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

№ 1(17)
2020

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 2020» (7 – 11 сентября 2020 года)*

Севастополь 2020

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

СОДЕРЖАНИЕ

Новиков П.А., Сидоров Д.Е. Методика проектирования и расчета конструкций деформирующе-режущих метчиков.....	4
Левченко Е.А., Покинтелица Н.И. Формирование микропрофиля поверхности при вибрационном выглаживании.....	10
Братан С.М., Харченко А.О., Владецкий Е.А. Модернизация технологического оборудования для качественной обработки деталей в плавучих мастерских	15
Вовк Л.П., Гусев В.В., Мельникова Е.П. Численно-аналитический анализ влияния параметров контактного взаимодействия на процесс финишной абразивной обработки	21
Ямников А.С., Сафарова Л.Л. Совершенствование технологии обработки зеркала цилиндра	27
Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Обеспечение качества поверхности при абразивной обработке полимеркомпозитных деталей	34
Братан С.М., Харченко А.О., Часовитина А.С. Анализ и моделирование закономерностей изменения размеров профилей абразивных зерен и площадок износа в процессе шлифования.....	43
Рахимьянов Х.М., Василевская С.И., Рахимьянов К.Х. Изучение процессов комбинируемой прошивки отверстий на основе системного анализа	49

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)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHOV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
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)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Novikov P.A., Sidorov D.E. Design procedure and calculation of deforming-cutting taps.....	4
Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I. Formation of the surface micro-profile during vibration burnishing	10
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. Modernization of technological equipment for quality treatment of parts in floating workshops.....	15
Vovk L.P., Gusev V.V., Melnikova E.P. Numeral-analytical analysis of influence of parameters of pin co-operation on process of finish abrasive treatment	21
Yamnikov A.S., Safarova L.L. Improvement of cylinder mirror processing technology.....	27
Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Surface quality assurance during abrasive treatment of polymer composite parts	34
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Analysis and modeling of patterns of changes in the size of profiles of abrasive grains and platforms wear in the grinding process	43
Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I., Rakhimyanov K. Kh. Study of the processes of combined portion of holes based on system analysis.....	49

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

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

УДК 621.9.022.2

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ДЕФОРМИРУЮЩЕ-РЕЖУЩИХ МЕТЧИКОВ

П.А. Новиков¹, Д.Е. Сидоров¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье приведена методика проектирования и расчета конструкций деформирующе-режущих метчиков. Предложенный алгоритм проектирования содержит основные этапы характерные для традиционного инструмента, однако в каждом имеются особенности и уточнения, обусловленные конструктивными особенностями деформирующе-режущих метчиков, к которым относится наличие деформирующих и режущих элементов на рабочей части. Представленная методика является конструкторским этапом в производстве инструмента, за которым следует проработка изделия на технологичность. Развитие рассмотренного вопроса возможно в учете влияния толщины нанесенного износостойкого слоя на размеры рабочих элементов инструмента, а также влияние динамических явлений на прочностные характеристики метчиков.

Ключевые слова: проектирование, расчет, инструмент, деформирующе-режущие метчики.

DESIGN PROCEDURE AND CALCULATION OF DEFORMING-CUTTING TAPS

P.A. Novikov¹, D.E. Sidorov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the methods of designing and calculation of deforming-cutting taps constructions. The proposed design algorithm contains the main stages typical of traditional tools, but each has features and clarifications due to the design features of deforming-cutting taps, which includes the presence of deforming and cutting elements on the working part. The presented technique is a design stage in tool production, which is followed by working out the product for manufacturability. Progress of the considered issue is possible in view of the impact of the thickness of the applied wear-resistant layer on the size of the working elements of the tool, as well as the impact of dynamic phenomena on the strength characteristics of taps.

Keywords: design, calculation, tool, deforming-cutting taps.

В настоящее время для проектирования резьбонарезного инструмента используются методики [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], регламентированные соответствующими ГОСТами и стандартами. В соответствии с существующими рекомендациями для проектирования метчиков необходимо выполнить следующие мероприятия:

1) определить параметры внутренней резьбы и допуски на нарезание резьбы метчиком;

2) выбрать тип метчика, определить число метчиков в комплекте и рассчитать распределение нагрузки между черновыми, получистовыми и чистовыми метчиками;

3) назначить схему резания и определить размеры рабочей части метчика;

4) произвести расчет дополнительных элементов конструкции метчиков (форму, размеры стружечной канавки, геометрию режущих элементов и размеры хвостовой части).

Для повышения точности внутренней резьбы и надежности операции резьбонарезания были предложены конструкции деформирующе-режущего инструмента: метчиков [8, 9] и резбовых фрез [10]. Принцип действия указанного инструмента основан на последовательном пластическом деформировании обрабатываемого материала и

его срезании, при этом геометрические параметры слоя, испытывающего комбинированное воздействие, определяются формой и размерами рабочей части инструмента, содержащей деформирующие и режущие элементы.

Для проектирования конструкции и расчета элементов деформирующе-режущих метчиков в силу их конструктивных особенностей необходимо ввести некоторые корректировки и уточнения в ранее приведенную методику. Например, при определении конструкции таких метчиков будет отсутствовать второй этап, так как тип метчика предварительно определен – в данном случае метчики принадлежат к машинно-ручным универсальным с точки зрения обработки глухих и сквозных отверстий одним инструментом, при этом также известна схема формообразования.

Соответственно, целью статьи является предложение методики проектирования и расчета конструкций деформирующе-режущих метчиков.

При проектировании конструкций и расчете деформирующе-режущих метчиков необходимо выполнить следующие этапы расчета:

Этап 1. Определение размеров внутренней резьбы и допусков на нее, для получения резьбы метчиком.

Параметры обрабатываемой резьбы нормализованы и определяются согласно требованиям стандартов [11, 12, 13]. Допуски на размеры выбираются в зависимости от типоразмера резьбы, их определение сводится к выбору значений из справочной литературы. Кроме параметров, относящихся непосредственно к характеристикам, связанным с профилем резьбы, задаются также длина нарезаемой резьбы и тип отверстия – глухое или сквозное.

Этап 2. Определение размеров рабочей части деформирующе-режущего метчика.

При определении рабочей части деформирующе-режущих метчиков необходимо рассчитать и назначить следующие параметры его конструкции:

а) диаметр метчика по переднему торцу d_3 (диаметр заборной части), который рас-

считывается в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия по следующей зависимости [14]:

$$d_3 = D_{om.min} - 0,1, \quad (1)$$

где $D_{om.min}$ – минимально допустимый диаметр обрабатываемого отверстия;

б) угол φ заборного конуса, определяется по выражению:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{a_\varepsilon z}{P} \right), \quad (2)$$

где a_ε – величина деформации на единичном зубе метчика; z – количество формирующих перьев метчика; P – шаг резьбы;

в) длина заборного конуса метчика l_3 , рассчитывается по формуле:

$$l_3 = \frac{d - d_3}{2 \cdot \tg \varphi}, \quad (3)$$

где d – наружный диаметр метчика;

г) величины осевого затылования резьбы метчика k_1 и k_2 определяются согласно зависимостям:

$$k_1 = \frac{\omega}{2\pi} (P_1 - P) \text{ и } k_2 = \frac{\omega}{2\pi} (P - P_2), \quad (4)$$

ω – угол раскрытия, $\omega = \frac{360^\circ}{n}$ (n – число граней метчика); P – шаг основной резьбы; P_1 и P_2 – ход каждого витка затылующих правой и левой резьб соответственно.

д) угол наклона режущих и деформирующих кромок λ (рис. 1), рассчитывается согласно соотношению:

$$\lambda = \arctg \left(\left(\frac{d_1}{2} + \frac{a_{cn}}{2\pi} \omega \right) \frac{\sin \left(\frac{2\pi}{a_{cn}} \varepsilon \right) \cos \varphi}{P} \right), \quad (5)$$

здесь a_{cn} – постоянная спирали; ε – величина коррекции зуба; φ – угол заборного конуса;

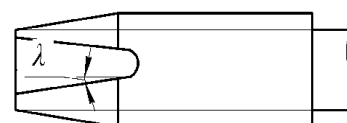


Рис. 1. Фрагмент рабочей части деформирующе-режущего метчика с обозначением угла наклона

λ заборного конуса/

е) площадь стружечной канавки $S_{стр.кан.i}$ определяется по зависимости:

$$S_{стр.кан.i} = \frac{S_{ср.i} V}{V_z k}, \quad (6)$$

в зависимости $S_{ср.i}$ – площадь среза материала i -м режущим зубом метчика; V – скорость рабочего движения инструмента; V_z – скорость осевого перемещения стружки; k – коэффициент заполнения стружечной канавки.

Этап 3. Определение дополнительных элементов конструкции метчика (формы и размеров стружечной канавки, геометрии формообразующих элементов, размеров хвостовой части):

а) к диаметральным размерам относятся – наружный d , средний d_2 и внутренний d_1 диаметры резьбы; размеры профиля – высота профиля H , шаг резьбы P и угол профиля, которые задаются, исходя из конструктивных размеров резьбы, для получения которой проектируется метчик. Так как параметры резьбы стандартизованы, соответственно и размеры резьбы определяются согласно ГОСТам, в зависимости от типа резьбы. Однако, для случая проектирования деформирующе-режущих инструментов, где калибрующая часть метчика формирует резьбу посредством пластической деформации обрабатываемого материала, имеет место эффект восстановления поверхности вследствие наличия остаточных упругих деформаций, из-за чего средний d_2 и наружный d диаметры резьбы метчика изготавливаются с учетом этого эффекта. Рабочие диаметры резьбы метчика принимаются согласно ГОСТ 18842-73;

б) назначение допусков на размеры резьбы метчика. Значение допусков на рабочие размеры резьбы метчика определяются согласно ГОСТ 18843-73.

Допуски на диаметральные размеры метчика и параметры профиля резьбы назначаются, исходя из точности нарезаемой резьбы. Соотношения между степенью точности получаемой резьбы и точностью

метчика представлено в таблице 1.

в) определение размеров калибрующей части метчика. Диаметр калибрующей части определяется диаметром резьбы изделия. Длина калибрующей части $l_{кал}$ задается, исходя из диаметра d метчика. Для малых диаметров $l_{кал} = (1,2 \div 1,5)d$; для резьб большого диаметра $l_{кал} \approx (0,6 \div 0,8)d$.

Таблица 1. Степень точности резьбы метчика

Степень точности нарезанной резьбы	4H5H	5H6H	6H	6H и 7H	6G	6H и 7H
Степень точности метчика	H1	H2	H3	H4	G1	G2

г) назначение углов резания – переднего γ и угла обратного резания η (рис. 2).

Например, при обработке алюминиевых сплавов рекомендованные углы γ составляют $\gamma = 16^\circ \dots 20^\circ$. Угол η должен лежать в пределах $85^\circ \dots 90^\circ$.

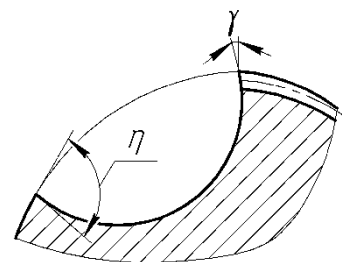


Рис. 2. Профиль стружечной канавки метчика

д) расчет хвостовых элементов метчика. Для передачи крутящего момента и закрепления инструмента в патроне метчик изготавливают с цилиндрической формой хвостовика и квадратом на конце. Для возможности использования инструмента с быстросъемным патроном на хвостовике выполняется радиусная канавка R (рис. 3).

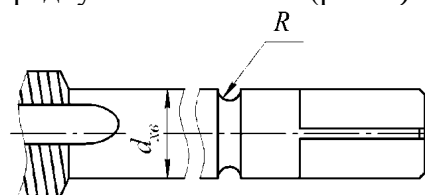


Рис. 3. Конструктивное исполнение хвостовика метчика с квадратом

Диаметр хвостовика $d_{шв}$ метчиков

МЗ...М6 назначается на 0,25...1,5 мм меньше внутреннего диаметра резьбы. Длина хвостовика зависит от диаметра и назначения метчика и выбирается согласно рекомендациям ГОСТа.

е) определение прочностных характеристик проектируемого метчика.

Разрушающий крутящий момент $M_{кр.раз}$ зависит от числа граней метчика и величины затылования k_1 и определяется по следующим зависимостям [15]:

– для трехгранных метчиков

$$M_{кр.раз} = \frac{\left(\frac{(d_1 - k_1)^4 \pi}{16} - 0,75k_1^2 \pi (d_1 - k_1)^2 - \right) \times (-0,75k_1^2 \pi) \times (d_1 - 5k_1) [\sigma_s]}{(d_1 - 3k_1)^2}; \quad (7)$$

– для пятигранных метчиков

$$M_{кр.раз} = \frac{\left(\frac{(d_1 - k_1)^4 \pi}{16} - 1,75k_1^2 \pi (d_1 - k_1)^2 - \right) \times (-5,25k_1^2 \pi) \times (d_1 - 5k_1) [\sigma_s]}{(d_1 - 3k_1)^2}; \quad (8)$$

– для шестигранных метчиков

$$M_{кр.раз} = \frac{\left(\frac{(d_1 - k_1)^4 \pi}{16} - 2,43k_1^2 \pi (d_1 - k_1)^2 - \right) \times (-10,66k_1^2 \pi) \times (d_1 - 5k_1) [\sigma_s]}{(d_1 - 3k_1)^2}; \quad (9)$$

где d_1 – внутренний диаметр метчика; $[\sigma_s]$ – предел прочности.

Исходя из конструкции метчика, согласно зависимостям приведенным в [16] рассчитывается момент резания $M_{кр.}$. Определяется коэффициент запаса прочности:

$$K_0 = \frac{M_{кр.раз}}{M_{кр.}}. \quad (10)$$

Коэффициент запаса должен быть больше 1, в противном случае эксплуатация метчика невозможна из-за его недостаточной прочности. В идеальном случае коэффициент K_0 должен быть равен или пре-

вышать значения, представленные в таблице 2, что гарантирует ожидаемую стойкость инструмента.

Для анализа влияния изгибающих моментов $M_z(x)$ и $M_y(x)$ на прочность спроектированного метчика, предлагается определять необходимый момент сопротивления $W_z = W_y = W$ и сравнивать его с допустимым $[W]$. Момент сопротивления определяется как

$$W = \frac{M_z(x) + M_y(x)}{[\sigma_s]}. \quad (11)$$

Условие обеспечения прочности при изгибе

$$[W] > W, \quad (12)$$

причем, $[W] = \pi d_{хв}^3 / 32$.

ж) расчет диаметра отверстия под нарезание резьбы.

Диаметр отверстия под нарезание резьбы определяется из условия недопущения заклинивания инструмента при его работе, что может произойти в случае, когда последним формирующим зубом на заборном конусе метчика будет деформирующий зуб (зубья). Исходя из этого, объем вытесняемого материала должен быть равен объему свободного пространства между зубьями.

Таблица 2. Значения коэффициентов запаса прочности K_0 метчиков в зависимости от твердости обрабатываемого материала.

Типоразмер	Твердость обрабатываемого материала					
	HB 70	HB 84	HB 97	HB 124	HB 155	HB 183
МЗ	4,50	4,40	4,27	3,72	3,68	3,06
М4	6,05	5,60	5,35	4,0	3,82	3,08
М5	9,35	8,30	7,70	5,75	5,35	4,08
М6	11,0	9,50	8,30	6,0	5,40	4,10

Тогда диаметр отверстия под нарезание резьбы рассчитывается по формуле:

$$D_{отв} = \frac{\sqrt[3]{108b - 64d_1^3 + 12\sqrt{81b^2 - 96d_1^3b}}}{6} + \frac{8d_1^2}{3\sqrt[3]{108b - 64d_1^3 + 12\sqrt{81b^2 - 96d_1^3b}}} + \frac{d_1}{3}, \quad (13)$$

где $b = S_{cp.i} \pi d_2$, $S_{cp.i}$ – площадь деформируемого слоя; d_2 – средний диаметр метчика; d_1 – внутренний диаметр метчика.

Представленная методика отображает основные этапы в проектировании конструкций и прочностного расчета деформирующе-режущих метчиков. Следующим шагом в подготовке производства метчиков является отработка конструкции на технологичность, вносящая в конструкцию инструмента свои рекомендации и уточнения.

Развитие вопроса проектирования и расчета конструкций деформирующе-режущих метчиков может реализоваться в учете влияния толщины нанесенного износостойкого слоя на размеры рабочих элементов инструмента, а также влияние динамических явлений, наблюдаемых при резбонарезании, на прочностные характеристики метчиков.

Список литературы

1. Древал А.Е. Расчет и конструирование метчиков: Учебное пособие по курсу «Режущий инструмент»/ А.Е. Древал. - М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1979. – 31 с.
2. Зотов Ю.Н. Проектирование резбобразующих инструментов: учебное пособие/ Ю.Н. Зотов. – Горький: ГПИ им. А. А. Жданова, 1978г. – 77 с.
3. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов/ Г.Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
4. Инструкция по проектированию метчиков/ М.: НИИ АВТОПРОМ, 1969. – 21 с.
5. Канареев Ф.Н. Новые конструкции деформирующих метчиков/ Ф.Н. Канареев // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. – Вып. 108. – С. 41 – 46.
6. Лашнев С.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ/ С.И. Лашнев, М.И. Юликов. – М.: Машиностроение, 1975. – 392 с.
7. Проскуряков Ю.Г. Расчет диаметральных исполнительных размеров бесстружечных метчиков/ Ю.Г. Проскуряков, В.А. Кохановский //СТИН. – 1973. – №8. С. 35 – 38.
8. Канареев Ф.М. Підвищення точності внутрішніх різьб (М3...М6) та продуктивності їх формоутворення в деталях з алюмінієвих сплавів/ Ф.М. Канареев, П.А. Новиков, О.О. Харченко// Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні

науки. – Житомир, 2012. – Вип. № 1(60) – С. 14 – 20.

9. Bratan, S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys/ S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin// Procedia Engineering, vol. 150 (2016) pp. 802–808 (DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.115)
10. Novikov, P. Synthesis of a deforming-cutting mill design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 709 (2020) pp. 044116. (DOI=10.1088/1757-899X/709/4/044116)
11. ГОСТ 16093-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором. – Взамен ГОСТ 16093-81; введ. 2005 – 07 – 01. – М.: Стандартинформ. – 45 с.
12. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. – Взамен ГОСТ 24705-81; введ. 2005 – 07 – 01. – М.: Стандартинформ. – 16 с.
13. ГОСТ 8724-2002. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Диаметры и шаги. – Взамен ГОСТ 8724-81; введ. 2004 – 01 – 01. – М.: Стандартинформ. – 9 с.
14. Фрумин К.Л. Высокопроизводительный резбобразующий инструмент/ Фрумин К.Л. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
15. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики/ В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 166 с.
16. Братан С.М. Моделирование силовых взаимодействий при формообразовании резбовых поверхностей режуще-деформирующими метчиками/ С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков// Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. №82. – С. 208 – 215.

References

1. Dreval' A.E. Raschet i konstruirovaniye metchikov: Uchebnoye posobie po kursu «Rezhushchiiy instrument»/ A.E. Dreval'. - M.: Izd-vo MVTU im. N.E. Bauman, 1979. – 31s.
2. Zotov Iu.N. Proektirovaniye rez'boob-razuiushchikh instrumentov: uchebnoye posobie/ Iu.N. Zotov. – Gor'kii: GPI im. A. A. Zhdanova, 1978g. – 77 s.
3. Inozemtsev G.G. Proektirovaniye metallorazhushchikh instrumentov/ G.G. Inozemtsev. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 272 s.
4. Instruktssiya po proektirovaniyu metchikov/ M.: NII AVTOPROM, 1969. – 21s.
5. Kanareev F.N. Novye konstruktssii deformiruiushchikh metchikov/ F.N. Kanareev // Vestnik SevNTU. Ser. Mashinopriporostroenie i transport: sb. nauch. tr. — Sevastopol', 2010. – Vyp. 108. – S. 41 – 46.
6. Lashnev S.I. Raschet i konstruirovaniye metallorazhushchikh instrumentov s primeneniem EVM/ S.I. Lashnev, M.I. Iulikov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 392 s.

7. Proskuriakov Iu.G. Raschet diametral'nykh ispolnitel'nykh razmerov besstruzhech-nykh metchikov/ Iu.G. Proskuriakov, V.A. Kokhanovskii //STIN. – 1973. – №8. S. 35 – 38.
8. Kanareev F.M. Pidvishchennia tochnosti vnutrishnikh riz'b (M3...M6) ta produktivnosti ikh formoutvorennia v detaliakh z aliuminievykh splaviv/ F.M. Kanareev, P.A. Novikov, O.O. Kharchenko// Visnik Zhitomir'skogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: tekhnichni nauki. – Zhitomir, 2012. – Vip. № 1(60) – S. 14 – 20.
9. Bratan, S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys/ S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin// Procedia Engineering, vol. 150 (2016) pp. 802–808 (DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.115)
10. Novikov, P. Synthesis of a deforming-cutting mill design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 709 (2020) pp. 044116. (DOI=10.1088/1757-899X/709/4/044116)
11. GOST 16093-2004. Osnovnye normy vzaimozameniaemosti. Rez'ba metricheskaia. Dopuski. Posadki s zazorom. – Vzamen GOST 16093-81; vved. 2005 – 07 – 01. – M.: Standartinform. – 45 s.
12. GOST 24705-2004. Osnovnye normy vzaimozameniaemosti. Rez'ba metricheskaia. Osnovnye razmery. – Vzamen GOST 24705-81; vved. 2005 – 07 – 01. – M.: Standartinform. – 16 s.
13. GOST 8724-2002. Osnovnye normy vzaimozameniaemosti. Rez'ba metricheskaia. Diametry i shagi. – Vzamen GOST 8724-81; vved. 2004 – 01 – 01. – M.: Standartinform. – 9 s.
14. Frumin K.L. Vysokoproizvoditel'nyi rez'boobrazuiushchii instrument/ Frumin K.L. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 183 s.
15. Men'shakov V.M. Besstruzhechnye metchiki/ V.M. Men'shakov, G.P. Uralpov, B.C. Sereda. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 166 s.
16. Bratan S.M. Modelirovanie silovykh vzaimodeistvii pri formoobrazovanii rez'bovykh po-verkhnostei rezhushche-deformiruiushchimi metchikami/ S.M. Bratan, F.N. Kanareev, P.A. Novikov// Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – Khar'kov: NTU «KhPI», 2012. – Vyp. №82. – S. 208 – 215.

