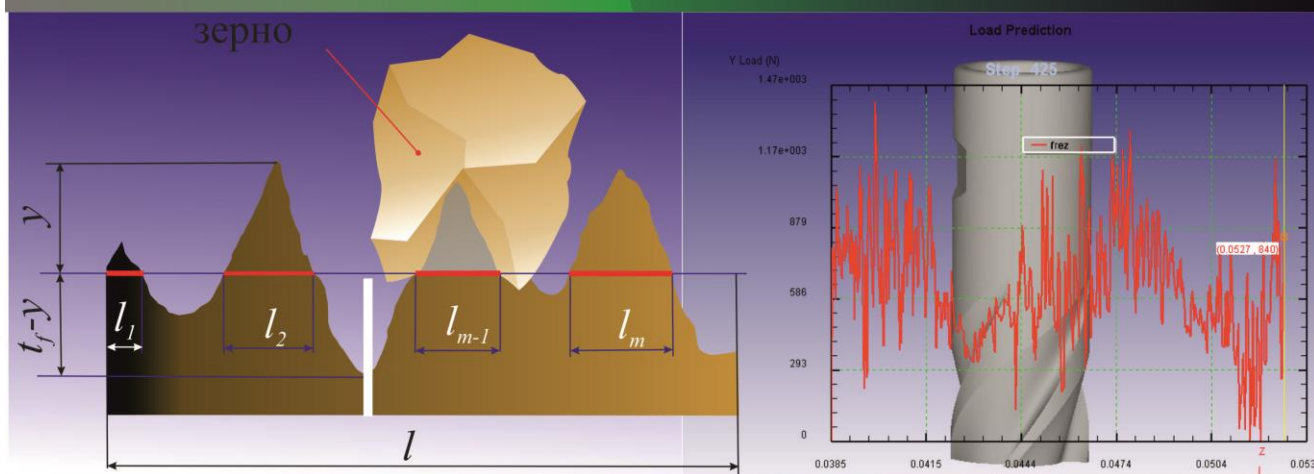




СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

№4(4)  
2016



# Вестник Современных Технологий

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

---

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

**№ 4(4)**  
**2016**

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» (12 – 18 сентября 2016 года),  
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 16-08-20625)*

---

Севастополь 2016

---

### СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

#### Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – ГОЛОВИН В.И.

#### Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

#### Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

#### Редакционная коллегия

|                   |                                          |
|-------------------|------------------------------------------|
| БАКУЛИНА А.Н.     | к. т. н., доц. (г. Севастополь)          |
| БЕРЕНГАРТЕН М. Г. | к. х. н., проф. (г. Москва)              |
| БОХОНСКИЙ А.И.    | д. т. н., проф. (г. Севастополь)         |
| ВЕТРОГОН А.А.     | к. т. н., доц. (г. Севастополь)          |
| ДУЮН Т.А.         | д. т. н., проф. (г. Белгород)            |
| КОПП В.Я.         | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| МЕШКОВ В.В.       | к. т. н., доц. (г. Севастополь)          |
| МИХАЙЛОВ А.Н.     | д. т. н., проф., (г. Донецк,<br>Украина) |
| НЕМЕНКО А.В.      | к. т. н., доц. (г. Севастополь)          |
| НИЧКОВА Л.А.      | к. т. н., доц. (г. Севастополь)          |
| НОВОСЕЛОВ Ю.К.    | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| ПАШКОВ Е.В.,      | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| СЕВРИКОВ В.В.     | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| СУСЛОВ А.Г.       | д. т. н., проф. (г. Москва)              |
| ФАЛАЛЕЕВ А.П.     | д. т. н., проф.<br>(г. Санкт-Петербург)  |
| ФИЛИПОВИЧ О.В.    | к. т. н., доц. (г. Севастополь)          |
| ХАРЧЕНКО А.О.     | к. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Акинцева А.В., Переверзев П.П. Методика оптимизации циклов внутреннего шлифования в многомерном пространстве управляющих параметров и технологических ограничений .....      | 4  |
| Братан С.М., Новоселов Ю.К., Столяров Н.Н., Стадник Т.В. Разработка моделей для оценки характеристик абразивного инструмента .....                                           | 10 |
| Васютенко А.П., Ефремова Л.В., Тараховский А.Ю. Автоматизированное устройство для контроля толщины и волнистости поверхностей теплопроводящих пластин .....                  | 20 |
| Владецкая Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях .....                                             | 25 |
| Герасимова А.А., Радюк А.Г. Применение алюминиевого и хромоникелевого газотермических покрытий на стенках кристаллизаторов МНЛЗ.....                                         | 35 |
| Дуюн Т.А., Бешевли О.Б. Оптимизация технологических режимов фрезерования поверхности скольжения крупногабаритных подшипников с использованием специального оборудования..... | 40 |
| Дуюн Т.А., Пчёлкин В.М., Сахаров Д.В. Исследование стойкости и шероховатости поверхности при фрезеровании легированной стали .....                                           | 47 |
| Дьяконов А.А., Шмидт И.В. Технологические особенности и эффективность изготовления металлобетонных конструкций металлорежущих станков .....                                  | 52 |
| Титков В.А., Богуцкий В.Б. Исследование влияния динамики технологической системы на эффективность алмазного шлифования.....                                                  | 59 |
| Храмов А.В., Семдянкин И.В., Киселев Е.С. Импортозамещение и технологии изготовления современного металлорежущего инструмента для обрабатывающих центров .....               | 64 |
| Ягьяев Э.Э. Повышение эффективности мониторинга процесса чистового шлифования на основе анализа динамики изменения выходных переменных .....                                 | 69 |
| Ямников А.С., Ямникова А.О. Аналитическое определение погрешностей приведенного среднего диаметра при нарезании резьбы метчиками .....                                       | 77 |

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, 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.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2016

## COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

### Chief Editor

**D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.**

### Associate Editor in Chief

**Ph.D., Associate Prof. – GOLOVIN V.I.**

### Scientific Editor

**D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.**

### Executive Secretary

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

### Editorial team

|                  |                                        |
|------------------|----------------------------------------|
| BAKULINA A.N.    | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |
| BERENGARTEN M.G. | D.Sc., Prof. (Moscow)                  |
| BOHONSKIY A.I.   | D.Sc., Prof. (Sevastopol)              |
| VETROGON A.A.    | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |
| DUYUN T.A.       | D.Sc., Prof. (Belgorod)                |
| KOPP V.YA.       | D.Sc., Prof. (Sevastopol)              |
| MESHKOV V.V.     | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |
| MIKHAILOV A.N.   | D.Sc., Prof. (Donetsk)                 |
| NEMENKO A.V.     | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |
| NICHKOVA L.A.    | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |
| NOVOSELOV YU.K.  | D.Sc., Prof. (Sevastopol)              |
| PASHKOV E.V.,    | D.Sc., Prof. (Sevastopol)              |
| SEVRIKOV V.V.    | D.Sc., Prof. (Sevastopol)              |
| SUSLOV A.G.      | D.Sc., Prof. (Moscow)                  |
| FALALEEV A.P.    | D.Sc., Prof. (St.Petersburg)           |
| FILIPOVICH O.V.  | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |
| KHARCHENKO A.O.  | Ph.D., Associate Prof.<br>(Sevastopol) |

