; pod red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie. 2008. – 320 p.
2. George E. Totten Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. / Totten G., Inoue T., Howes M. //ASM International, 2002. – 550 p.
3. Butenko V.I. Nauchnye osnovy funktsional'noj inzhenerii poverhnostnogo sloya detalej mashin: monogr. Donskoj gos. tekhn. un-t. – Rostov-na-Donu: DGTU, 2017. – 481 p.
4. CRC Materials Science and Engineering Handbook, Third Edition. Edited By William Alexander, James F. Shackelford, Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. – 1980 p.
5. Kremen' Z.I. Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii. SPb.: Politehnika, 2007. – 424 p.
6. W. Brian Rowe. Principles of modern grinding technology. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK 2009. – 421 p.
7. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press, New York, 2008. – 372 p.
8. Kal'chenko V.V. Nauchnye osnovy ehffektivnogo shlifovaniya so skreshchivayushchimisya osyami abrazivnogo instrumenta i obrabatyvaemoe detali. Diss...d-ra tekhn. nauk. – Chernigov, 2006. – 488 p.
9. Bogutsky V.B. Opredelenie glubiny mikrorezaniya pri shlifovanii so skreshchennymi v odnoj ploskosti osyami abrazivnogo instrumenta i zagotovki/ V.B. Bogutsky, L.B. Shron // Vestnik sovremennyh tekhnologij. 2017. № 2 (6). – P. 4-8.
10. Novoselov Y. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact area/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // Procedia Engineering. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017», 2017. – С. 991-996.

11. Novoselov Y. Forecasting the surface roughness of the workpiece in the round external grinding/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017», 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901080.
12. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik / Pod red. Reznikova A.N. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 391 p.
13. Handbook of Machining with Grinding Wheels/ Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner, Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe, Ichiro Inasaki. CRC Press, 2006. – 632 p.
14. Hassan Abdel-Gawad El-Hofy. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. CRC Press, 2006. – 562 p.
15. Korolev A.V. Progressivnye processy pravki shlifoval'nyh krugov./ A.V. Korolev, R.A. Bereznyak. Saratov: Izd-vo Saratovsk. un-ta, 1984. – 112 p.
16. Robert I. King, Robert S. Hahn. Handbook of Modern Grinding Technology. Springer Science & Business Media, 2012 г. – 360 p.
17. Novoselov Y.K. Dinamika formo-obrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke: monogr. – Sevastopol': Iz-vo SevNTU, 2012. – 304 p.
18. Novoselov Y. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear/ Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering 2. «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016», 2016. – P. 809-814.
19. Bogutsky V.B. Obespechenie kachestva poverhnosti zub'ev protyazhek pri ih shlifovanii profilirovannyimi preryvistymi krugami. Diss. ... kand. tekhn. nauk. – Sevastopol', 2014. – 163 p.
20. Novoselov Y.K. Prognozirovanie parametrov sherohovatosti poverhnosti pri abrazivnoj obrabotke/ Y.K. Novoselov, V.B. Bogutsky, R.N. Dzyubaba // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017. № 8-1. – P. 262.

УДК 621.914.02

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЕРЕН НА ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТРЕЗНОГО КРУГА ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ

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

Аннотация

Разработана вероятностно-статистическая модель периферийной поверхности отрезного круга распределения вершин зерен по глубине рабочего слоя абразивного инструмента в зависимости от времени абразивной резки. В модели учтено случайное взаимодействие вершин зерен с выступами неровностей разрезаемой поверхности, вероятности изнашивания и случайное перемещение вершин по глубине рабочего слоя в результате скалывания, истирания, вырывания. Разработан способ определения переходных вероятностей вершин зерен в результате изнашивания скалыванием, истиранием и вырыванием учитывающий случайную величину радиального износа вершины зерна при различных видах изнашивания и ее зависимость от глубины резания зерна.

Ключевые слова: износ, вероятность удаления, глубина резания зерна, периферия круга, вероятностно-статистическая модель.

PROBABILITY-STATIC MODEL OF THE DISTRIBUTION OF GRAINS ON THE PERIPHERAL SURFACE OF THE CUTTING CIRCLE WHEN ABRASIVE SECTION

Е.А. Levchenko¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

A probabilistic-statistical model of the peripheral surface of the cutting circle of the distribution of grain peaks along the depth of the working layer of the abrasive tool is developed depending on the time of abrasive cutting. The model takes into account the random interaction of the vertices of the grains with the projections of the unevenness of the cut surface, the probability of wear and the random displacement of the vertices along the depth of the working layer as a result of rocking, abrasion, and tearing. A method has been developed for determining the transition probabilities of grain vertices as a result of wear by shearing, abrasion and taking into account the random value of the radial out-nose of the grain tip for various types of wear and its dependence on the depth of grain cutting.

Keywords: wear, the probability of removal, the depth of grain cutting, the periphery of the circle, the probability-statistical model.

Введение

Износ является приоритетным показателем абразивного резания потому, что во многом определяет расход режущего инструмента, качество обработанной поверхности торцов трубы и производительность процесса.

В зависимости от условий абразивной резки различают следующие основные разновидности износа абразивного инструмента [1-6]: истирание вершин зерен с обра-

зованием достаточно ровной площадки износа небольшой шероховатости поверхности; микроразрушение или поверхностное выкрашивание с отделением небольших частиц материала и образованием развитого рельефа площадки износа; скалывание с отделением крупных частиц, соизмеримых с размером зерна; вырывание зерен из связки. Поверхностное выкрашивание и скалывание являются следствием хрупкого разрушения зерна. Образование площадки износа на вершине зерна происходит в результате ад-

гезионного, абразивного, диффузионного, химического, окислительного, усталостного и др. видов изнашивания.

Целью данной статьи разработка вероятностно-статистической модели периферийной поверхности отрезного круга распределения вершин зерен по глубине рабочего слоя абразивного инструмента в зависимости от времени абразивной резки.

Обсуждение и результаты

Особенность работы отрезного круга заключается в том, что периферийная рабочая поверхность формируется в процессе резания, а эффективность работы торцев зависит от конструкции боковой поверхности, которая оказывает непосредственное влияние на качество реза обрабатываемой заготовки (рис.1).

При построении вероятностно-статистической модели в качестве рабочей поверхности, выполняющей основную функцию резки заготовки рассмотрим процесс изнашивания периферийной части отрезного круга.

По характеру формирования структуры рабочий слой отрезного круга в радиальном направлении от условной наружной поверхности инструмента можно разбить на три зоны (рис. 2). Зона 1 или зона контакта ограничена линией выступов шероховатости разрезаемой поверхности. В этой зоне происходит основное формирование структуры в результате износа истирания, скалывания и вырывания зерен. В зоне 2 изменение плотности распределения вершин происходит в результате появления новых вершин от зерен, работавших до скалывания в зоне 1. В зоне 3 вершины зерен распределены согласно начальным условиям.

Выделим в зоне абразивной резки на рабочей поверхности отрезного круга в непосредственной близости к основной плоскости прямоугольный параллелепипед, основанием которого является квадрат с единичной стороной, лежащей на условной наружной поверхности круга. Очевидно, что стороны квадрата основания параллелепипеда намного меньше радиуса круга R_K . По-

этому кривизной основания можно пренебречь. Выделим в параллелепипеде элементарный объем (далее слой) ΔV в виде прямоугольного параллелепипеда высотой ΔR_K , равной радиальному износу круга за один оборот. Тогда в зонах 1 и 2 получим соответственно N и M слоев. В зоне 3 выделим K таких слоев.

Будем считать, что за один контакт с разрезаемым металлом первый слой изнашивается полностью в результате вырывания зерен из связки, скалывания и истирания их вершин. Вершины зерен, расположенные в других слоях зоны 1, при контактировании с разрезаемым металлом могут перейти в вышележащие или остаться в рассматриваемом слое. Количество вершин, подверженных в слое тем или иным видам изнашивания определяется вероятностями вырывания зерен из связки P_{Bi} , скалывания P_{Ci} и истирания P_{Ei} их вершин [7-10].

Для зерен, контактирующих с металлом, вероятности изнашивания составляют полную группу:

$$P_{Bi} + P_{Ci} + P_{Ei} = 1. \quad (1)$$

Рассмотрим влияние каждой из составляющих на формирование вершин зерен в слое. Зерна, которые будут вырваны из связки, покидают рабочую поверхность круга. Вершины зерен, подвергнутые истиранию в слое ΔV_1 , согласно ранее принятого условия, полностью перейдут в слой ΔV_2 .

В остальных слоях зоны 1 в результате износа истиранием вершины могут остаться в рассматриваемом слое или перейти в вышележащий. Исключением является последний слой ΔV_N , для которого все вершины, подвергнувшиеся износу истиранием, остаются в данном слое. Допустим, что в результате износа скалыванием образуется только одна новая вершина. Если скалывание произошло в слое ΔV_1 , новая вершина может появиться в любом вышележащем слое зоны 1 или 2.

При скалывании в любом другом слое зоны 1 вершина может, кроме того, остаться и в рассматриваемом слое.

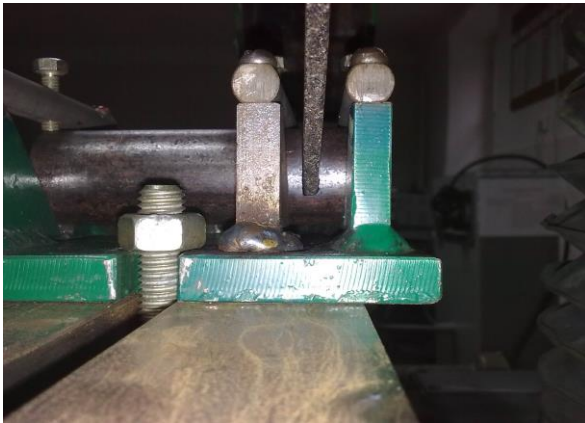


Рис. 1. Схема абразивной разрезки

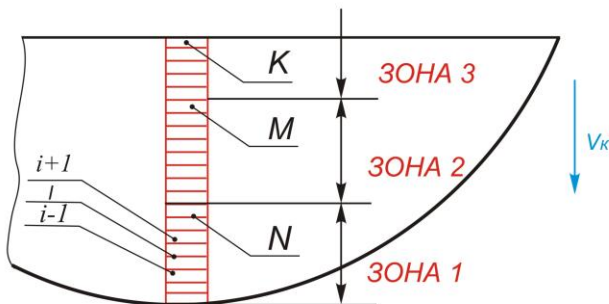


Рис. 2. Схема деления рабочего слоя периферийной поверхности отрезного круга

Вероятность появления вершины в любом слое от i -го, где произошло скалывание, до $N+M$ определяется плотностью распределения по глубине вновь образованных вершин зерен [11-12].

На K -ом обороте за одно касание круг изнашивается на величину ΔR_K . На эту же величину в результате износа уменьшается расстояние от вершин зерен рассматриваемого слоя до наружной поверхности круга. Если начало координат привязать к наружной поверхности круга, то можно считать, что после каждого оборота круга координаты вершин всех зерен уменьшаются на величину ΔR_K .

Исходя из этого, примем следующую схему формирования вершин зерен рабочей поверхности круга при абразивной разрезке. На K -ом обороте круга в i -ом слое во взаимодействии с разрезаемым металлом вступают вершины зерен, сформированные на $(K-1)$ -м обороте круга в $(i+1)$ -м слое. При прохождении зоны контакта количество вершин в i -ом слое будет изменяться под влиянием следующих факторов: часть режущих кромок Δn_i , выйдет из слоя в результате вырывания зерен из связки круга; некоторое количество Δn_{2i} покинет рассматриваемый слой в результате скалывания; в результате изнашивания истиранием некоторое количество режущих кромок Δn_{3i} переместится в вышележащий слой; в результате скалывания в нижележащих слоях часть режущих кромок Δn_{4i} попадет в рассматриваемый слой; в результате изнашивания истиранием в слое ΔV_{i-1} часть режущих кромок Δn_{5i} переместится в наблюдаемый.

Исключением является слой ΔV_1 где все вершины зерен, подвергнутые скалыванию и истиранию, покидают этот объем и последний слой ΔV_N зоны 1, где все зерна, работающие в режиме истирания, остаются в данном слое.

Тогда общее количество вершин в i -ом слое после K оборотов круга будет равно:

$$n_i(K) = n_{i+1}(K-1) - n_{1i}(K) - n_{2i}(K) - n_{3i}(K) + n_{4i}(K) + n_{5i}(K)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_{4i}(K) &= 0 \\ \Delta n_{5i}(K) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ при } i = 1;$$

$$\Delta n_{3i}(K) = 0 \quad \text{при } i = N;$$

$$1 \leq i \leq N$$

Вершины зерен, расположенные в зоне 2, контактируют с разрезаемым материалом, т.е. происходит процесс вырывания зерен, истирания и скалывания вершин. Изменения, происходящие в зоне 1, оказывают свое влияние и на зону 2. Во-первых, изменение количества вершин в слоях происходит в результате перемещения вершин на величину радиального износа круга за оборот, во-вторых, возможно появление новых вершин

в результате скалывания их в зоне 1. Для зоны 2 общее количество вершин в слое ΔV_i после K оборотов круга определяем по формуле:

$$n_i(K) = n_{i+1}(K-1) + \Delta n_{4i}(K), \quad (3)$$

где

$$N < i \leq N + M$$

В зоне 3 изменение количества вершин в слоях происходит только в результате перемещения их на величину ΔR_K после каждого оборота круга и определяется начальным законом распределения вершин:

$$n_i(K) = n_0 \int_{u_{H_{i+K}}}^{u_{B_{i+K}}} f_0(u) du, \quad (4)$$

$$N + M < i \leq N + M + K$$

где n_0 – количество зерен, выступающих над связкой на единице рабочей поверхности круга; $f_0(u)$ – плотность распределения вершин по глубине, отвечающая начальным условиям; $u_{B_{i+K}}$ – координаты верхней и нижней границ $(i+K)$ -го слоя начального распределения.

При $K = 1$, что соответствует первому обороту круга, первое слагаемое в формулах (2) и (3) определяется начальным законом распределения вершин и рассчитывается по формуле (4).

При абразивной разрезке не все вершины зерен отрезного круга, проходящие через зону резания, контактируют с металлом. Количество вершин, взаимодействующих с разрезаемым материалом, определяется вероятностью контакта P_K :

$$n_{pi} = n_i(K-1)P_{Ki}(K). \quad (5)$$

Распределение вершин зерен по слоям рабочей поверхности абразивного инструмента задается вектором распределения $n(K)$, который можно представить в виде матрицы-строки:

$$n(K) = [n_i(K)]. \quad (6)$$

Вероятность взаимодействия вершин зерен зоны 1 с обрабатываемым материалом описывается мономиальной матрицей вероятности контакта:

$$P_K(K) = [P_{Kij}(K)], \quad (7)$$

где $P_{Kij}(K) = 0$ при всех $i \neq j$.

Тогда количество вершин зерен, взаимодействующих с металлом при разрезке, находим по формуле:

$$n_p(K) = n(K-1)P_K(K). \quad (8)$$

Количество вершин зерен, подвергаемых различным видам износа, с учетом выражения (1) определяем по следующим зависимостям:

$$n(P_B) = n(K) \cdot P_K(K) \cdot P_B(K), \quad (9)$$

$$n(P_C) = n(K) \cdot P_K(K) \cdot P_C(K), \quad (10)$$

$$n(P_H) = n(K) \cdot P_K(K) \cdot P_H(K), \quad (11)$$

где P_B, P_C, P_H – квадратные матрицы вероятностей износа в результате соответственно вырывания зерен из связки, скалывания, истирания вершин.

Матрицы вероятностей износа имеют вид:

$$P_B(K) = [P_{Bij}(K)], \quad P_{Bij}(K) = 0 \quad \text{при } i \neq j. \quad (12)$$

$$P_C(K) = [P_{Cij}(K)], \quad P_{Cij}(K) = 0 \quad \text{при } i \neq j. \quad (13)$$

$$P_H(K) = [P_{Hij}(K)], \quad P_{Hij}(K) = 0 \quad \text{при } i \neq j. \quad (14)$$

Рассмотрим процесс взаимодействия с разрезаемым материалом вершин зерен, содержащихся до взаимодействия в некотором слое ΔV_i с позиции теории вероятностей. Для этого введем понятие состояния вершин зерен. Будем говорить, что вершины находятся в состоянии i , если они расположены в слое ΔV_i , где i – номер слоя, в котором вершины находятся до взаимодействия; i изменяется от 1 до N . Взаимодействие зерен с разрезаемым материалом будем рассматривать как испытание, в результате которого состояние вершин изменяется, они переходят в некоторое новое состояние j . Под j -ым состоянием понимаем номер нового слоя, в который вершины попадают в результате взаимодействия с разрезаемым материалом. В каждый момент времени вершина может находиться только в одном из этих состояний. В теории вероятностей последовательность испытаний, в каждом из

которых система принимает только одно из множества состояний полной группы, называется цепью Маркова.