УДК 629. 923. 1

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ

Е.А. Левченко¹, Н.И. Покинтелица¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен комплексный характер исследований возможностей получения покрытий механохимическим способом на станках вибрационного типа. Представлены результаты единого подхода при определении режимов обработки на технологических операциях, влияние условий обработки на параметры качества ответственных деталей в условиях трения, переменных нагрузок, коррозионных сред. Проведен анализ изучения закономерностей совмещенного процесса вибрационной обработки и формирования защитного покрытия, исследование кинетики и механизма формирования покрытия при разработке технологического процесса с наиболее оптимальными режимами, позволяющими интенсифицировать совмещенный процесс резания и нанесения защитных покрытий на детали из различных материалов.

Ключевые слова: покрытия, показатель качества, процесс резания, вибрационная обработка.

FORMATION OF THE SURFACE MICRO-PROFILE DURING VIBRATION BURNISHING

Е.А. Levchenko¹, N.I. Pokintelitsa¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The complex nature of studies of the possibilities of obtaining coatings by a mechanochemical method on vibration-type machines is considered. The results of a unified approach in determining the modes of processing in technological operations, the influence of processing conditions on the quality parameters of critical parts under conditions of friction, variable loads, and corrosive environments are presented. The analysis of the study of the regularities of the combined process of vibration treatment and the formation of a protective coating, the study of the kinetics and the mechanism of formation of the coating in the development of a technological process with the most optimal modes, allowing to intensify the combined process of cutting and applying protective coatings on parts made of various materials.

Keywords: coatings, quality index, cutting process, vibration processing.

Введение

Металлические покрытия на поверхности металлических и неметаллических изделий (стекло, пластмассы, керамика и др.) наносят для защиты их от коррозии, повышения твердости, электропроводности и износоустойчивости и придания им красивого внешнего вида. Покрытия наносят гальваническим, механическим (плакирование), диффузионным методами; распылением (металлизация) и погружением в расплавленный металл (горячий метод) [1 – 5].

Гальванический способ нанесения покрытий на поверхность изделий состоит в

выделении и осаждении металлов из водных растворов их солей при пропускании постоянного электрического тока через электролит.

В качестве электролита применяют растворимые соли тех металлов, которые наносят на поверхность изделий (NiSO_4 , CuSO_4 , ZnSO_4).

Металлическое покрытие образует осадки разнообразного строения (гладкие мелкокристаллические, крупнокристаллические и дендритообразные) [6].

До последнего времени осаждение металлов на поверхность изделий осуществ-

ляли при электролизе серноокислых и цианистых электролитов [7 – 9]. Серноокислые электролиты обладают низкой рассеивающей способностью и осадки имеют крупнокристаллическую структуру. Цианистые электролиты токсичны, так как при электролизе выделяются парообразные и газообразные цианистые соединения. Расход энергии при применении цианистых электролитов больше, чем при применении серноокислотных.

В настоящее время применяют электролиты, которые позволяют повысить скорость осаждения металла по сравнению с сульфатными. Однако они не заменяют цианистые электролиты, так как при их использовании осадки обладают наиболее высокими коррозионными и механическими свойствами.

Результаты и обсуждение

Из-за шероховатости и волнистости поверхности контакт обрабатываемой поверхности и шаров различного диаметра будет дискретным. Вначале контактирование осуществляется на самых высоких микронеровностях, расположенных на вершинах волн. Деформация элементов волнистости более жесткого материала при контакте с менее жестким металлом упругопластическая. Эта деформация приводит к возникновению площадок касания. Пластические деформации возникнут в зоне максимальных напряжений $p_{r\max} = HB$, где HB – твердость материала по Бринеллю при внедрениях индентора [10]:

$$\frac{h}{R} \geq 2,4(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E}\right)^2 \quad (1)$$

где h – сближение между поверхностями контактирующих тел;

R – шероховатость поверхности;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости материала.

Сближение между поверхностями контактирующих тел можно определить по следующей зависимости:

$$h = R \left(\frac{5\rho_c \cdot (1 - \mu^2) \cdot \Delta^v}{\vartheta \cdot (\vartheta - 1) \cdot k_1 \cdot E} \right) \cdot \frac{2}{2\vartheta + 1} \quad (2)$$

где ρ_c – контурное давление для упругого ненасыщенного контакта металлических твердых тел;

ϑ – вид обработки поверхности, в машиностроении для наиболее распространенных видов обработки $\vartheta = 2$;

Δ – комплексный параметр, характеризующий шероховатость поверхности, здесь $\Delta = R \max / (Rb^{1/\vartheta})$;

k_1 – постоянная интегрирования, зависящая от ϑ .

Площадь фактического контакта поверхностей состоит из множества дискретных малых площадок диаметром от 3 до 50 мкм, расположенных на различных высотах.

Между площадками касания имеются микрополости заполненные воздухом, продуктами изнашивания, химически активными растворами. В зонах касания в зависимости от механических свойств будет происходить смятие микронеровностей или их внедрение в поверхность более мягкого тела. Площадь фактического контакта возрастает при увеличении нагрузки, уменьшении шероховатости поверхности и росте радиуса закругления вершин ее неровностей. Эта площадь убывает с увеличением упругих характеристик, предела текучести материала и высоты неровностей поверхностей.

При вибрационной обработке в зависимости от формы контейнера, места расположения вибровозбудителя, режимов амплитуды и частоты – присутствует или отсутствует циркуляционная скорость, что сказывается на числе прямых или косых ударов. В одном случае вершина микрорельефа вдавливается, а во втором – сглаживается, раскатывается.

В зависимости от того какие удары нужны при формировании покрытия, следует не только подбирать величину давления обрабатываемого тела на поверхность, но и тип движения этого тела и обрабатываемого изделия.

К числу основных параметров процесса, определяющих технологические воз-

возможности метода, относятся амплитуда, частота колебаний рабочей камеры, объем загрузки, масса наполнителя.

Известно, что технологические возможности вибрационной обработки определяются характером взаимодействия обрабатываемой поверхности детали с рабочей средой и режимом обработки [3, 5].

Анализируя влияние каждого из перечисленных факторов на возможность нанесения металлического покрытия в процессе вибрационной обработки можно сделать вывод, что вибрационная обработка при совмещении с нанесением металлического покрытия представляет химико-механический процесс разрушения оксидов на обрабатываемой поверхности, процесса сглаживания микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды. Процесс сопровождается соударением, скольжением рабочей среды относительно поверхности обрабатываемой детали. Основная часть соударений происходит при тангенциальном нагружении, что способствует образованию ювенильных поверхностей и повышению адсорбционной способности. Образование металлического покрытия в среде рабочих тел (стеклянные и металлические шары) и металлического порошка происходит в результате сложения двух процессов ударного воздействия и химического воздействия рабочего раствора.

Основными параметрами этого процесса являются скорость и сила соударения частиц рабочей среды с поверхностью детали и контактное давление в зоне соударения.

Максимальное значение скорости частиц наполнителя [4] рассчитывается, по следующей зависимости

$$g_{\max} = A \cdot \omega = A \cdot 2\pi f = \frac{A \cdot 2\pi n}{60} \approx \frac{An}{10} \quad (3)$$

но на самом деле она идеализирована и может соответствовать только значению в местах контакта контейнера и единичных гранул.

Скорость гранул рабочей среды в других зонах контейнера учитывать коэффициентом K_g , который определяется следую-

щим образом: $K_g = \frac{a_g}{l_g}$ – коэффициент падения скорости по мере удаления от стенок контейнера.

Суммарную скорость, направленную по касательной к траектории, можно определять по зависимости:

$$g = \sqrt{A_y^2 \omega^2 \cos^2 \omega t + A_x^2 \omega^2 \sin^2 \omega t} \quad (4)$$

где A_y, A_x – амплитуда вертикального и горизонтального колебаний, мм;

ω – круговая частота колебаний частиц, 1/с.

Однако, следует помнить, что траектория движений вибрирующего контейнера в различных точках различна и, следовательно, воспользоваться этой зависимостью можно только с грубым приближением.

Силу соударения свободно загруженной детали с шарами наполнителя предлагается определять по зависимости:

$$P_{CB} = 6 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot g_{н.п.с.}^2 \cdot \sigma_s \cdot R_{ш} \cdot K_m \cdot K_q \cdot B}{K_2}} \quad (5)$$

где m – масса частиц рабочей среды, кг

$g_{н.п.с.}^2$ – скорость соударения, м/с;

$g_{н.п.с.} = g_{р.к.} \cdot K_g$;

σ_s – предел текучести материала детали, МПа;

$R_{ш}$ – радиус гранулы рабочей среды, м

K_2 – коэффициент, учитывающий многократное приложение нагрузки;

$K_2 = 1,3 - 1,6$

K_m – коэффициент одновременного действия столба частиц;

K_q – коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства среды;

B – коэффициент, учитывающий количество энергии удара гранулы, идущий на упругий отскок ее и на перемещение свободно загруженной детали.

$$B = \frac{5}{8} [1 - (1 + K)C]^2 + (1 - K^2)C \quad (6)$$

$$C = \frac{M}{m + M}$$

где M – масса детали;

m – приведенная масса гранулы среды;

C – коэффициент, учитывающий количество кинетической энергии удара, идущей на перемещение обрабатываемой детали

K – эмпирический коэффициент, учитывающий повторное попадание шара в одно и то же место, $K = 0,56$.

Однозначно понятно, что для обеспечения процесса механохимического покрытия необходимо разработка математической модели, описывающей процесс движения элементов рабочей среды как их совокупности в циркуляционном и послойном движении, а также движение единичных гранул контактирующих с поверхностью изделия и обеспечивающих в этом контакте нанесение равномерного покрытия.

Существенное значение на процесс схватывания будут оказывать контактные давления, которые зависят от масс гранулы и детали, материала детали, амплитуды колебаний, размера – радиуса гранулы и др. А производительность процесса неразрывно будет связана с частотой актов взаимодействия гранул и обрабатываемых изделий.

Качество формируемого металлического покрытия зависит от исходной шероховатости и активации поверхности обрабатываемого изделия. Образцы с исходной грубо обработанной поверхностью ($R_a \geq 12,5$ мкм) после нанесения металлического покрытия толщиной 8 – 10 мкм не имеют товарного вида, так как выявляют неравномерность микрошероховатости по всей поверхности образца. Кроме того, наличие загрязнений (ржавчины, масляных пятен) снижают качество обрабатываемой поверхности. Поэтому необходима предварительная вибрационная и абразивная обработка в растворах электролитов, которая как активизирует поверхность образцов, так и позволит создать микрошероховатость, достаточную для получения качественного металлического покрытия.

При вибрационной обработке, с использованием абразивного материала различной зернистости происходит периодически повторяющиеся и накладывающиеся друг на друга микроконтакты частиц рабочей среды и заготовок. В зависимости от режимов вибрационной обработки, свойств обраба-

тываемого материала (его структуры, твердости, пластичности), массы и формы обрабатываемых изделий, а также свойств абразивного материала, количественного и качественного состава химически активного раствора зависит микрорельеф и физико-механические свойства образующейся поверхности.

Формирование микрорельефа поверхности металла зависит от его твердости (НВ) и пластичности ($\delta, \%$). При этом, вследствие пластической деформации, твердость материала в зоне микрорезания увеличивается и превышает исходную.

С увеличением зернистости шлифовальных тел съём металла и величина микрошероховатости возрастают.

Установлено, что размер зерен шлифовальных тел в сочетании с режимами обработки является одним из основных факторов, определяющих как съём металла, так и микрошероховатость поверхности.

Для определения средней величины микрошероховатости (H_{cp}) в зависимости от механических и технологических параметров обработки предложена следующая зависимость:

$$H_{cp} = \frac{106k \cdot A \cdot \omega \cdot m \cdot M}{c \cdot \sigma_s \cdot \rho_x \cdot (m + M)} \quad (7)$$

где A – амплитуда колебаний, мм;

ω – частота колебаний, Гц;

m – приведенная масса шлифовальной гранулы, $г \cdot c^2 / cm$; M – приведенная масса детали, $г \cdot c^2 / cm$; c – коэффициент, учитывающий число одновременно работающих зерен; σ_s – прочность материала на растяжение, $(г \cdot c^2 / cm)$, МПа, ρ_x – диаметр лунки от внедрения абразивного зерна, см, k – абразивная способность зерна шлифовального тела.

Приведенные зависимости представлены для практического пользования. применимы для расчета шероховатости поверхности для группы деталей, геометрические параметры которых близки к геометрическим параметрам образцов, на которых изучались закономерности процесса вибрационной обработки.

Список литературы

1. Анпилогов В.А. Исследование влияния динамики массы загрузки и других факторов на интенсивность отделочных процессов объемной вибрационной обработки: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / В.А. Анпилогов. – Пермь, 2008. – 131 с.
2. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. - М.: Энергия, 1998. - 165 с.
3. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей / А.П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1996. – 134 с.
4. Бабичев А.П. Вибрационные станки для обработки деталей / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский, В.П. Устинов. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
5. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
6. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
7. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
8. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
9. Левченко Е.А. Использование механохимического метода обработки сталей на вибрационных станках / Е.А. Левченко, Ю.В. Дейкун // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Вып. № 4. – С. 44 – 48.
10. Дьяченко В.И. Исследование процесса вибрационной обработки / В.И. Дьяченко // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин: сб. науч. тр. ЦНИИТМ. – Ростов-на-Дону, 1968. – С. 42-48.

References

1. Anpilogov V.A. Issledovanie vliyaniya dinamiki massy zagruzki i drugih faktorov na intensiv-nost' otdelochnykh processov ob'emnoy vibra-cionnoj obrabotki: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / V.A. Anpilogov. – Perm', 2008. – 131 s.
2. Afanas'ev Yu.V. Ferrozondy. - M.: Energiya, 1998. - 165 s.
3. Babichev A.P. Vibracionnaya obrabotka detalej / A.P. Babichev. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 134 s.
4. Babichev A.P. Vibracionnye stanki dlya obra-botki detalej / A.P. Babichev, V.B. Trunin, Yu.M. Samodumskij, V.P. Ustinov. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 168 s.
5. Blekhan I.I. Vibracionnoe peremeshchenie / I.I. Blekhan, G.Yu. Dzhanelidze. – M.: Nauka, 1964. – 488 s.
6. Vinogradov V.N. Abrasive wear / Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 224 s.
7. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
8. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
9. Levchenko E.A. Ispol'zovanie mekhanohimicheskogo metoda obrabotki stalej na vibracionnyh stankah / E.A. Levchenko, Yu.V. Dejgun // Vestnik sovremennykh tekhnologij: sb. nauch. tr. Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet. – Seva-stopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2018. – Vyp. № 4. – С. 44 – 48.
10. D'yachenko V.I. Issledovanie processa vibraci-onnoj obrabotki / V.I. D'yachenko // Progressiv-nye metody otdelochnoj obrabotki detalej ma-shin: sb. nauch. tr. CNIITM. – Rostov-na-Donu, 1968. – S. 42-48.

УДК 621. 9-219.1-752

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В ПЛАВУЧИХ МАСТЕРСКИХ

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены результаты исследований и разработок в направлении модернизации технологического оборудования для качественной обработки деталей в условиях плавучих мастерских путем повышения виброустойчивости и снижения вредных воздействий от внешней среды (морского волнения) и соседнего работающего оборудования. Традиционные виброизолирующие опоры станков невозможно использовать на плавучих мастерских по причине потери ими функционирования в условиях качки плавучего основания и горизонтальных смещений под ее воздействием. Описаны новые эффективные варианты конструкций устройства виброзащиты прецизионных станков и опоры с активной виброизоляцией, позволяющие обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры станка при различных видах внешних воздействий.

Ключевые слова: плавучая мастерская, технологическое оборудование, виброзащита, активная виброизоляция, механо-гидравлическая опора.

MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR QUALITY TREATMENT OF PARTS IN FLOATING WORKSHOPS

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

Abstract

The article discusses the results of research and development in the direction of modernizing technological equipment for high-quality processing of parts in floating workshops by increasing vibration resistance and reducing harmful effects from the external environment (sea waves) and neighboring operating equipment. Traditional vibration isolation mounts of machine tools cannot be used in floating workshops due to their loss of functioning under the conditions of the floating base swinging and horizontal displacements under its influence. Described are new effective design options for the vibration protection device of precision machine tools and supports with active vibration isolation, allowing for automatic control of damping of the vibration isolation support of the machine tool under various types of external influences.

Keywords: floating workshop, technological equipment, vibration protection, active vibration isolation, mechano-hydraulic support.

В настоящее время для установки высокоточных, чувствительных к колебаниям оснований станков, а также многих станков общего назначения предпочтение отдается упругим виброизолирующим опорам. При таком способе установки монтаж станка производится во много раз быстрее, повышается качество обработанных поверхностей на прецизионных станках, снижается шум и запыленность воздуха в цехах. Такие опоры очень удобны при установке станков на перекрытиях верхних

этажей зданий, при перестановке станков в связи с изменением технологического процесса и т.п. Опоры различных конструкций выпускаются в нашей стране и за рубежом. Чаще всего – это: резинометаллические опоры повышенной податливости, расположенные на полу цеха; пневматические серий «L» и «K»; серии «M» – для координатно-измерительных машин и шлифовального оборудования.

Станок может устанавливаться также на связанном со станиной фундаментном

бетонном блоке, который опирается на резиновые коврики; на фундаментном блоке, опирающемся на пружинные опоры и демпферы. В таких вариантах установки основанием для упругих опор служат бетонные коробки, опирающиеся на грунт или межэтажные перекрытия [1, 2]. Выбор упругих элементов в этом случае существенно затруднен, а при недостаточно тщательном подборе или при изменении режима работы станка упругие элементы могут вызвать даже усиление вибраций. В случаях, когда требуется уменьшить шероховатость обработанной поверхности, в качестве наиболее рациональных вариантов могут служить фундамент с пружинной виброизоляцией с применением спиральных пружин, тросовых, спирально-тросовых и тросово-резиновых виброизоляторов, а также коврики и прокладки спирально-тросовые, резиново-эластомерные и резиновые.

Этот фундамент способствует повышению точности работы шлифовального станка, установленного на мягком грунте, предохраняя несущую систему от возможных колебаний и деформаций.

Применение различных упругих опор (рис. 1, а-з) позволяет получать различные собственные частоты вертикальных колебаний станка f_0 :

1) для $f_0 \geq 25 \text{ Гц}$ – прокладки из резины, пробки, фетра, пластмасс и т.п.;

2) для $25 \text{ Гц} \geq f_0 \geq 10 \text{ Гц}$ – резиновые и резинометаллические опоры, в которых резина работает на сжатие;

3) $10 \text{ Гц} \geq f_0 \geq 5 \text{ Гц}$ – резинометаллические опоры, в которых резина работает на сдвиг, опоры из объемной металлической сетки;

4) для $f_0 \leq 10 \text{ Гц}$ – спиральные или листовые стальные пружины.

Частоту собственных колебаний f_0 определяют по формуле [3]:

$$f_0 = 5 \sqrt{\frac{k}{\Delta_{cm}}} [\text{Гц}],$$

где k – отношение жесткости опоры при колебаниях к жесткости при статическом нагружении (динамический коэффициент);

Δ_{cm} – статическая деформация опор от веса станка.

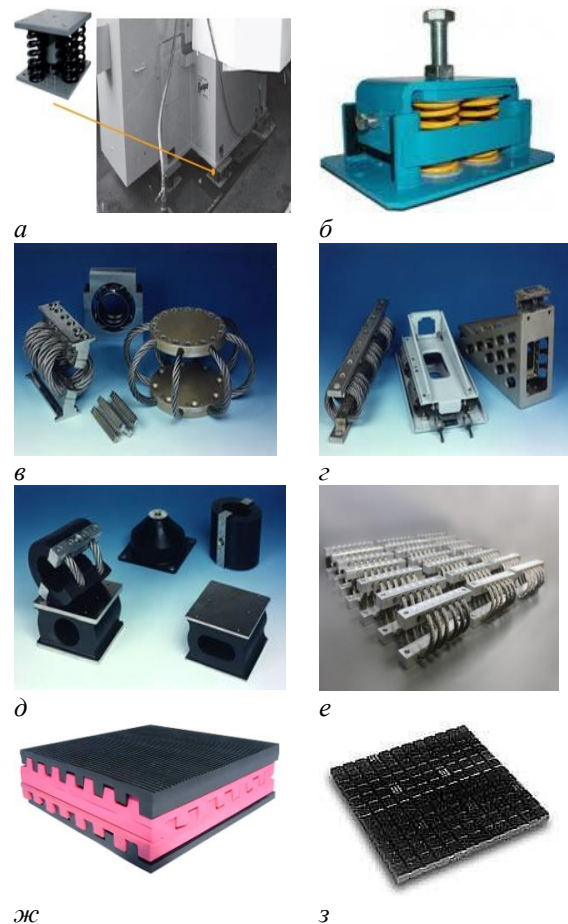


Рис.1. Виброизолирующие устройства современных станков: а, б – с применением спиральных пружин; в, г, д – тросовые, спирально-тросовые и тросово-резиновые виброизоляторы; е, ж, з – коврики и прокладки спирально-тросовые, резиново-эластомерные и резиновые

Неправильный выбор виброизолирующих опор может привести к усилению вибраций, если окажется, что f_0 и частота возмущающей силы f близки. Для обеспечения пассивной виброизоляции (т.е. изоляции станка от колебания основания) высокоточных, в том числе шлифовальных станков, значения f необходимо определять в результате специальных исследований, не исключая возможности совершенствования конструкций существующих виброизолирующих опор и разработки принципиально новых, более рациональных вариантов их исполнения. При упругой установке станок изолирован от внешней среды. При этом влияние внешних возмущений на работоспособность станка меньше, но уровень пере-

мещений и колебаний от возмущений, действующих в станке – больше.

Разные способы установки обеспечивают различную степень чувствительности станка к колебаниям основания и возмущениям, действующим в станке. Чем ниже частоты собственных колебаний, определяемые жесткостью опор и массой системы, тем выше степень виброизоляции. При одних и тех же частотах собственных колебаний системы чем больше масса системы и жесткость опор, тем ниже уровень колебаний, вызываемых работой механизмов станка. В соответствии с этим наиболее эффективным, но и наиболее дорогим средством виброизоляции, применяемым для особо точных станков, являются фундаменты на пружинах, а наиболее дешевым, обеспечивающим удовлетворительную степень виброизоляции для большинства станков средних размеров, упругие виброизолирующие опоры [4].