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Akintseva A.V., Pereverzev P.P.</b> Optimization technique of cycles of internal grinding in multidimensional space of control parameters and technological restrictions ..... | <b>4</b>  |
| <b>Bratan S.M., Novoselov Y.K., Stolyarov N.N., Stadnik T.V.</b> Development of models for performance evaluation of properties of abrasive tools .....                           | <b>10</b> |
| <b>Vasenko A.P., Efremova L.V., Tarakhovskiy A.Yu.</b> Automated system for monitoring and thickness wavy surface heatspreader .....                                              | <b>20</b> |
| <b>Vladetskaya E.A.</b> Modeling vibration exposure from external sources when grinding the details under laboratory conditions .....                                             | <b>25</b> |
| <b>Gerasimova A.A., Radyuk A.G.</b> The use of aluminum and chrome-nickel thermal coatings on the walls of the continuous casting mold .....                                      | <b>35</b> |
| <b>Dujun T.A., Beshevli O.B.</b> Optimization of technological processes milling surface sliding large bearings using special equipment .....                                     | <b>40</b> |
| <b>Dujun T.A., Pchelkin V.M., Saharov D.V.</b> Study of resistance and surface roughness at milling alloy steel .....                                                             | <b>47</b> |
| <b>Dyakonov A.A., Schmidt I.V.</b> Technological characteristics and effectiveness of manufacturing of the metal-concrete structures of the metal-cutting machines .....          | <b>52</b> |
| <b>Titkov V.A., Bogutsky V.B.</b> Research of the effect dynamic technological system on the efficiency of diamond grinding .....                                                 | <b>59</b> |
| <b>Khramov A.V., Semdyankin I.V., Kiselev E.S.</b> Import substitution and production technology of modern cutting tools for machining centers .....                              | <b>64</b> |
| <b>Yagyaev E.E.</b> Improving the efficiency of the monitoring process finish grinding on the basis of the analysis of dynamics of change of the output variables .....           | <b>69</b> |
| <b>Yamnikov A.S., Yamnikova A.O.</b> Analytical definition of errors of the specified average diameter when cutting the carving taps .....                                        | <b>77</b> |

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, 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

© FSAEO HE «Sevastopol State University», 2016

---

УДК 621.923.01

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛОВ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ В МНОГОМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

А.В. Акинцева<sup>1</sup>, П.П. Переверзев<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Южно-уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация<sup>2</sup> Финансовый университет при правительстве РФ (Челябинский филиал), Челябинск, Российская Федерация

### Аннотация

Рассмотренная в данной статье методика проектирования оптимальных циклов внутреннего шлифования использует в качестве метода математической оптимизации метод динамического программирования (МДП). МДП не ограничивает ни количество технологических ограничений целевой функции, ни количество оптимизируемых параметров. За критерий оптимальности принимает минимальное время обработки. В результате становится возможным проводить многопараметрическую оптимизацию управляющей программы для станков с ЧПУ на операциях внутреннего шлифования, учитывая при этом весь комплекс основных технологических ограничений: по точности и качеству поверхности, мощности станка и т.д. Отметим так же, что описанная в статье методика учитывает изменения условий обработки (степень затупления круга, исходное биение заготовки и др. параметры), что делает применение данной методики пригодной для любого типа производства.

**Ключевые слова:** внутреннее шлифование, оптимизация процесса, метод динамического программирования, цикл, комплекс ограничений

## OPTIMIZATION TECHNIQUE OF CYCLES OF INTERNAL GRINDING IN MULTIDIMENSIONAL SPACE OF CONTROL PARAMETERS AND TECHNOLOGICAL RESTRICTIONS

A.V. Akintseva<sup>1</sup>, P.P. Pereverzev<sup>2</sup><sup>1,2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation<sup>2</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation (Chelyabinsk Branch), Chelyabinsk, Russian Federation

### Abstract

The design technique of optimal cycles of internal grinding considered in this article uses a method of dynamic programming (MDP) as a method of mathematical optimization. MDP does not limit either the number of technological restrictions of criterion function, or the number of the optimized parameters. The minimum time of handling is taken for optimality criterion. As a result it becomes possible to perform multiparameter optimization of the control program for machines with ChPU during the internal grinding operations, considering the whole set of basic technological restrictions: on the accuracy and surface quality, machine power, etc. It also should be noted that the technique described in article considers changes of handling conditions (blunting degree of circle, initial blank runout, et al. parameters) which makes the use of this method suitable for any type of production.