Исходя из сделанного анализа и согласно определению, процесс разрушения единичных зерен на рабочей поверхности абразивного круга можно рассматривать как марковский процесс с дискретным временем и дискретным состоянием, а процесс разрезки – как суперпозицию таких марковских процессов.

В обозначении переходной вероятности $p_{ij}(K)$ первый индекс указывает номер предшествующего, а второй номер последующего состояния, т.е, соответственно номер слоя, в котором находилась вершина зерна до взаимодействия с обрабатываемым материалом и номер слоя, в котором она оказалась в результате взаимодействия.

Например, $p_{22}(K)$ означает вероятность перехода вершин зерен из второго состояния во второе, или вероятность того, что после K -го оборота круга вершина останется во втором слое; $p_{23}(K)$ – вероятность перехода из второго состояния в третье, или переход вершин зерен из слоя 2 в слой 3 также после K -го оборота круга. Число состояний является величиной конечной и в нашем случае равно $N+M$.

Матрицей перехода системы в общем случае называют квадратную матрицу, которая содержит все переходные вероятности этой системы:

$$X(K) = \begin{pmatrix} p_{11}(K) & p_{12}(K) & \dots & p_{1N+M}(K) \\ p_{21}(K) & p_{22}(K) & \dots & p_{2N+M}(K) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{N+M_1}(K) & p_{N+M_2}(K) & \dots & p_{N+M_{N+M}}(K) \end{pmatrix} \quad (15)$$

В каждой строке матрицы помещены вероятности перехода из одного состояния i в любое возможное состояние j . Поэтому вероятности каждой строки образуют полную группу:

$$\sum_{j=1}^{N+M} p_{ij} = 1 \quad (1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq N+M). \quad (16)$$

Для системы рабочей поверхности абразивного инструмента матрицу переходных вероятностей можно представить в виде

блочной матрицы, отражающую характер перемещения вершин:

$$X(K) = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

где P_1 – квадратная матрица размера $N \times N$ переходных вероятностей перемещения вершин в результате скалывания и истирания внутри зоны 1; P_2 – прямоугольная матрица размера $N \times M$ переходных вероятностей перемещения вершин из зоны 1 в зону 2; P_3 – прямоугольная матрица размера $M \times N$ переходных вероятностей перемещения вершин из зоны 2 в зону 1; P_4 – квадратная матрица размера $M \times M$ переходных вероятностей перемещения вершин внутри зоны 2.

Выделим некоторые особенности матрицы переходных вероятностей изменения состояния вершин зерен. Рассмотрим взаимодействие вершин с разрезаемым материалом в зоне 1. Начальным состоянием вершин зерен, взаимодействующих с разрезаемым материалом, является нахождение в одном из слоев зоны 1. Номер слоя начального состояния i изменяется от 0 до N . В результате износа вершина, в общем случае, может занять новое положение в любом из слоев от $i = j$ до $N + M$. Будем считать невозможным, перемещение вершины зерна в нижележащие слои.

Таким образом, перемещение вершин зерен в результате взаимодействия с разрезаемым материалом возможно внутри зоны 1 и из зоны 1 в зону 2. Невозможно перемещение вершин внутри зоны 2 и из зоны 2 в зону 1. Исходя из этого, блоки P_3 и P_4 представляют собой нулевые матрицы. Матрица переходных вероятностей (17), в данном случае, будет состоять только из блоков P_1 и P_2 :

$$X(K) = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Выводы

Для создания адекватной модели рассмотрена схема процесса абразивной разрезки трубных заготовок, в которой учтено, что абразивные зерна не имеют регулярной геометрии, расположены на рабочей поверхности инструмента на различных уровнях, при работе изнашиваются и разрушаются.

Список литературы

1. E. Levchenko Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin/ E. Levchenko, N. Pokintelitsa, MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901082>.
2. Левченко Е.А., Покинтелица Н.И., Харченко А.О. Теория и практика абразивной резки труб: монография – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 142 с. ISBN:9785955805993
3. Грабченко А.И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: учебн. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 364 с.
4. 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.
5. Козлов А.М. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом / А.М. Козлов, В.В. Ефремов // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2004. – №1. – С. 59–64.
6. 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.
7. Левченко Е.А. Методика расчета параметров боковых поверхностей отрезных кругов при абразивной резке / Е.А. Левченко // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2017. – Вип. № 6. – С. 39–45.
8. 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.
9. 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.
10. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
11. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования / И.П. Никифоров // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2003. – №6. – С. 64–72.
12. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.

References

1. E. Levchenko Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin/ E. Levchenko, N. Pokintelitsa, MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901082>.
2. Levchenko E.A., Pokintelica N.I., Harchenko A.O. Teoriya i praktika abrazivnoy razrezki trub: monografiya – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2018. – 142 s. ISBN:9785955805993
3. Grabchenko A.I. 3D modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shli-fovaniia: uchebn. posobie / A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, V.A. Fedorovich. – Khar'kov: NTU "KhPI", 2006. – 364 s.
4. Kalinin E. P. Teoriia i praktika upravleniia proizvoditel'nost'iu abrazivnoi obrabotki s uchetom zatupleniia instrumenta: dis. na so-skaniie nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Tekhnologiiia i oborudovanie mekha-nicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki» / E.P. Kalinin. – Rybinsk, 2006. – 414 s.
5. Kozlov A.M. Formirovanie mikrorel'efa pri obrabotke abrazivnym instrumentom / A.M. Kozlov, V.V. Efremov // Izvestiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2004. – №1. – S. 59–64.
6. Levchenko E.A. Analiz zakonornostei uda-leniiia metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – C. 57 – 61.
7. Levchenko E.A. Metodika rascheta parametrov bokovykh poverkhnostej otreznykh krugov pri ab-rativnoy razrezke / E.A. Levchenko // Vestnik so-vremennykh tekhnologij: sb. nauch. tr. Sevasto-pol'skij gosudarstvennyj universitet. – Seva-stopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2017. – Vyp. № 6. – C. 39 – 45.
8. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie oso-bennostei raboty bokovykh poverkhnostei otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. – Vip. 107. – C. 114 – 117.
9. Novoselov Iu.K. Analiticheskii raschet ele-mentov konstruktzii bokovykh poverkhnostei otreznykh krugov / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2011. – Vip. 28. – S.27–31.
10. Maslov E.N. Teoriia shlifovaniia materialov / E.N. Maslov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 320 s.
11. Nikiforov I.P. Stokhasticheskaiia model' protsessa shlifovaniia / I.P. Nikiforov // Izve-stiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2003. – №6. – S. 64–72.
12. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol: Izd-vo SenNTU, 2012. – 304 s.

УДК 621.01/03

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ КАК НАУКИ

А.Г. Суслов¹¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, Российская федерация

Аннотация

Изложено зарождение технологии машиностроения и ее формирование как науки. Приведены этапы развития технологии машиностроения и имена ученых, внесших значительный вклад в это развитие. Даны научные направления дальнейшего развития технологии машиностроения.

Ключевые слова: технология машиностроения; этапы развития технологии; направления развития технологии машиностроения.

FORMATION AND DEVELOPMENT OF MACHINE-BUILDING TECHNOLOGY AS SCIENCE

A.G.Suslov¹¹Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

Abstract

The origin of engineering technology and its formation as a science are described. The stages of the development of engineering technology and the names of scientists who have made a significant contribution to this development are given. The scientific directions of the further development of engineering technology are given.

Keywords: technology of mechanical engineering; stages of technology development; directions of development of technology of mechanical engineering.

Технология машиностроения как наука призвана разработать и совершенствовать теорию технологического обеспечения и повышения качества изделий машиностроения при наименьшей себестоимости или наивысшей производительности их изготовления [1, 2].

Совершенствование и разработка новых теоретических положений должно базироваться на последних достижениях науки и техники на данный период времени. В качестве примера можно привести совершенствование теории формирования параметра шероховатости при механической обработке. В начале XX в. было представлено, что формирование параметра шероховатости обусловлено радиусом при вершине резца и кинематикой его перемещения по обрабатываемой поверхности. В середине XX в. стали учитывать, что на формирование параметра шероховатости обрабатываемой поверхно-

сти при механической обработке в зависимости от соотношения радиуса при вершине резца и подаче, оказывают влияние главный и вспомогательный углы в плане резца. В конце XX в. при теоретическом описании параметра шероховатости обрабатываемой поверхности было учтено, что на ее формирование, наряду с геометрией и кинематикой перемещения резца, оказывают влияние пластическое оттеснение материала в зоне резания, упругие колебания технологической системы и шероховатость режущей кромки резца. В это же время эта теория формирования шероховатости обрабатываемой поверхности была распространена на все методы механической обработки: лезвийные, алмазно-абразивные и ОУО ППД.

При этом теоретические исследования по формированию шероховатости обрабатываемых поверхностей проводятся по двум направлениям:

- ✓ классическое направление, реализуемое Брянской и Севастопольской научными технологическими школами. Оно заключается в теоретическом представлении физической картины формирования параметров шероховатости поверхностей деталей при механической обработке и ее математическом описании;
- ✓ теоретическое описание формируемой шероховатости поверхностей детали при механической обработке с использованием метода подобия (реализуемое Рыбинской научной технологической школой).

Технология машиностроения является прикладной наукой, вызванной к жизни потребностями промышленности.

Она прошла в своем развитии через несколько этапов.

Предшествующий этап – накапливаемый человечеством практический опыт на протяжении тысячелетий.

Подготовительный этап, начиная с появления первых токарных и сверлильных станков с ручным приводом в XII в. и кончая XVII столетием.

Накопительный этап (XVII – XIX вв.) характеризуется накоплением отечественного и зарубежного производственного опыта изготовления машин. В конце XVII – начале XIX вв. в технических журналах и брошюрах публикуются описания процессов обработки различных деталей, применяемого оборудования и инструментов. Накопленный опыт впервые был описан в 1807 г. проф. Московского университета И.В. Двигубским в книге «Начальные основы технологии или краткое описание работ на заводах и фабриках».

Первый научный этап (для России это 1880 – 1940 гг.) характеризуется обобщением и систематизацией производственного опыта и началом разработки общих научных принципов построения технологических процессов. Это труды проф. И.И. Тиме, А.П. Гавриленко, А.П. Соколовского, А.И. Каширина, В.М. Кована, А.И. Яхина. Как итог этих работ в 1940 г. вышло постановление Совета народных комиссаров СССР «О соблюдении технологической дисциплины на

машиностроительных заводах», что сыграло большую роль в повышении качества военной техники.

Второй научный этап (1941 – 1970 гг.) отличается разработкой новых технологических идей. Формируются теория точности обработки (профессора А.П. Соколовский, Б.С. Балакшин, В.М. Кован, И.М. Колесов, В.С. Корсаков); качества поверхности и его влияния на эксплуатационные свойства деталей машин (профессора П.Е. Дьяченко, М.А. Елизаветин, А.И. Исаев, А.М. Сулима, З.В. Рыжов, А.М. Маталин, И.В. Крагельский, А.С. Проников, Э.А. Сатель); теория технологической наследственности (профессора А.М. Дальский, П.И. Ящерицин). Детально исследуются различные методы обработки: лезвийная (профессора Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев, И.А. Коганов, Б.А. Кравченко, Т.И. Лоладзе, А.Д. Макаров, В.И. Подураев, А.И. Исаев, Н.И. Резников, П.Р. Родин, С.С. Силин, Н.В. Талантов и др.); абразивная (профессора А.В. Якимов, Л.В. Худобин, Е.Н. Маслов, С.А. Попов, М.Ф. Семко и др.); отделочно-упрочняющая обработка ППД (профессора П.Г. Алексеев, Е.Г. Коновалов, И.В. Кудрявцев, Д.Д. Папшев, Ю.Г. Проскуряков, А.А. Хворостухин, Ю.Г. Шнейдер, Д.Н. Юдин). Разрабатываются групповая технология (профессор С.П. Митрофанов), адаптивное управление обработкой (профессора Б.С. Балакшин, Ю.М. Соломенцев, Б.М. Базров), научные основы сборки (профессора М.П. Новиков, В.С. Корсаков).

Первым результатом этих исследований и формирования технологии машиностроения как науки явилась книга А.П. Соколовского «Научные основы технологии машиностроения» (1955 г.) [1].

Третий научный этап (1970 – 2000 гг.) характеризуется широким использованием достижений фундаментальных наук и вычислительной техники в технологии машиностроения (профессора В.И. Аверченков, Н.М. Капустин, В.П. Митрофанов, А.В. Олейник, В.В. Павлов, Ю.М. Соломенцев, В.А. Тимирязев, В.Д. Цветков). Существенно повышается теоретический уровень технологии машиностроения (профессора А.П.

Бабичев, Б.М. Базров, А.М. Барзов, В.Ф. Безъязычный, П.И. Белянин, В.И. Бутенко, А.С. Васильев, Л.А. Гик, О.А. Горленко, А.А. Гусев, А.М. Дальский, Д.Г. Евсеев, В.Б. Ильицкий, Л.И. Карпов, А.В. Киричек, А.А. Колобов, С.А. Корчак, М.Г. Косов, З.И. Кремень, В.Н. Латышев, В.В. Микитянский, А.Н. Михайлов, Ю.К. Новоселов, Ю.Ф. Назаров, А.Н. Овсенко, В.М. Оробинский, В.А. Остафьев, М.Е. Попов, А.А. Рыжкин, Н.М. Султан-заде, В.М. Смелянский, В.К. Старков, Ю.С. Степанов, А.Г. Суслов, М.А. Тамаркин, А.Г. Схиртладзе, Н.Э. Тернюк, А.В. Тотай, А.П. Улашкин, В.П. Федоров, А.С. Ямников).

Вышедший в 1973 г. новый ГОСТ на параметры шероховатости (ГОСТ 2789-73) активизировал научные исследования по технологическому обеспечению и повышению качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений. Это работы профессоров Безъязычного В.Ф., Рыжова Э.В., Силина С.С., Сулимы А.М., Горленко О.А., Горленко А.О., Сулова А.Г., Федорова В.П., Тотая А.В., Старкова В.К., Новоселова Ю.К., Кожиной Т.Д., Хандожко А.В., Федонина О.Н.

Разрабатываются и тщательно исследуются электро-физико-химический, плазменный, ионный, лазерный, ультразвуковой и комбинированные методы обработки (профессора В.А. Барвинок, П.Ю. Бочкарев, А.Н. Болдырев, А.Г. Григорьянц, С.А. Клименко, В.М. Приходько, А.М. Марков, В.П. Смоленцев и др.). Совершенствуются и создаются новые методы механической обработки: иглофрезерование, вибронакатывание, центробежно-ударная обработка, виброобработка, обработка алмазным инструментом, импульсно-ударная обработка, дорнование (профессора А.П. Бабичев, С.А. Зайдес, Ю.Г., А.В. Киричек, А.А. Рыжкин, А.В. Тотай, Ю.В. Проскуряков, Ю.Г. Шнейдер, и др.).

Тщательно исследуются автоколебания технологического оборудования и его влияние на качество обрабатываемых деталей машин (профессор Б.М. Бржозовский и др.).

Результаты этих работ были обобщены и частично нашли отражение в Энциклопедии

«Машиностроение», выпущенной издательством «Машиностроение» в 2000 г., т. III-3 «Технология изготовления деталей машин». В 2002 г. вышла монография А.Г. Сулов, А.М. Дальский «Научные основы технологии машиностроения» [2].

В настоящее время реализуется четвертый научный этап развития технологии машиностроения.

Осуществляется систематизация научных школ и направлений в технологии машиностроения. В 2006 г. издается Энциклопедия Технологи России (машиностроение) [3] в которой приведены ученые, внесшие значительный вклад в развитие технологии машиностроения; дана информация о научных технологических школах, сформировавшихся к этому времени и направление их научных работ. В ней изложены основные направления дальнейшего развития технологии машиностроения.