Однако ни один из вышеприведенных типов виброизолирующих опор и устройств не приемлем в условиях плавучих мастерских для прецизионных станков в силу особенностей эксплуатации при значительных внешних воздействиях и возможностью горизонтальных смещений оборудования при качке плавучего основания. На палубах плавучих мастерских, как правило, фиксация станков обеспечивается фундаментом (рис. 2), который не гарантирует достаточного уровня виброизоляции вследствие значительных колебательных воздействий как от внешнего оборудования, так и от внешней среды через плавучее основание и поверхность палубы.

Традиционные виброизолирующие опоры станков, проанализированные ранее, не могут быть использованы на плавучих мастерских по причине невозможности их функционирования в условиях качки плавучего основания и горизонтальных смещений под ее воздействием.



а



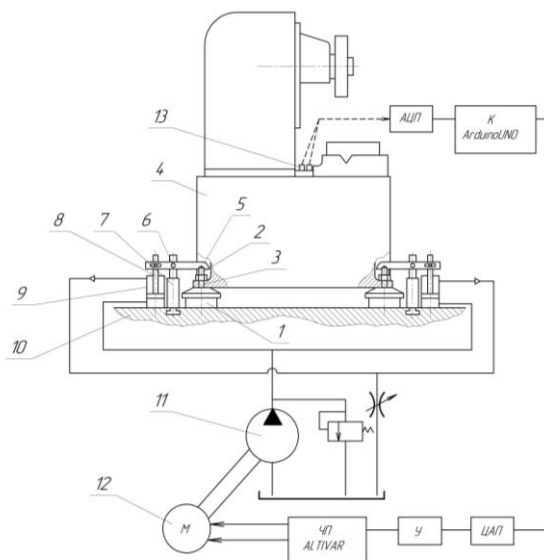
б



в

Рис.2. Примеры установленного на фундаментах и растяжках оборудования механообрабатывающего участка плавучей мастерской: *а* – горизонтально-расточный станок; *б* – универсальный круглошлифовальный станок 3В12; *в* – плоскошлифовальный станок SPC-20с

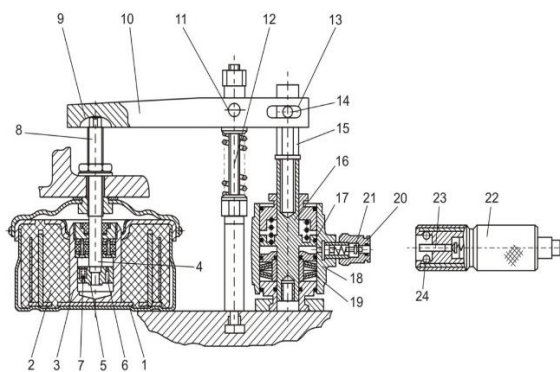
С учетом проведенных теоретических и экспериментальных исследований в Севастопольском государственном университете разработано устройство (рис. 3, *а*), позволяющее на основе испытанных образцов виброизолирующих опор (рис. 3, *б*) и виброизолирующего устройства (рис. 3, *в*), адаптировавшего указанные опоры к условиям плавучих мастерских, обеспечивать автоматическую виброзащиту шлифовального станка [5, 6].



а



б



в

Рис.3. Схема устройства автоматической виброзащиты станка в условиях плавучей мастерской (а) на основе виброизолирующих опор (б) и виброизолирующего устройства (в)

Металлорежущий станок для прецизионной обработки (кругло-, плоскошлифовальный, расточный и т.п.) устанавливают на общей поверхности палубы механообрабатывающего участка плавучей мастерской на четырех виброизолирующих опорах 1 [7], выполненных в виде основания с резиновым элементом и установленным в осевом отверстии цилиндром с рабочей

жидкостью, поршнем со штоком 2, размещенным и зафиксированным в отверстиях станины 3 станка 4 (рис. 3, а). В процессе воздействия на станину станка 4 колебаний от внешних источников через поверхность палубы передаются колебательные воздействия через опору 1 и цилиндр со штоком 2, обеспечивая гашение колебаний, то есть механическое и гидравлическое демпфирование. Для предотвращения сдвига и перекоса станка верхнюю часть штока 2 поджимают прижимом 5, размещенным на оси 6 стойки 7. Задней частью прижим 5 взаимодействует со штоком 8 антивибрационного гидроцилиндра 9, закрепленного на поверхности 10 палубы вместе со стойкой 7. Нижняя полость антивибрационного гидроцилиндра 9 связана с гидронасосом 11, работающим от асинхронного электродвигателя 12. Однако внешние воздействия не являются постоянными как по частоте, так и по амплитуде. Для исключения вредного влияния этих колебаний на процесс обработки, в частности, для снижения волнистости при шлифовании деталей установленные на направляющих станины 3 вибродатчики 13 преобразуют вибрации в электрические сигналы, которые через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) передаются на вход программируемого логического контроллера *ArduinoUNO*. Указанный контроллер через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и усилитель (У), а также частотный преобразователь (ЧП) *Altivar*, регулируя частоту вращения электродвигателя 12 и насоса 11, соответственно увеличивает или уменьшает давление в противоштоковой полости антивибрационного гидроцилиндра 9, тем самым увеличивая или уменьшая жесткость виброизолирующей опоры воздействием через прижим 5 на шток 2. Контроллер *ArduinoUNO* настраивается таким образом, что при появлении на выходе вибродатчиков 13 низкочастотных высокo-амплитудных вибраций, выходящих за пределы расчетных (нормальных), генерируются соответствующие сигналы на выходе контроллера, позволяющие повысить жесткость виброопоры путем увеличения давления рабочей жидкости в антивибрационном гидроцилиндре 9 за счет увели-

чения давления в напорном трубопроводе от насоса 11 с электродвигателем 12 и ЧПУ *Altivar*.

Разработанные устройства позволяют:

- обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, в том числе и от колебаний водной поверхности;

- повысить динамические качества станка и надежность его виброзащиты при работе в условиях плавучих мастерских;

- обеспечить возможность регулировки управляющих воздействий на жесткость виброизолирующих опор в широком диапазоне путем использования современной платформы *ArduinoUNO*, имеющей 14 цифровых входов и 6 выходов, кварцевый генератор, разъем USB, силовой разъем, разъем *ICSP* и устройство перезагрузки;

- повысить качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы, уменьшения шероховатости и волнистости поверхности путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует виброизолирующая механо-гидравлическая опора с автоматическим регулированием жесткости в зависимости от сигналов с вибродатчиков, размещенных на незначительном удалении от рабочей зоны станка.

Таким образом, в результате проведенных исследований и разработок получены эффективные варианты конструкций устройств автоматической виброзащиты прецизионных станков [8, 9], позволяющих обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры станка при внешних воздействиях, в том числе от колебаний водной поверхности и соседнего работающего оборудования. Предлагаемые устройства позволяют повысить качество обработки деталей [10], за счет снижения погрешностей их формы, уменьшения шероховатости и волнистости поверхности путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует виброизолирующая механо-гидравлическая опора с автоматическим регулированием жесткости в зависимости от величины сигналов вибродатчиков, раз-

мещенных на незначительном удалении от рабочей зоны станка.

В дальнейших разработках следует учесть необходимость дополнительного оснащения таких станков специальными растяжками в виде шарнирно прикрепленных к станине и палубе штанг с демпфирующими элементами. Кроме предложенных выше мероприятий в условиях плавучих мастерских возможно применение высокоточных станков с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного управления, построенных на основе оптимальных моделей со стохастическим регулятором процесса.

Список литературы

1. Проников А.С. Металлорежущие станки и автоматы / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
2. Проников А.С. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1982. – 246 с.
3. Металлорежущие станки: в 2 т. / [Ачеркан Н.С., Гаврюшин А.А., Ермаков В.В. и др.]; под ред. Н.С. Ачеркана. [2-е изд.] – М.: Машиностроение, 1965. – 2 т. – 628 с.
4. Фундаменты и виброизолирующие опоры станков. Динамические расчеты установки станков на фундаментах и виброизолирующих опорах по заданным относительным перемещениям инструмента и изделия. Руководящие материалы. – М.: ЭНИМС, 1985. – 584 с.
5. Владецька К.О., Харченко А.О., Братан С.М. та ін. Пристрій автоматичного віброзахисту металорізального верстата // Патент України 94200, 2014, Бюл. №21.
6. Владецька Е.А., Харченко А.О., Братан С.М. и др. Устройство автоматической виброзащиты металлорежущего станка // Патент России RU 158629 U1, 2016, Бюл. №2.
7. Харченко А.О., Владецька К.О., Братан С.М., Владецький Д.О. Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої майстерні // Патент України 51621, 2010, Бюл. №14.
8. Братан С.М. Обеспечение качества деталей при круглом шлифовании в условиях плавучих мастерских / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецькая // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2018. – Т. 22, № 12 (143). – С. 21-34.
9. Братан С.М. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецькая // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. – Том 21, №1. – С.

35-49. doi: 10,17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.

10. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавающих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.

References

1. Pronikov A.S. Metallovezhushchiye stanki i avtomaty (Metal-cutting machines and automatic machines) / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 167 s.
2. Pronikov A.S. Tochnost' i nadezhnost' stankov s chislovym programmnyim upravleniyem (The accuracy and reliability of numerically controlled machines) / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 246 s.
3. Metallovezhushchiye stanki: v 2 t. (Metal-cutting machines) / [Acherkan N.S., Gavryushin A.A., Yermakov V.V. i dr.]; pod red. N.S. Acherkana. [2-ye izd.] – M.: Mashinostroyeniye, 1965. – 2 t. – 628 s.
4. Fundamenty i vibroizoliruyushchiye opory stankov (Foundations and vibration isolating machine supports). Dinamicheskiye raschety ustanovki stankov na fundamentakh i vibroizoliruyushchikh oporakh po zadannym otnositel'nyim peremeshcheniyam instrumenta i izdeliya. Rukovodiyashchiye materialy. – M.: ENIMS, 1985. – 584 s.
5. Vladets'ka K.O., Kharchenko A.O., Bratan S.M. ta in. Prystriy avtomaticheskoy vibrozakhystu metalorizal'noho verstata (Device for automatic vibration protection of a metal-cutting machine) // Patent Ukrayiny 94200, 2014, Byul. №21.
6. Vladetskaya Ye.A., Kharchenko A.O., Bratan S.M. i dr. Ustroystvo avtomaticheskoy vibrozashchity metallovezhushchego stanka (Device for automatic vibration protection of a metal cutting machine) // Patent Rossii RU 158629 U1, 2016, Byul. №2.
7. Kharchenko A.O., Vladets'ka K.O., Bratan S.M., Vladets'kyy D.O. Vibroizolyuyuchyy prystriy metalorizal'noho verstata plavuchoyi maysterni (Vibrating isolation device of a metal-cutting machine floating workshop) // Patent Ukrayiny 51621, 2010, Byul. №14.
8. Bratan S.M. Obespecheniye kachestva detaley pri kruglom shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh (Quality assurance of parts during circular grinding in the conditions of floating workshops) / S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, Ye.A. Vladetskaya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2018. – T. 22, № 12 (143). – S. 21-34.
9. Bratan S.M. Analiz i sintez sistemy vibroizolyatsii shlifoval'nogo stanka s uchetom ekspluatatsionnoy nadezhnosti yeye elementov (Analysis and synthesis of the vibration isolation system of a grinding machine, taking into account the operational reliability of its elements) / S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, Ye.A. Vladetskaya // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty). 2019. – Tom 21, №1. – S. 35-49. doi: 10,17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.
10. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya (Improving the quality of parts during grinding in the conditions of floating workshops) / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.

УДК 621.892.09

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Л.П. Вовк¹, В.В. Гусев², Е.П. Мельникова¹¹ Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка, Украина² ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина

Аннотация

Разработана математическая модель процесса съема поверхностного слоя металла при финишных абразивных методах обработки. Краевые задачи и их аналитические решения, рассмотренные в совокупности позволяют объединить их в единую математическую модель, пригодную для описания всех видов финишной абразивной обработки материалов с учетом таких важнейших параметров процесса, как характеристики смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и продуктов диспергирования, глубину внедрения абразивного инструмента, применяемого для съема материала детали, объемный съём обрабатываемого материала, геометрические параметры следов обработки. Приведены и проанализированы конкретные графические срезы полученных зависимостей.

Ключевые слова: модель, финишная обработка, виброобработка, хонингование, доводка, съём металла, параметры процесса.

NUMERAL-ANALYTICAL ANALYSIS OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF PIN CO-OPERATION ON PROCESS OF FINISH ABRASIVE TREATMENT

L.P. Vovk¹, V.V. Gusev², E.P. Melnikova¹¹ Automobile and Highway Institute of State Higher Educational Establishment "Donetsk National Technical University", Gorlovka, Ukraine² "Donetsk National Technical University", Donetsk, Ukraine

Abstract

The mathematical model of process of output of superficial layer of metal is worked out at the finish abrasive methods of treatment. Regional tasks and their analytical decisions, considered in an aggregate allow to unite them in a single mathematical model suitable for description of all types of finish abrasive treatment of materials taking into account such major parameters of process, as descriptions of lubricating-cooling technological environment (LCTM) and foods of dispersing, depth of introduction of the abrasive instrument applied for the output of material of detail, by volume output of the processed material, geometrical parameters of tracks of treatment. Concrete graphic cuts over of the got dependences are brought and analysed.

Keywords: model, finish treatment, vibrotreatment, honing, polishing, output of metal, parameters of process.

Технологические процессы финишной абразивной обработки деталей машин позволяют управлять физико-механическими показателями поверхностных слоев деталей и при том минимизировать объем съема материала заготовки.

В научной и технической литературе в настоящее время отсутствуют эмпирические и математические теории взаимодействия

абразивного инструмента и детали при финишной обработке, учитывающие физико-механические свойства контактируемых материалов и СОТС.

Задачей настоящей работы является разработка обобщенной математической модели съема поверхностного слоя деталей машин при финишных методах обработки с учетом основных параметров процесса.

Рассмотрим силы, действующие на режущую частицу. Введём локальную систему координат, начало которой совпадает с точкой касания частицы и поверхности детали, ось h направлена внутрь детали нормально к поверхности, ось x – вдоль касательной составляющей скорости частицы.

Сила нормальной реакции со стороны деформируемой контактной поверхности детали:

$$N(h) = \begin{cases} \pi R c \sigma_s h, & h > 0 \\ 0, & h \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Динамические уравнения взаимодействия абразивного инструмента с поверхностью детали, запишем в виде [1]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 h}{d\tau^2} = -P_N = -[N(h) + N_1] \\ m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -P_\tau = -[F + F_1] \end{cases} \quad (2)$$

где: $m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_r$ – масса частицы; τ – время; N_1 – нормальная составляющая гидродинамической силы; F, F_1 – касательные усилия при отсутствии и наличии слоя жидкости на поверхности обрабатываемой детали соответственно; R – радиус частицы; ρ_r – плотность материала частицы.

Учитывая стохастический характер процесса, примем, что математическое ожидание нормальной силы, приложенной к одному зерну со стороны упругих элементов, будет:

$n_x = \frac{p_n}{v_z}$, где p_n, v_z – среднее нормальное давление на брусок и среднее число режущих зерен на единицу поверхности бруска.

Обозначая площадь бруска через S_b и производя усреднение по всем зернам, получим $N_x = \left\langle \frac{p_n \cdot S_b}{v_z} \right\rangle$. Далее, учитывая, что

давление p_n зависит от h и от жесткости упругих элементов c_{el} : $p_n(h) = p_0 - c_{el} h$.

Таким образом, нормальная составляющая полной силы с учетом силы упругого поджатия частицы $N_x(h)$ будет:

$$P_N(h) = N(h) + N_1 + N_x(h) \quad (3)$$

Рассмотрим задачу Коши для дифференциального уравнения движения закрепленной частицы:

$$\begin{cases} \ddot{h} = -\alpha^+ h + \eta \\ h(0) = 0 \\ \dot{h}(0) = V_N \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\alpha^+ = \frac{\pi R c \sigma_s v_z}{M_b} > 0, \quad \eta = \frac{p_0 - N_1 v_z}{M_b} > 0,$$

M_b – масса бруска.

Индекс "+" указывает, что величина относится к этапу контактирования [2, 3]. Подставляя в уравнение значения величин, использованные выше и учитывая, что параметр α имеет разрыв (рис.1), когда зерно отрывается от поверхности, проведем численный анализ сформулированной краевой задачи.

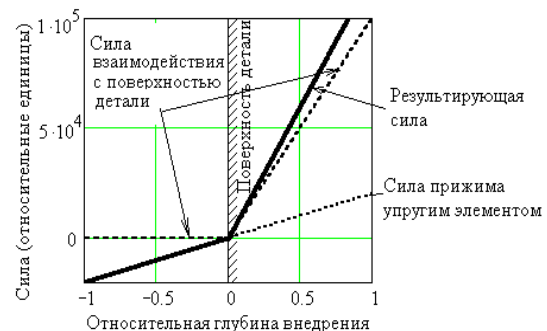


Рис. 1. Зависимость силы, приложенной к зерну хонинговального бруска, от координаты вершины зерна

Результаты моделирования, представленные на (рис.2), позволяют говорить о возникновении релаксационных колебаний, частота которых превышает частоту свободных колебаний бруска в $k=1,1 \dots 1,4$ раза, а

период равен
$$T_r = \frac{2\pi}{k_r} \sqrt{\frac{C}{M_b}}$$

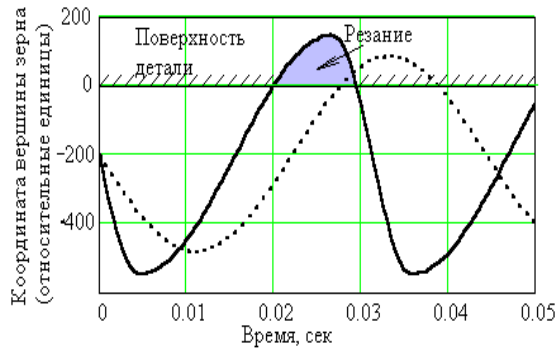


Рис. 2. Релаксационные колебания, в системе «брусок – поверхность детали»

После интегрирования краевой задачи (4) можно определить максимальное значение h и время контактного взаимодействия частицы t_c что наибольшая глубина внедрения и продолжительность пребывания частицы в контакте определяется формулами:

$$h_{\max} = \frac{\eta}{\alpha^+} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{V_N^2 \alpha^+}{\eta^2}} \right], \quad t_c = \frac{2(\pi - \theta^+)}{\sqrt{\alpha^+}}. \quad (5)$$

После окончания процесса контактирования начинается процесс движения частицы под действием гидродинамического воздействия и механических сил контакта, описываемый следующей начальной краевой задачей

$$\begin{cases} \ddot{h} = -\alpha^- h + \eta \\ h(0) = 0 \\ \dot{h}(0) = -V_N \end{cases}, \quad \alpha^- = \frac{C_{el}}{M_b} > 0 \quad (6)$$

Время внеконтактного поведения частицы

$$t_{wc} = -\frac{2\theta^-}{\sqrt{\alpha^-}} \quad (7)$$

Чтобы найти период релаксационных колебаний нужно сложить величины t_c и t_{wc} . Причем следует учитывать, что $t_{wc} \ll t_c$.

Зная скорость касательного движения брусков V_b и время t_c , можно определить длину следа частицы абразива $x_{\max} = V_b \cdot t_c$.

Теперь сформулируем начальную задачу Коши для функции $h(t)$:

$$\begin{cases} \ddot{h} = -\beta^+ h + \zeta \\ h(0) = 0 \\ \dot{h}(0) = V_N \end{cases}, \quad (8)$$

$$\text{Здесь } \beta^+ = \frac{\pi R c \sigma_s}{m} > 0, \quad \zeta = -\frac{N_1}{m} < 0.$$

После интегрирования краевой задачи (8), находим максимальное значение глубины внедрения частицы в материал детали

$$h_{\max} = \frac{\zeta}{\beta^+} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{V_N^2 \beta^+}{\zeta^2}} \right].$$

Теперь время контактного состояния частицы определится как $t_c = -\frac{2\theta^+}{\sqrt{\beta^+}}$.

Следующая краевая задача описывает движение частицы по касательной:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{P_\tau}{m} = \frac{-f P_N \operatorname{sgn}(V_x)}{m} \\ x(0) = 0 \\ \dot{x}(0) = V_\tau \end{cases}, \quad (9)$$

Её решение дает:

$$x_{\max} = \frac{\gamma}{\beta^+} (\cos \theta^+ - 2\theta^+ \sin \theta^+) - 2 \frac{V_\tau \theta^+}{\sqrt{\beta^+}}.$$

Итак, можно считать, что все характеристики локального контактного взаимодействия абразивной частицы определены аналитически, что позволяет обобщить полученные результаты для всей массы абразива.

Переходим к анализу динамических характеристик процесса. Используя значения $x_{\max}$ и $h_{\max}$, можно найти объем полости, остающейся при движении единичной частицы (т.н. единичного съема [2])

$$q = \pi h_{\max}^2 R \sqrt{1 + \frac{x_{\max}^2}{8h_{\max} R}}$$

Для анализа интенсивности съема металла используем стохастическую теорию [2]. В развитии этой теории найдем выражение для удельного объемного съема материала детали.

$$\tilde{Q} = N_p \cdot q = \frac{n_p \cdot q}{S_{kb,yn}},$$

где N_p – число актов микрорезания в единицу времени на единице площади детали, а n_p – число актов микрорезания в единицу времени на площади детали, равной площади квадрата упаковки абразивных частиц $S_{кв.уп.}$ [3,4,5,6].

Массовый съём при виброобработке определяется найденным выше значением h_{max} параметрами единичного следа, вероятностью возникновения микрорезания, механическими и физическими параметрами материала детали (плотность – ρ , площадь внешней поверхности – S_d) и внешней вынужденной частотой воздействия абразив:

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot ab \cdot h_{max}^2 \cdot \sqrt{1 + a^2 / 4h_{max}^2} \cdot D \cdot P_2 f_b}{2D \cdot (\pi a^2 + 4Da + d^2)} \cdot \rho S_d \quad (10)$$

Из анализа соотношения (10) следует, что съём материала зависит от параметров всех рассмотренных краевых задач, что позволяет обобщить рассматриваемый подход на все способы абразивной обработки деталей машин.

Например, при хонинговании внутренней поверхности полого цилиндра площадью S_d , удельный объём удаленного материала составит

$$\tilde{Q}_x = \frac{k_r \cdot q_x \cdot v_z \cdot S_b \cdot n_b}{2\pi \cdot S_d} \sqrt{\frac{M_b}{C_{el}}},$$

где n_b – количество брусков хонинговальной головки.