**Keywords:** internal grinding, optimization of processing, method of dynamic programming, cycle, complex restrictions

### Введение

Появление современных металлорежущих станков, позволяющих производить обработку на повышенных режимах и по заданным циклам, выявило проблему – отсутствия нормативно-справочной литературы, расчетных методик и рекомендаций от про-

изводителей, позволяющих проектировать циклы для заданных условий обработки. В результате на практике на предприятиях вынуждены подбирать циклы вручную, ориентируясь на предшествующий опыт технолога. И как следствие современное оборудование используется на 30...40% от своей заяв-

ленной производительности. Часто производительность современных станков с ЧПУ оказывается ниже, чем на универсальных станках, особенно при малых партиях деталей. Это связано с тем, что подобранные вручную режимы резания по большей части являются заниженными, так как при этом возникает большая вероятность обеспечения требований чертежа по точности и качеству обработки.

### Результаты и обсуждение

Анализ известных на данный момент расчетных методик проектирования циклов [1-6] показал, что в них не используется математические методы оптимизации, модели точности обработки, не учитываются изменения условий обработки в комплексе (степень затупления круга, износ инструмента, исходное радиальное биение заготовки и др.). Отметим также, что данные методики имеют значительные затраты на расчет по времени и «техническим возможностям». В результате циклы, проектируемые по данным методикам, являются рациональными, а не оптимальными, не гарантируют точность обрабатываемых поверхностей, тратят при этом много ресурсов на расчеты. Таким образом, низкая производительность операций внутреннего шлифования из-за отсутствия нормативов и методик проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, является насущной проблемой в рамках машиностроительной отрасли.

В 90-х годах в Челябинской школе шлифования под руководством С.Н. Корчака разработана теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках [7-8]. В данной работе впервые применяется математический метод оптимизации – метод динамического программирования (МДП) [9]. Применение данного метода обусловлено тем, что он не требует построения заранее границ области допустимых ограничений и не является чувствительным к свойствам (дифференцируемости и непрерывности) моделей управления и ограничений. В результате чего МДП нашел свое применение в научных

работах как отечественных, так и зарубежных ученых [10-12]. В качестве критерия оптимальности принимается минимальное время цикла обработки, так как оно зависит от режимов обработки и является переменной частью затрат. Определение минимального времени цикла в процессе оптимизации цикла шлифования производится при обязательном учете основных технологических ограничений по: качеству и точности, эксплуатационным свойствам круга, конструктивным параметрам станка и др. Проектируемые циклы обработки для операций круглого врезного шлифования являются двухмерными, и отражают зависимость измерения скорости радиальной подачи от величины снимаемого припуска.

По своей структуре и трудоемкости управления циклы внутришлифовальной обработки являются более сложными по сравнению с упомянутым выше наружным врезным шлифованием, т.к. требуется управление не только радиальной подачей, но скоростью осевой. Кроме того управления требуют и другие параметры обработки, оказывающие значительное влияние на сам процесс: диаметр и высота круга, скорость вращения детали, характеристика круга, вылет шлифовальной оправки, величина перебега и многие др. Как следствие, применение методики оптимизации циклов наружного врезного шлифования напрямую не может быть использовано для проектирования циклов внутреннего шлифования. Поэтому, необходима разработка новой методики проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки, комплексно учитывающей все вышеперечисленные управляющие параметры. Базовой основой новой методики является развитие метода динамического программирования для многомерного пространства управляющих параметров.

Оптимизация режимных параметров производится в координатной сетке радиальная подача ( $S_{rad}$ , мм/дв.ход) – скорость осевой подачи ( $V_{soc}$ , мм/мин) – припуск ( $l_m$ , мм) (рис. 1). Так как МДП относится к методам дискретной оптимизации, он требует дискретизации управляющих параметров (табл. 1). Состояние процесса на сетке ха-

рактизуется координатами состояния процесса шлифования –  $[m, n, b, z]$ .