Совершенствование и оптимизация существующих и разработка новых энерго- и материалосберегающих технологических процессов изготовления изделий машиностроения.

Совершенствование и оптимизация существующих и разработка новых наукоёмких комбинированных технологических методов обработки заготовок, в том числе из новых материалов.

Разработка экологически чистых методов и технологических процессов изготовления изделий.

Развитие методов получения технологических жидкостей, связанных с обработкой металлов.

Технологическая модификация поверхностных слоев и восстановления размеров деталей машин.

Технологическое создание закономерно изменяющегося оптимального качества поверхности детали, исходя из её функционального назначения.

Высокоточные, прецизионные и нанотехнологии, позволяющие обеспечивать точность обработки порядка 10 ангстрем и получать поверхность с шероховатостью $R_z = 0,001$ мкм.

Высокоскоростные технологические методы обработки.

Технологическая наследственность по свойствам материала, точности размеров и качеству поверхностного слоя деталей от производства материалов до эксплуатации.

Совершенствование конструкторско-технологического размерного анализа изделий машиностроения с учетом качества сопрягаемых поверхностей и его полная автоматизация.

Технологическое обеспечение и повышение непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, т.е. разработка функционально-ориентированных технологий.

Адаптивное управление качеством обрабатываемых деталей и собираемых изделий.

Создание самообучающихся технологических систем.

Совершенствование существующих и разработка новых технологических методов сборки.

Создание элементной базы средств технологического обеспечения изготовления деталей и сборки изделий.

Объединение технологий проектирования, изготовления, эксплуатации, ремонта и утилизации в единый процесс.

Новая технология создания деталей вырабатыванием (прототипирование).

Совершенствование САПР ТП и создание ИПИ-технологий.

Разработка методов построения технологических процессов, средств технологического оснащения, их типизации и унификации, методов организации технологических и производственных процессов изготовления деталей и сборки изделий на принципах модульной технологии.

Типизация и унификация средств технологического обеспечения с позиций системного подхода.

Разработка технологических проектов по оптимальному перевооружению машиностроительных производств с целью их интенсификации, гибкости и конкурентоспособности.

Оптимизация технологических процессов изготовления крупногабаритных деталей.

Технологические среды и самоорганизующиеся технологические системы.

Технологии обработки заготовок для компьютерно-интегрированных гибких машиностроительных производств.

Технологические процессы изготовления деталей машин из неметаллических материалов.

Учитывая, что в СССР и России разработано и создано много различных методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием, в 2015 г. издается Энциклопедия поверхностного пластического деформирования [4]. Использование этих энциклопедий позволяет машиностроительным предприятиям напрямую обращаться к ведущим ученым и научным школам для научного решения возникающих проблем.

Широкое применение композиционных материалов привело к исследованию процессов резания этих материалов. Эти работы проводятся в МГТУ им. Н.Э. Баумана (В.М. Ярославцев), в С-Петербургском политехническом институте (Ю.М. Зубарев), Пермском национально-исследовательском университете (В.Ф. Макаров) и др. .

В связи с широким применением титановых сплавов разрабатывается метод глубинного шлифования (профессора С.М. Братан, В.Ф. Макаров, Ю.К. Новоселов и др.); шлифование высокопористыми кругами (профессор В.А. Носенко, В.К. Старков и др.).

Сформировалось направление, заключающееся в объединении технологий проектирования, изготовления и эксплуатации машин и в разработке научных основ по системному созданию новых технологических методов обработки, в том числе и механофизико-химических, позволяющих обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей машин; а также в модификации поверхностных слоев деталей и разработке функционально-ориентированных технологий и модульного принципа построения технологических процессов (профессора В.Ф.

Безъязычный, В.П. Смоленцев, А.Г. Суслов, А.О. Горленко, О.Н. Федонин, Б.М. Базров, А.Н. Михайлов, А.М. Марков, А.А. Ситников, П.Ю. Бочкарев и др.).

Начинают активно развиваться аддитивные технологии, CALS-технологии и автоматизация всех производственных процессов. Их объединение позволяет подойти к разработке и созданию цифровых производств.

Активно обсуждаются различные программы технологического развития России. Осознавая большую роль технологии машиностроения в этом развитии, в 2008 г. создается Ассоциация технологов-машиностроителей, которая призвана консолидировать научные технологические школы России для дальнейшего научного развития технологии машиностроения. Учитывая, что в эти годы технологами начали называться различные менеджеры, то в обществе появились выражения («высокие технологии», «критические технологии» и т.д.). Понимая извращенность этих определений по инициативе Ассоциации технологов-машиностроителей в издательстве «Машиностроение» в 2011 г. был создан новый журнал «Научные технологии в машиностроении». Под научными технологиями в машиностроении понимаются технологии, базирующиеся на последних достижениях науки и техники. На базе обобщения научных технологий по различным технологическим переделам издается монография «Научные технологии в машиностроении» [5].

Ежегодно в различных городах по этому направлению проводятся международные научно-технические конференции.

Список литературы

1. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машгиз, 1955 г. – 250 с.
2. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
3. Суслов А.Г., Бушуев В.В., Гречишников В.А., Смоленцев В.П. Энциклопедия. Технологии России (машиностроение). Т.1. Технология машиностроения, станки и инструменты/ под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 412 с.
4. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – 396 с.
5. Научные технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный, и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

References

1. Sokolovskij A.P. Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya. – M.: Mashgiz, 1955 g. – 250 s.
2. Suslov A.G., Dal'skij A.M. Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 684 s.
3. Suslov A.G., Bushuev V.V., Grechishnikov V.A., Smolencev V.P. Enciklopediya. Tekhnologi Ros-sii (mashinostroenie). T.1. Tekhnologiya mashinostroeniya, stanki i instrumenty/ pod obshch. red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 412 s.
4. Enciklopediya poverhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya / pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. S.A. Zajdesa. – Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2015. – 396 s.
5. Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bez'yazychnyj, i dr.; pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroe-nie, 2012. – 528 s.

УДК 621.99

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИИ РЕЗЦА НА УТОЛЩЕНИЕ СТРУЖКИ ПРИ ТОЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

А.С. Ямников¹, А.О. Чуприков¹, А.И. Харьков¹¹ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены вопросы, определения деформаций срезаемых слоев металла при токарной обработке высокопрочных заготовок. Отмечается, что величины деформации срезаемых слоев металла имеют большое влияние на расчет составляющих силы резания. Приведены формулы известных авторов для расчетов составляющих силы резания, а так же показано, что все формулы имеют величину, характеризующую деформацию срезаемых слоев металла, которая определяется экспериментальным путем. Приведены результаты нахождения величины утолщения стружки точением закаленных высокопрочных заготовок с положительным, нулевым и отрицательным передним углом резцов.

Ключевые слова: составляющие силы резания, величина усадки стружки, высокопрочная сталь, передний угол резца.

INFLUENCE OF CASE GEOMETRY PARAMETERS FOR CUTTING THE STRUCTURE WHILE INGENINGHIGH STRENGTH STEEL

A.S. Yamnikov¹, A.O. Chuprikov¹, A.I. Kharkov¹¹The FEDERAL IN Tula state University, Tula, Russian Federation

Abstract

Questions, definitions of deformations of cut layers of metal during turning processing of high-strength blanks are considered. It is noted that the values of the deformation of the sheared layers of metal have a great influence on the calculation of the cutting force components. The formulas of the well-known authors for calculating the components of the cutting force are given, and it is also shown that all formulas have a value characterizing the deformation of the cut-off metal layers, which is determined experimentally. The results of finding the amount of chip thickening by turning quenched high-strength blanks with a positive, zero and negative front angle of the incisors are given.

Keywords: cutting force components, shrinkage shrinkage value, high-strength steel, cutting angle.

Современные технологии в обработке материалов резанием и применение всё более нового и прочного режущего инструмента из высокостойких сплавов достигли высоких результатов, но ещё остались сложности, связанные с обработкой закалённых заготовок, связанные с невысокой стойкостью резцов. Обычно проблема, связанная с низкой стойкостью режущих кромок резца, ведет к нестабильности получения размеров и невыполнению требований по качеству обрабатываемых деталей, что в итоге приводит к неисправимому браку, что впоследствии негативно скажется на экономических показателях предприятий.

При нарезании упорных резб в закаленных корпусах ракет, режущий инструмент, а именно резец, имеет довольно низкую стойкость режущих кромок, которых хватает на обработку 2-3 деталей. Стойкость режущего инструмента зависит от множества параметров, таких как скорость резания, материал обрабатываемой детали, материал режущих кромок, глубины резания, подачи, геометрии резца (пластины), количества и качества применяемого охлаждения в зоне резания, жесткость агрегатов станка, приспособлений, вспомогательной оснастки и самой заготовки [1].

Обработка детали, несомненно, производится с соблюдением конструкторских и

технологических требований, предъявляемых к деталям, а изготовление серийных партий деталей требует обеспечение стабильного выполнения размерной части, что возможно выполнить, применяя резцы с высокой стойкостью режущих кромок. Важной характеристикой процесса резания является величина и направление силы резания. От значения величины и направления силы резания неоспоримо будут зависеть условия работы самого станка и приспособления, инструмента и точности обрабатываемой детали и т. д.

Определение величины силы резания расчетом является одной из самых первых задач конца XIX и продолжается до настоящего времени. Данную задачу пытается решить наука о резании металлов [2-11]. Общие итоги исследователей СССР были приведены в книге [12], посвященной 50-летию советской власти.

Выдающимися отечественными учеными излагающими разработанные ими формулы к книге для определения аналитическим путем составляющих силы резания, например, А.М. Розенбергом для расчета силы резания R_z в главной проекции по твердости стружки предложена формула [12]

$$R_z = \frac{\sigma_0}{m} st \frac{e^{\frac{n}{1.5} \frac{\xi^2 - 2\xi \sin \gamma + 1}{\xi \cos \gamma}}}{1 - \frac{\sin \theta}{\xi \cos(\theta - \gamma)}},$$

где σ_0 и n – параметры политропы сжатия, определяемые механическими испытаниями обрабатываемых материалов. Величина $1 - \frac{\sin \theta}{\xi \cos(\theta - \gamma)}$ должна находиться по номограмме.

Определение проекций силы резания R_z и R_{xy} по результатам, полученным при испытании обрабатываемого материала на растяжение, Н.Н. Зоревым [12] были предложены следующие формулы:

$$R_z = 0,185 H V k s t, \quad R_{xy} = A_R s t t g \omega,$$

причем

$$A_R = A \left[\frac{\xi - \sin \gamma}{\cos \gamma} + t g c \right],$$

где A_R — удельная работа процесса стружкообразования; A — противодействие обрабатываемого материала сдвигу при величине относительного сдвига, равной 2,5.

Чтобы упростить предложенные формулы можно воспользоваться приближенным выражением заключающемся в следующем:

$$A = \frac{0,6 \sigma_s}{1 - 1,7 \psi},$$

где σ_s – предел прочности на растяжение; ψ – относительное сужение на разрыв %.

В приведенные две формулы входит величина ξ , являющаяся зависимой производной от угла наклона условной плоскости на сдвиг, или от величины коэффициента усадки стружки, определяемые эмпирическим путем.

Авторами данной статьи также была сделана попытка определения аналитическим путем с учетом достижений науки нашего времени [13-15], особенно, приведенная термомеханическая теория процессов непрерывного резания пластичных материалов Кушнером В.С. [16]. Приводя зависимости, которые составляют силу резания, действующие на прямолинейном участке режущей кромки в процессе обработки [17]:

$$P_x = (F \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1) \sin \psi,$$

$$P_y = (F \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1) \cos \psi + N_2,$$

$$P_z = F \sin \gamma + N \cos \gamma + F_1,$$

где ψ – угол диагонали сечения срезаемого слоя и направления подачи, F_1 и N_1 – величина силы трения и силы нормального давления на задней поверхности инструмента, N_2 – сила, действующая на участке зачищающей кромки режущего инструмента.

Величину силы трения F на передней поверхности можно найти из следующей зависимости: $F = q_F \cdot b \cdot c$; где c – длина контакта стружки с резцом, $c \cong a = s \sin \varphi$; q_F – касательное напряжение на передней поверхности режущего инструмента.

Для определения величины силы N , необходимо спроецировать силы, действующие на передней поверхности на плоскость сдвига:

$$P_{\tau} = N \cdot \cos(\beta - \gamma) + F \cdot \sin(\beta - \gamma) - N_1 \cdot \sin \beta + F_1 \cdot \cos \beta,$$

откуда

$$N = \frac{P_{\tau} - F \sin(\beta - \gamma) + N_1 \sin \beta - F_1 \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)}.$$

Величину касательной силы в плоскости сдвига P_{τ} можно определить как $P_{\tau} = \tau ab / \sin \beta$, где τ – касательное напряжение, действующее в плоскости сдвига,

$\tau = 0,8S_b$; $\frac{ab}{\sin \beta}$ – площадь плоскости сдвига;

$\beta = \arctg \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}$; K_L – коэффициент усадки стружки. Тогда

$$P_{\tau} = 0,8 \cdot \sigma_{\partial} \cdot \frac{st}{\sin \beta};$$

$$N = \frac{0,8\sigma_{\partial} \frac{st}{\sin \beta} - 0,6\sigma_{\partial} st \sin(\beta - \gamma) + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \sin \beta - \mu \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} +$$

$$\frac{\sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \sin \beta - \mu \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)},$$

где N_2 – сила, действующая на участке зачищающей кромки режущего инструмента, $N_2 = K_s \sigma_b h_3 s$; K_s – коэффициент, $K_s \approx 2$ [18] (рис. 3).

Соответственно:

$$P_x = \left(- \frac{0,8S_b \frac{st}{\sin \beta} - 0,6S_b st \sin(\beta - \gamma) + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} - \frac{\mu \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \sin \gamma + \right.$$

$$\left. + 0,6S_b ts \cos \gamma + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \right) \sin \psi;$$

$$P_y = \left(- \frac{0,8S_b \frac{st}{\sin \beta} - 0,6S_b st \sin(\beta - \gamma) + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} - \frac{\mu \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \sin \gamma + \right.$$

$$\left. + 0,6S_b ts \cos \gamma + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \right) \cos \psi + 2\sigma_b h_3 s;$$

$$P_z = 0,6S_b ts \sin \gamma + \mu \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} +$$

$$+ \frac{0,8S_b \frac{st}{\sin \beta} - 0,6S_b st \sin(\beta - \gamma)}{\cos(\beta - \gamma)} +$$

$$+ \frac{\sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \sin \beta - \mu \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \phi} \cos \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \cos \gamma.$$

Уравнения представлены в виде математических зависимостей составляющие силы резания, в которых учитывается действительный предел прочности материала в момент резания металла. Данные уравнения позволяют повышать объективность и точность при расчетах составляющих силы резания, в том числе и при автоматизированном расчете [13]. Уравнения, представленные выше, представляются собой вполне аналитическими, но чтобы определить величину $\beta = \arctg \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}$ снова потребова-

лось знание K_L – коэффициент усадки стружки. Обычно производя практические расчеты при обработке резанием большинство значений конструкционных сталей K_L известны.

Необходимыми для проведения основных расчетов параметрами режущего инструмента являются материал резца и его геометрия. Другие параметры, не сильно влияющие на процессы резания можно рассматривать в процессе обработки без подробного исследования [18]. Вопросы определения величины усадки стружки в процессе точения высокопрочных сталей рассматриваются в литературе, где проводится исследование результатов обработки закалённых сталей. Исходными данными для проведения эксперимента по определению величины усадки стружки послужит заготовка из стали твердостью НВ по Бринеллю, равной 217 МПа, величина предела кратковременной прочности $\sigma_{\partial} = 1080$ МПа.

Для исследования коэффициента усадки стружки рассмотрим влияние переднего угла режущего инструмента при обработке заготовки в виде прутка из стали 30ХГСА со

следующими исходными данными для проведения эксперимента: диаметр 35мм, резец с напайной пластинкой (ВК8).

Исследование проводилось для определения влияния на усадку стружки различных значений величины переднего угла γ . Были определены постоянные исходные данные: скорости резания, подача на оборот и глубина резания. Были отобраны три резца с разным передним углом. У первого был отрицательный передний угол равным -5° , у второго был нулевой передний угол, и у третьего был положительный передний угол равный $+5^\circ$. Так же были приняты параметры режимов обработки: скорость резания V равнялась 250 м/мин; подача S равна 0,32 мм/об; глубина резания t была 0,5 мм; обработка велась без использования СОТС.