Учитывая данные рис.2, откуда можно определить время формирования следа единичного воздействия (заштрихованная область), находим длину X_{max} в зависимости от параметров процесса хонингования

$$x_{max} = V_b \cdot \gamma \cdot T_r = \frac{2\pi \cdot V_b \cdot \gamma}{k_r} \sqrt{\frac{C_{el}}{M_b}} = 2\pi \cdot V_b \cdot \gamma_r \sqrt{\frac{C_{el}}{M_b}},$$

где коэффициент $\gamma_r \approx 0,15...0,25$. Подстановка найденного значения в формулу (10) позволяет найти объём съёма материала в рассматриваемом процессе хонингования.

Проанализируем кинематические характеристики процесса притирка – доводка. Разбиваем все множество абразивных зёрен на две части: 1) внедрившиеся в массу притира. 2) находящиеся между притиром и обрабатываемой деталью.

Рассмотрим формулы для съёма материала детали при хонинговании (11) и вибрационной обработке (12) с целью свести их к единообразному виду.

$$\tilde{Q}_x = k_x \cdot q_x \cdot \frac{S_b}{S_d} \cdot f_b, \quad k_x = k_r \cdot v_z \quad (11)$$

$$\tilde{Q}_b = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot P_2 \cdot q_b}{D^2 \cdot (\pi \cdot a^2 + 4D \cdot a + D^2)} \cdot f_b = k_b \cdot q_b \cdot \frac{S_b}{S_d} \cdot f_b \quad (12)$$

В формуле (12) введено обозначение

$$k_b = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot P_2}{D^2 (\pi \cdot a^2 + 4D \cdot a + D^2)}.$$

Общий объём снимаемого материала детали обеими частями зёрен:

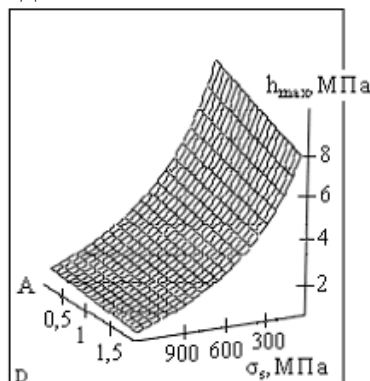
$$\tilde{Q}_n = \tilde{Q}_x + \tilde{Q}_b = (k_x \cdot q_x + k_b \cdot q_b) \frac{S_b}{S_d} \cdot f_b \quad (13)$$

При выводе формулы (13) принято допущение, что вынужденная частота внешнего воздействия одинакова для обеих рассматриваемых частей зёрен. Также предполагается, что вся площадь часть S_b значительно превосходит абразивную площадь закреплённых под притиром зёрен. Выражение в скобках в правой части формулы (13) учитывает оба механизма съёма материала детали при притирке обеими рассматриваемыми частями зёрен абразива зависит от жесткости крепления притира и усреднённого давления на него. Изменение этих характеристик процесса приводит к флуктуациям физико-механических параметров

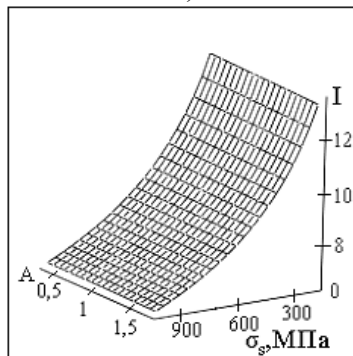
$$k_x, k_b, q_x, q_b.$$

Целью численного анализа полученных соотношений [7, 8, 9, 10] было определение взаимной зависимости прочностных механических характеристик материала от свойств смазочно-охлаждающей жидкости и продуктов диспергирования (СПД). Например, на (рис.3) представлены трехмерные зависимости параметров глубины внедрения

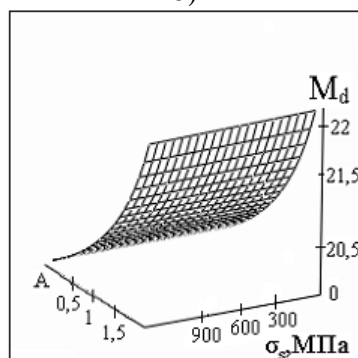
$h_{\max}$ от предела текучести обрабатываемого материала физических параметров внутренней среды между абразивным материалом и материалом детали машины.



а)



б)



в)

Рис. 3. Влияние предела текучести материала и свойств СПД на:

- а) максимальную глубину внедрения;
- б) единичный съем;
- в) удельный объемный съем.

Из анализа данных, представленных на (рис.3) следует, что:

Варьируя механические свойства СОТС и продуктов диспергирования можно добиться существенного изменения определяющих технологических параметров абразивного процесса.

Возрастание максимальной сдвиговой компоненты тензора напряжений промежуточной среды между материалом и абразивом (параметра A), приводит к существенному возрастанию удельного съема и практически не влияет на $h_{\max}$.

Увеличение параметра A значительно уменьшает удельный съем и слабо зависит от механических характеристик обрабатываемого материала.

Основные выводы

Основной вывод по работе состоит в том, что описываемые краевые задачи и их аналитические решения, рассмотренные в совокупности, позволяют объединить их в единую математическую модель, пригодную для описания всех видов финишной абразивной обработки материалов. Главный параметр процесса – удельный объемный съем материала детали единообразно зависит от физико-механических и геометрических параметров всех видов абразивных процессов в широких границах их области изменения. Приведены и проанализированы конкретные графические срезы указанных зависимостей, что отвечает ожидаемым эмпирическим результатам обработки и свидетельствует о достоверности предлагаемой модели.

Список литературы

1. Мельникова Е.П. Повышение эксплуатационных свойств деталей двигателей внутреннего сгорания за счет совершенствования финишных абразивных способов обработки. – Дис. д.т.н. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 419 с.
2. Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. – Дис. д.т.н. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1995. – 298 с.
3. Баби́чев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Баби́чев, И.А. Баби́чев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. – 620 с.
4. Баби́чев А.П. Теоретико-вероятностная модель процесса виброобработки плоской детали в случае эллиптических пятен контакта / А.П. Баби́чев, Н.Т. Мишняков // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология: Межвуз. сб. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1981. – С. 8-10.
5. Проволоцкий А.Е. Развитие комбинированных методов обработки, как база интегрированных технологий / А.Е. Проволоцкий // Высокие тех-

- нологии в машиностроении. Сборник научных трудов. – 2003. – №1. – С. 103-112.
6. Вовк Л. П. Определение параметров разрушения пластины с трещиной при наличии концентраторов напряжения в процессе упругопластического деформирования / Л. П. Вовк, Е.С. Кисель // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №4. – С. 8-15.
 7. Вовк Л.П. Анализ характеристик волнового поля в задачах диагностики неоднородных термоупругих областей / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – № 1. – С. 28-44.
 8. Вовк Л.П. Определение параметров разрушения пластины с трещиной при наличии концентраторов напряжения в процессе упругопластического деформирования / Л.П. Вовк, Е.С. Кисель // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – №4. – С. 8-15.
 9. Мельникова Е.П. Вариационный подход к исследованию явлений, возникающих в зоне микрорезания при вибрационной обработке / Мельникова Е.П., Вовк Л.П. // Вибрации в технике и технологиях. – 2007. – №3(48). – С. 57-60.
 10. Мельникова Е.П. Исследование взаимодействия параметров технологической системы при финишных абразивных методах обработки / Е.П. Мельникова // Вестник Автомобильно – дорожного Института Донецкого национального технического университета. Международный научно-технический сборник. – 2016. – № 3 (20). – С. 27-33.
- ### References
1. Melnikova E.P. An increase of operating properties of details of combustion engines is due to perfection of finish abrasive methods of treatment. – Dis. d.t.n. – Donetsk: DonNTU, 2006. – 419 p.
 2. Tamarkin M.A. Technological bases of optimization of processes of treatment of details the free abrasives. – Dis. d.t.n. – Rostov - na - Donu: RISHM, 1995. – 298 p.
 3. Babichev A.P. Bases of oscillation technology / of A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov - na - Donu: DGTU, 1999. – 620 p.
 4. Babichev A.P. In theory - probabilistic model of process of vibrotreatment of flat detail in case of elliptic spots of contact / A.P. Babichev, N.T. Mishnjakov // Progressive technology: Mezhd. sb. - Rostov - na - Donu: RISHM, 1981. – P. 8-10.
 5. Provolockij A.E. Development of the combined methods of treatment, as a base of the integrated technologies / A.E. Provolockij // High-tech in an engineer. Collection of scientific works. – 2003. – №1. – P. 103-112.
 6. Vovk L. P. Determination of parameters of destruction of plate with a crack at presence of concentrators of tension in the process of resilientlyplastic deformation / L. P. Vovk, E.S. Kisel // Vestnik DonNTU. – 2018. – №4. – P. 8-15.
 7. Vovk L.P. An analysis of descriptions of the wave field is in the tasks of diagnostics of heterogeneous термоупругих areas / L. P. Vovk, E.S. Kisel // Ecological announcer of scientific centers of the black Sea economic collaboration. – 2017. – № 1. – P. 28-44.
 8. Vovk L.P. Determination of parameters of destruction of plate with a crack at presence of concentrators of tension in the process of упругопластического deformation / L. P. Vovk, E.S. Kisel // Announcer of the Donetsk national technical university. – 2018. – №4. – P. 8-15.
 9. Melnikova E.P. Variation going near research of the phenomena arising up in the zone of cutting of at oscillation treatment / Melnikova E.P., L. P. Vovk // Vibrations in a technique and technologies. – 2007. – №3(48). – P. 57-60.
 10. Melnikova E.P. Research of cooperation of parameters of the technological system at the finish abrasive methods of treatment / E.P. Melnikova // Bulletin of the automobile and highway institute. International scientific and technical collection. – 2016. – № 3 (20). – P. 27-33.

УДК 621.91; 621.923.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ЗЕРКАЛА ЦИЛИНДРА

А. С. Ямников¹, Л. Л. Сафарова²¹ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Российская Федерация²Производственное Объединение "ТУЛАМАШЗАВОД", г. Тула, Российская Федерация

Аннотация

Исследована действующая на ПО "ТУЛАМАШЗАВОД" технология изготовления цилиндра дизелей ТМЗ-450Д, ТМЗ-520Д. Деталь имеет цилиндрическую форму, на внешней поверхности которой 8÷10 ребер, внутренняя поверхность представляет собой зеркало цилиндра и требует высоких точности обработки и качества поверхности. К готовой детали предъявляют высокие требования по точности формы и размера: отклонение от цилиндричности не более 0,005 мм, допуск диаметра $(85; 95)^{+0,03}$ мм. Требования к качеству поверхности типовые для дизельных двигателей: на зеркальную поверхность цилиндра ($Rz\ 0,2\div0,7$ мкм) наносят редкую сетку диагональных перекрестных смазочных впадин по глубине ($Rz\ 2\div6$ мкм), задаваемую и контролируемую по диаграмме Аббота. Теоретические предпосылки дали обоснование заменить две операции: алмазно-расточную на станке 1Р-СТ95 и хонинговальную операцию на вертикально-хонинговальном станке 3822ОП40 в базовом технологическом процессе на одну – двойное растачивание на агрегатно-расточном станке с ЧПУ АРС – 4/Ц. Полученные результаты показывают, что совмещение двух переходов растачивания на одной операции позволяет на порядок снизить наследственные погрешности формы расточенного отверстия и, соответственно, сократить количество операций хонингования до одной.

Ключевые слова: точность, шероховатость, диаграмма Аббота, растачивание, хонингование, отклонение от цилиндричности, старение, отливка.

IMPROVEMENT OF CYLINDER MIRROR PROCESSING TECHNOLOGY

A. S. Yamnikov¹, L.L. Safarova²¹ FSBEI HE "Tula State University", Tula, Russian Federation.² Production Association "TULAMASHZAVOD", Tula, Russian Federation

Abstract

The technology of manufacturing the cylinder of diesel engines ТМЗ-450Д, ТМЗ-520Д operating at PA "TULAMASHZAVOD" was investigated. The part has a cylindrical shape, on the outer surface of which there are 8÷10 ribs, the inner surface is a mirror of the cylinder and requires high processing precision and surface quality. The finished part is subject to high requirements in terms of shape and size accuracy: deviation from cylindricity is not more than 0.005 mm, diameter tolerance is $(85; 95) + 0.03$ mm. Requirements for surface quality are typical for diesel engines: on the mirror surface of the cylinder ($Rz\ 0.2 \div 0.7\ \mu m$), a sparse grid of diagonal cross lubricant depressions in depth ($Rz\ 2 \div 6\ \mu m$) is applied, set and controlled according to the Abbot diagram. Theoretical prerequisites gave justification to replace two operations: diamond boring on the 1P-ST95 machine and honing operation on the 3822OP40 vertical honing machine in the basic technological process with one - double boring on the ARS-4 / Ts CNC aggregate boring machine ... The results obtained show that the combination of two boring transitions in one operation makes it possible to reduce by an order of magnitude the inherited errors in the bore hole shape and, accordingly, reduce the number of honing operations to one.

Keywords: precision, roughness, Abbot diagram, boring, honing, deflection from cylindricity, aging, casting.

В ПО Туламашзавод (Тульский машиностроительный завод) выпускают малогабаритные четырехтактные одноцилиндровые универсальные дизели ТМЗ-450Д, ТМЗ-520Д. Двигатели применяют при больших

колебаниях температуры окружающей среды, что требует постоянства эксплуатационных характеристик в различных ситуациях [1].

Для сохранения эксплуатационных характеристик в технологии производства базовых деталей двигателя – цилиндров, изготавливаемых из высокопрочных чугунов [2–7], применяют особые приемы, включающие стадийность механической обработки резанием с последовательным удалением припуска и уточнением обрабатываемых поверхностей, а также различные варианты старения.

Одной из самых ответственных деталей дизелей ТМЗ-450Д, ТМЗ-520Д является цилиндр. Заготовкой для этой детали служит отливка из специального цилиндрического чугуна, который имеет следующий химический состав: С 3÷3,5 %; Mn 0,5÷0,9 %; Si 2,1÷2,7 %; Cr 0,3÷0,6 %; Ni 0,7÷1,3 %; P 0,1÷0,6 %; S ≤0,14 %.

Деталь имеет цилиндрическую форму, на внешней поверхности которой 8÷10 ребер, внутренняя поверхность представляет собой зеркало цилиндра и требует высоких точности обработки и качества поверхности. Точность отливки 11-0-0-16 по ГОСТ Р 53464–2009 [7].

К готовой детали предъявляют высокие требования по точности формы и размера: отклонение от цилиндричности не более 0,005 мм, допуск диаметра (85; 95)^{+0,03} мм. Требование к качеству поверхности типовые для дизельных двигателей: на зеркальную поверхность цилиндра (Rz 0,2÷0,7 мкм) наносят редкую сетку диагональных перекрестных смазочных впадин по глубине (Rz 2÷6 мкм), задаваемую и контролируемую по диаграмме Аббота. Замеры производят на профилографе-профилометре «Сейтроник ПШ 8-4», который автоматически на ЭВМ строит профилограмму измеряемой поверхности по относительной длине опорной поверхности $t_p = (20 \dots 100) \%$ [8].

Анализ действующего технологического процесса

При разработке технологических операций по достижению заданного качества деталей уделяют внимание проявлению технологической наследственности, проявляющейся в переносе дефектов заготовки на промежуточных операциях на готовую де-

таль [9, 10]. Так, в работе авторов [9] рекомендовано применять естественное старение отливок в течение 6 месяцев, что обеспечивает снижение разброса размеров зеркала цилиндра после окончательной обработки с 3÷10 мкм до 0÷5 мкм. Следует отметить, что и перед операцией хонингования заготовок деталей проводили стабилизирующий отпуск.

Для уменьшения копирования погрешностей применяют стадийность обработки. Так на ПО Туламашзавод применяют следующую технологию (табл. 1, рис. 1):

Таблица 1. Перечень операций по обработке зеркала цилиндра дизельного двигателя

№ и название операции	Модель оборудования
(1) 0152 Токарная с ЧПУ	Токарный с ЧПУ 16A20Ф3С39
(2) 0460 Расточная	Отделочно-расточный 1Р-ТС95, 1999 года выпуска.
(3) 0560 Хонинговальная	Вертикально-хонинговальный 3822ОП40
(4) 0570 Хонинговальная	Вертикально-хонинговальный 3822ОП40
(5) 0580 Хонинговальная	Вертикально-хонинговальный СС-6062
(6) 0590 Хонинговальная	Вертикально-хонинговальный СС-6062
(7) 0600 Хонинговальная	Вертикально-хонинговальный СС-6062

Стадийность механической обработки предназначают для снижения эффекта копирования погрешностей, состоящего в том, что все погрешности, полученные заготовкой на предшествующей операции, копируются на последующей в масштабе, обратном величине уточнения [11]. Уточнением ε называют отношение одноименных погрешностей заготовки $\Delta_{заг}$ и обработанной детали $\Delta_{дет}$:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{заг}}{\Delta_{дет}} = \frac{j}{\lambda C_p S^q}, \quad (1)$$

где j – жесткость технологической системы, $\frac{H}{mm}$, λ – отношение радиальной составляющей

щей силы резания к главной, C_p - постоянная главной составляющей силы резания для принятого соотношения обрабатываемого материала заготовки и режущего материала инструмента, S - подача инструмента на очередной рез (оборот заготовки) $\frac{\text{мм}}{\text{рез(об)}}$, q - степень влияния подачи на главную силу резания.

Погрешность детали можно определять по формуле

$$\Delta_{\text{дет}} = \frac{\Delta_{\text{заг}}}{j} \lambda C_p S^q. \quad (2)$$

При работе за несколько (n) операций возникает эффект уменьшения погрешностей:

$$\Delta_{\text{дет } n} = \Delta_{\text{заг}} \prod_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i C_{pi} S_i^q}{j_i} \right), \quad (3)$$

где i – номер операции.

Следовательно, жесткость оборудования является важнейшим параметром, определяющим его качество.

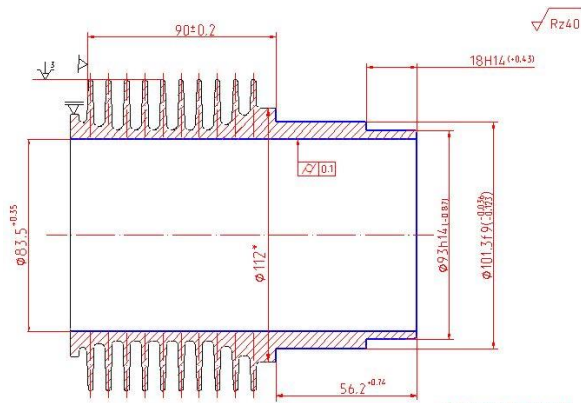


Рис. 1. Эскиз обработки заготовки на токарном станке с ЧПУ

Как видно из (рис. 1), базирование производят по черным базам отлитых охлаждающих ребер. Это приводит к значительному смещению обрабатываемой поверхности отверстия относительно оси вращения шпинделя станка. С учетом требования ГОСТ Р 53464 – 2009, для отливки 11 класса точности смещение стержня относительно наружной поверхности до $\Delta_{\text{заг}} = 1,2$ мм. Соответ-

ственно припуск при черновом растачивании может колебаться в этих пределах. С учетом возможного уточнения токарного станка на операции растачивания $\varepsilon_{\text{ток}} = 6$ [11], получают по формуле (1): $\Delta_{\text{дет1}} = 0,2$ мм. Одновременно, за одну установку на операции 0152 Токарная с ЧПУ обрабатывают комплекс поверхностей, служащих в дальнейшем технологическими базами на операции растачивания, выполняемой на отделочно-расточном станке модели 1Р-ТС95, выпущенного в 1999 году на станкостроительном производстве АО «АК «Туламашзавод» (рис. 2).

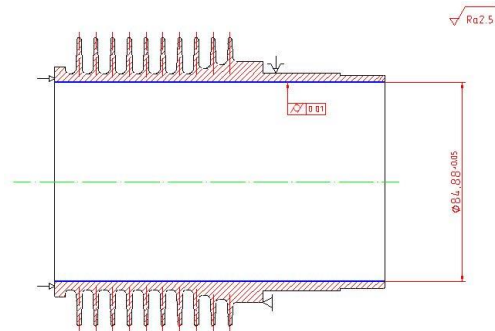


Рис. 2. Эскиз обработки заготовки на отделочно-расточном станке 1Р-ТС95

С учетом большого срока эксплуатации станка и пониженной жесткости, коэффициент уточнения на операции растачивания составил $\varepsilon_{\text{раст}} = 6$. Общее уточнение на двух последовательных операциях: токарной и расточной составило $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{\text{ток}} \cdot \varepsilon_{\text{раст}} = 36$. Тогда с учетом формулы (3) получают ожидаемое значение наследственной составляющей погрешности формы и положения отверстия $\Delta_{\text{дет } n=2} = 0,0333$ мм. С учетом неизбежной погрешности базирования на операции растачивания реально, погрешность обработки достигает 0,06 мм.

Для достижения заданной точности в исходном технологическом процессе предусмотрены 6 хонинговальных операций, выполняемых последовательно на вертикально-хонинговальном станке модели 3822ОП40 и вертикально-хонинговальном станке модели СС-6062. Черновое хонингование на операциях 0560 и 0570 удаляет основную часть припуска. На последующих операциях до-

стигают нужного размера, точности формы и требований к качеству поверхности в соответствии с заданной диаграммой Аббота [8]. Установлено, что при длительном хонинговании происходит нагрев обрабатываемых заготовок на 2 °С каждые 20 минут работы станка, несмотря на обильное охлаждение СОЖ, используемой на АО «АК «Туламашзавод» для цилиндров дизелей серии ТМЗ. Поэтому чистовое хонингование разбивают на более короткие временные отрезки, а после каждой операции детали охлаждаются на воздухе в течение 15 минут.

При этом не всегда удается избежать получения бракованных деталей. Так по отклонению от цилиндричности бракует до 10 % обработанных заготовок от партии в количестве 100 штук. По соответствию заданной диаграмме Аббота бракуется 30 % обработанных заготовок.

С целью улучшения качества обрабатываемой поверхности зеркала «Цилиндров» было разработано техническое задание для проектирования и изготовления расточного станка. ПО Туламашзавод разработано техническое задание, в соответствии с которым на владимирском станкостроительном заводе был заказан агрегатно-расточный станок с ЧПУ APC – 4/Ц (рис. 3).

Станок имеет четыре шпинделя, предназначен для обработки 2 заготовок одновременно [12]. Беспрерывно осуществляется чистовая и черновая обработка внутренней поверхности «Цилиндра», а именно правым шпинделем черновая, затем левым – чистовая обработка.