Таблица 1. Дискретизация параметров управления

| Название шкалы                                               | Дискрета                                                                                              | Диапазон                           |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Радиальная подача ( $n$ – номер радиальной подачи)           | $N$ – количество радиальных подач станка                                                              | $[S_{pad}^{\min}; S_{pad}^{\max}]$ |
| Припуск ( $m$ – номер дискреты припуска)                     | $M$ – максимальный номер дискреты припуска, при котором величина оставшейся части припуска равна нулю | $[I^{\max}; 0]$                    |
| Скорость осевой подачи ( $b$ – номер скорости осевой подачи) | $B$ – количество скоростей осевых подач по паспорту станка                                            | $[V_{soc}^{\min}; V_{soc}^{\max}]$ |
| Степень припуска ( $z$ – номер ступени припуска)             | $Z$ – количество ступеней цикла*                                                                      | $[1; Z_{дан}]$                     |

\*Примечание к табл. 1: с целью выполнения ограничения целевой функции по количеству допустимых ступеней цикла состояние процесса вводится дополнительная координата  $z$ .

На каждом пересечении координатной сетки помещена «информационная клетка», содержащая в себе данные, необходимые для расчета: оптимальное время достижения состояния, текущие размеры обрабатываемой поверхности, силы резания и др. Определение минимального времени достижения состояния определяется по средствам перебора возможных вариантов переключения подачи внутри проектируемого цикла – конкурирующих ходов (рис. 1). Количество конкурирующих ходов зависит от множества факторов: подачи переключаются в цикле одновременно или неодновременно на

$z$ -ой ступени; количеству пригодных подач с предшествующей дискреты припуска и др.

Согласно принципу оптимальности из конкурирующих ходов необходимо выбрать оптимальный ход, имеющий оптимальное время достижения состояния. Выбор оптимального хода осуществляется посредством моделирования съема  $m$ -ой дискреты припуска для каждого конкурирующего хода. При моделировании процесса съема металла производится расчет величины фактически снятого припуска, текущих значений радиусов обрабатываемого отверстия, силы резания, времени съема дискреты припуска, времени достижения состояния и др. Более подробно с методикой моделирования съема металла для внутреннего шлифования можно ознакомиться в статьях [13-14].

Конкурирующий ход участвует в выборе оптимального хода, если в достигнутом состоянии  $[m, n, b, z]$  выполняются все ограничения целевой функции. Ограничения подразделяются на две группы. Первая группа – ограничения, накладываемые в течение всего цикла шлифования (по осыпаемости круга, мощности привода, допустимости диапазона подач и т.д.). Во вторую группу входят ограничения, накладываемые в конце цикла (точность [15], неприжоговость, шероховатость обрабатываемой поверхности). Величина фактически снятого припуска находится в прямой зависимости от радиальной подачи, предел управления которой определяется допустимым диапазоном станка. В результате можно предположить, что наиболее быстрое снижение величины фактически снятого припуска возможно при минимально допустимом значении подач. Тогда проверка выполнения ограничений в конечном состоянии процесса сводится к ответу на вопрос (принцип проверки допустимости хода), можно ли после снятия  $m$ -ой части припуска успеть снизить величину фактически снимаемого припуска за время съема оставшейся части припуска при минимальных подачах до значения, при котором выполняются ограничения первой группы. Если ответ на данный вопрос отрицательный, то тогда за время съема оставшейся части припуска при любых других больших значениях радиаль-

ной и осевой подач из допустимого диапазона подач выполнить эти ограничения тем более невозможно.

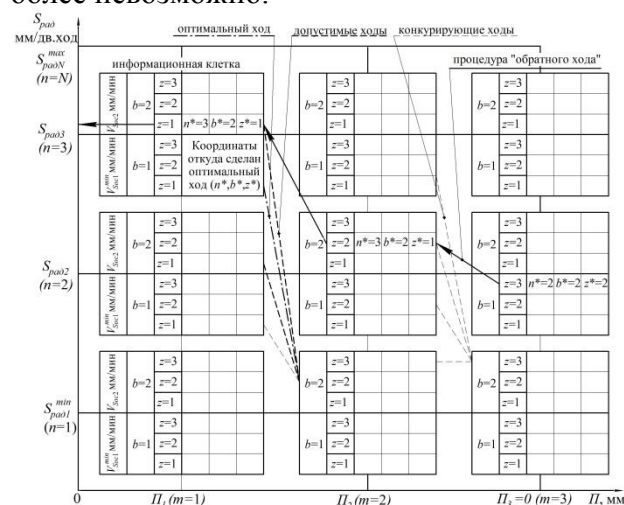


Рис. 1. Координатная сетка для оптимизации цикла внутришлифовальной обработки методом динамического программирования при учете ограничения по допустимому количеству переключений подач