Как известно коэффициентом усадки стружки служит отношение длин стружки, а именно это отношение пути, пройденного резцом к длине срезаемого слоя стружки. Измерение длины стружки достаточно трудоёмко, так как стружка бывает ломается, и дальнейшее измерение становится невозможным. Итогом резания послужили 3 группы стружки (рис. 1). Причем отчетливо видно, что группы различаются между собой целостностью элемента стружки.



Рис. 1. Результаты влияния переднего угла резца на вид стружки: а) 1 группа ($+5^\circ$); б) 2 группа (0°); г) 3 группа (-5°)

Для того, чтобы найти полную величину отрезка стружки, а также и тех элементов, которые довольно трудоемко измерять, были вычислены соотношение весов и длин приведенных групп и определена теоретическая длина стружки. Средством измерения длины послужил электронный штангенциркуль точностью 0,01 мм, а для вычисления веса использовались электронные весы точностью до 0,01 г предварительно проверенные и откалиброванные эталонным грузом. Известно, что у коэффициента утолщения стружки есть аналог - коэффициент усадки стружки, поэтому при анализе стружки был определен коэффициент утолщения для каждого из трех резцов, следующей зависимостью [19]:

$$k_{\text{утолщ}} \cong k_{\text{ус}} = \frac{a_{\text{изм}}}{a_{\text{рез}}} = \frac{a_{\text{изм}}}{Stg\varphi}.$$

Измерения толщины стружки производились несколько раз, и определялась среднеарифметическая величина значения коэффициента утолщения $k_{\text{утолщ}}$. Приведенный коэффициент усадки стружки отражает её порядок. Отметим, что стружка охватывалась не полностью, а всего до середины поперечного сечения. Полный охват стружки губками штангенциркуля невозможен, вследствие формы стружки, которая в сечении принимает выгнутую форму. Количество измерений для каждого элемента проводилось 3 раза, для того чтобы снизить погрешности ручного измерения.

Далее приведены изображения шлифов самых ярких представителей трех групп, где уже отчетливо видно замечание, что измерение полностью было бы корректно для плоского вида стружки без вогнутостей. Справедливо можно отметить, что более точный замер возможен лишь до середины сечения поперечного сечения (рис. 2).

Для того, чтобы получить представленные элементы шлифов, стружка была залита двухкомпонентным эпоксидным клеем, далее после его затвердевания стружка вместе с клеем была отшлифована и протравлена, для отчетливого вида структуры. После измерений результаты были сведены в таблицу ниже для наглядности.

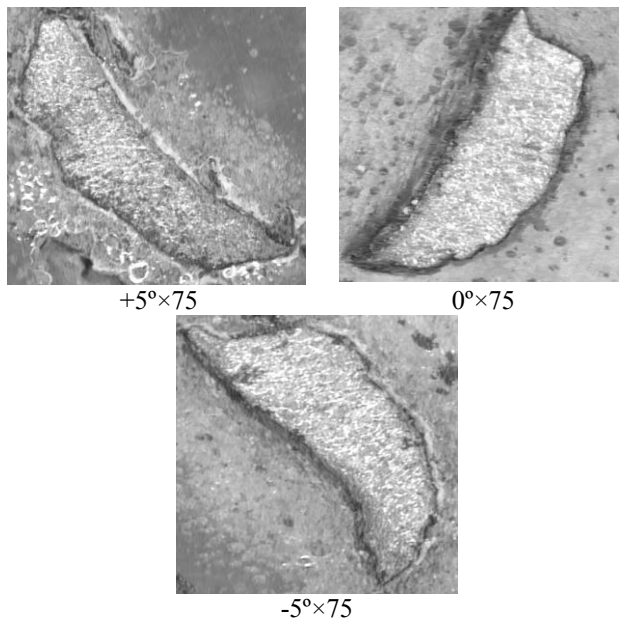


Рис. 2. Формы поперечных сечений стружки (увеличение $\times 75$)

Таблица 1. Результаты расчетов коэффициента утолщения $K_{утолщ}$

	Результаты расчетов с передним углом 0°			Результаты расчетов с передним углом -5°			Результаты расчетов с передним углом $+5^\circ$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Среднее значение каждой выборки	1,12	1,146	1,146	1,166	1,16	1,16	1,073	1,046	1,073
Среднее значение группы	1,137			1,162			1,064		

Полученные результаты говорят о том, что коэффициенты утолщения стружки $K_{утолщ}$, а также их аналоги – коэффициенты усадки стружки $K_{ус}$ для трех резцов показывают, что для резца с отрицательным передним углом $K_{утолщ}$ будет выше, чем для резца с нулевым передним углом, когда для резца с положительным передним углом выходит ниже, чем для резца с нулевым углом. Эти данные позволяют произвести дальнейшие исследования по определению сил резания.

Список литературы

1. Грановский Г., Грановский В. Резание металлов. М.: Высш. шк. 1985. 304с.
2. Тиме И.А. Сопротивление металлов и дерева резанию. СПб, 1870. 160 с.
3. Брикс А.А. Резание металлов. СПб, 1896. 163 с.
4. Тэйлор Ф. Искусство резать металлы / Пер. с англ. под ред. Панкина А.В., Левенстерна Л.А. 2-е изд. Берлин: Бюро иностранной науки и техники. 1922. 356 с.
5. Розенберг А.М., Хворостухин Л.А. Твердость и напряжение пластичности в деформированном теле. «Журнал технической физики», т. XXV, вып. 2, 1955. С. 313-332.
6. Зорев Н.Н. Вопросы механики процессов резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
7. Зорев Н.Н. Расчет проекций силы резания. М.: Машгиз, 1958. 55 с.
8. Зорев Н.Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента // Вестник машиностроения. 1963. № 12. С. 42-50.
9. Васильев Д.Т. Силы на режущих поверхностях инструмента // Станки и инструмент. 1954. № 4. С. 1-5.
10. Грановский Г.И. Износостойкость твердых сплавов и закаленных инструментальных сталей // Трение и износ при резании металлов. М.: Машгиз. 1955.
11. Бобров В.Ф. Определение напряжений в режущей части металлорежущих инструментов // Высокоскоростное резание в машиностроении. М.: Наука. 1966. С. 223-228.
12. Развитие науки о резании металлов/В.Ф. Бобров [и др.]; под ред. Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967. 415 с.
13. Нгуен Ван Кыонг, Ямников А.С. Методология оптимизации режимов резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 1 (291) 2012. С. 56-63.
14. Ямников А.С., Ямникова О.А. Экспериментальное определение силы резания при фрезоточении резьбы // Известия ТулГУ, Технические науки, 2015. Вып. 1. С. 82-93.
15. Харьков А.И., Чуприков А.О., Ямников А.С. Аналитическое определение составляющих силы резания при точении // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов МНТК «АПИР-19», 13-14 сентября 2014 года Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 107-112.
16. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов: монография / Иркутск. Изд-во Иркут. ун-та. 1982. 180 с.
17. Бобров В.В. Основы теории резания. М.: Машиностроение, 1976. 344 с.
18. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов М. Свердловск, 1956. 318 с.

19. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М. Машгиз, 1956. 367 с.

References

1. Granovskij G., Granovskij V. Rezanie metallov. M.: Vyssh. shk. 1985. 304s.
2. Time I.A. Soprotivlenie metallov i dereva re-zaniyu. SPB, 1870. 160 s.
3. Briks A.A. Rezanie metallov. SPB, 1896. 163 s.
4. Tejlor F. Iskustvo rezat' metally / Per. s angl. pod red. Pankina A.V., Levensterna L.A. 2-e izd. Berlin: Byuro inostrannoj nauki i tekhniki. 1922. 356 s.
5. Rozenberg A.M., Hvorostuhin L.A. Tverdost' i napryazhenie plastichnosti v deformirovannom tele. «Zhurnal tekhnicheskoy fiziki», t. XXV, vyp. 2, 1955. S. 313-332.
6. Zorev N.N. Voprosy mekhaniki processov reza-niya metallov. M.: Mashgiz, 1956. 368 s.
7. Zorev N.N. Raschet proekcij sily rezaniya. M.: Mashgiz, 1958. 55 s.
8. Zorev N.N. O vzaimozavisimosti processov v zone struzhkoobrazovaniya i v zone kontakta pe-rednej poverhnosti instrumenta // Vestnik mashinostroeniya. 1963. № 12. S. 42-50.
9. Vasil'ev D.T. Sily na rezhushchih poverhnostyah instrumenta // Stanki i instrument. 1954. № 4. S.1-5.
10. Granovskij G.I. Iznosostojkost' tverdyh splavov i zakalennykh instrumental'nykh stalej // Trenie i iznos pri rezanii metallov. M.: Mashgiz. 1955.
11. Bobrov V.F. Opredelenie napryazhenij v rezhushchej chasti metallovezhushchih instrumentov // Vysokoproizvoditel'noe rezanie v mashino-stroenii. M.: Nauka. 1966. S. 223-228.
12. Razvitie nauki o rezanii metallov / V.F. Bobrov [i dr.]; pod red. N.N. Zoreva. M.: Mashinostroyeniye, 1967. 415 s.
13. Nguen Van Kyong, Yamnikov A.S. Metodologiya optimizacii rezhimov rezaniya // Fundamental'-nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. № 1 (291) 2012. S. 56-63.
14. Yamnikov A.S., Yamnikova O.A. Eksperimental'-noe opredelenie sily rezaniya pri frezotochenii rez'by // Izvestiya TulGU, Tekhnicheskie nauki, 2015. Vyp. 1. S. 82-93.
15. Har'kov A.I., Chuprikov A.O., Yamnikov A.S. Analiticheskoe opredelenie sostavlyayushchih sily rezaniya pri tochenii // Vestnik TulGU. Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya: sb. nauchnykh trudov MNTK «APIR-19», 13-14 sentyabrya 2014 goda Tula: Izd-vo TulGU, 2014. S. 107-112.
16. Kushner V.S. Termomekhanicheskaya teoriya processa nepreryvnogo rezaniya plastichnykh materialov: monografiya / Irkutsk. Izd-vo Irkut. un-ta. 1982. 180 s.
17. Bobrov V.V. Osnovy teorii rezaniya. M.: Mashinostroyeniye, 1976. 344 s.
18. Rozenberg A.M., Eremin A.N. Elementy teorii processa rezaniya metallov M. Sverdlovsk, 1956. 318 s.
19. Zorev N.N. Voprosy mekhaniki processa rezaniya metallov. M. Mashgiz, 1956. 367 s.

УДК 621.923:621.90.17

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ, ОЦЕНКИ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЯ И ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается методика построения динамических соотношений при синтезе систем автоматического управления для финишных процессов обработки, к которым относится чистовое и тонкое шлифование. Разработан метод, оценки отклонений формы заготовки и шлифовального круга при воздействии на объект внешних возмущений. Применение предложенного подхода целесообразно при оценках непосредственно неизмеряемых параметров, что позволяет снизить влияние шумов измерения, и шумов, связанных с вычислительными процедурами соответствующих оценок.

Ключевые слова: чистовое и тонкое шлифование, уравнения наблюдений, уравнения восстановления состояний, подсистема наблюдений, стохастическое наблюдение, оценка отклонений формы.

THE METHOD OF CONSTRUCTING DYNAMIC RELATIONS, EVALUATION OF DEVIATIONS OF THE FORM OF THE PRODUCT AND GRINDING WHEEL

S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹¹FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article deals with the technique of constructing dynamic relationships in the synthesis of automatic control systems for finishing machining processes, which include fine and final grinding. A method for measurement of deviations of the product shape and the grinding wheel was fulfilled. The application of the proposed approach is useful in estimating directly of unmeasured parameters and allows reducing the influence of measurement noise and noise associated with the computational procedures of the corresponding estimates.

Keywords: fine and final grinding, equation observation, equation the recovery state, the subsystem observations, stochastic monitoring, evaluation of deviations of the form.

Повышение качества обработки изделий требует применения систем автоматического управления технологическими операциями. Особенно актуальной становится указанная задача для финишных процессов обработки, к которым относится чистовое и тонкое шлифование [1-4]. При построении таких систем требуется получение в реальном масштабе времени достоверной информации о значениях и тенденциях изменения выходных параметров технологического процесса [5-7]. Однако не все необходимые параметры доступны непосредственному измерению или их измерение может оказаться сопряже-

но с большими техническими трудностями. К таким параметрам относится, например, фактическая глубина резания, для определения значений которой целесообразно использовать оценки, получаемые методами теории динамических оценок и фильтрации с использованием доступных непосредственному измерению данных о ходе технологического процесса [8]. При этом необходимо построение описания технологического процесса в пространстве состояний и уравнений восстановления искомых технологических параметров по результатам моделирования технологического процесса [9].

При построении автоматических систем приходится решать проблему, связанную с тем, что результаты измерений параметров технологического процесса несвободны от погрешностей, имеющих как закономерный, так и случайный характер, отражающий не учитываемые при построении системы процессы различной физической природы и приводящие к динамическим отклонениям в расчетных моделях (в том числе и параметрах инструмента). Погрешности в таких информационных сигналах непосредственно сказываются на определяемых сигналах обратной связи автоматических систем управления и приводят к соответствующим погрешностям обработки и разбросам показателей качества изделий.

Для повышения чувствительности систем управления к отклонениям параметров и, особенно к тенденциям их изменения используются системы управления с обратной связью, включающей производную. Однако погрешности измерительного сигнала существенно возрастают в силу зависимости не только от амплитуд погрешностей исходных представлений, но и скоростей их изменения.

Такая проблема актуальна при синтезе систем управления процессами чистового и тонкого шлифования. Ее решение требует модификации динамических соотношений, не требующих дифференцирования измерений [10].

Модификации пространства состояний («модели системы») и соответствующих изменений «уравнений наблюдений» целесообразно представить в виде отдельной подсистемы «уравнений восстановления состояний» и «подсистемы наблюдений». В работе [11] для решения поставленной задачи использована методика [8], основанная на методе неопределенных коэффициентов, однако построение «уравнения восстановления состояний» сопряжено со значительными сложностями.

Целью данной работы является разработка метода построения динамических соотношений, не требующих дифференцирования сигналов измерений при оценках от-

клонений формы изделия и шлифовального круга при чистовом и тонком шлифовании.

В соответствии методикой [8] динамическое описание процессов чистового и тонкого шлифования в форме пространства состояний имеет вид:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U, \quad (1)$$

$$\text{где } \dot{Y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}, Y_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} B_{01} & B_{02} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \Delta L \\ \dot{L} \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix}, \Psi_1 = [\Delta R + \Delta r],$$

$$\Psi_2 = [\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r}],$$

$$B_{01} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{c_3}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{c_3}{m_2} \end{bmatrix}, B_{02} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{h_3}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{h_3}{m_2} \end{bmatrix},$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{h_2}{m_2} \end{bmatrix},$$

Y_0 – вектор (матрица-столбец), представляющая вектор состояния системы; $\dot{Y}_0$ – вектор производных состояний системы; A_0 – матрица, характеризующая динамические свойства системы; B_0 – матрица параметров влияния отклонения формы детали и круга; Ψ – вектор состояний отклонений формы детали и круга от номинальных параметров; C_0 – матрица управления процессом (за счет поперечной подачи); U – вектор управляющих воздействий, связанный с поперечной подачей.

Для описания процесса введены следующие обозначения:

L, x_1, x_2 – соответственно межцентровое расстояние, отклонения координат центра шлифовального круга и детали относительно

соответствующих положений динамическое равновесия;

R_k, c_1, h_1, m_1 – соответственно радиус круга, его приведенная жесткость, коэффициент демпфирования и масса;

r_d, c_2, h_2, m_2 – соответственно радиус детали, ее приведенная жесткость, коэффициент демпфирования и масса;

c_3, h_3 – соответственно эквивалентные параметры зоны контакта круга и детали.

$$L(\tau) = R(\phi(\tau)) + r(\phi(\tau)) - t_f(\tau) - \int_{\tau_0}^{\tau} \dot{S} d\tau + y_T - y_{УП} \quad (2)$$

где t_f – глубина внедрения режущих зерен круга в материал заготовки, отсчитываемая от ее исходной поверхности; $\dot{S}$ – поперечная подача; $y_T, y_{УП}$ – температурные и упругие деформации технологической системы

В выражении (1) матрица B_0 представлена в блочном виде в расщепленной по столбцам форме. Целесообразность такого описания будет показана ниже.