Рис. 3. Агрегатно-расточный станок с ЧПУ APC – 4/Ц

Существенным технологическим преимуществом совмещения чистовой и черновой обработки внутренней поверхности «Цилиндра», является отсутствие погрешностей установки между чистовой и черновой обработкой. Это обеспечивает, в соответствии с формулой (3), при условии, что вследствие повышенной жесткости и точности специального агрегатно-расточного станка, каждая позиция растачивания дает уточнение $\varepsilon = 10$. Тогда доля наследственной погрешности формы зеркала цилиндра после 3-х переходов растачивания составит

$$\Delta_{\text{дет } 3} = \Delta_{\text{заг}} \prod_{i=1}^3 \left(\frac{\lambda_i C_{pi} S_i^q}{j_i} \right)^3 = 0,002 \text{ мм.}$$

Такое значение наследственной погрешности формы зеркала цилиндра после 3-х переходов растачивания - $\Delta_{\text{дет } 3} = 0,002 \text{ мм}$, меньше допуска на погрешность формы готового отверстия.

Полученные результаты

Теоретические предпосылки дали обоснование заменить две операции: алмазно-расточную на станке 1Р-СТ95 и хонинговальную операцию на вертикально-хонинговальном станке 3822ОП40 в базовом технологическом процессе на одну – двойное растачивание на агрегатно-расточном станке с ЧПУ APC – 4/Ц. Для проверки заявленных параметров детали после обработки на агрегатно-расточном станке APC – 4/Ц была проведена инженерная партия обработки «Цилиндров», в количестве 26 шт. уточнение $\varepsilon = 10$ (табл. 2).

Таблица 2. Геометрические параметры зеркала цилиндров Ø85 мм, Ø95 мм, полученные при обработке на агрегатно-расточном станке APC-4/Ц

Проверяемые параметры	Параметры, предложенные для разработанного вновь технологического процесса	Результаты, полученные по разработанному вновь технологическому процессу, мм
Внутренний Ø85, мм	Ø84,92 ^{+0,05}	0,016÷0,038
Внутренний Ø95, мм	Ø94,92 ^{+0,05}	0,016÷0,025

Допуск круглости, мкм	не задан	0,003÷0,02
Допуск цилиндричности, мкм	10	0,009
Допуск радиального биения внутренней поверхности относительно наружной, мкм	не задан	0,05
Шероховатость, Ra, мкм	2,5	1,2÷1,7 мкм

Результаты, полученные при обработке на агрегатно-расточном станке с ЧПУ APC-4Ц, показывают, что фактические погрешности формы поверхности зеркала превышают, рассчитанные по формуле (3). Это объясняется наличием погрешности базирования при установке на операции совмещенного растачивания, а также неоднородностью структуры отливки по плотности [9] и, соответственно, по твердости, вызывающих колебание радиальной составляющей силы резания и отжимов резца от обрабатываемой поверхности [11].

Указанные в (табл. 2) погрешности успешно удаляют хонингованием [13-16]. В результате проведенной инженерной партии деталей «Цилиндры», был сделан вывод о целесообразности введения агрегатно-расточной операции на станке с ЧПУ APC – 4/Ц в технологический процесс механической обработки «Цилиндров» и применения однократного хонингования. Отклонения диаметра после однократного хонингования не превышают 0,028 мм, а отклонение от круглости – 0,006 мм, что укладывается в заданные допуски.

Операции механической обработки зеркала цилиндра вновь разработанного технологического процесса представлены в (табл. 3).

Таблица 3. Операции механической обработки зеркала цилиндра вновь разработанного технологического процесса

№ и название операции	Модель оборудования	Основное время, мин
(1) 0350 Токарная с ЧПУ	Токарный с ЧПУ 1ТНС-6008	6,99
(2) 0640 Расточная	Агрегатно-расточной станок APC-4/Ц	6,06
(3) 1120 Хонинговальная с ЧПУ	Хонинговальный с ЧПУ CC740B2	3,5
Итого		18,55

Расчет основного времени на операцию «Хонинговальная с ЧПУ» произведен для каждого перехода по формуле:

$$T_0 = \frac{L_p}{S_\phi \cdot n_\phi} \cdot i, \text{ мин},$$

где L_p – расчетная длина обработки, мм; S_ϕ – фактическая, принятая по паспорту станка, величина подачи изделия или инструмента, мм/об; n_ϕ – фактическая, принятая по паспорту станка, частота вращения детали или инструмента, мин^{-1} ; i – число ходов инструмента.

Сопоставление трудоемкости изготовления изделий по новой технологии (табл. 3) по сравнению с базовой (табл. 1) составит экономию в 2,1 раза.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что совмещение двух переходов растачивания на одной операции позволяет на порядок снизить наследственные погрешности формы расточенного отверстия и, соответственно, сократить количество операций хонингования до одной. Опытные результаты показывают более высокую исправляющую способность растачивания по сравнению с хонингованием. Кроме того при растачивании заготовка не так сильно нагревается ввиду концентрированной зоны резания по сравнению с размерами и объемом металла заготовки.

Выводы

Проведенные опытные работы показывают целесообразность максимально точной обработки зеркала цилиндра растачиванием перед хонингованием. Это повышает общую производительность и качество цилиндров.

Список литературы

1. Производственное Объединение «Туламашзавод». [Электронный ресурс]. URL: www.tulamash.ru (дата обращения: 03.10.2019)
2. ГОСТ 7769–82. Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. (С Изм. 1). — Введ. 01.01.1983.
3. Чугуны, их свойства и области применения. [Электронный ресурс] URL: http://mkkrasnoyarsk.ru/d/1624922/d/chugun_khar-ki.pdf (дата обращения: 23.04.2019).
4. Zhenting W., Hongming G. Investigation on microstructure and wear resistance of the new Cr-W-Mo-V high-alloy wear resistant cast iron // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1061–1062. P. 670–673.
5. Gromczyk M., Kondracki M., Studnicki A., Szajnar D. Stereological analysis of carbides in hypoeutectic chromium cast iron // *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15. Iss. 2.
6. Biswas S., Monroe C., Prucha T. Use of Published Experimental Results to Validate Approaches to Gray and Ductile Iron Mechanical Properties Prediction // *International Journal of Metalcasting*. 2017. Vol. 11. Iss. 4. P. 656–674.
7. ГОСТ Р 53464–2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку (с Изм. № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2010. 62 с.
8. Ямников А. С., Сафарова Л. Л. Синтез диаграммы Аббота // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 8. С. 30–34.
9. Ямников А.С., Сафарова Л.Л. Снижение влияния технологической наследственности на точность хонингованных заготовок цилиндров применением естественного старения // *Черные металлы*. 2019. № 11. С. 47–51.
10. Васильев А. С., Ямников А. С., Ямникова О. А., Матвеев И. А. Влияние наследственных технологических погрешностей изготовления базовой трубы на параметры собранного реактивного двигателя // *Черные металлы*. 2019. № 1. С. 67–71.
11. Технология машиностроения. В 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М. Дальского. Издательство: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. 564 с.

12. Владимирский станкостроительный завод. [Электронный ресурс] URL: http://www.vzfs.ru/catalog/spetsialnoe_oborudovanie/agregatno_rastochney_stanok_modeli_ars_4/ (Дата обращения 06.07.2019).
13. Бабичев А.П. Хонингование: [монография] / А.П. Бабичев, Ю.Н. Поляничков, А.В. Славин, [и др.] под ред. А.П. Бабичева; М-во образования и науки Рос. Федерации; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т; Донской гос. техн. ун-т. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. – 245 с.
14. Uwe Moos, Dirk Bahre. Analysis of Process Forces for the Precision Honing of Small Bores / *Procedia CIRP*. Volume 31, 2015, Pages 387–392. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.066>.
15. R. Joliet, M. Kansteiner, P. Kersting. A process Model for Force-controlled Honing Simulations / *Procedia CIRP*, Volume 28, 2015, pp. 46–51. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.009.
16. Shaowu Gao, Changyong Yang, Jihua Xu, Hao Su Yucan Fu. Modelling and simulation of bore diameter evolution in finish honing / *Procedia Manufacturing*. Volume 26, 2018, Pages 462–468. Show more. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.054>.

References

1. Production Association "Tulamashzavod". [Electronic resource]. URL: www.tulamash.ru (date accessed: 03.10.2019)
2. GOST 7769–82. Alloy cast iron for castings with special properties. Stamps. (With Amendment 1). - Introduction. 01/01/1983.
3. Cast irons, their properties and applications. [Electronic resource] URL: http://mkkrasnoyarsk.ru/d/1624922/d/chugun_khar-ki.pdf (date of access: 23.04.2019).
4. Zhenting W., Hongming G. Investigation on microstructure and wear resistance of the new Cr-W-Mo-V high-alloy wear resistant cast iron // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1061–1062. P. 670–673.
5. Gromczyk M., Kondracki M., Studnicki A., Szajnar D. Stereological analysis of carbides in hypoeutectic chromium cast iron // *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15. Iss. 2.
6. Biswas S., Monroe C., Prucha T. Use of Published Experimental Results to Validate Approaches to Gray and Ductile Iron Mechanical Properties Prediction // *International Journal of Metalcasting*. 2017. Vol. 11. Iss. 4. P. 656–674.
7. GOST R 53464-2009. Castings from metals and alloys. Dimensional tolerances, weights and allowances for machining (with amendments No. 1, 2). М.: Standard-tinform, 2010.62 p.
8. Yamnikov AS, Safarova LL Synthesis of the Abbot diagram // *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2018.No. 8. P. 30–34.
9. Yamnikov A.S., Safarova L.L. Reducing the influence of technological heredity on the accuracy of

- honed cylinder blanks by using natural aging. Chernyye metally. 2019. no. 11, pp. 47-51.
10. Vasiliev AS, Yamnikov AS, Yamnikova OA, Matveev IA Influence of hereditary technological errors in the manufacture of the base pipe on the parameters of the assembled jet engine. Chernyye metally. 2019. No. 1. P. 67–71.
11. Technology of mechanical engineering. In 2 volumes. Vol. 1. Fundamentals of mechanical engineering technology / V.M. Burtsev, A.S. Vasiliev, A.M. Dalsky and others; Ed. A.M. Dalsky. Publisher: MSTU im. N.E. Bauman. 2001.564 p.
12. Vladimirsky machine-tool plant. [Electronic resource] URL: http://www.vzfs.ru/catalog/spetsialnoe_oborudovanie/agregatno_rastochniy_stanok_modeli_ars_4/ (Date of treatment 07/06/2019).
13. Babichev A.P. Honing: [monograph] / A.P. Babichev, Yu.N. Polyanchikov, A.V. Slavin, [and others] ed. A.P. Babichev; Ministry of Education and Science Ros. Federation Volgogr. state architect-build un-t; Don state tech. un-t - Volgograd: VolgGASU, 2013. -245 p.
14. Uwe Moos, Dirk Bahre. Analysis of Process Forces for the Precision Honing of Small Bores / Procedia CIRP. Volume 31, 2015, Pages 387-392. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.066>.
15. R. Joliet, M. Kansteiner, P. Kersting. A process Model for Force-controlled Honing Simulations / Procedia CIRP, Volume 28, 2015, pp. 46-51. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.009.
16. Shaowu Gao, Changyong Yang, Jiuhua Xu, Hao Su Yucan Fu. Modelling and simulation of bore diameter evolution in finish honing / Procedia Manufacturing. Volume 26, 2018, Pages 462-468. Show more. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.054>.

УДК 62-52

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

М.А. Тамаркин¹, Э.Э. Тищенко¹¹ФБГОУ ВО Донской государственный технический университет, г.Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

В статье представлены результаты исследований процесса абразивной обработки деталей из полимеркомпозитных материалов. Описаны особенности обработки полимеркомпозитов, технология получения заготовки гидроабразивной резкой. Проведены исследования и описаны этапы подготовки детали из полимеркомпозитного материала под операцию «склеивание». Приведены зависимости для определения шероховатости поверхности при гидроабразивной резке полимеркомпозитного материала. Выполнены исследования по достижению необходимой шероховатости поверхности при склеивании заготовок. Приведена зависимость, описывающая шероховатость поверхности, достижение которой необходимо для обеспечения надежного клеевого соединения. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки. Описана методика их проведения, применяемый инструмент и оснастка. Выполнено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Установлена их высокая сходимость. Приведены результаты экспериментальных исследований по подготовке деталей из полимеркомпозитных материалов к склеиванию. Подобран абразивный инструмент, режимы обработки. Предложена методика проектирования технологического процесса абразивной обработки деталей из полимеркомпозитных материалов.

Ключевые слова: обработка полимеркомпозитных материалов, гидроабразивная резка, обработка лепестковыми кругами, шероховатость поверхности.

SURFACE QUALITY ASSURANCE DURING ABRASIVE TREATMENT OF POLYMER COMPOSITE PARTS

М.А. Tamarkin¹, E.E. Tishchenko¹¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of studies of the process of abrasive processing of parts from polymer composite materials. Peculiarities of polymer composites processing, technology of production of preform by hydroabrasive cutting are described. Studies have been carried out and stages of preparation of a part from polymer composite material for "gluing" operation have been described. Dependencies for determination of surface roughness during hydroabrasive cutting of polymer composite material are given. Studies have been carried out to achieve the necessary surface roughness when gluing blanks. A dependency describing the surface roughness required to achieve a reliable adhesive connection is given. Results of theoretical and experimental studies of hydroabrasive cutting process are presented. Method of their execution, applied tool and tooling are described. The results of theoretical and experimental studies were compared. Their high convergence has been established. The results of experimental studies on preparation of parts from polymer composite materials for gluing are presented. Abrasive tool, machining modes are selected. Method of design of process of abrasive processing of parts from polymer composite materials is proposed.

Keywords: treatment of polymer composite materials, hydroabrasive cutting, treatment with petal circles, surface roughness.

Современное машиностроительное производство в условиях рыночной экономики может развиваться за счет повышения производительности труда, применения новых технологий и материалов. В связи с этим для

изготовления деталей машин все большее применение находят полимеркомпозитные материалы (ПКМ). Они состоят из композиции двух и более материалов: основы и связующего. Изделия из полимеркомпозитов по

сравнению с металлическими имеют лучшие физико-механические свойства, при этом, как правило, гораздо меньше весят. Анизотропная структура полимеркомпозитного материала позволяет распределять полезную нагрузку по всей конструкции изделия, что повышает его эксплуатационные свойства. Как правило, слои основы укладываются во взаимно противоположных направлениях, а связующее обеспечивает неподвижность и заполняет пространство между слоями. Поверхность детали из ПКМ после формовки представляет собой верхний слой композита, состоящий из отвержденного связующего, имеет макро- и микроотклонения от идеальной поверхности. На поверхности детали могут находиться вещества, используемые в качестве разделительных слоев при формовании, а также продукты химических реакций отверждения связующего, что может придавать поверхности антиадгезионные свойства.

Для удаления антиадгезионного слоя и создания оптимальной шероховатости поверхности детали необходимо подвергать механической обработке. Механическая обработка ПКМ имеет ряд особенностей: образуются расслоения, волокна вблизи места обработки разлохмачиваются, при резании выделяется большое количество тепла, которое вызывает прижоги, разрушение материала. При этом применение смазывающе-охлаждающих жидкостей ограничено, так как их воздействие вызывает расслоение, набухание и потерю физико-механических свойств в связи с тем, что материал обильно поглощает влагу. Применение жидкости при обработке ПКМ требует дальнейшего изучения.

На большинстве предприятий, где производятся детали из полимеркомпозитов, технологический процесс их механической обработки состоит из раскроя листа и дальнейшей механической обработки заготовки. Часто полимеркомпозитные детали подвергаются склеиванию, для которого необходима тщательная подготовка поверхностного слоя. В настоящей статье мы провели исследования формирования качества поверхности при гидроабразивной резке ПКМ, а так-

же при подготовке его поверхности к дальнейшему склеиванию.

Одной из наиболее современных и перспективных технологий раскроя заготовок из полимеркомпозиционных материалов является гидроабразивная резка. Широкие диапазоны обрабатываемых толщин материалов, высокая производительность, получение высокого качества поверхности реза, возможность обработки заготовок сложной геометрии делает этот метод обработки наиболее востребованным в условиях современного производства. Отсутствие термического воздействия на материал, низкая сила резания, эрозионный характер разрушения не способствует развитию внутренних напряжений в зоне реза. Кроме того, в отличие от лезвийной обработки и обработки связанным абразивом, для гидроабразивной резки характерен малый припуск и высокая точность реза. Процесс гидроабразивной резки сложный, малоизученный, на его результат влияет множество технологических параметров, таких как давление режущей струи, подача сопла, зернистость, твердость, расход абразива, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, физико-механические характеристики обрабатываемого полимеркомпозита. Сложность проектирования технологического процесса резки заключается в выборе оптимальных режимов резания, при которых будет обеспечиваться заданное качество поверхностного слоя детали при наименьших затратах. Применение гидроабразивной резки для обработки ПКМ требует также исследования влияния воды на состояние поверхности реза. При проведении предварительных исследований установлено, что сверхзвуковая струя воды с абразивом обладает настолько большой энергией, что ее взаимодействие можно рассматривать как воздействие твердого абразивного инструмента. При резке вода не отклоняется от траектории движения, и воздействие на материал заготовки минимально, т.е. поглощение воды не происходит [1-4].

Как известно, при резании материалов на большую глубину, в том числе и полимеркомпозитных материалов, в зоне контакта абразивной струи и разрезаемого матери-

ала возникают две четко отслеживаемые зоны: зона с низкой шероховатостью поверхности (зона гладкого реза) и зона с более высокой шероховатостью (зона волнистого реза) [1,2]. Их появление обусловлено тем, что при проникании струи к низу реза, возрастает угол атаки внедрения частиц. Большое число частиц, не вызывая полезных соударений, отражаются от материала, новые частицы встречая препятствие отражаются, блокируют частицы поступающие в зону резания. В результате образуется зона волнистого реза с высокой шероховатостью поверхности. При этом в верхней части реза соударению частиц ничего не препятствует, поэтому образуется поверхность более гладкая, с меньшей шероховатостью. Технологи на производстве сталкиваются с трудностью определения не только шероховатости поверхности обеих зон, но и размеров зоны гладкого и волнистого реза. Прогнозирование шероховатости поверхности позволяет определить требуются ли на детали чистовая обработка и какую величину припуска необходимо заложить под нее.

Проведены теоретические исследования формирования профиля шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке ПКМ. Выявлены закономерности, описывающие взаимодействия частиц с поверхностью обрабатываемой детали. Исследовано влияние технологических параметров обработки на шероховатость поверхности реза, а также описан механизм формирования зоны волнистого и гладкого резов, на которые условно разделен получаемый рез. Определена максимальная глубина внедрения частицы [1-3]:

$$h_{\max} = DK_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \rho_{\text{ч}}}{3c \rho_{\text{см}} k_s \sigma_s}} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частиц, k_s – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта, K – объемная концентрация частиц в рабочей жидкости, $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление смеси; $\rho_{\text{см}}$ – плотность рабочей смеси жидкости и частиц, σ_s – предел текучести материала детали, D –

диаметр частицы; K_L – коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали, c – коэффициент оценивающий несущую способность контактной поверхности, α – угол встречи частицы с поверхностью детали.

Поскольку вероятность совершения микрорезания частицами в какой-либо фиксированный интервал времени зависит от продолжительности интервала и не зависит ни от начала его отсчета, ни от возможности реализации предыдущих или последующих аналогичных актов, то имеются основания считать рассматриваемый поток абразивных частиц, как поток событий, соответствующий распределению Пуассона. В законе Пуассона λ – интенсивность потока событий. Примем, что λ – это число полезных взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки. Тогда через сторону квадрата упаковки $2R$ будет проходить $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину будет проходить $\frac{L_{\text{ед}}}{2R}$ частиц. С учетом этого

установлена зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости поверхности при гидроабразивной резке ПКМ [1,2]:

$$Ra = 13,01 K_{\alpha}^{Ra} \cdot R \sqrt{K_L \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{дин}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_{\text{см}} \cdot k_s \cdot \sigma_s}}} \quad (2)$$

где K_{α}^{Ra} – коэффициент, учитывающий угол падения струи, R – радиус частицы,

Число полезных взаимодействий λ можно представить как функцию от подачи, расхода абразива, глубины измерения шероховатости $\lambda = f(S, Q, h)$. Величину λ сложно описать теоретически, поэтому были выполнены экспериментальные исследования для нахождения комплекса регрессионных зависимостей для его определения.

Экспериментальные исследования выполнялись на базе машиностроительного предприятия на установке 5-ти координатной гидроабразивной резки «Flow». В качестве абразива использовался гранатовый песок. Экспериментальные исследования проводились на стеклопластике ВПС-7, армиро-

ванным титановой фольгой ОТ4-0-0,1×220 и применяемым для изготовления лонжерона лопасти несущего винта вертолета Ми-28.

Измерение шероховатости производили на цифровом профилометре Surtronic 25 фирмы Taylor Hobson. Влияние воздействия воды при резке ПКМ исследовали на дифференциально сканирующем калориметре DSC 200 F3 Maia производства NETZSCH. Статистическая обработка результатов исследований выполнялась с использованием программы прикладных и научных расчетов MathCad.

Данные экспериментов показывают, что при увеличении подачи сопла ухудшается шероховатость поверхности реза, растет отношение высоты зоны волнистого реза к зоне гладкого реза. Установлено, какое качество поверхности и при каких режимах обработки можно получить при гидроабразивной резке ПКМ. Образцы разрезали при ступенчатом изменении подачи сопла режущей головки от 5 до 480 мм/мин. Учитывая анизотропию свойств материала и слоистую структуру, шероховатость поверхности реза измеряли в двух направлениях: перпендикулярно и вдоль направления подачи.