В результате, проверка допустимости хода по ограничениям первой группы (точности, прижогу и шероховатости) сводится к следующей типовой процедуре. После моделирования съема металла для координат  $[m, n, b]$  (совершения хода) производится аналогичное моделирование съема оставшейся части припуска при минимально допустимых по станку подачах – координаты  $[m_{max}, n_{min}, b_{min}]$ . Таким образом, из всех конкурирующих ходов выбираются только допустимые ходы. А уже из совокупности допустимых ходов выбирается оптимальный ход, имеющий оптимальное время достижения состояния и допустимый по всем ограничениям. Затем в клетку записывается номер радиальной и осевой подач, номер ступени, откуда произведен оптимальный ход. Запомненное значение уровня, откуда произведен оптимальный ход, фиксируется для каждого состояния  $[m, n, b, z]$  и хранится в переменных  $n^*, b^*$  и  $z^*$  (рис. 1).

Процесс оптимизации начинается с выполнения совокупности прямых ходов на первой дискрете припуска. Затем производится переход из предыдущей дискреты припуска ( $m-1$ ) при  $n$ -ой радиальной подаче круга в  $m$ -ую дискрету припуска. Каждый конкурирующий ход проверяется на допустимость по заданным ограничениям. При достижении  $[m, n, b, z]$ -ого состояния про-

цесса шлифования одним или несколькими допустимым конкурирующими ходами производится выбор оптимального хода, обеспечивающего минимальное время достижения состояния. При этом в «информационную ячейку» записывается координаты предыдущего состояния процесса, переход с которого является оптимальным. После рассмотрения последней дискреты припуска  $m=M$  из ряда оптимальных ходов, расположенных на различных номерах радиальных подач, выбирается один ход, имеющий минимальное время достижения конечного состояния (минимальное время цикла).

Для фиксации оптимальной траектории управления циклом шлифования необходимо выполнить процедуру обратного хода, которая начинается из хода, имеющего минимальное время достижения конечного состояния. Восстановление траектории управления цикла происходит по координатам предыдущего состояния процесса  $n^*, b^*$  и  $z^*$ , идя от конечной дискреты припуска к начальной, запоминая при этом величины подач и припусков. На (рис. 1) можно увидеть графическое представление примера процедуры обратного хода, формирующей траектории оптимальной управляющей программы. После проведения обязательной процедуры обратного хода формируется цикл внутришлифовальной обработки, представленный на (рис. 2) в виде проекций траектории цикла на плоскости  $S_{rad}$  и  $\Pi$  –  $A_1B_1C_1D_1E_1$ ,  $S_{rad}$  и  $V_{soc}$  –  $A_2B_2C_2D_2E_2$ ,  $V_{soc}$  и  $\Pi$  –  $A_3B_3C_3D_3E_3$ .

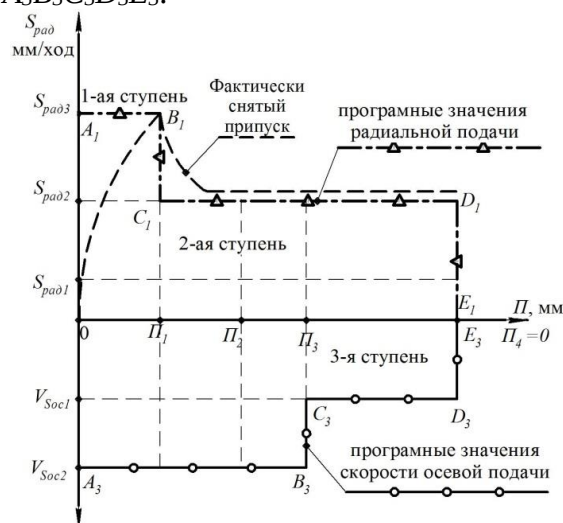


Рис. 2. Пример трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки в двухмерном пространстве управляющих параметров