Для восстановления представления переменных в виде, соответствующем (1), необходимо построить «уравнение восстановления состояний», которое в данном случае будет иметь выражение:

$$\dot{X}_0 = D_0 \cdot Y_0, \quad (3)$$

где D_0 – матрица, характеризующая состав оценок параметров пространства состояний, структуру их линейных комбинаций.

Если необходимы оценки всего пространства состояний, то D_0 представляет собой единичную матрицу.

Как было указано выше, непосредственное применение матричных представлений (1) при моделировании нецелесообразно вследствие необходимости дифференцирования отклонений форм. Для преодоления этих трудностей введем модифицированный вектор состояния системы вида:

$$F = Y_0 - B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (4)$$

где Y_0, B_{02}, Ψ_1 – соответствуют выражениям, представленным в зависимости (1).

Из записи соотношения (1) непосредственно следует, что $\dot{\Psi}_1 = \Psi_2$. А из уравнения (4) следует:

$$Y_0 = F + B_{02} \cdot \Psi_1. \quad (5)$$

Известно, например [12], что для любых совместных по форме матриц $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ справедливо соотношение

$$\frac{d[\alpha(t) \cdot \beta(t)]}{dt} = \alpha(t) \frac{d\beta(t)}{dt} + \beta(t) \frac{d\alpha(t)}{dt}.$$

Производная $\dot{Y}_0$ вектора состояния (4), полученная с учетом равенства (5) и приведенного выше матричного тождества, имеет вид:

$$\dot{Y}_0 = \dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \psi_1 + B_{02} \cdot \psi_2. \quad (6)$$

С раскрытием расщепленных форм, матричное уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U \quad (7)$$

Подстановка в правую часть уравнения (7) Y_0 из (4) приводит к результату:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (8)$$

Из сравнения левых частей (6) и (8) следует:

$$\begin{aligned} \dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \psi_1 + B_{02} \cdot \psi_2 = \\ A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + \\ + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U \end{aligned}$$

что после соответствующих преобразований и группировки позволяет записать модифицированное уравнение состояния, не содержащее Ψ_2 и, следовательно, не требующее дифференцирования параметров форм Ψ_1 :

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (9)$$

Сравнение уравнения (9) для модифицированного пространства состояний F и исходного соотношения (1) для пространства состояний Y_0 позволяет рассматривать коэффициент, стоящий перед матрицей Ψ_1 :

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}], \quad (10)$$

как матрицу влияния отклонения формы детали и круга для модифицированного состояния. Если дополнительно параметры демпфирования зоны контакта, массы заготовки и шлифовального круга в процессе обработки могут быть приняты не зависящими от времени, то элементы матрицы $\dot{B}_{02}$ равны нулю и выражение (10) приобретает форму:

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01}].$$

Модифицированное матричное дифференциальное уравнение пространства состояния имеет вид:

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (11)$$

Как системе дифференциальных уравнений (1), так и системе (11) соответствуют совпадающие с точностью до обозначений $Y_0, \dot{Y}_0$ и $F, \dot{F}$ системы однородных линейных дифференциальных уравнений $\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0$ и $\dot{F} = A_0 \cdot F$. Следовательно, системы (1) и (11) являются эквивалентными в смысле Ляпунова [13,14].

Оценка состояния X_0 на основе результатов моделирования модифицированной системы (11) может быть восстановлена в состояниях (3) применением к результатам (11) преобразования (7):

$$X_0 = D_0 \cdot F + D_0 \cdot B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (12)$$

где матрицы X_0, D_0, B_{02}, Ψ_1 соответствуют матрицам, использованным в (1), а модифицированный вектор состояния F определяется (11).

Применение предложенного подхода целесообразно при оценках непосредственно неизмеряемых параметров (например, фактической глубины резания) и позволяет снизить влияние как шумов измерения, так и шумов, связанных с вычислительными процедурами соответствующих оценок. Его необходимо непосредственно использовать при реализациях процедур стохастического наблюдения и фильтрации при построении систем управления технологическими процессами чистового и тонкого шлифования.

Список литературы

1. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
2. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. №1-2. С. 78-84.
3. Братан С.М. Оценка параметров зоны контакта заготовки с инструментом при круглом наружном шлифовании / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, Д.А. Каинов. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків, 2001. – Вип.1(4). – С.78-83.
4. Братан С.М. Моделирование взаимодействия шлифовального круга с заготовкой / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, Д.А. Каинов // Вестник СевГТУ: Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2001 г. – Вып.30. – С.12-16.
5. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение / Д. Сю, А.М. Мейер. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
6. Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
7. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 228 с.
8. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О.

- Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.
9. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). – С.88-103.
 10. Харченко А.О. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка / А. Харченко, С. Братан, Е. Владецкая // *International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08»*. – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
 11. Харченко А.О. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской / А. Харченко, Е. Владецкая, В.Долгин, С. Братан // *Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne»* (Машины и производственные процессы).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – С. 86-98.
 12. Братан С.М. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, // *Наукоемкие технологии в машиностроении*.– Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. №9 (63). – С. 10-15.
 13. Владецкая Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях/ Е.А. Владецкая// *Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов*. – Севастополь: СевГУ, 2016. – Вып.4.– С.25-34.
 4. Bratan S.M. Modelirovaniye vzaimodeystviya shlifoval'nogo kruga s zagotovkoy / S.M. Bratan, YU.K. Novoselov, D.A. Kainov // *Vestnik SevGTU: Ser. Mekhanika, energetika, ekologiya: Sb. nauch. tr.* – Sevastopol', 2001 g.- Vyp.30. – S.12-16.
 5. Syu D., Meyyer A. Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya i yeye primeneniye / D. Syu, A.M. Meyyer. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 544 s.
 6. Kvakernaak KH. Lineynyye optimal'nyye sistemy upravleniya / KH. Kvakernaak, R. Sivan. – M.: Mir, 1977. – 650 s.
 7. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
 8. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.
 9. Vladeckaja E.A. Obespecheniye kachestva shlifoval'noy obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushhenij v usloviyakh plavuchey masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii*.– Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). – S.88-103.
 10. Harchenko A.O. Povysheniye tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoy vibroizol'yacii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya // *International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08»*. – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
 11. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyy signal na primere stanka v usloviyakh plavuchey masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // *Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne»* (Mashiny i proizvodstvennye processy).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015.– S. 86-98.
 12. Bratan S.M. Issledovaniye nadezhnosti vibroizoliruyushchego ustroystva shlifoval'nogo stanka / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, // *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*.– Bryansk: FGBOU VO «BGTU», 2016. №9 (63). – S. 10-15.
 13. Vladetskaya Ye.A. Modelirovaniye vibratsionnykh vozdeystviy ot vneshnikh istochnikov pri shlifovanii detaley v laboratornykh usloviyakh / Ye.A. Vladetskaya// *Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov*.– Sevastopol': SevGU, 2016. – Vyp.4. – S.25-34.

References

1. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S., Arkhipov P.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoyanie tverdospavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivani // *Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.
2. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdenosti tverdogo splava pri zatachivani instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskich kompozitov // *Aktual'nye problemy v mashinostroyenii*. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.
3. Bratan S.M. Otsenka parametrov zony kontakta zahotovky s ynstrumentom pry kruhlom naruzhnom shlyfovany / S.M. Bratan, YU.K. Novoselov, D.A. Kaynov.// *Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*. Zbirnyk naukovykh prats' KHDPU. – Kharkiv, 2001. – Vyp.1(4). – S.78-83.

УДК 539.3:666.9-16;621.9

ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНОГО ЗАТАЧИВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТОВ

Д.В. Лобанов¹, А.С. Янюшкин¹, Н.В. Мулюхин¹¹ФГБОУ ВО Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация

В работе рассмотрена специфика и трудности обработки резанием неметаллических композиционных материалов, связанные с их уникальным сочетанием свойств на примере фрезерования. Отмечено, что инструмент, оснащенный твердосплавным режущим элементом для обработки полимерных композитов должен иметь качественное режущее лезвие, чтобы обеспечить заданную форму и технические характеристики обработанной поверхности детали. Рассмотрена проблема формообразования режущего клина с требуемыми параметрами для обработки неметаллических композитов. Приведена методика моделирования алмазного шлифования твердого сплава с применением модели разрушения Джонсона-Кука. Предложенная методика позволит оценить режимы затачивания и инструментальный материал, с точки зрения возникновения разрушений вдоль режущей кромки. Сформулированы выводы и перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: шлифование, прогнозирование, поврежденность, твердый сплав, режущий инструмент, качество, неметаллические композиты.

STAGES OF MODELING DIAMOND GRINDING OF A HARD-AL-LOY TOOL FOR PROCESSING COMPOSITES

D.V. Lobanov¹, A.S. Yanyushkin¹, N.V. Muliukhin¹¹Federal State Educational Budget Institution of Higher Professional Education «The Ulianov Chuvash State University», Cheboksary, Russian Federation

Abstract

In this paper, the specifics and complexity of cutting processing of nonmetallic composite materials related to their unique combination of properties in the example of milling are considered. It is noted that a tool equipped with a carbide cutting element for the processing of polymer composites should have a quality cutting blade in order to provide the desired shape and technical characteristics of the treated surface of the parts. The problem of forming a cutting wedge with the required parameters for the processing of nonmetallic composites is considered. A technique for modeling diamond grinding of a hard alloy using the Johnson-Cook breakdown measures is presented. The proposed method allows to evaluate the grinding conditions and tool material, from the point of view of the occurrence of fractures along the cutting edge. Conclusions and prospects of further research are formulated.

Keywords: grinding, prediction, damage, hard alloy, cutting tools, quality, non-metallic composites.

В настоящее время бурно растет тенденция широкого применения в различных конструкциях как металлосодержащих, так и неметаллических композиционных материалов, которые позволяют снизить вес и повысить эксплуатационные характеристики деталей и узлов агрегатов, применяемых в различных отраслях машиностроения [1-3].

Создание деталей из полимерных композитов необходимой формы и с заданными техническими требованиями на заготовительной стадии, с помощью прессования литья, штамповки и других методов формования не всегда возможно, это связано с

усложнением конструкций пресс-форм и процессов формирования. Поэтому возникает необходимость в механической обработке резанием подобных изделий.

Большинство неметаллических композитов на основе полимеров хорошо поддается обработке резанием и выполняется на обычном металлорежущем оборудовании, но имеет множество особенностей, которые качественно отличает от обработки традиционных конструкционных материалов. К примеру, для фрезерования скорость резания и скорость подачи необходимо увеличить, а инструмент должен иметь угол режущего

клина 50-60°, в качестве инструментального материала используется твердый сплав. Необходимо учитывать также и температурный режим в зоне обработки, потому что возможны деформации детали, деструкция материала, выделение вредных продуктов горения и пыли. Также к лезвию предъявляются более повышенные требования к качеству лезвия инструмента для обработки неметаллических композитов. Однако получение качественного режущего лезвия инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного твердыми сплавами, традиционными методами шлифования достаточно трудоемкий и сложный процесс [4-12].

Доля механической обработки, приходящаяся на фрезерование, составляет более 65%, поэтому формообразования качественной режущей кромки пластины фрезерного инструмента весьма актуально [3].

Однако, необходимо определить условия, позволяющие добиться высокого качества шлифования высокопрочных обрабатываемых материалов. Целесообразно выявлять эти условия изначально на стадии моделирования. Авторы [13-21] уделяли внимание моделированию процессов шлифования труднообрабатываемых материалов, однако в работах недостаточно были учтены специфические особенности твердосплавного инструмента для обработки неметаллических композитов и алмазного абразивного инструмента. Основываясь на ранее полученные теоретические и экспериментальные предпосылки [22-24], нами ведется моделирование процесса алмазного затачивания твердосплавного инструмента для обработки неметаллических композиционных материалов.

Рассмотрим процесс затачивания твердосплавной пластины фрезы для обработки полимерных композитов. Обозначим геометрические параметры режущего элемента инструмента: ширина a (мм), длина b (мм), высота c (мм), угол заострения β , а режимы затачивания: продольная подача $S_{пр}$ (мм/мин), поперечная подача $S_{поп}$ (мм/ход), глубина резания t (мм).

При моделировании процесса затачивания твердосплавной пластины будем ис-

пользовать модуль Explicit STR программного комплекса Ansys R18, который позволяет решать задачи нестационарной линейной динамики с явным интегрированием по времени. На каждом шаге интегрирования решатель вычисляет размер шага по времени используя критерий Куранта-Фридрихса-Леви :

$$dt_{\max} = b \cdot \sqrt{\frac{r}{E}}$$

где b – характерный размер элемента, r – плотность материала, E – модуль упругости материала.

Как видно из формулы, шаг по времени определяется минимальным размером ячейки конечно-элементной сетки объекта. Для моделирования процесса затачивания, с целью оценки степени разрушения режущей кромки твердосплавной пластины, необходимо выбрать размер элемента сетки таким, чтобы он был меньше или равен реальным разрушениям. Из работ [22, 23] выявили, что реальные разрушения при алмазном затачивании составляют 0,02...0,1 мм с размерами пластины ширина 12 мм, длина 21 мм и толщина 3 мм, т.е. максимальный размер элемента можно условно принять 0,02 мм. Расчет процесса, протекающий во временном промежутке 0,003 секунды с представленными геометрическими характеристиками пластины при принятом размере элемента 0,02 мм потребует значительных вычислительных ресурсов и займет продолжительный промежуток времени, что нерационально с экономической точки зрения.

Из предыдущих исследований напряженно-деформированного состояния твердосплавной пластины [22-24], следует, что критические разрушения и напряжения в режущем клине возникают в области близкой к режущей кромке, а в остальной части значительных изменений исследуемых параметров не наблюдается. Поэтому, основываясь на полученные ранее результаты, ограничим область расчета до участка вдоль режущей кромки, ширина которого составляет 1 мм (участок рабочей зоны режущего элемента, необходимый для оценки реального процесса обработки). Уменьшение расчетной области позволит значительно эконо-

номить расчетно-вычислительные мощности при сохранении необходимого размера элемента сетки, без снижения точности расчета.

В работах [24-26] для математического описания процесса разрушения твердого сплава марки ВК6 применяют модифицированную модель Джонсона – Холмквиста (JH2), которая используется для определения разрушения хрупких материалов подвергшимся высоким давлениям, деформациям и скорости сдвига, такие материалы имеют высокий предел прочности на сжатие, но имеют низкий предел прочности на растяжение. Твердый сплав считается квазихрупким материалом со степенью деформации до разрушения при сжатии $\epsilon_f \sim 1,5 \dots 5\%$.

Но, в указанной работе при моделировании процесса затачивания, шлифовальный круг исключается из процесса и его воздействие заменяется скоростью сдвига. Представленная постановка задачи чрезмерно упрощенна, т.к. шлифование – это контактный процесс двух тел, одно из них (шлифовальный круг) имеет абразивные зерна в виде единичных инденторов, распределенных по поверхности круга, а другое – обрабатываемый материал. Указанные метод моделирования достаточно неточен, описывает процесс не в полной мере.

Предлагается моделировать процесс затачивания твердосплавной пластины, как контактный процесс с учетом реального взаимодействия двух объектов с наложенными ограничениями-допущениями. Для моделирования процесса затачивания и оценки разрушения твердосплавного режущего клина сделаем некоторые допущения:

Материал пластины будем считать однородным, сплошным, изотропным

Радиус скругления режущей кромки равен нулю, пластина абсолютно острая.

Шлифовальный круг работает с постоянной скоростью вращения.

Технологическая система абсолютно жесткая

Абразивные зерна имеют одинаковую геометрию, ориентированы определенным образом в пространстве и выступают на одинаковую величину из связки с учетом зернистости круга.

Шлифовальный круг не теряет работоспособность в процессе затачивания (не засаливается), т.е. его режущая способность в течении времени не изменяется и равна первоначальной.

При обработке не учтено воздействие смазочно-охлаждающих технологических средств.

Применение в данных условиях модели разрушения Джонсона – Холмквиста, представленной ранее при прогнозировании поврежденности режущей кромки, не целесообразно, т.к. по итогам предварительных исследований не обеспечивает достаточной точности результатов.