На основании полученных данных был проведен регрессионный анализ, результатом которого являются однофакторная модель формирования поверхности реза при измерении шероховатости поперек сечения реза (3) и двухфакторная модель описывающая формирование профиля шероховатости поверхности реза при измерении шероховатости вдоль сечения реза и изменении глубины измерения шероховатости (4):

$$Ra = 3.538 \cdot 10^{-6} + 4.721 \cdot 10^{-6} \cdot S \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ra = & 2.706 \cdot 10^{-13} \cdot \psi \cdot \psi - \\ & - 3.157 \cdot 10^{-10} \cdot \psi + 1.886 \cdot 10^{-8} \cdot \psi^2 - \\ & - 3.062 \cdot 10^{-7} \cdot \psi - 1.301 \cdot 10^{-10} \cdot \psi \cdot \psi + \\ & + 1.469 \cdot 10^{-12} \cdot \psi^2 \cdot \psi + \\ & + 4.288 \cdot 10^{-6} + 1.324 \cdot 10^{-8} \cdot \psi - \\ & - 5.142 \cdot 10^{-11} \cdot \psi^2 + 7.308 \cdot 10^{-14} \cdot \psi^3 \end{aligned} \quad (4)$$

Проведены исследования влияния воды на термофизические свойства композита при гидроабразивной резке. ПКМ на основе стеклопластика очень чувствительны к поглощению влаги, поэтому для того чтобы убедиться в возможности обработки данного типа материала гидроабразивным способом производились исследования методом дифференциально сканирующей калориметрии. Для этого сравнивали сухой материал со слоем материала, где происходил контакт с гидроабразивной струей. Исследования проводили как сразу после резки, так и спустя неделю, после высыхания образцов. Слой стружки снимался в зоне 1 мм от края реза. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что в процессе резки происходит поглощение воды близлежащих к гидроабразивной струе слоев материала. Об этом свидетельствует изменение температуры перехода материала в другое фазовое состояние. Однако спустя неделю после высыхания материал вновь принимает исходные характеристики. Таким образом можно считать, что применение технологии гидроабразивной резки возможно для ПКМ.

Выполнены исследования по определению шероховатости поверхности реза согласно теоретической модели (2). Расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 15%, что свидетельствует о том, что полученные теоретические зависимости адекватно описывают процесс формирования шероховатости поверхности и позволяют определить шероховатость поверхности реза при обработке ПКМ.

Как отмечалось ранее, полученная заготовка из полимеркомпозитного материала часто подвергается склеиванию. На многих машиностроительных предприятиях для подготовки поверхности под операцию «склеивание» используют абразивную шлифовальную шкурку (ГОСТ 13344-79, ГОСТ 5009-82 и ГОСТ 10054-82) [4-5]. Обработка производится вручную до удаления глянца. С поверхности детали снимается тонкий слой сполимеризованного связующего. При этом важно не повредить волокна. Существенным недостатком такой обработки яв-

ляется высокая трудоемкость операции, которая выполняется вручную, что требует больших затрат по времени обработки. Кроме того, при обработке ПКМ шлифовальной шкуркой происходит быстрый износ инструмента вследствие его засаливания. Листы шлифовальной шкурки необходимо менять по мере износа, чтобы они сохраняли свою режущую способность.

На процесс обработки значительное влияние оказывает человеческий фактор. Во время зашкуривания исполнителю необходимо следить за нажимом на шлифовальный инструмент. При недостаточном нажиме глубина обработки будет небольшой, что приводит к наименьшему смачиванию субстрата клеем. При чрезмерном нажиме могут повреждаться волокна композита и нарушаются геометрические параметры детали.

Альтернативой зашкуриванию может быть применение шлифовальных головок и лепестковых кругов, не повреждающих волокна композита. При этом процесс будет механизирован, что приведет к снижению времени обработки заготовки, а, следовательно, общей трудоемкости изготовления детали.

При решении задачи снижения трудоемкости и доли ручного труда, при одновременном повышении стойкости инструмента и обеспечении стабильных характеристик поверхностей эффективны два подхода: исследование процессов формирования шероховатости поверхности деталей из ПКМ при различных методах обработки (необходимо получить оптимальную для склеивания шероховатость поверхности, а не минимальную как при обработке изделий из металла) и подбор оптимального шлифовального инструмента для механизации процесса зашкуривания. Работы по изучению соответствующих технологических возможностей и процессов проводились на базе машиностроительного предприятия. Исследовались изделия из полимеров, применяемых для производства деталей авиационной техники.

Для механизации процесса шлифования было принято решение о применении эластичных шлифовальных инструментов, конструкция и свойства которых допускают

значительное перемещение зерен во время работы от статического положения в направлении нормальной составляющей силы резания [7]. Это обеспечивает стойкость инструмента, уменьшение напряженности теплового потока, отсутствие микрорастрескиваний поверхностного слоя по сравнению с «жестким» шлифованием шкуркой [8]. Многие изделия из полимерных композиционных материалов (обшивки, оболочки, колпаки и т.п.) имеют малую жесткость. Для них целесообразно применять эластичный шлифовальный инструмент. Упругое основание такого инструмента является своеобразным амортизатором, введенным в технологическую систему, который способен гасить колебания и вибрации, возникающие при абразивной обработке [4-7]. Как уже отмечено ранее, большинство полимерных композиционных материалов гигроскопичны, поэтому недопустимо использование охлаждающих жидкостей при обработке. Конструкция инструмента на гибкой основе позволяет применять его в процессе шлифования без применения охлаждающей жидкости.

Проведены теоретические исследования формирования качества поверхности детали из ПКМ, предназначенной для дальнейшего склеивания.

Для определения шероховатости поверхности была использована методика, разработанная профессором Королевым А.В. [8], для описания формирования профиля шероховатости, примененная при обработке связанным абразивом. На основании исследований, представленных в [8], получена зависимость для определения шероховатости поверхности ПКМ, обработанной гибкими лепестковыми кругами:

$$Ra = 0,9 \sqrt{\frac{t_c \cdot v_s \cdot l_f^3 \cdot L_{eo}}{60 \cdot v_k \cdot L_k}} \quad (5)$$

где t_c – толщина слоя материала, снимаемого за один проход, v_s – скорость подачи, l_f – фактическое расстояние между контактными зернами, L_{eo} – ширина обрабатываемого участка, v_k – скорость круга, L_k – суммарная протяженность лепестков.

Для проверки адекватности полученной зависимости был проведен большой комплекс экспериментальных исследований подготовки полимеркомпозитных деталей под операцию «склеивание». Были изготовлены образцы из ПКМ. Материал образцов — стеклопластик ВПС-7, состоящий из композиции тканого стеклопластикового полотна и сполимеризованного эпоксидного связующего. В качестве обрабатывающего инструмента был выбран гибкий абразивный лепестковый круг фирмы *Klingspor* модели ММ 630 с рассеченными ламелями (рис. 1).

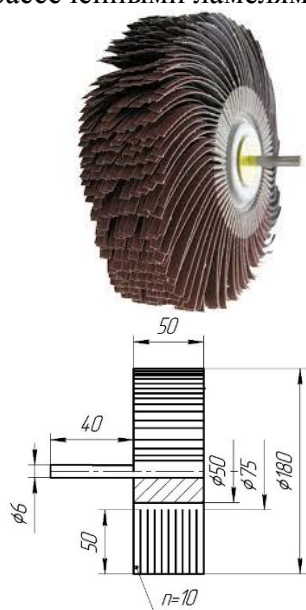


Рис. 1. Лепестковый круг фирмы *Klingspor* модели ММ 630: диаметр – 180 мм; ширина – 50 мм; зерно – электрокорунд; связка – синтетическая смола

Лепестковый круг фирмы *Klingspor* представляет собой шлифовальную оправку Ø6 мм, на которой радиально закреплены лепестки шлифовальной шкурки. Каждый лепесток рассечен на 10 равных сегментов. Длина сегмента составляет 50 мм. Лепестки завернуты в одном направлении. Конструкция лепестков и их крепление на оправку позволяет отнести этот круг к очень эластичному инструменту. Данная модель имеет размер зерна по стандарту FERA 240, что соответствует по ГОСТ 3647-80 [10] зернистости М63 и шлифовальной шкурке №6.

Эффективность процесса шлифования зависит от режимов обработки: скорости резания, скорости подачи, удельного давления. Следует подобрать скорость вращения круга, при которой происходит стабилизация

процесса обработки, т. е. под воздействием центробежных и упругих сил шлифовальные лепестки имеют наилучший контакт с обрабатываемой поверхностью. Изменение скорости подачи и удельного давления при шлифовании (изменение динамического радиуса r_d круга, который представляет собой расстояние от центра круга до поверхности соприкосновения лепестков круга с обрабатываемой деталью при выключенном станке) также влияет на качество поверхности. [7, 9-14].

Для подбора оптимальных режимов обработки гибкий шлифовальный круг был установлен в шпиндель вертикально-фрезерного станка, и с его помощью обработаны образцы из ПКМ. Выбраны диапазоны частоты вращения (450 – 1400) об/мин, скорости подачи (100 – 800) мм/мин.

Учитывая конструкцию и эластичность круга, обработку производили при трех значениях динамического радиуса: r_d – 55 мм, 60 мм, 65 мм. Данные значения r_d приняты с учетом максимальной, средней и минимальной площади контакта лепестков с обрабатываемой поверхностью при выключенном станке. Образцы устанавливались в специальных ложементах и были закреплены при помощи прижимных планок.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что образцы, обработанные лепестковым кругом, имеют равномерную, матовую, без глянца поверхность. Нарушений целостности волокон не наблюдается. После обработки были проведены замеры показателей шероховатости на профилометре *Taylor Hobson* и визуальный осмотр.

Произведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Установлена их высокая сходимость.

Разработана методика проектирования и оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки ПКМ и подготовки их поверхности под дальнейшее склеивание, учитывающая заданную шероховатости поверхности реза и склеиваемой поверхности при обеспечении минимальной себестоимости изделия [1-4, 9-12]. Расчет шероховато-

сти поверхности реза производится по математической зависимости (2), представленной ранее. Задавая начальные параметры обработки (P_{din} , R , ρ_{ch} , h , L , S , Q) рассчитываем число полезных соударений λ . Затем рассчитываем значение шероховатости R_a . Далее производим отсеивание вариантов технологических процессов, при которых не выполняется условие: шероховатость обработанной поверхности меньше или равна заданной. И производим расчет себестоимости реза. Выбираем ту комбинацию параметров обработки, при которой себестоимость реза будет минимальной.

Проектирование операции подготовки детали из ПКМ к склеиванию начинается с технологической оценки конструкции детали и клеевого соединения, в котором участвует эта деталь. Для каждого вида клеевого соединения и вида адгезива разработчик должен указывать необходимый класс шероховатости поверхности, подлежащей склеиванию, исходя из которого технолог выбирает зернистость шлифовального инструмента и режимы обработки. Обработанная поверхность должна быть однородной и обработанной равномерно по всей площади для склеивания. Количественным показателем качества обработки является параметр шероховатости поверхности R_a . Замер данного параметра можно проводить с помощью профилометра щупового типа. А необходимая величина шероховатости поверхности обеспечивается технологически за счет корректного назначения режимов обработки и выбора инструмента.

Деталь, поступающая на операцию по подготовке поверхности под склеивание должна быть чистой и не иметь остатков материалов опрессовки (разделительные материалы, материалы вакуумных мешков, герметиков и т.п.). Технологические припуски, если они не нужны на последующих операциях, должны быть удалены. Поверхность, подлежащая зашкуливанию, осматривается на наличие наплывов, шагреней и других дефектов, которые подлежат удалению с поверхности детали.

Осуществляется выбор зернистости абразивного круга в зависимости от необходи-

мой шероховатости изделия для обеспечения прочности клеевого соединения. Для менее жестких и тонкостенных изделий и для подготовки поверхности под склеивание рекомендуется использовать шлифовальные круги зернистостью по FERA 240, 220, 180, 150. Для обработки деталей с наличием довольно толстого поверхностного эпоксидного слоя (0,01 мм и более), рекомендуется применять шлифовальные круги зернистостью по FERA 40, 80, 100, 120. Для сошкуривания поверхностных дефектов (наплывов, шагреней, перепадов и т.п.) с одновременной подготовкой поверхности к склеиванию рекомендуется зашкуривание производить шлифовальными лепестковыми кругами зернистостью по FERA 80, 100, 120, что будет более производительно по сравнению с кругами меньшей зернистостью.

Подбираются режимы обработки. Из площади поверхности, подлежащей зашкуриванию, рассчитывается количество проходов инструмента. Обработку деталей сложной формы при наличии поверхностей, расположенных под углом, радиусов скругления, криволинейных поверхностей и т.п. элементов конструкций, следует сначала обработать эти поверхности и затем зашкурить плоские поверхности. Механическую обработку криволинейных деталей возможно проводить на высокотехнологичном оборудовании: станки и установки с программным управлением. В этом случае движение инструмента происходит по программе и траектория инструмента повторяет теоретический контур детали.

При исследовании процесса шлифования стеклопластиковых деталей лепестковым кругом были выбраны постоянные параметры процесса: частота вращения круга n (об/мин), подача S (мм/мин) и значение g_d (мм).

После окончания обработки поверхность детали подлежит очистке от продуктов зашкуривания. Очистку необходимо проводить чистой хлопчатобумажной салфеткой или щёткой-сметкой с мягкой щетиной, убирая стеклопластиковую пыль, не поднимая её в воздух.

Контроль обработанной поверхности заключается в визуальном осмотре поверхности на отсутствие необработанных участков (глянца на поверхности), оголения и разрушения волокон композита.

Список литературы

1. Тамаркин М.А., Верченко А.В., Кишко А.А. Повышение эффективности гидроабразивной резки толстолистовых авиационных материалов // Вестник МАИ, Т.24, №2 – М.: МАИ, 2017 – с. 104-114.
2. Тамаркин М.А., Верченко А.В., Кишко А.А. Повышение качества гидроабразивной резки деталей из авиационных материалов / Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева №2(41) – Рыбинск: РГАТУ, 2017. – с. 88-96.
3. Тамаркин М.А., Верченко А.В. Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке / Вестник ДГТУ №2(89). – Ростов н/Д: ДГТУ, 2017. – с. 116-130.
4. Тамаркин М.А., Козулько Н.В., Верченко А.В. Механизация процесса абразивной обработки деталей из композиционных материалов / Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева №2(41) – Рыбинск: РГАТУ, 2017. – с. 75-82.
5. Тамаркин М.А., Козулько Н.В. Механизация процесса абразивной обработки деталей из композиционных материалов // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева №2(41) – Рыбинск: РГАТУ, 2017. – с. 75-82.
6. Козулько Н.В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию «склеивание» / Вестник ДГТУ 18(2) – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – с. 179-189.
7. Козулько Н.В., Семиниченко К.В. Исследование процесса окончательной абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) / Научно-технический вестник Поволжья №1 2019 – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2019. – с. 55-59.
8. Hamouda, K., Bournine, H., Mikhail Tamarkin, Anatoliy Babichev, Saidi, D., Amrou, H.E. Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State / Materials Science, **52** (2), 216-221 (2016). Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727.
9. Tamarkin M.A., Butenko V. I., Isaev A.N., Murugova E.V. Optimization of the flat stock cutting process by hydroabrasive jet. /MATEC Web of Conferences, 226 (2018).
10. Hamouda K., Bournine H., Amrou H.E., Tamarkin M.A., Babichev A.P., Saidi D. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding on

the surface state / Materials Science. 2016. Т. 52. № 2. С. 216-221.

11. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Fedorov V.P. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016.
12. Tamarkin M.A., Tishchenko E. E., Kazakov D.V., Isaev A.G. Reliability of centrifugal–rotational finishing by steel shot/ Russian Engineering Research. - 2017. - Vol. 37, Is. 4. - P. 326-329
13. Solovev A.N., Van T.N., Mikhail Tamarkin, Panfilov I.A., Wang J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method/Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018). Abstracts & Schedule., 334-336 (2018)
14. Mikhail Tamarkin, Elina Tishchenko, Irina Chukarina., Tamara Sosnitskaya Part Processing Technology in Transport Engineering/Proceedings of the VIII International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2019, Volume 1 (2019).

References

1. Tamarkin M.A., Verchenko A.V., Kishko A.A. Povyshenie effektivnosti gidroabrazivnoy rezki tolstoлистовых авиационных материалов // Vestnik MAI, T.24, №2 – М.: MAI, 2017 – с. 104-114.
2. Tamarkin M.A., Verchenko A.V., Kishko A.A. Povyshenie kachestva gidroabrazivnoy rezki detalей iz aviacionnyh materialov / Vestnik RGATU im. P.A. Solov'eva №2(41) – Rybinsk: RGATU, 2017. – с. 88-96.
3. Tamarkin M.A., Verchenko A.V. Issledovanie sherohovatosti poverhnosti reza pri gidro-abrazivnoy rezke / Vestnik DGTU №2(89). – Ro-stov n/D: DGTU, 2017. – с. 116-130.
4. Tamarkin M.A., Kozul'ko N.V., Verchenko A.V. Mekhanizaciya processa abrazivnoy obrabotki detalей iz kompozicionnyh materialov / Vest-nik RGATU im. P.A. Solov'eva №2(41) – Ry-binsk: RGATU, 2017. – с. 75-82.
5. Tamarkin M.A., Kozul'ko N.V. Mekhanizaciya processa abrazivnoy obrabotki detalей iz kompozicionnyh materialov // Vestnik RGATU im. P.A. Solov'eva №2(41) – Rybinsk: RGATU, 2017. – с. 75-82.
6. Kozul'ko N.V. Mekhanizaciya abrazivnoy obra-botki detalей iz polimernyh kompozitnyh ma-terialov pod operaciyu «skleivanie» /Vestnik DGTU 18(2) – Rostov-na-Donu: DGTU, 2018. – с. 179-189.
7. Kozul'ko N.V., Seminichenko K.V. Issledovanie processa okonchatel'noy abrazivnoy obrabotki detalей iz polimernyh kompozicionnyh mate-rialov (PKM) / Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya №1 2019 – Kazan': Nauchno-tekhnicheskij vestnik Pov-olzh'ya, 2019. – с. 55-59.
8. Hamouda, K., Bournine, H., Mikhail Tamarkin, Anatoliy Babichev, Saidi, D., Amrou, H.E. Effect of

-
- the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State/Materials Science, 52 (2), 216-221 (2016). Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727.
9. Tamarkin M.A., Butenko V. I., Isaev A.N., Murugova E.V. Optimization of the flat stock cutting process by hydroabrasive jet. /MATEC Web of Conferences, 226 (2018).
 10. Hamouda K., Bournine H., Amrou H.E., Tamarkin M.A., Babichev A.P., Saidi D. Effect of the velocity of rotation in the process of vibration grinding on the surface state / Materials Science. 2016. T. 52. № 2. S. 216-221.
 11. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Fedorov V.P. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016.
 12. Tamarkin M.A., Tishchenko E. E., Kazakov D.V., Isaev A.G. Reliability of centrifugal–rotational finishing by steel shot/ Russian Engineering Research. - 2017. - Vol. 37, Is. 4. - P. 326-329.
 13. Solovev A.N., Van T.N., Mikhail Tamarkin, Panfilov I.A., Wang J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method/Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018). Abstracts & Schedule., 334-336 (2018)
 14. Mikhail Tamarkin, Elina Tishchenko, Irina Chukarina., Tamara Sosnitskaya Part Processing Technology in Transport Engineering/Proceedings of the VIII International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2019, Volume 1 (2019).
-

УДК 621. 923:621.90.17

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПРОФИЛЕЙ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН И ПЛОЩАДОК ИЗНОСА В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, А.С. Часовитина¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены результаты исследований текущего состояния рабочей поверхности абразивного инструмента, которое определяется формой режущих кромок, их числом, распределением, формой инструмента, наличием на режущих кромках и в порах круга частичек обрабатываемого материала. Форма режущих кромок, их "острота" существенно влияют на производительность процесса обработки, на величину силы резания, на температуру шлифования. Для оценки адекватности полученных зависимостей проведены экспериментальные исследования. В качестве индентора использовались конуса из легированной стали, быстрорежущей стали и твердого сплава с формой вершины в виде параболоида вращения. В процессе работы в плоскости вектора скорости резания появляется площадка износа, которая непрерывно увеличивается, в плоскости, перпендикулярной вектору скорости, форма вершины зерна остается близкой к форме параболоида, но радиус при вершине непрерывно увеличивается. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что их отклонения друг от друга не превышают 9%, что позволяет рекомендовать полученные зависимости для практического применения.

Ключевые слова: абразивный инструмент, форма режущих кромок, индентор, площадка износа, форма вершины зерна.

ANALYSIS AND MODELING OF PATTERNS OF CHANGES IN THE SIZE OF PROFILES OF ABRASIVE GRAINS AND PLATFORMS WEAR IN THE GRINDING PROCESS

S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, A. S. Chasovitina¹¹FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russian Federation

Abstract

In the article the results of studies of the current state of the working surface of the abrasive tool, which is determined by the shape of the cutting edges, their number, distribution, shape of the tool, the presence of cutting edges and in the pores of the circle of particles of the processed material. Form the cutting edges, their "sharpness" significantly affect the performance of the treatment process, the magnitude of the cutting force and the grinding temperature. Experimental studies were conducted to assess the adequacy of the obtained dependencies. As an indenter, we used cones made of alloy steel, high-speed steel and hard alloy with a vertex shape in the form of a paraboloid of rotation. In the process, in the plane of the vector cutting speed appears pad wear, which continually increases in a plane perpendicular to the velocity vector, form the top of the grain remains close to the form of a paraboloid, but the radius increases continuously. Comparison of calculated and experimental data shows that their deviations from each other do not exceed 9%, which allows us to recommend the obtained dependencies for practical application.

Keywords: abrasive tools, form cutting edges, the indenter, pad wear, the shape of the top of the grain.

Текущее состояние рабочей поверхности абразивного инструмента определяется формой режущих кромок, их числом, распределением, формой инструмента, наличием

ем на режущих кромках и в порах круга частичек обрабатываемого материала.

Форма режущих кромок, их "острота" (по данным многочисленных исследований) существенно влияют на производительность

процесса обработки, на величину силы резания, на температуру шлифования. Математическое моделирование формы режущих кромок выполнено в ряде работ [1]. Исследованиями профессора Новоселова Ю.К. [2] показано, что наиболее адекватной моделью вершины зерна является модель в виде параболоида вращения. В процессе обработки режущие кромки притупляются, на вершинах зерен появляются площадки износа [3]. Обобщение имеющихся исследований позволяет построить модель изношенной вершины абразивного зерна (рисунок 1) в форме параболоида вращения с усеченной вершиной. В плоскости вектора скорости резания вершина зерна имеет площадку с радиусом округления, равным радиусу круга, в плоскости перпендикулярной скорости резания – форму параболоида вращения с радиусом $\rho_3(\tau) > \rho_3(0)$. Для любой точки вершины абразивного зерна M с координатами X и Z справедлива зависимость:

$$Z_m = Z_m^1 + h_m, \quad (1)$$

где Z_m и Z_m^1 – значение координат точки поверхности вершины зерна до шлифования $\tau = 0$ и после шлифования в момент времени τ ; h_m – износ зерна в этом же сечении.

Учитывая, что для расчета параметров шероховатости поверхности, съема материала, сил резания, температур шлифования достаточно иметь данные по радиусу закругления вершины зерна в плоскости Z (рис. 1) и величине длины площадки износа в направлении оси Y , модель вершины зерна может быть значительно упрощена.

Ширину абразивного зерна b_3 на расстоянии h от его вершины в работе [3] предлагается определять по зависимости:

$$b_3 = C_b h^m, \quad (2)$$

где C_b и m – коэффициенты в уравнении формы зерна.

При частных значениях $C_b = 2\sqrt{2\rho_3}$, $m = 0,5$ зависимость (2) принимает вид:

$$b_3 = 2\sqrt{2\rho_3}. \quad (3)$$

Наибольший износ h наблюдается на вершине зерна h_3 . При увеличении расстоя-

ния от вершины он уменьшается и в точке, контактирующей с наибольшими выступами шероховатости поверхности заготовки, становится равным нулю. Если предположить, что ширина изношенного абразивного зерна может быть определена по зависимости, аналогичной уравнению (2), то текущее значение коэффициента $C_{b\tau}$ вычисляется по формуле [4]:

$$C_{b\tau} = C_b \left(\frac{t_\Phi - u}{t_\Phi - u - h_3} \right)^m, \quad (4)$$

где t_Φ – фактическая глубина резания; u – расстояние до вершины от условной наружной поверхности круга. При определении $b_{3\tau}$ из зависимости (2) с учетом (4) получим:

$$b_{3\tau} = C_b \left(\frac{t_\Phi - u}{t_\Phi - u - h_3} \right)^m \cdot h_\tau^m, \quad (5)$$

где h_τ – расстояние до рассматриваемого уровня от вершины изношенного зерна.

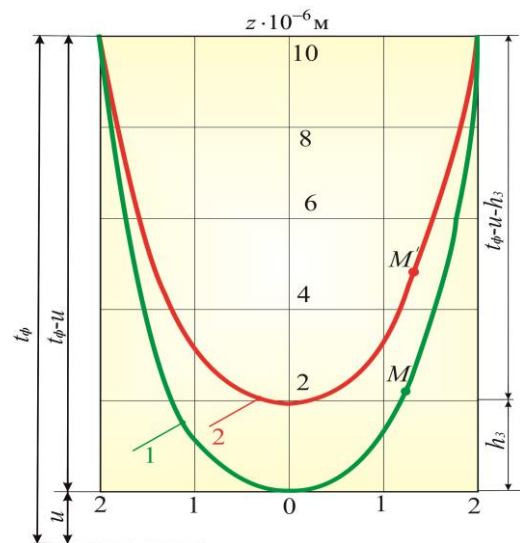


Рис. 1. Форма вершины изношенного зерна: 1 – исходный профиль; 2 – изношенный профиль

Таким образом, профиль вершины изношенного зерна в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, однозначно определяется глубиной резания и износом вершины абразивного зерна.

В плоскости, параллельной вектору скорости резания, размер площадки l_3 износа с учетом (5) вычисляется [5]:

$$l_3 = C_b \sqrt{(h_\tau + h_3)^{2m} - \left(\frac{t_\Phi - u}{t_\Phi - u - h_3}\right)^{2m} \cdot h_\tau^{2m}}, \quad (6)$$

где h_τ – координата точки профиля зерна от его изношенной вершины.

Число режущих кромок на рабочей поверхности инструмента за период его стойкости может, как увеличиваться, так и уменьшаться. При правке на поверхности формируется слой с повышенной плотностью режущих кромок. При шлифовании часть режущих кромок разрушается и вырывается из связки круга, что приводит к уменьшению числа кромок [6].

Для оценки адекватности полученных зависимостей в СевГУ проведены экспериментальные исследования. В связи с тем, что проверяется геометрическая модель формы зерна, выбор обрабатываемого материала и индентора не имел принципиального значения. В качестве индентора использовались конуса из стали 40X (HRC 55...60), быстрорежущей стали Р6М5, твердого сплава Т15К6 с формой вершины в виде параболоида вращения (рис. 2).

С целью получения заданной формы вершины обработаны по шаблону на оптико-шлифовальном станке *Amada GLS-150GL* (рисунок 3).

В качестве образцов использовались алюминиевые (АЛ-6) заготовки, заготовки из стали 45 (HRC 45...50) с размерами рабочей части 60×120мм.

Поверхность образца с целью получения заданной шероховатости обрабатывалась точением резбовым резцом на токарно-винторезном станке, после чего образцы устанавливались на оптический профилировальный станок и на их поверхности резцом, закрепленным на диске, наносились риски до получения равномерной поверхности.



а



б

Рис.2. Фото инденторов из стали Р6М5 (а) и из твердого сплава Т15К6 (б) с формой вершины в виде параболоида вращения



Рис.3. Профилирование инденторов на станке *Amada GLS-150GL*

Таким образом, индентор работал по шероховатой поверхности. Испытания проводились по схеме (рисунок 4) со скоростью индентора $V_k = 33\text{м/с}$, скоростью образца $V_u = 20\text{м/мин}$, глубиной резания $t_\Phi = 1.25H = 0.01\text{мм}$, где H – слой, в котором распределена шероховатость поверхности образца. Профили инденторов зарисовывались и фотографировались с экрана оптического профилировального станка через определенные промежутки времени (табл. 1). Примеры фотографий профилей индентора в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания приведены на ри-

сунке 5, *а*, в плоскости, параллельной вектору скорости – на рисунке 5, *б*, сопоставление полученных экспериментальных профилей представлено на рисунке 6. Сравнение расчетных и экспериментальных размеров профилей в плоскости перпендикулярной вектору скорости резания и длины площадки износа в плоскости параллельной скорости приводится в (табл. 2).

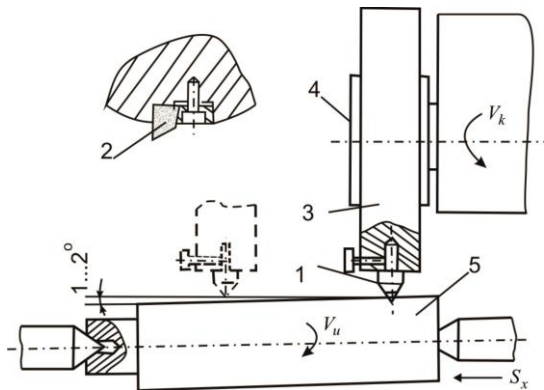


Рис.4. Установка для исследования процессов микрорезания индентором

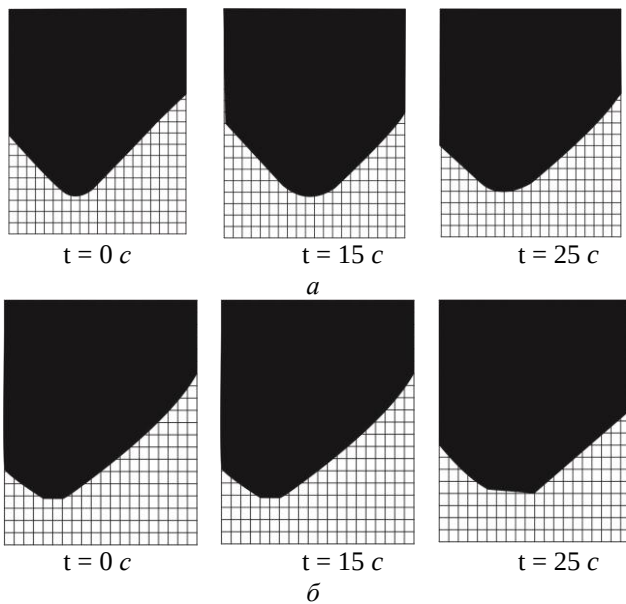


Рис.5. Фото профилей индентора из твердого сплава Т15К6 при резании стали 45 в плоскостях, перпендикулярной (*а*) и параллельной (*б*) вектору скорости резания

Полученные результаты показывают, что экспериментальные данные полностью подтверждают расчетные значения профилей, которые определяли в следующей последовательности

– вычисляли коэффициенты C_b и показатель m зависимости (4) исходного инден-

тора. Необходимость выполнения этого этапа связана с погрешностями изготовления инденторов. Для расчета измеряли на различных уровнях h размеры профиля b_z , результаты замеров аппроксимировали по методу наименьших квадратов;

– по зарисовкам инденторов определяли величину износа вершины h_3 ;

– для различных уровней h_t (20, 40, ..., 130 мкм) замеряли по зарисовкам размеры профиля изношенного индентора;

– для этих же уровней по зависимости (5) определяли расчетные значения размеров профилей b_{3r} ;

– по зарисовкам профилей в плоскости вектора скорости резания определяли размер площадки износа;

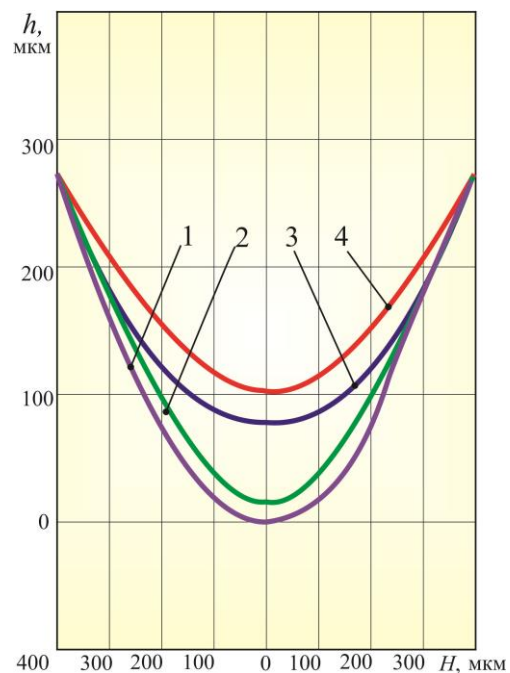


Рис.6. Изменение профиля индентора из быстрорежущей стали Р6М5 при резании алюминиевого сплава АЛ-6 в плоскости,

перпендикулярной вектору скорости резания: 1 – для $t = 0$; 2 – для $t = 2$ с; 3 – для $t = 10$ с; 4 – для $t = 20$ с

– по формуле (6) при $u = 0$ и $h_t = 0$ определяли расчетный размер площадки износа.

Так, например, для индентора из Р6М5 размеры исходного профиля соответствовали указанным в табл. 1.

Таблица 1. Начальное состояние образцов

$h, \text{мкм}$	20	40	60	80	100	130
$b_3, \text{мкм}$	240	300	340	400	460	500

После определения коэффициента C_b и показателя m по методу наименьших квадратов уравнение (2) приняло вид:

$$b_3 = 69,27 \cdot h^{0,403}$$

При микрорезании индентором образца из АЛ-6 с $t_0 = 130 \text{ мкм}$ за 10 секунд его вершина изнашивалась на 50 мкм ($h_3 = 50 \text{ мкм}$). С учетом полученных значений C_b , m , h_3 при $u = 0$ уравнение для расчета размеров изношенного профиля принимает вид:

$$b_{3\tau} = C_b \left(\frac{t_\phi - u}{t_\phi - u - h_3} \right)^m h_\tau^m = 69,27 \left(\frac{130}{130 - 50} \right)^{0,403} h_\tau^m = 84,24 h_\tau^{0,403}$$

Уравнение для расчета размеров площадки износа соответственно запишется

$$l_{3\tau} = 69,27 \sqrt{(h_\tau + 50)^{0,806} - 1,476 h_\tau^{0,806}}.$$

Для вершины зерна $h_t = 0$ и

$$l_{3\tau} = 69,27 \cdot 50^{0,403} = 335 \text{ мкм}.$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по размерам профилей и по величине площадок износа показывает, что их отклонения не превышают 9 % (табл. 2).

В процессе работы в плоскости вектора скорости резания появляется площадка износа, которая непрерывно увеличивается, в плоскости перпендикулярной вектору скорости форма вершины зерна остается близкой к форме параболоида, но радиус при вершине непрерывно увеличивается.

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные размеры профилей единичного зерна

Образец	Индентор	Время раб. $t, \text{с}$	Расст. от проф. до верш. $h_\tau, \text{мкм}$	Ширина профиля $b_3, \text{мкм}$		Длина площадки износа $h_3, \text{мкм}$	
				эсп.	расч.	эсп.	расч.
АЛ-6	Р6М5	0	20	240	-	0	0
			40	300			
			60	340			
			80	400			
			100	460			
			130	500			
	600	600	20	280	270	340	50
			40	360	372		335
			60	460	439		
	1200	1200	80	520	493		
			20	400	418	440	100
	40X	0	20	220	196	0	0
			40	270	269		0
			60	320	324		0
			80	360	370		0
			100	400	409		
			130	460	462		
		10	20	250	260	320	60
			40	340	358		325
		20	60	420	430		
			80	500	491		
Сталь 45	Т15К6	0	20	290	281	0	0
			40	400	402		
			60	500	498		
			80	570	578		
			100	630	648		
		15	20	320	316	310	20
			40	460	453		281
			60	560	559		
			80	630	649		
		60	20	420	403	500	50
			40	580	578		453

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что их отклонения друг от друга не превышают 9%, что позволяет рекомендовать зависимости (5) и (6) для практического применения.

Список литературы

1. Грабченко А.И. Пути повышения эффективности процесса обработки абразивными шлифовальными кругами / А.И. Грабченко, В.А. Федорович, Я.А. Шахбазов, В.В. Русанов // Резание и инструмент в технологических системах. Междунар. научно-технический сб. НТУ «ХПИ». – Харьков, 2008. – №74 – С. 70 – 83.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304с.

3. Братан С.М. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, С.И. Рощупкин, В.Б. Богущкий // Научно-технические технологии в машиностроении, № 5, 2017. Научно-техническое издательство «Инновационное машиностроение». – Москва. С. 9-18.
4. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.
5. Lindsay R.P. The relationship between wheel characteristics and operating problems in high production precision grinding / R.P. Lindsay, R.S. Hahn. – CIRP, 1972. – Vol. 21. № 1, – P. 77 – 78.
6. Miyoshi T. Estimation of grinding wheel surface by power spectrum pattern / T. Miyoshi, K. Saito // Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering. – 1979, 13. – №1, P.51 – 53.
7. Братан С.М. Процессы и операции формообразования поверхностей при механической обработке: Учеб. пособие / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Е.А. Левченко и др. – М.: Центркаталог, 2018. – 200 с.
8. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавающих мастерских: монография/ С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.
2. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke (Dynamics of surface shaping during abrasive processing) / Yu.K. Novoselov. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 s.
3. Bratan S.M. Modelirovaniye protsessa stokhasticheskogo vzaimodeystviya instrumenta i zagotovki na operatsiyakh shlifovaniya (Modeling of the process of stochastic interaction of a tool and a workpiece on grinding operations) / S.M. Bratan, YU.K. Novoselov, S.I. Roshchupkin, V.B. Bogutskiy // Nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo «Innovatsionnoye mashinostroyeniye». – Moskva. S. 9-18.
4. Popov S.A. Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tverdykh spлавov (Diamond-abrasive processing of metals and hard alloys) / S.A. Popov, N.P. Malevskiy, L.M. Tereshchenko. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 264 s.
5. Lindsay R.P. The relationship between wheel characteristics and operating problems in high production precision grinding / R.P. Lindsay, R.S. Hahn. – CIRP, 1972. – Vol. 21. № 1, – P. 77 – 78.
6. Miyoshi T. Estimation of grinding wheel surface by power spectrum pattern / T. Miyoshi, K. Saito // Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering. – 1979, 13. – №1, P.51 – 53.
7. Bratan S.M. Protsessy i operatsii formoobrazovaniya poverkhnostey pri mekhanicheskoy obrabotke: Ucheb. Posobiye (Processes and operations of shaping surfaces during machining) / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, Ye.A. Levchenko i dr. – M: Tsentrkatolog, 2018. – 200 s.
8. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya (Improving the quality of parts during grinding in the conditions of floating workshops) / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.

References

УДК 621.9.047

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРУЕМОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Х.М. Рахимьянов¹, С.И. Василевская¹, К.Х. Рахимьянов¹¹ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г.Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена изучению процессов, протекающих в межэлектродном зазоре при комбинированной электроэрозионно-электрохимической прошивке отверстий диаметром менее 1 мм. Отмечена перспектива совмещения электроэрозионных и электрохимических механизмов удаления материала в одной обработке. Выявлены сопутствующие формообразованию отверстия процессы, препятствующие достижению высоких скоростей прошивки. Для целенаправленного управления формообразованием отверстия на основе системного анализа разработана структурная схема, представляющая собой совокупность взаимосвязанных между собой процессов. Показано, что действующие в обработке процессы распределяются в трех составляющих: «Технологической подсистеме», «Процессах комбинированной прошивки отверстия» и «Функции выхода». Для каждого из процессов в подсистемах определены входные, выходные параметры и возмущающие воздействия, для каждого из которых установлена ответственность за реализацию определенного явления в межэлектродном зазоре. Анализ процессов структурной схемы показал, что формообразование отверстия в условиях комбинированной прошивки во многом определяется уровнем развития гидродинамики потока электролита, ориентированного на своевременное и полное удаление продуктов обработки из межэлектродного зазора. Разработанная на основе анализа физических процессов комбинируемых в обработке воздействий структурная схема способствует установлению взаимосвязей между ними, что является необходимым для последующего представления их математического описания. Это позволит установить область режимных параметров комбинированной обработки для решения технологических задач по прошивке глубоких отверстий малого диаметра.

Ключевые слова: электроэрозионно-электрохимическая прошивка отверстий, комбинированная обработка, пассивационные ограничения, структурная схема, электролит, межэлектродный зазор, анодное растворение, гидродинамический режим.

STUDY OF THE PROCESSES OF COMBINED PORTION OF HOLES BASED ON SYSTEM ANALYSIS

Kh.M. Rakhimyanov¹, S.I. Vasilevskaya¹, K. Kh. Rakhimyanov¹¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the study of the processes occurring in the interelectrode gap during the combined electroerosive-electrochemical piercing of holes with a diameter of less than 1 mm. The prospect of combining electroerosive and electrochemical mechanisms of material removal in one treatment is noted. The processes accompanying the hole shaping that prevent the achievement of high piercing speeds are revealed. For purposeful control of hole shaping based on system analysis, a structural diagram has been developed, which is a set of interconnected processes. It is shown that the processes operating in the processing are distributed in three components: "Technological subsystem", "Processes of combined hole piercing" and "Output functions". For each of the processes in the subsystems, the input, output parameters and disturbing effects are determined, for each of which the responsibility for the implementation of a certain phenomenon in the interelectrode gap is established. The analysis of the processes of the structural diagram showed that the formation of a hole under conditions of combined piercing is largely determined by the level of development of hydrodynamics of the electrolyte flow, focused on the timely and complete removal of processing products from the interelectrode gap. The structural diagram developed on the basis of the analysis of physical processes combined in processing influences helps to establish interrelationships between them, which is necessary for the subsequent presentation of their mathematical description. This will make it possible to establish the range of operating parameters of combined machining for solving technological problems of piercing deep holes of small diameter.

Keywords: electroerosive-electrochemical hole piercing, combined processing, passivation restrictions, structural diagram, electrolyte, interelectrode gap, anodic dissolution, hydrodynamic regime.

Формообразование глубоких отверстий малого диаметра (до 1 мм) традиционными методами механической обработки связано со значительными сложностями, обусловленными малой прочностью и недостаточной жесткостью режущего инструмента, проблемами удаления стружки из отверстия, затруднением подачи СОЖ в зону резания. Поэтому в современном производстве деталей различного служебного назначения все больше внимания обращено к методам формообразования, основанным на электрофизических и электрохимических процессах удаления обрабатываемого материала [1-10]. Наибольшую перспективу для решения задач по прошивке глубоких отверстий получили электроэрозионные и электрохимические методы формообразования. Однако, для каждого из этих методов характерно наличие определенных недостатков, ограничивающих процесс обработки. Так, электроэрозионная обработка, обеспечивающая высокие скорости прошивки, сопровождается значительным износом электрода-инструмента, что в итоге отражается на точности формообразования отверстия. Тепловой механизм удаления обрабатываемого материала приводит к образованию зоны термического воздействия и, как следствие, формированию остаточных растягивающих напряжений в поверхностном слое. Для электрохимической размерной обработки характерно возникновение пассивационных ограничений, значительно тормозящих процесс анодного растворения, вплоть до полного прекращения обработки.

Решение проблем в обработке возможно при комбинировании процессов, когда их сочетание в едином пространстве и времени не только снижает, а порой полностью исключает ограничения, присущие комбинируемым процессам по отдельности. Для понимания механизмов снятия ограничений и целенаправленного управления режимными параметрами комбинированной прошивки отверстий необходимо изучение процессов, протекающих в межэлектродном зазоре (МЭЗ), что представляется возможным на основе их системного анализа.

Изучение комбинированной прошивки отверстий как объекта, основанного на действии определенной совокупности процессов, позволило разработать ее структурную схему с отображением действующих входных, выходных и возмущающих воздействий (рис.1).

Структурная схема состоит из трех подсистем: «Технологическая подсистема», «Процесс комбинированной прошивки отверстия» и «Функции выхода». Если подсистема «Процесс комбинированной прошивки отверстия» обеспечивает достижение технологической цели – формообразования отверстия за счет реализации электрохимических и электроэрозионных процессов, то «Технологическая подсистема» ответственна за реализацию этих процессов. «Функции выхода» как подсистема предназначена для преобразования выходных параметров состояния предшествующей подсистемы в параметры качества объекта обработки.

Принимая во внимание, что структурная схема отображает комбинированную обработку, следует отметить, что в первых двух подсистемах присутствуют процессы – основные и сопутствующие электрохимической и электроэрозионной составляющим. В рамках «Технологической подсистемы» этапы формирования энергетических параметров электрохимического ① и электроэрозионного ⑥ воздействий реализуются независимо друг от друга. Каждый из этапов имеет как отдельные наборы входных параметров, так и общие. Так, для электрохимической составляющей входными параметрами процесса являются: межэлектродный зазор, удельная электропроводность электролита, технологическое напряжение. Для реализации электроэрозионной составляющей необходим следующий набор входных параметров: межэлектродный зазор, удельная электропроводность электролита, импульсное напряжение, длительность импульса (накопительная емкость), период следования импульса (частота следования импульсов).