В работе [25] приведен опыт расчета разрушения с учетом свойств твердого сплава ВК6 на основе модели Джонсона – Кука, который используется чаще для описания пластичных материалов подверженных большим деформациям, высоким давлениям и высоким температурам, что соответствует условиям затачивания/шлифования твердосплавной пластины. Применение данной модели разрушения не типично для подобных материалов, но возможно, т.к. твердый сплав за счет связующего имеет некоторую пластичность [22].

Итак, определяющее уравнение эквивалентных напряжений повреждаемого материала определяется из модели разрушения Джонсона – Кука:

$$D = \frac{1}{\epsilon_f} \sum_i \Delta \epsilon_p^i,$$

где $\Delta \epsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе i -м шаге интегрирования по времени. Величина ϵ_f вычисляется по формуле:

$$\epsilon_f^f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} \right] \left[1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right],$$

где $D_1 \dots D_5, \epsilon_0$ – параметры материала; σ_{ef} – эффективное напряжение; p – давление; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; ϵ_p – эффективная пластическая деформация.

Тогда уравнение определяющее предел текучести будет иметь вид:

$$\sigma_y = (A + B \epsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right),$$

где A, B, c, n, m – параметры материала.

Для описания высокоскоростного взаимодействия твердых тел важную роль играет уравнение состояния конденсированной фазы материала необходимо использовать уравнение Ми-Грюнайзена в полиномиальной форме:

$$P = A_1 + A_2 + A_3 + (B_0 + B_1) \text{ при } \xi = [(\rho / \rho_0) - 1] > 0 \text{ (сжатие),}$$

$$P = T_1 + T_2 + B_0 \rho_0 E_T, \text{ при } \xi < 0 \text{ (растяжение),}$$

где P – давление; $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$ – постоянные материала; ρ, ρ_0 – текущая и начальная массовая плотность соответственно; E_T – тепловая составляющая удельной внутренней энергии.

Представленная методика моделирования позволяет оценить напряжения и разрушения режущего клина, возникающие при затачивании инструмента для обработки полимерных композиционных материалов, оснащенного твердосплавными пластинами. С помощью моделирования, возможно, определить теоретически оптимальные режимы затачивания пластины. Данная модель является основой для дальнейших исследований процессов формообразования твердосплавного инструмента со специфичной геометрией для обработки неметаллических композиционных материалов с использование высокопроизводительного алмазного абразивного инструмента.

Список литературы

1. Bratan S., Novikov P., Roshchupkin S. Application of combined taps for increasing the shaping accuracy of the internal threads in aluminium alloys // В сборнике: Procedia Engineering 2. Сер. "2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016" 2016. С. 802-808.
2. О свойствах алюминиевых порошков, применяемых для изготовления композиционных материалов / Рычков Д.А., Сидоренко С.А., Большапова А.В., Ющенко Д.А. // Механики XXI века. 2014. № 13. С. 98-101.
3. Рычков Д.А. Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 100-105.
4. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // СТИН. 2012. № 5. С. 7-10.
5. Реченко Д.С. Повышение качества высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов алмазными кругами с прерывистой поверхностью / автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Томский политехнический университет. Томск, 2009.
6. Расчет гибкого вала, используемого для непрерывной правки шлифовальных кругов / Салова Д.П., Петряшин Е.Н., Григорьев В.С., Мулюхин Н.В., Плотников В.В., Сорокин С.С. // В сборнике: Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции. Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова". 2016. С. 118-121.
7. Создание твердосплавного инструмента сверхскоростным шлифованием для суперфинишной лезвийной обработки / Реченко Д.С., Попов А.Ю., Леонтьева Е.В., Матвеева М.Г. // Омский научный вестник. 2015. № 2. С. 92.
8. Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств / Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкий Д.О. // В сборнике: Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 139-148.
9. Реченко Д.С. Влияние скорости резания на качество затачивания твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 47-49.
10. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. // Key Engineering Materials. 2016. Т. 712. С. 105-111.
11. Yanpolsky V.V., Rakhimyanov K.Kh. Features of forming the surface microrelief of low-wear coatings by electro-diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 28-34.
12. Определение относительной абразивной способности кругов при безалмазной непрерывной правке / Салов П.М., Цай В.Н., Сайкин С.С., Воронцов Ю.И., Мулюхин Н.В. // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 57-59.
13. Методика компьютерного моделирования процессов комбинированной электроалмазной обработки / Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. // Механики XXI века. 2014. № 13. С. 91-96.
14. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 129-135.
15. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки / Попов В.Ю., Шку-

- ратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 201-207.
16. Bratan S., Novosyolov Y., Roshupkin S. Modeling of cutting forces in diamond drilling // *International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies*. 2015. № 2. С. 59.
 17. Мулюхин Н.В., Лобанов В.Д. Моделирование безрезонансных вибрационных систем // *Вестник современных технологий*. 2017. № 4 (8). С. 38-42.
 18. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Моделирование теплофизики плоского шлифования // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2005. № 5. С. 56-62.
 19. Моделирование процессов структурообразования при формировании сварного соединения из разнородных сталей / Никулина А.А., Скиба В.Ю., Корниенко Е.Е., Миронов Е.Н. // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2011. № 4. С. 54-61.
 20. Солер Я.И., Нгуен В.Л., Казимиров Д.Ю. Моделирование прижогов при шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 4 (673). С. 71-81.
 21. Солер Я.И. Компьютерные технологии прогнозирования микрорельефа поверхности пластин p18 при шлифовании кубонитовыми кругами // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2006. № 4-4 (28). С. 11-17.
 22. Моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине из композиционного материала (WC - CO) при алмазном затачивании / Скрипняк В.В., Лобанов Д.В., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С. // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2013. № 4 (24). С. 99-110.
 23. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
 24. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2018. Т. 5. №1-2. С. 78-84.
 25. T. J. Holmquist, G. R. Johnson, W. A. Gooch Modeling the 14.5 mm BS41 projectile for ballistic impact computations // *WIT Transactions on Modeling and Simulation*, Vol 40, pp. 61-75, 2005.
- ### References
1. Bratan S., Novikov P., Roshchupkin S. Application of combined taps for increasing the shaping accuracy of the internal threads in aluminium alloys // В сборнике: *Procedia Engineering* 2. Сер. "2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016" 2016. С. 802-808.
 2. Svoistvakh aliuminievykh po-roshkov, primeniaemykh dlia izgotovleniia kompozitsionnykh materialov / Rychkov D.A., Sidorenko S.A., Bol'sheshapova A.V., Iushchenko D.A. // *Mekhaniki XXI veku*. 2014. № 13. С. 98-101.
 3. Rychkov D.A. Ratsionalizatsiia pa-rametrov frezerovaniia polimernykh kompo-zitsionnykh materialov // *Aktual'nye pro-blemy v mashinostroenii*. 2016. № 3. С. 100-105.
 4. Vasil'ev E.V., Popov A.Iu., Re-chenko D.S. Almaznoe shlifovanie tverdo-splavnykh plastin // *STIN*. 2012. № 5. С. 7-10.
 5. Rechenko D.S. Povyshenie kachest-va vysokoskorostnogo zatachivaniia tverdo-splavnykh instrumentov almaznymi krugami s preryvistoi poverkhnost'iu / avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Tomskii poli-tekhnicheskii universitet. Tomsk, 2009
 6. Raschet gibkogo vala, ispol'zue-mogo dlia nepreryvnoi pravki shlifoval'-nykh krugov / Salova D.P., Petriashin E.N., Grigor'ev V.S., Muliukhin N.V., Plotnikov V.V., Sorokin S.S. // В сборнике: *Proektirovanie i perspektivnye tekhnologii v mashinostroenii i metallurgii ma-terialy II-oi Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ministerstvo obrazovaniia i nauki RF; FGBOU VPO "Chu-vashskii gosudarstvennyi universitet im. I.N. Ul'ianova". 2016. С. 118-121.
 7. Sozдание tverdosplavnogo inst-rumenta sverkhskorostnym shlifovaniem dlia superfinishnoi lezviinoi obrabotki / Re-chenko D.S., Popov A.Iu., Leont'eva E.V., Matveeva M.G. // *Omskii nauchnyi vestnik*. 2015. № 2. С. 92.
 8. Povyshenie dinamicheskogo kache-stva shlifoval'nogo stanka na osnove opti-mizatsii vibroizoliruiushchikh ustroistv / Vladetskaia E.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskii D.O. // В сборнике: *Sovremennye napravleniia i perspektivy razvitiia tekhnologii obrabotki i oborudovaniia v mashino-stroenii materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2015. С. 139-148.
 9. Rechenko D.S. Vliianie skorosti rezaniia na kachestvo zatachivaniia tverdo-splavnogo instrumenta // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2014. № 2 (22). С. 47-49.
 10. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. // *Key Engineering Materials*. 2016. Т. 712. С. 105-111.
 11. Yanpolsky V.V., Rakhimyanov K.Kh. Features of forming the surface microrelief of low-wear coatings by electro-diamond grinding // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Т. 788. С. 28-34.

12. Opredelenie otnositel'noi ab-razivnoi sposobnosti krugov pri bezalmaz-noi nepreryvnoi pravke / Salov P.M., Tsai V.N., Saikin S.S., Vorontsov Iu.I., Muliukhin N.V. // Nauchno-tekhnicheskii vestnik Po-volzh'ia. 2016. № 4. S. 57-59.
13. Metodika komp'iuternogo mode-lirovaniia protsessov kombinirovannoi elektroalmaznoi obrabotki / Popov V.Iu., Shkuratova A.P., Khlystov A.N., Bondin A.V., Miroshnichenko N.A. // Mekhaniki XXI veku. 2014. № 13. S. 91-96.
14. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. T. 788. C. 129-135.
15. 3D modelirovanie protsessa kom-binirovannoi elektroalmaznoi obrabotki / Popov V.Iu., Shkuratova A.P., Khlystov A.N., Bondin A.V., Miroshnichenko N.A. // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2014. T. 1. S. 201-207
16. Bratan S., Novosyolov Y., Roshupkin S. Modeling of cutting forces in diamond drilling // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies. 2015. № 2. C. 59.
17. Muliukhin N.V., Lobanov V.D. Modelirovanie bez-rezonansnykh vibratsion-nykh sistem / Vestnik sovremennykh tekhnolo-gii. 2017. № 4 (8). S. 38-42.
18. Soler Ia.I., Kazimirov D.Iu. Modelirovanie teplofiziki ploskogo shli-fovaniia // Problemy mashinostroeniia i na-dezhnosti mashin. 2005. № 5. S. 56-62.
19. Modelirovanie protsessov struk-turoobrazovaniia pri formirovanii svarno-go soedineniia iz raznorodnykh stalei / Ni-kulina A.A., Skiba V.Iu., Kornienko E.E., Mironov E.N. // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty). 2011. № 4. S. 54-61.
20. Soler Ia.I., Nguen V.L., Kazimirov D.Iu. Modelirovanie prizhgov pri shlifovanii zakalennykh detalei iz stali 30khgsa // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavede-nii. Mashinostroenie. 2016. № 4 (673). S. 71-81.
21. Soler Ia.I. Komp'iuternye tekhnologii prognozirovaniia mikrorel'efa po-verkhnosti plastin r18 pri shlifovanii ku-bonitovymi krugami // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universite-ta. 2006. № 4-4 (28). S. 11-17.
22. Modelirovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia v plastine iz kompozitsionnogo materiala (WC - CO) pri almaznom zatachivanii / Skripniak V.V., Lo-banov D.V., Skripniak V.A., Ianiushkin A.S. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2013. № 4 (24). S. 99-110.
23. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S., Arkhipov P.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii // Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.
24. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskiikh kompozitov // Aktual'nye problemy v mashinostroenii. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.
25. T. J. Holmquist, G. R. Johnson, W. A. Gooch Modeling the 14.5 mm BS41 projectile for ballistic impact computations // WIT Transactions on Modeling and Simulation, Vol 40, pp. 61-75, 2005.

УДК 621.9.047

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

А.А. Широкожухова¹, Ю.В. Шаров¹, И.Г. Стародубцев¹¹«ВМЗ» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Проведен краткий анализ распространенных методов получения отверстий при изготовлении металлических фильтров. Обоснована актуальность и необходимость использования нетрадиционных технологий. Раскрыта возможность применения комбинированной одновременной прошивки сверхглубоких точных отверстий цельным инструментом с монокристаллическими электродами при изготовлении типовых конструкций фильтров из листовых заготовок. Рассмотренный метод существенно расширяет технологические возможности производства, позволяет существенно улучшить технические характеристики деталей, снизить массу фильтров, сократить трудоемкость окончательной доводки выполненных каналов.

Ключевые слова: металлические фильтры, электроэрозионная многоэлектродная прошивка отверстий, электрод-инструмент.

NON-TRADITIONAL TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF METAL FILTERS USED IN ENGINE AEROSPACE INDUSTRY

A.A. Shirokozukhova¹, Y.V. Sharov¹, I.G. Starodubtsev¹¹Voronezh Mechanical Plant, Voronezh, Russian Federation

Abstract

A short analysis on the common methods of receiving holes in a metal filters. The necessity and relevance of using non-traditional technology. Revealed the possibility of using a combined simultaneous firmware deep precise holes one-piece tool with monolithic electrodes in the manufacture of standard filter designs from sheet blanks. The method significantly expands the technological possibilities of production, allows the substantially improve the technical characteristics of parts, to reduce the weight of filters that reduce the complexity of the final finishing is done channels.

Keywords: metal filters, electroerosion multielectrode firmware holes, electrode-tool.

Постоянно растущие требования, предъявляемые к летательным аппаратам, необходимость достижения более высоких уровней параметров, повышение надежности агрегата определяют актуальность поиска новых конструктивных решений, применения современных материалов и технологий, постоянных исследований рабочих процессов.

В составе двигателей летательных аппаратов фильтры выполняют ответственную функцию: очищают жидкие, газожидкостные и газовые смеси от посторонних частиц (элементов) путем их пропускания через разделительные элементы (металлические, пластмассовые, тканевые, сетки, бумажные и т.д.). В современном двигателестроении

применяются самые разнообразные конструкции фильтров в зависимости от множества факторов: рабочей среды, места использования, требуемой степени очистки.

Фильтрующие элементы изготавливаются из различных материалов: металлических сеток, проволоки, пластин, картона, бумаги, фетра и т.д. Для фильтров, применяемых в летательных аппаратах, предъявляются повышенные требования, так как при работе двигателей летательных аппаратов все элементы конструкции подвергаются значительным вибрационным нагрузкам, что зачастую может вызвать деформацию, сдвиг фильтра, изготовленного, допустим, из проволоки. Исходя из сложных условий работы

в данной отрасли, в основном, применяют цельные изделия из металлических листовых материалов. Соответственно, толщина листа, используемого при изготовлении, определяет не только механическую прочность фильтрующего элемента, но и его устойчивость к воздействию вибрационных нагрузок. При значительных толщинах заготовок из листа глубина каналов в фильтрах может составлять более 10 их диаметров, что делает подобные элементы малого диаметра и большой глубины трудно обрабатываемыми. Не стоит забывать, что при изготовлении фильтрующих элементов для летательных аппаратов высокие требования предъявляются и к точности выполнения отверстий, и к качеству поверхности детали, что зачастую ограничивает применение традиционных методов получения отверстий.

Одновременно с прочностными характеристиками в целях достижения минимальной массы деталей применительно к фильтрам всегда стоит задача обеспечить максимальную фильтрующую способность, оцениваемую соотношением площади сечения каналов к общей площади, занимаемой фильтром. Однако же при любом виде механической обработки расстояние между соседними отверстиями должно быть достаточным для противодействия силам деформации, что, безусловно, ограничивает характеристики фильтров.

К распространенным способам получения отверстий в фильтрах можно отнести:

1. Механические (например, прошивка профильным пуансоном, сверление).
2. Лучевые (электронно-лучевой метод, лазерная прошивка).
3. Ультразвуковое комбинированное сверление отверстий.
4. Электроэрозионная прошивка.
5. Электрохимическая прошивка (струйный метод, прошивка профильным электродом-инструментом).

Перечисленные выше технологии достаточно широко используются при изготовлении металлических фильтров из листовых заготовок, однако опыт их применения выявляет определенного рода недостатки, а именно:

1. Выполнение отверстий методами механической обработки хоть и позволяет получать отверстия малого диаметра, связано с определенными трудностями, а именно с необходимостью частой замены инструмента, дефицитом сверл малого диаметра, сложностью их изготовления и заточки. При использовании труднообрабатываемых материалов, что свойственно авиакосмической отрасли, сверление отверстий значительно усложняется, процесс становится чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим.

2. При прошивке отверстий сплошным инструментом-стержнем (проволока) все геометрические дефекты, такие как погрешность формы в поперечном и продольном сечениях, отклонение от прямолинейности оси, будут сказываться на качестве получаемых отверстий. Так же имеет место неэффективная эвакуация продуктов эрозии из зоны обработки.

3. Часто применяемые в двигателестроении лучевые методы изготовления отверстий не позволяют выполнять некруглые каналы, имеют расширения на входе луча, что приводит к снижению плотности расположения отверстий и, соответственно, влияет на фильтрующую способность детали.

На практике для исключения указанных недостатков используют различные технологические приемы, такие как вращательное движение электрода, устраняющее овальность отверстия, применение шнековых электродов для более эффективного удаления продуктов эрозионного разрушения, орбитальное движение электрода-инструмента относительно оси канала.

Во избежание указанных выше проблем на ВМЗ применяется технология группового изготовления отверстий в металлических фильтрах из листовых материалов, в частности электроэрозионная многоэлектродная прошивка.

Ключевым отличительным моментом этой технологии является размещение на обрабатываемой поверхности детали параллельно несколько электродов-инструментов. При подключении электродов к одному генератору импульсов обработка называется многоэлектродной, при подключении каж-

дого электрода к отдельному источнику питания – многоконтурной.

В качестве электродов используют проволоку из меди, вольфрама и его сплавов с медью или серебром. Вольфрамовые электроды отличаются более высокой жесткостью, соответственно, целесообразно их использование при прошивке отверстий малых диаметров. При работе с титановыми сплавами зачастую применяют латунную проволоку.

Многоэлектродная электроэрозионная обработка позволяет:

- решить проблему качественной прошивки отверстий малого диаметра при их большой глубине;
- эффективно использовать имеющееся оборудование и приспособления, что, в свою очередь, снижает материальные затраты и сроки технологической подготовки производства;
- снизить износ инструмента;
- за счет снижения трудоемкости изготовления деталей существенно повысить производительность труда;
- создать новые конструкции фильтров, повышающие характеристики двигателей летательных аппаратов.

Применительно к опыту ВМЗ по изготовлению фильтрующих элементов наиболее сложно технология многоэлектродной эрозионной прошивки отверстий реализовывалась в цилиндрических фильтрах с глубиной более десяти диаметров при числе отверстий в изделии от 100000 до 17000. Такие фильтры можно разделить на группы по диаметрам отверстий: малого (менее 0,35 мм); среднего – до 0,45 мм и большого - более 0,5 мм. Наиболее трудоемкими были фильтры из металлов с толщиной листа до 2 мм и диаметром отверстия 0,3 мм. Эскизы типовых представителей таких фильтров приведены на рисунке 1. Технические условия для фильтров показаны в таблице 1.

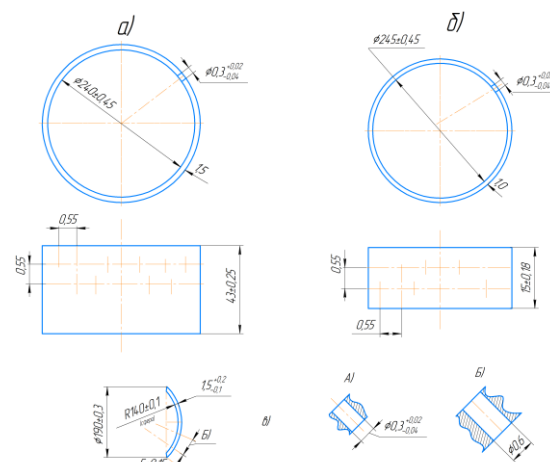


Рис. 1. Схемы фильтров:

а) в толстостенном листовом материале с глубиной отверстий до 5 диаметров; б) в листе толщиной 1,0-3,0 мм; в) в сферической заготовке с отверстиями различных диаметров.

Таблица 1. Типовые конструкции фильтров

Параметр	Рисунок 1, а
Материал	Бронза, нержавеющая сталь
Общее количество отверстий	170 000
Допуск на толщину листа, мм	– 0,2
Нагар	Не допускается
Скругление кромок, отверстий (метод)	ЭХО
Место пропуска отверстий	Участок не более 1,5 мм от сварного шва
Вид покрытия	Химическая пассивация
Параметр	Рисунок 1, б
Материал	Бронза, нержавеющая сталь
Общее количество отверстий	19 500
Допуск на толщину листа, мм	– 0,3
Нагар	Не допускается
Скругление кромок, отверстий (метод)	Электрополирование
Место пропуска отверстий	Участок не более 1,5 мм от сварного шва
Вид покрытия	Химическая пассивация
Параметр	Рисунок 1, в
Материал	Нержавеющая сталь
Общее количество отверстий	Место А – 77800 Место Б – 50
Допуск на толщину листа, мм	– 0,1
Нагар	Не допускается
Скругление кромок, отверстий (метод)	Солеструйная обработка ЭХО (R = 0,02 мм)
Место пропуска отверстий	Только в месте А
Вид покрытия	Химическая пассивация

Результаты работ по групповому выполнению отверстий методом многоэлектродной электроэрозионной прошивки сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Характеристики, достигнутые при прошивке группы отверстий в стальных деталях

Диаметр отверстия d , мм	До 0,5	До 0,5	0,5-2	0,5-2
Глубина отверстия H , мм	3-5	3-5	10-20	10-20
Материал электрода - инструмента	Медь, вольфрам	-/-	-	-
Число электродов	До 10	От 10 до 1000	До 2000	От 2000 до 10000
Частота, кГц	8-88	8-44	3-22	3-22
Скважность	Более 5	3	2-5	1,5-3
Скорость прошивки, мм/мин	0,1-0,5	0,1-1,0	0,05-1,0	0,02-0,05
Относ-й износ, %	50-150	30-70	20-40	10-20

Проведенные исследования по возможности использования многоэлектродной прошивки отверстий при изготовлении металлических фильтров показывают, что данный метод расширяет технологические возможности производства, позволяет существенно улучшить технические характеристики деталей, снизить массу фильтров, сократить трудоемкость окончательной доводки выполненных каналов. Полученные результаты по прошивке одним инструментом тысяч сверхглубоких точных отверстий различного сечения, используя в основном имеющиеся или модернизированные средства технологического оснащения, наглядно показывают перспективность применения нетрадиционных технологий для получения качественных фильтров двигателей летательных аппаратов.

Список литературы

1. Бойко А. Ф., Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010 – 314 с.

2. Владыкин А.В. Оценка области использования электроэрозионной и комбинированной обработки для отверстий малого диаметра / А.В. Владыкин, Е.Ю. Овчинников, И.И. Коптев // «Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства»: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 10. Воронеж: ВГТУ, 2012. – С.70-75.
3. Лышевский А. С. Системы питания дизелей. М.: Машиностроение, 1981 – 216 с.
4. Машиностроение. Энциклопедия. Т.Ш-3/ Под ред. А.Г Суслова. М.: Машиностроение, 2000-840 с.
5. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. Воронеж: ВГТУ, 1996- 168 с.
6. Сергеев А.П. Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра. /А.П. Сергеев, В.П. Смоленцев, А.А. Якупов. Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1981. Вып.4-С.8-10
7. Кириллов О.Н. Чистовая обработка переходных участков непрофилированным электродом / О.Н. Кириллов // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2009. №2-2/274 (560). С.66-71
8. Норман А. В. Оборудование для изготовления отверстий малого диаметра // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2005. Вып. 7. – С. 119 – 125.
9. Рязанцев А.Ю. Методика расчёта инструмента с непрофилированной рабочей частью / А.Ю. Рязанцев, О.Н. Кириллов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т.11. №5. С. 4 – 8
10. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др. Л.: Машиностроение, 1988 – 719 с.

References

1. Bojko A.F., Effective technology and equipment for electroerosive firmware insertion of precision micro-holes. Belgorod: Publishing BSTU, 2010 – 314 p.
2. Vladukin A.V. Evaluation of the use of electroerosion and combined processing for small diameter holes / A.V. Vladukin, E. Y. Ovchinnikov, I.I. Koptev // “Product quality assurance at the stages of design and technological preparation of production” Intercollegiate collection Volume 10. Voronezh: VSTU, 2012. - P 70-75.
3. Lyshevski A.S. The power supply system of diesel engines. M.: Mashinostroenie, 1981 – 216 p.
4. Machine building. Encyclopedia Volume 3/ Edited by Suslov A.G. M.: Mashinostroenie, 2000-840 p.

-
5. Combined treatment methods/ V.P. Smolentsev, A.I. Boldurev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996-168 p.
 6. Sergeev A.P. Electroerosion firmware of holes of small diameter. /A.P. Sergeev, V.P. Smolentsev, A.A. Yakupov. Electrophysical and electrochemical treatment methods, 1981. Volume 4 - P. 8 -10.
 7. Kirillov O.N. Finish machining of transition sections by inshaped electrode / O.N. Kirillov // News of Orel State Technical University, edition «Basic and applied problems of engineering and technologies». 2009. №2-2/274 (560). P.66-71.
 8. Norman A.V. Equipment for manufacturing small diameter holes // Nontraditional machining methods: intercollegiate collection. Voronezh: VSTU, 2005. Volume 7. - P. 119-125.
 9. Ryazantsev A.Y. Method of calculation of the tool with non-profiled working part/ A.Y. Ryazantsev, O.N. Kirillov // Voronezh State Technical University Bulletin. 2015. V.11. №5. P. 4 - 8.
 10. Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods / G.L. Amitan, I.A. Bisupov, Y.M. Baron and others. L.: Mashinostroenie, 1988-719 p.

УДК 621.833

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ ШПИНДЕЛЯ СТАНКА С ЧПУ

В.А. Сидоров¹¹ ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина

Аннотация

В работе приведены результаты диагностирования подшипников шпинделя станка с ЧПУ GLS-200M. Изменение в техническом состоянии зафиксировано органолептическим методом при изменении характера шума. Оценка состояния проведена с использованием методов виброметрии – измерения общего уровня вибрации, применения взаимной и относительной оценки, дополненной результатами спектрального анализа составляющих вибрации. Причины повреждений установлены при визуальном осмотре деталей подшипников. Развитие повреждения происходило при взаимном влиянии нескольких причин: отклонения в точности монтажа, что проявилось в увеличении осевой вибрации; накопление продуктов окисления смазочного материала в окнах сепараторов, что привело к вращению тел качения по одной оси.

Ключевые слова: шпиндель, подшипники, диагностирование, параметры вибрации, спектр колебаний, техническое состояние

DIAGNOSING THE BEARINGS OF MACHINE'S SPINDLE WITH CNC

V.A. Sidorov¹¹ «Donetsk national technical university», Donetsk, Ukraine

Abstract

The results of diagnosing the bearing assemblies of the spindle of the GLS-200M CNC machine are presented. The change of the technical condition is fixed by an organoleptic method on the noise changing. The state estimation was carried out using vibrometry methods - measurement of the general level of vibration, application of mutual and relative evaluation, supplemented by the results of spectral analysis. The causes of damage are established by visual inspection of the bearing parts. The development of failure occurred with the mutual influence of several reasons: deviations in the accuracy of the montage, which was manifested in an increase in the axial vibration; accumulation of oxidation products of the lubricant in the separator windows, which led to rotation of the rolling elements along one axis.

Keywords: spindle, bearings, diagnostics, vibration parameters, vibration spectrum, technical condition

Подшипниковые опоры шпинделя станков с ЧПУ являются одним из элементов гарантирующим длительное функционирование этой сложной технической системы. Раннее обнаружение отклонений в работе данного узла обеспечивает минимальные затраты для восстановления работоспособности при условии своевременного проведения ремонта. Возможные решения данной задачи рассматривались в работах [1-3]. Предлагается использовать метод вибрационной диагностики включая методологию спектрального анализа вибрации [4-6]. Предложения об установке стационарной системы вибродиагностики на станок с ЧПУ, приведены в работах [7-9]. Существуют комплексные решения, связанные с

анализом погрешностей элементов 5-ти осевого станка с ЧПУ и корректировкой перемещений по осям с помощью оптических датчиков [10] или анализом динамического поведения шпинделя на обрабатывающем центре с ЧПУ [11]. Результаты диагностирования технического состояния металлорежущих станков указывают на наличие некоторых особенностей при оценке технического состояния подшипниковых узлов редуктора и шпинделя [12, 13]. Обзор современных методов и средств, результаты внедрения системы технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию на основе безразборной диагностики технического состояния металлообрабатывающих станков с ЧПУ рассмотрены в [14, 15].

В работе излагается последовательность комплексного диагностирования подшипниковых узлов шпинделя токарного станка с ЧПУ GLS-200M (рис. 1а), при использовании методов виброметрии с анализом возможных подходов при постановке диагноза о техническом состоянии.

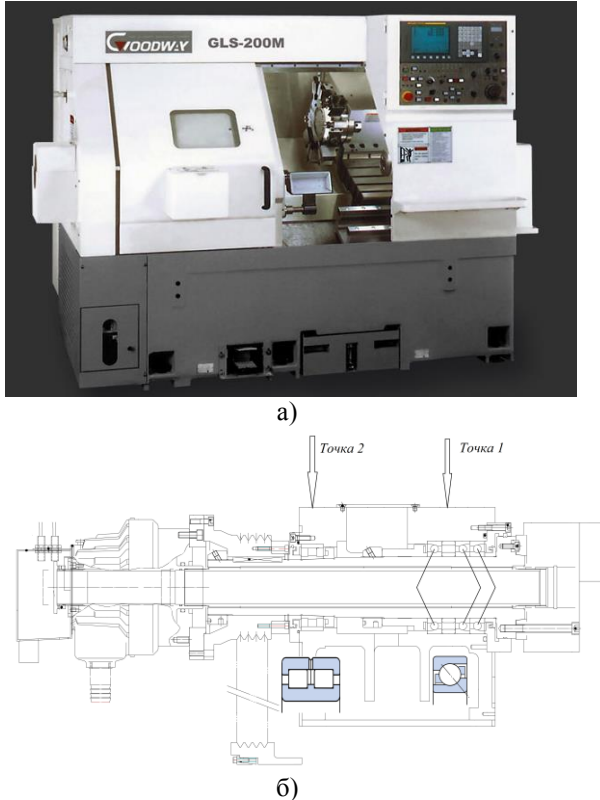


Рис. 1. Общий вид станка с ЧПУ GLS-200M (а), схема шпинделя (б) и расположение контрольных точек измерения параметров вибрации

Шпиндель токарного обрабатывающего центра серии Goodway модели GLS-200M приводится во вращение поликлиновой ременной передачей и установлен на подшипниках качения смазываемых пластичной смазкой (рис. 1б). Роликовый двухрядный подшипник NN3018 воспринимает основную радиальную нагрузку и обеспечивает точное центрирование. Три шариковых радиально-упорных подшипника 7020A5 расположены по «О»-образной схеме с усилением схемой «тандем» для компенсации осевой нагрузки. Регулировка зазоров в «О»-образной паре подшипников 7020A5 осуществляется при помощи промежуточных дистанционных колец. Рабочий диапазон частот вращения 42...4200 об/мин ниже допустимого значения (6000 об/мин для

NN3018 и 8000 об/мин для 7020A5) позволяющего использовать пластичную смазку. Мощность шпинделя 15 кВт.

Первые отклонения в работе металлорежущих станков наиболее часто регистрируются при помощи органолептических методов – изменяется характер звука на холостом ходу и при обработке, появляется вибрация или повышается температура узлов станка. В рассматриваемом случае, возникновение нехарактерного шума позволило предположить наличие неисправности в подшипниковом узле. Рядом со станком, имеющим повреждения работал такой же, но исправный станок. Сравнительный анализ характера шума не позволил локализовать место повреждения из-за наличия релаксационных шумов и субъективности метода.

Решение задачи по оценке степени повреждения, выполнено с использованием методов измерения общего уровня вибрации для режима холостого хода на корпусе подшипников шпинделя при помощи анализатора вибрации С911 и дублировались виброметром 795М-107В. Спектральный анализ выполнен с использованием пакета прикладных программ ConSpect. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита. Контрольные точки измерения вибрации (рис. 1б): точка 1 – шарикоподшипники радиально-упорные; точка 2 – сдвоенный роликоподшипник.