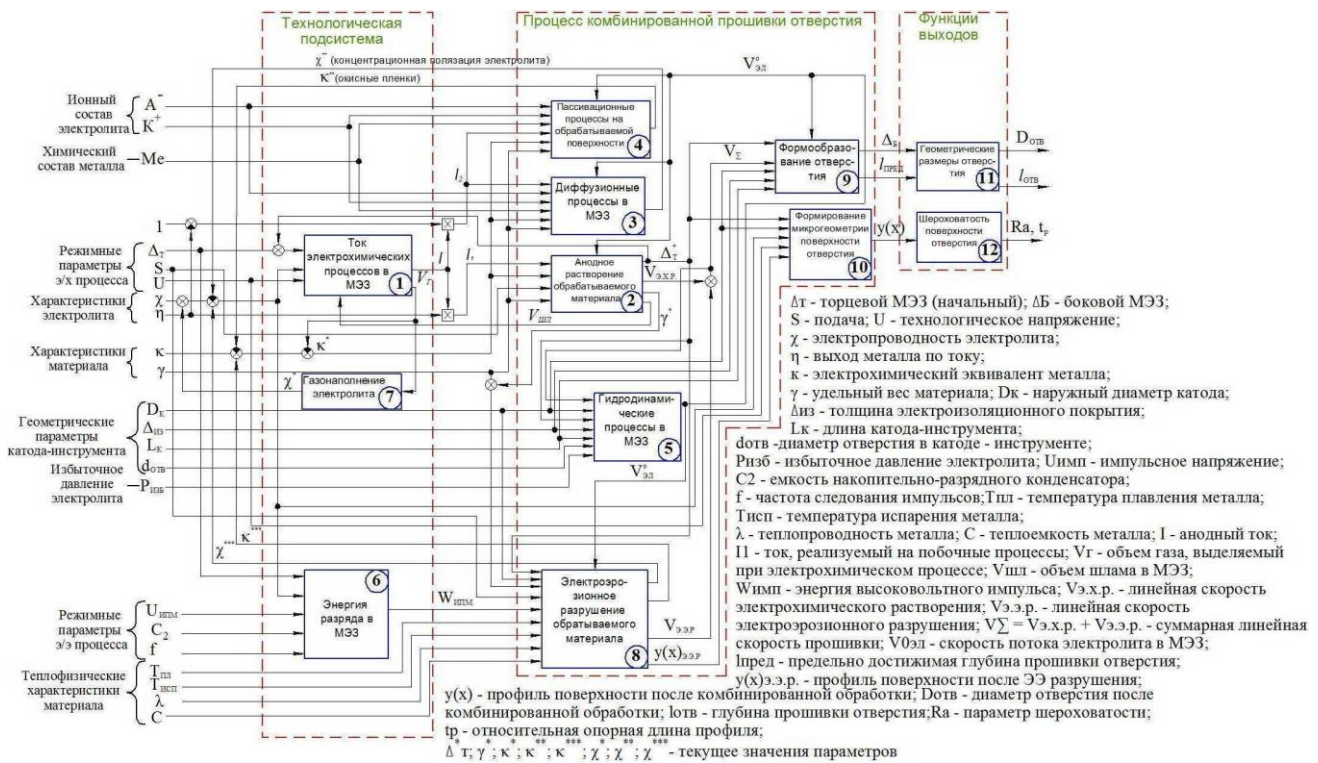


Рис. 1. Структурная схема процессов комбинированной прошивки отверстий

Следует отметить, что входные параметры – межэлектродный зазор и удельная электропроводность электролита являются общими для обеих составляющих комбинированного процесса. Это и определяет возможность их сочетания в едином пространстве, что было отмечено при рассмотрении физической модели. Так, межэлектродный зазор определяет общность технологической схемы реализации обоих воздействий, а характеристика электролита свидетельствует о возможности их осуществления в одной и той же технологической среде. Однако, следует учитывать, что электролит в своем начальном состоянии не обеспечивает реализацию электроэрозионных процессов в межэлектродном зазоре. Эта проблема разрешается по мере развития электрохимического процесса, который сопровождается выделением определенного объема газа (V_g) в межэлектродном зазоре, что приводит к газонаполнению электролита (7). Образование смеси газожидкостных слоев в технологической среде и создает необходимые условия для реализации электроэрозионных процессов. Изменение состава электролита при-

водит к корректировке его удельной электропроводности (χ^*).

Процесс газонаполнения электролита оказывает и негативное влияние на процесс электрохимического растворения. Появление кислорода в межэлектродном зазоре приводит к его адсорбированию на обрабатываемой поверхности и блокированию доступа анионов раствора для осуществления электрохимических реакций. В структурной схеме данный факт отображен изменением электрохимического эквивалента обрабатываемого материала (k^*).

Выходные параметры «Технологической подсистемы» представлены энергетическими характеристиками протекающих процессов: токовой (I) – для электрохимической составляющей и энергией импульса ($W_{имп}$) – для электроэрозионной. Выходные параметры данной подсистемы являются входными для подсистемы «Процессы комбинированной прошивки отверстия». И в этой подсистеме реализуются как основные процессы – анодное растворение (2) и электроэрозионное разрушение (8) обрабатываемого материала, так и сопутствующие, связанные с диффузионными (3) и

пассивационными ④ процессами в межэлектродном зазоре.

Сопутствующие процессы оказывают влияние на развитие основных процессов. Анализ физических моделей, как электрохи-

процессов в МЭЗ возлагается задача по удалению из него продуктов обработки. Это определяет значимость еще одной составляющей ⑤ в данной подсистеме, определяющей развитие гидродинамических процессов в межэлектродном зазоре.

Переход от «Технологической подсистемы» к подсистеме «Процессы комбинированной прошивки отверстия» для реализации основных этапов по анодному растворению ② и электроэрозионному разрушению ⑧ обрабатываемого материала невозможен без обозначения дополнительных входных параметров, определяющих характеристики обрабатываемого материала (электрохимический эквивалент, удельный вес – для электрохимической составляющей, теплофизические свойства – для электроэрозионного процесса). Общим входным параметром для обеих составляющих на данном этапе развития процесса обработки является подача электрода – инструмента, что согласно физической модели комбинированной обработки и определяет единство технологической схемы прошивки отверстий.

Наличие обратной связи между процессами анодного растворения ② и электроэрозионного разрушения ⑧ по удельному весу обрабатываемого материала (γ^*) отображает утверждение о создании предразрушенного приповерхностного слоя обрабатываемого материала вследствие разрыва химических связей в его кристаллической решетке. В свою очередь, возникновение обратной связи (χ^{***}) между процессом электроэрозионного разрушения ⑧ и входным параметром удельной электропроводности свидетельствует о проявлении механизма тепловой активации анионов электролита.

Следует отметить, что выходной параметр «Технологической подсистемы», определяющий развитие электрохимических процессов в межэлектродном зазоре – ток электрохимических процессов (I), не всегда полностью расходуется на реализацию ос-

мических и электроэрозионных процессов в отдельности, так и в комбинированной обработке в целом, показал, что на электролит помимо функции обеспечения основных

новой задачи – анодное растворение ②. Часть его затрачивается на протекание побочных процессов – диффузионных ③ и пассивационных ④. Распределение тока определяется такой характеристикой процесса как выход металла по току (η), которая зависит как от химического состава обрабатываемого металла (Me), так и анионного (A^-) и катионного (K^+) состава электролита, которые и являются входными параметрами для диффузионных ③ и пассивационных ④ процессов. Последствием развития данных процессов является возникновение концентрационной поляризации электролита и образование окисных пленок на обрабатываемой поверхности, что отображено в структурной схеме обратными связями по электропроводности электролита (χ^{**}) и электрохимическому эквиваленту обрабатываемого материала (κ^*).

Выходным параметром элемента ⑥ «Технологической подсистемы», определяющего условие реализации электроэрозионных процессов, является удельная мощность разрядов в межэлектродном зазоре, которая, в свою очередь, является входным параметром системы, определяющей процессы электроэрозионного разрушения обрабатываемого материала ⑧.

Если значение плотности тока (i) определяет линейную скорость электрохимического растворения ($V_{Э.Х.Р.}$) обрабатываемого материала, то уровень удельной мощности разрядов – линейную скорость электроэрозионного разрушения ($V_{Э.Э.Р.}$). Значения скоростей и являются выходными параметрами процессов ② и ⑧. Одновременное задействование двух механизмов удаления обрабатываемого материала и определяет суммарную линейную скорость процесса комбинированной обработки $V_{\Sigma} = V_{Э.Х.Р.} + V_{Э.Э.Р.}$. Стабильность процесса обработки будет определяться условием равенства суммарной линейной скорости и величины назначенной в обработке подачи ($V_{\Sigma} = S$).

Невыполнение данного условия по каким – либо причинам (колебание режимных параметров, влияние ограничений диффузионного и пассивационного характера) приведет к опережению либо запаздыванию перемещения фронта обработки относительно движущегося электрода – инструмента. Это отразится на величине торцевого межэлектродного зазора (Δ_T^*), отличного от установленного на начальном этапе обработки. Наличие обратной связи приведет к изменению данного входного параметра, произойдет соответствующая корректировка плотности тока, что и определяет самоустанавливающийся характер данного процесса.

Как отмечалось, эффективность комбинированной обработки во многом определяется своевременным и полным удалением продуктов электрохимического растворения и электроэрозионного разрушения из межэлектродного зазора, что определяется гидродинамическим режимом потока электролита.

Из практики электрохимической обработки известно, что соблюдение условия $v_{эл}^0 \geq 4 + 0,6 S^{0,5}$ (где – скорость потока электролита в рабочей зоне МЭЗ, м/с, S – подача электрода – инструмента, мм/мин) гарантирует полное удаление продуктов анодного растворения. Применительно к комбинированной обработке данное условие выглядит следующим образом:

$$v_{эл}^0 \geq 4 + 0,6 (V_{э.х.р.} + V_{э.э.р.})^2. \quad (1)$$

Элемент ⑤ рассматриваемой подсистемы определяет развитие гидродинамических процессов в межэлектродном зазоре. Распределение скоростей потока электролита при его движении по гидравлическому тракту, конфигурация которого определяется схемой формообразования отверстия, зависит от геометрических параметров катода – инструмента (наружный диаметр, диаметр отверстия для подачи электролита, длина, толщина изоляции на боковой поверхности), которые и являются входными параметрами данного процесса. Глубина отверстия как текущая координата при прошивке определяется суммарной линейной скоростью удаления материала (V_{Σ}) и временем обработки, также является входным параметром для оценки гидродинамических процессов. Са-

моустанавливающий параметр в обработке – торцевой межэлектродный зазор (Δ_T^*) дополняет комплект параметров, описывающих геометрию гидравлического тракта. Значение скоростей потока на участках гидравлического тракта определяется величиной избыточного давления ($P_{изб}$) на его входе. Изменение скоростей на участках МЭЗ связано с ростом гидравлических потерь на местных сопротивлениях по мере обработки. Естественно, что при определенной глубине прошивки значение скорости потока электролита в рабочей зоне торцевого межэлектродного зазора снизится до критической, определяемой ограничением (1). Это означает, что условие полной эвакуации продуктов обработки с этого момента не соблюдается и стабильность процесса не обеспечивается. Снижение скорости потока до критического значения и определяет предельную глубину прошивки отверстия в конкретных условиях обработки. Очевидным является и то, что максимальное значение скорости потока электролита в рабочей зоне будет иметь место в начале обработки. При этом величина избыточного давления ($P_{изб}$) имеет ограничение сверху, поскольку при движении потока со скоростями более 50 м/с по межэлектродному зазору возможно возникновение кавитационных явлений. Это приведет к сепарации потока на отдельные струи, и, как следствие, образованию так называемых «сухих» зон на электродах, что недопустимо при электрохимическом формообразовании. В связи с этим значение избыточного давления при электрохимических процессах ограничено – $P_{изб} < 1,0$ МПа.

Единственный выходной параметр данного элемента ⑤ подсистемы – скорость потока электролита ($V_{эл}^0$) в рабочей зоне межэлектродного зазора является управляющим фактором для основных и сопутствующих процессов комбинированной обработки. Обеспечение определенного гидродинамического режима направлено на удаление продуктов обработки из межэлектродного зазора, снятие диффузионных ограничений и разрушение непрочных окисных образований на обрабатываемой поверхности.

Полная депассивация обрабатываемой поверхности обеспечивается непрерывным действием электроэрозионных разрядов, что и определяется наличием обратной связи по выходному параметру (k^{***}) процесса электроэрозионного разрушения ⑧. Два последующих элемента в подсистеме «Процесс комбинированной прошивки отверстия» описывают формообразование геометрии

отверстия ⑨ и формирование микрогеометрии его поверхности ⑩. Выходные параметры процессов анодного растворения ② и электроэрозионного разрушения ⑧ – установившееся значение торцевого межэлектродного зазора (Δ_T^*) и суммарная линейная скорость обработки (V_Σ), являясь входными параметрами для процесса формообразования отверстия, определяют величину бокового межэлектродного зазора (Δ_b) и предельно достижимую глубину прошивки ($l_{\text{пред}}$) в конкретных условиях обработки.

Действующие в комбинированной обработке процессы удаления материала имеют разные механизмы формирования микрогеометрии поверхности. Для электрохимической размерной обработки в условиях высокой локализации процесса микрогеометрия формообразуемой поверхности в основном определяется глубиной травления границ зеренной структуры, что и составляет высотный параметр шероховатости. Электрохимическая обработка при высоких плотностях тока мало чувствительна к внутривершинной структурной неоднородности, что и определяет высокие показатели качества поверхностей при электрохимическом формообразовании. Иной механизм формирования шероховатости поверхности имеет место при электроэрозионной обработке. Микрогеометрия поверхности представляет собой чередование стохастически расположенных на поверхности лунок, сформированных электроэрозионными разрядами. Значительный перепад высотных параметров такого рельефа и определяет невысокие показатели качества поверхностей при данном виде обработки. Совмещение электрохимических и электроэрозионных процессов обеспечивает более интенсивное электрохимическое растворение выступающих элементов рельефа, сформированного электроэрозионным разрушением материала. Поэтому для оценки конечного состояния микрогеометрии поверхность отверстия ⑩ в качестве входных параметров необходимо рассматривать профили микрорельефа, сформированные анодным растворением – $u(x)_{\text{э.х.р.}}$ и электроэрозионным разрушением – $u(x)_{\text{э.э.р.}}$ обрабатываемого материала.

Выходными параметрами подсистемы «Процесс комбинированной прошивки отверстия» являются: боковой межэлектродный зазор (Δ_b), предельная глубина прошивки отверстия ($l_{\text{пред}}$) и итоговый профиль микрогеометрии поверхности ($u(x)$), которые и являются входными параметрами подсистемы «Функции выходов» ⑪ и ⑫. Назна-

чение данной подсистемы в структурной схеме комбинированной обработки – преобразование состояния систем в виде расчетных значений процесса формообразования и профиля микрогеометрии в геометрические параметры отверстия (диаметр и длина прошивки в расчетный момент времени) и показатели качества поверхности (параметр шероховатости и относительная опорная длина профиля).

Разработка структурных схем различного рода технологических обработок на основе изучения физических моделей процессов и явлений способствует установлению взаимосвязей между ними, что является необходимым для последующего построения их математического описания, ориентированного на решение технологических задач по обеспечению точности, качества и производительности обработки, либо снижению ее трудоемкости. Математическое описание моделей при динамическом характере входящих в них подсистем реализуется с помощью дифференциальных либо разностных уравнений. В настоящем исследовании локальные процессы, входящие в подсистемы структурной схемы находятся в различных областях естествознания: химии, материаловедения, теплофизики, электричества, гидродинамики, физики твердого тела, физики конденсированного состояния. Решение всего комплекса вопросов по их математическому описанию, хоть и представляет несомненный научный интерес, тем не менее, является сложной и трудоемкой задачей.

Для достижения поставленной цели предлагается упрощенный подход в теоретическом решении проблем. Так, анализ структурной схемы комбинированной обработки, ее декомпозиция по отдельным подсистемам, изучение действующих в них процессов позволили установить, что последние можно разделить на три группы.

В первую группу входят процессы «Технологической подсистемы», процессы анодного растворения и электроэрозионного разрушения обрабатываемого материала, формообразование отверстия и формирование микрогеометрии поверхности из подсистемы «Процессы комбинированной прошивки отверстия». В группе данные процессы объединяет общая направленность на достижение цели – формообразование отверстия.

Во вторую группу следует отнести диффузионные и пассивационные процессы, ограничивающие или блокирующие основ-

ные процессы формообразования из первой группы.

Третья группа представлена единственным процессом, определяющим развитие гидродинамических процессов в межэлектродном зазоре, и ориентированным на полное снятие или частичное устранение ограничений, вызванных действием процессов второй группы.

Наиболее сложными в математическом описании являются процессы второй группы, играющие негативную роль в обработке. Анализ физических моделей действующих процессов показал, что диффузионные ограничения и часть пассивационных устраняются при определенном уровне гидродинамики потока электролита, а полная депассивация обрабатываемой поверхности обеспечивается введением электроэрозионной составляющей в обработку.

Данное заключение позволяет исключить необходимость в математическом описании диффузионных и пассивационных процессов. В связи с этим, основной задачей теоретического исследования является установление количественных взаимосвязей процессов формообразования отверстия и организации гидродинамики потока электролита в межэлектродном зазоре. Поэтому, часть исследований комбинированной обработки должна быть ориентирована на экспериментальное подтверждение и оценку ограничений диффузионного и пассивационного характера, а также на доказательство возможности их устранения за счет гидродинамики потока электролита и депассивации (обновления) обрабатываемой поверхности.

Проведение же теоретических исследований связано с необходимостью количественной оценки взаимосвязей процессов формообразования и гидродинамического режима в межэлектродном зазоре для установления границ области режимных параметров комбинированной прошивки отверстий малого диаметра.

Разработанная структурная схема комбинированной прошивки отверстий позволила установить взаимосвязи действующих процессов. Показано, что при наличии гидродинамики потока электролита в МЭЗ и постоянного обновления обрабатываемой поверхности разрядными импульсами возможно устранение ограничений диффузионного и пассивационного характера, снижающих эффективность процесса анодного растворения материала.

Список литературы

1. Жоголев А.Б. Электрохимическое микроформообразование микродеталей типа тел вращения: дисс. ... канд. техн. наук, Тула, 2005. – 140 с.
2. Любимов В.В. Современные способы электрофизико-химической обработки микро – и макрообъектов / В.В. Любимов, В.К. Сундуков // Современные наукоемкие технологии. – 2004. - № 1. – С. 77 – 79.
3. T. Masuzawa, Micro – EDM // Proc. Intern. Symp. Electrical Mach. Bilbao, Spain, 2001.
4. Koch., Ehrfeld W., Michel F. Recent progress in micro-electro discharge machining. Part 1: Technology // Proc. Intern. Symp. Electrical machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 117 – 127.
5. Zolotykh B.N. Modern physical Theory of Metals Electric Erosion as the Basis for the Development of New Trends in EDM // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XI) Switzerland, Lausanne. 1995. P. 114 – 116.
6. Саушкин Б.П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве // Металлообработка. 2003. № 1 (13). – С. 8 – 17.
7. Такунцев К.В., Зайцев А.Н. Электроэрозионно – электрохимическая обработка: современное состояние, проблемы, перспективы // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 9 – 13.
8. Rakhimyanov Kh.M. Prospects of combining electro-erosive and electrochemical processes in forming the holes of a small diameter in difficult – to – process materials / Kh.M. Rakhimyanov, S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2018, Vol. 224. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018). – Art. 01013 (7p.).
9. Vasilevskaya S.I. Consideration of hydraulic limitations in setting the mode parameters of combined piercing the holes / S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2019, Vol. 298. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2019). – Art. 00141 (6 p.).
10. Rakhimyanov Kh.M. Activation of Electrochemical Piercing of Small Diameter Holes by Implementing High-Voltage Pulses in the Inter-Electrode Gap / Kh.M. Rakhimyanov, S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2019, Vol. 297. X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME 2019). – Art. 01008 (7 p.).

References

1. Zhogolev A.B. Elektrohimicheskoe mikroformoobrazovanie mikrodetalej tipa tel vrashcheniya: diss...kand. tekhn. nauk, Tula, 140 (2005).
2. Lyubimov V.V., Sundukov V.K. Sovremennye sposoby elektrofiziko – himicheskoy obrabotki

- mikro – i makroob"ektov [Modern methods of electrophysical and chemical processing of micro – and macroobjects], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, no. 1, PP. 77 – 79 (2004).
3. Masuzawa T. Micro – EDM // *Proc. Intern. Symp. Electrical Mach. Bilbao, Spain*, 2001.
 4. Koch., W. Ehrfeld, F. Michel, Recent progress in micro-electro discharge machining, Part 1, Technology, *Proc. Intern. Symp. Electrical machining. Bilbao, Spain*, PP. 117 – 127 (2001).
 5. Zolotikh. B.N. Modern physical Theory of Metals Electric Erosion as the Basis for the Development of New Trends in EDM, *Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XI) Switzerland, Lausanne*. PP. 114 – 116 (1995).
 6. Saushkin B.P. Kombinirovannye metody obrabotki v mashinostroitel'nom proizvodstve [Combined processing methods in engineering production], *Metalloobrabotka*, no. 1(13), PP. 8 – 17 (2003), (In Russian).
 7. Takuntsev K.V., Zaitsev A.N. Jelektroerozionno – jelektrohimicheskaja obrabotka: sovremennoe sostojanie, problemy, perspektivy [Electroerosion-electrochemical treatment: current state, problems, prospects], *Perspektivnye tehnologii fiziko – himicheskoy razmernoj obrabotki i formirovanija jekspluatacionnyh svojstv metallov i splavov* [Perspektivnye tehnologii fiziko – himicheskoy razmernoj jekspluatacionnyh formirovanija i obrabotki metallov i splavov svojstv], Ufa, PP. 9 – 13 (2001).
 8. Rakhimyanov Kh.M. Prospects of combining electro-erosive and electrochemical processes in forming the holes of a small diameter in difficult – to – process materials / Kh.M. Rakhimyanov, S.I. Vasilevskaya // *Matec Web of Conferences*, 2018, Vol. 224. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018). – Art. 01013 (7p.).
 9. Vasilevskaya S.I. Consideration of hydraulic limitations in setting the mode parameters of combined piercing the holes / S.I. Vasilevskaya // *Matec Web of Conferences*, 2019, Vol. 298. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2019). – Art. 00141 (6 p.).
 10. Rakhimyanov Kh.M. Activation of Electrochemical Piercing of Small Diameter Holes by Implementing High-Voltage Pulses in the Inter-Electrode Gap / Kh.M. Rakhimyanov, S.I. Vasilevskaya // *Matec Web of Conferences*, 2019, Vol. 297. X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME 2019). - Art. 01008 (7 p.).

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №1(17) 2020

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.