Измерение общего уровня вибрации выполнено в фиксированных частотных диапазонах: виброскорость – среднеквадратичное значение в диапазоне (СКЗ) 10...1000 Гц; виброускорение – пиковое (ПИК) и СКЗ в диапазоне 10...5000 Гц.

Результаты взаимной оценки исправного и неисправного станков по значению виброскорости при частоте вращения 2000 об/мин в одинаковом режиме работы показаны в табл. 1. Значения низкие, имеют равный порядок, за исключением осевого направления. Это позволяет предположить наличие неисправности в одном из шариковых радиально-упорных подшипников.

Таблица 1. Результаты измерения виброскорости в контрольных точках станков

Точка измерения	СКЗ виброскорости (мм/с), для направлений измерения		
	Вертикальное	Горизонтальное	Осевое
1	0,26 (0,20)	0,19 (0,18)	0,32 (0,04)
2	0,24 (0,22)	0,14 (0,15)	0,34 (0,05)

Примечание: в скобках значения для шпинделя без постороннего звука.

При изменении частоты вращения шпинделя от 500 об/мин до 3000 об/мин в режиме холостого хода были установлены зависимости изменения параметров вибрации (рис. 2). Для параметра виброскорости (рис. 2а) - это линейные зависимости с различным углом наклона для роликового и шариковых подшипников. Следовательно, это не дисбаланс, для которого характерны квадратичные зависимости, а механические повреждения подшипников.

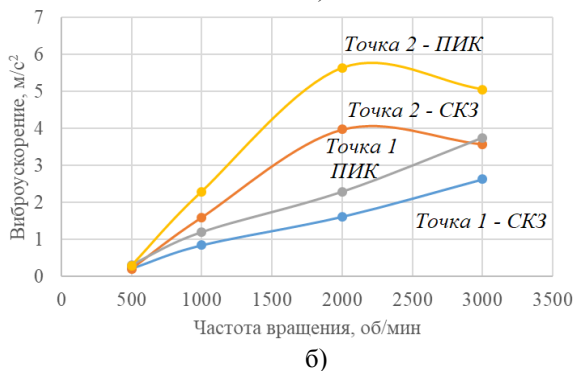
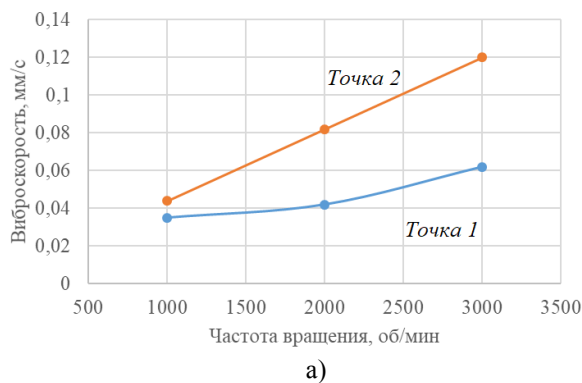


Рис. 2. Зависимости изменения параметров вибрации от частоты вращения:
а) виброскорость; б) виброускорение

Зависимости виброускорения (рис. 2б) остаются линейными для шариковых и становятся нелинейными для роликового подшипника. Это указывает на взаимное влия-

ние подшипниковых узлов при проявлении признаков повреждений на частоте вращения свыше 2000 об/мин. Большие значения виброускорения зафиксированы в районе роликоподшипника.

Спектральный анализ параметров виброскорости и виброускорения (рис. 3) выполнен относительно основных составляющих: обратная частота вращения вала; гармоники; зубцовые - частоты работы зубчатых передач; негармонические - повреждения подшипников качения; боковые полосы, резонансные частоты; электромагнитные частоты кратные 50 Гц. Составляющие вибрационного сигнала отслеживались при изменении частоты вращения шпинделя в диапазоне 500...3000 об/мин.

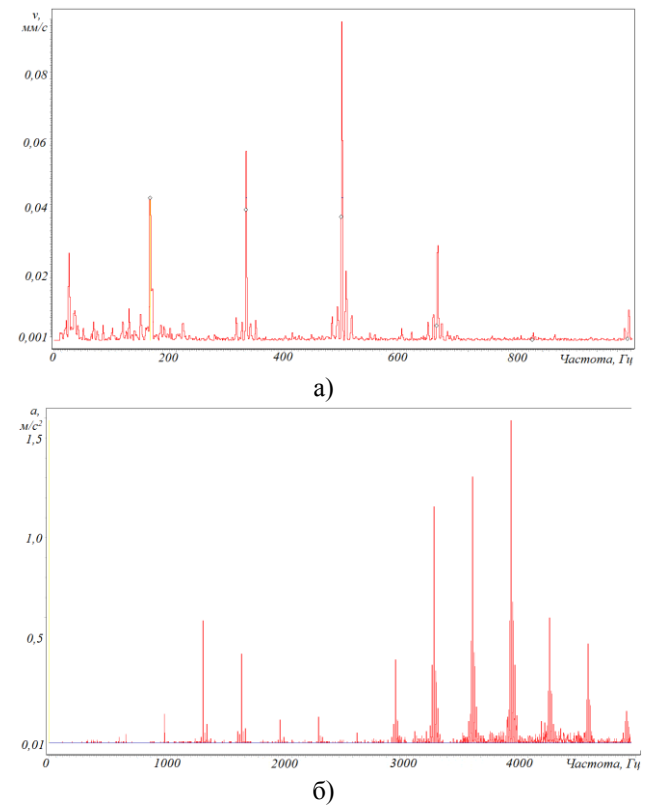


Рис. 3. Спектрограммы виброскорости (а) и виброускорения (б) подшипниковых узлов шпинделя станка GLS-200M

Установленные диагностические признаки имеют линейную зависимость относительно обратной частоты вращения шпинделя – первой гармоники:

- наличие гармонических составляющих из-за ослабления посадки или зазоров;

- частота гармоник соответствующая перекатыванию тел качения по наружному кольцу шарикового радиально-упорного подшипника 7020A5 практически совпадала с 10-й гармоникой оборотной частоты вращения шпинделя, что затруднило однозначную постановку диагноза, для точного диагноза необходим анализатор вибрации с числом линий 6400 и более;

- при частоте вращения 500 об/мин и 1000 об/мин значения виброускорения нестабильны;

- при повышении частоты вращения происходит модуляция вибрационного сигнала частотой вращения сепаратора – появляются боковые полосы возле гармоник.

Дополнительным диагностическим признаком явилась повышенная амплитуда высших гармоник, что является следствием развивающегося повреждения [13]. Малые значения составляющих объясняются затуханием вибрационного сигнала в корпусных деталях и начальной стадией развития повреждения. Поставленный диагноз:

- состояние подшипникового узла шпинделя – плохое, необходим ремонт;

- степень повреждения – переход от начального к развитому повреждению;

- возможные неисправности: увеличенная осевая игра или радиальный зазор, ослабление посадки подшипника, начальная стадия повреждения сепаратора;

- принятое решение – начать подготовку к ремонту (замене подшипниковых узлов) и продолжить наблюдение за техническим состоянием подшипников шпинделя.

Измерения, проведенные через месяц работы станка, показали увеличение значений параметров вибрации в 2,5...3,0 раза. Относительная оценка, в данной ситуации, согласно правилам вибродиагностики [5] соответствует изменению категории технического состояния. Этот диагноз подтверждался появлением в спектре ударного характера колебаний. В наибольшей степени диагностические признаки повреждений проявлялись в осевом направлении.

При разборке блока подшипников в смазке присутствовали следы окисления – возможно из-за попадания конденсата в сма-

зочный материал. Корпусные детали имели следы ослабления посадки подшипников. На роликовом подшипнике 3018 повреждений не обнаружено. При осмотре радиально-упорных шарикоподшипников 7020 установлено (рис. 4):

- один из подшипников при повороте от руки издавал лёгкие щелчки, после промывки подшипника щелчки исчезли;

- наружное кольцо - следы проворота по посадочному диаметру в корпусе (рис. 4а);

- наружное кольцо - следы проворота по торцевым поверхностям (рис. 4б);

- наружное кольцо – не плотное прилегание дистанционного кольца (рис. 4в);

- беговые дорожки - следы окислительного износа и микроцарапины расположенные по направлению движения, макроповреждений не обнаружено;

- сепаратор – следы накопления окисленного смазочного материала в окнах сепаратора;

- тела качения – следы окисления в виде полосы светло коричневого цвета на одном, нескольких или всех шариках комплекта подшипника;

- внутреннее кольцо - ослабление посадки на валу (рис. 4г).

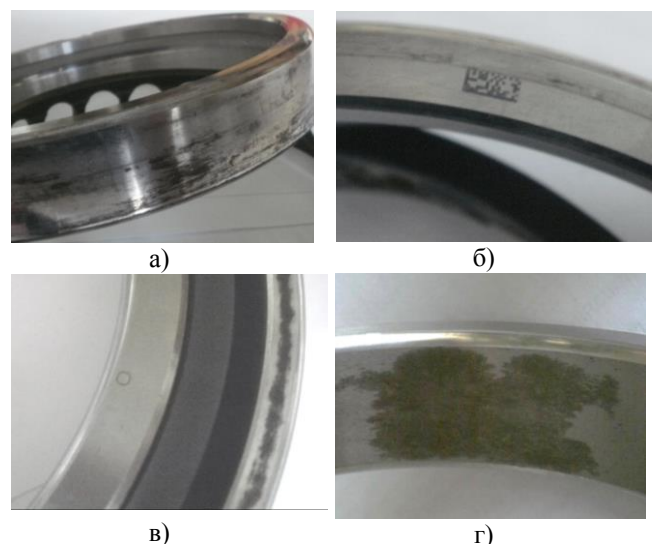


Рис. 4. Визуальное проявление повреждений элементов подшипника 7020: а) следы проворота по посадочному диаметру наружного кольца; б) следы проворота по торцевой поверхности наружного кольца; в) не плотное прилегание дистанционного кольца к наружному кольцу; г) ослабление посадки внутреннего кольца на валу

Проведенный анализ следов повреждений позволил синтезировать две взаимосвязанных причины развития неисправности: отклонения в точности монтажа, что проявилось в увеличении осевой вибрации; накопление продуктов окисления в окнах сепараторов, что приводит к нарушению свободы вращения тел качения. Причиной повышенной вибрации подшипникового узла шпинделя стало вращение тел качения по одной оси при фиксации тел качения из-за накопления продуктов износа смазочного материала в окнах сепаратора. Колебания наиболее загрязнённого шарикоподшипника передавались по валу относительно податливой «О»-образной пары на роликовый подшипник, имеющий более строгие допуски по возможности компенсации угловых отклонений, что приводило к повышению вибрации в точке 2.

Замена подшипников проведена своевременно, повреждений на сопрягаемых деталях не появилось. Отсутствие макроповреждений на деталях подшипников позволяет их использование в качестве резерва после промывки.

Таким образом, установлены комплексные возможности диагностических подходов: органолептического метода по распознаванию отклонений в техническом состоянии, измерения параметров вибрации и спектрального анализа по оценке технического состояния, принятия решений по своевременному проведению ремонта, визуального осмотра при определении причин повреждений. Полученные данные могут быть использованы при разработке моделей, учитывающих одновременное влияние нескольких причин возникновения и развития повреждений. Установлена необходимость использования анализаторов вибрации с большим разрешением (6400 линий и более), а также многоканальной параллельной записи вибрационных сигналов.

Список литературы

1. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков. / С.С. Кедров, М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
2. Аршанский, М.М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. / М.М. Аршанский, В.П. Щербаков, М.: Машиностроение, 1988. – 135с.
3. Фельдштейн, Е.Э. Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. — 3-е изд., доп. — Минск: Новое знание, 2007. — 299 с.
4. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. / А.Р. Ширман, А.Д. Соловьев, – Москва, 1996. – 276 с.
5. Розенберг Г.Ш. Вибродиагностика / Под ред. Г.Ш. Розенберга СПб: ПЭИПК, 2003. –284с.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. Ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1 В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829с.
7. Система мониторинга вибраций (VCM) для станков с ЧПУ http://www.omative.com/image/users/173890/ftp/my_files/Russian/Documents/TechSpec_Config/TechSpec_for_VCM_Russian.pdf
8. Systèmes de surveillance automatique en usinage: Moyens et methods http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52148/a_IU3P65K3.pdf?sequence=1.
9. Surveillance vibratoire et maintenance prédictive <http://silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/r6100.pdf>
10. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01101528/document>
11. Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660867/document>
12. Сидоров В.А. Вибродиагностика бесцентровых токарных станков / В.А. Сидоров, А.Л. Нестеров // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов, серия Металлообработка», №2 (134) 2011. С. 70 – 74.
13. Молчанов А.Д. Практическая виброметрия металлорежущих станков / А.Д. Молчанов, В.А. Сидоров // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. - № 1(11)'2014. – Донецьк, 2014. – С. 165-172
14. Писарев, В.И., Ваганов А.А., Денисенко А.Ф., Тютюрев И.О. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16. – 2014. – №1(2). – С. 508–514.
15. Лукина, С.В. Методика оптимизации производственной деятельности промышленного предприятия на основе комплекса прогностических

моделей формирования и выбора проектных инновационных решений в области высокотехнологичных производств // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 1(32). – С. 125–129.

References

1. Kedrov, S.S. Kolebaniia metallovezhushchikh stankov. / S.S. Kedrov, M.: Mashinostroenie, 1978. – 199 s.
2. Arshanskii, M.M. Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'iu obrabotki na metallovezhushchikh stankakh. / M.M. Arshanskii, V.P. Shcherbakov, M.: Mashino-stroenie, 1988. – 135s.
3. Fel'dshtein, E.E. Obrabotka detalei na stankakh s ChPU: ucheb. posobie / E.E. Fel'dshtein, M.A. Kornievich. — 3-e izd., dop. — Minsk: Novoe znanie, 2007. — 299 s.
4. Shirman, A.R. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoianiia mekhanicheskogo oborudovaniia. / A.R. Shirman, A.D. Solov'ev, – Moskva, 1996. – 276 s.
5. Rozenberg G.Sh. Vibrodiagnostika / Pod red. G.Sh. Rozenberga - SPb: PEIPK, 2003. – 284s.
6. Nerazrushaiushchii kontrol': Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. Red. V.V. Kliueva. T. 7: V 2 kn. Kn. 1 V.I. Ivanov, I.E. Vlasov. Metod akusticheskoi emissii / Kn. 2: F.Ia. Balitskii, A.V. Barkov, N.A. Barkova i dr. Vibrodiagnostika. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 829 s.
7. Sistema monitoringa vibratsii (VCM) dlia stankov c ChPU http://www.omative.com/image/users/173890/ftp/my_files/Russian/Documents/TechSpec_Config/TechSpec_for_VCM_Russian.pdf
8. Systèmes de surveillance automatique en usinage: Moyens et methods http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52148/a_IU3P65K3.pdf?sequence=1.
9. Surveillance vibratoire et maintenance prédictive <http://silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/r6100.pdf>
10. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01101528/document>
11. Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660867/document>
12. Sidorov V.A. Vibrodiagnostika bestsentrovnykh tokarnykh stankov / V.A. Sidorov, A.L. Nesterov // Mezhdunarodnyi informatsionno-tekhnicheskii zhurnal «Oborudovanie i instrument dlia professionalov, seriia Metalloobrabotka», №2 (134) 2011. – S. 70 – 74.
13. Molchanov A.D. Prakticheskaya vibrometriia metallovezhushchikh stankov / A.D. Molchanov, V.A. Sidorov // Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu. Seriia: Mashinobuduvannia i mashinoznavstvo. - № 1(11)'2014. – Donets'k, 2014. – S. 165-172
14. Pisarev, V.I., Vaganov A.A., Denisenko A.F., Tituterev I.O. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont me-talloobrabatyvaiushchikh stankov s ChPU na osnove bezrazbornoi diagnostiki tekhnicheskogo sostoianiia // Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, tom 16. – 2014. – №1(2). – S. 508–514.
15. Lukina, S.V. Metodika optimizatsii proizvodstvennoi deiatel'nosti promyshlennogo predpriiatiia na osnove kompleksa prognosticheskikh modelei formirovaniia i vybora proektnykh innovatsionnykh reshenii v oblasti vysokotekhnologichnykh proizvodstv // Vestnik MGTU «Stankin». – 2015. – № 1(32). – S. 125–129).

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №1(9) 2018

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.