## Выводы

Рассмотренная в статье методика проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки:

- позволяет с математической точностью оперативно рассчитывать оптимальные параметры цикла внутришлифовальной обработки, т.е. такие параметры при которых достигаются требования чертежа по точности и качеству за минимально возможное время обработки;

- используется в качестве метода математической оптимизации метод динамического программирования, который не ограничивает ни количество технологических ограничений целевой функции, ни количество оптимизируемых параметров. В результате становится возможным проводить многопараметрическую оптимизацию управляющей программы для станков с ЧПУ на операциях внутреннего шлифования, т.е. оптимизировать параметры управления циклом, оказывающее значительное влияние на процесс обработки;

- обеспечивает многопараметрическую оптимизацию управляющей программы для станков с ЧПУ на операциях внутреннего шлифования. Результатом оптимизации являются оптимальные значения радиальной подачи  $S_{rad}$  на всех ступенях цикла, оптимальные значения осевой подачи  $V_{soc}$  на всех ступенях цикла, оптимальное распределение снимаемого припуска по ступеням цикла для радиальной подачи  $S_{rad}$  и осевой подачи  $V_{soc}$ , при которых обеспечивается минимальное время цикла (или другой целевой функции).

## Список литературы

1. Lee C.W. Dynamic optimization of the grinding process in batch production / C.W. Lee // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. – 2009. – Vol. 131. – P. 61-66.
2. Cycle optimization in cam-lobe grinding for high productivity / P. Krajinik, R. Drazumeric, J. Badger, F. Hashimoto // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 630. – P. 333-336.
3. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
4. Шипулин Л.В. Совершенствование методики проектирования операций плоского шлифования периферией круга на основе комплексного имитационного моделирования процесса: автореф. дис. канд. техн. наук. – Челябинск, 2013. – 20с.
5. Столяров Н.Н. Построение циклов шлифования для обработки шеек распределительных валов с коррекцией режимов резания за период стойкости инструмента / Н.Н. Столяров, С.Н. Братан // *Прогрессивные технологии машиностроения и современность: тезисы докл. международной конф. (Донецк, 21.05.2014г.)*. – Донецк, 2014 – С. 172–182.
6. Нуркенов А.Х. Повышение производительности операции круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ за счет учета фактической жесткости технологической системы на стадии проектирования цикла шлифования: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2016. – 18с.
7. Переверзев П.П. Моделирование технологических ограничений при оптимизации автоматических циклов шлифования / П.П. Переверзев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение»*. – 2012. – №12. – С. 165-168.
8. Переверзев П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ в автоматизированном машиностроительном производстве / П.П. Переверзев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение»*. – 2012. – № 12. – С. 152-157.
9. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.
10. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 286 с.
11. Continuous variable feed rate: A novel method for improving infeed grinding processes / J. Alvarez, D. Barrenetxea, J.I. Marquinez, I. Begiaga, I. Gallego // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 73. – P. 53-61.
12. Continuous optimal infeed control for cylindrical plunge grinding, part 1: Methodology / S. Dong, K. Danai, S. Malkin, Deshmukh A. // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. – 2004. – Vol. 126. – P. 327-333.
13. Переверзев П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // *Металлообработка*. – 2013. – №3. – С. 24-30.
14. Переверзев П.П. Моделирование процесса съема металла при внутреннем шлифовании с учетом особенностей кинематики резания / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // *СТИН*. – 2016. – №4. – С. 23-28.
15. Переверзев П.П. Модель формирования погрешностей внутришлифовальной обработки / П.П.

Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2016. – №6. – С. 25-30.

## References

1. Lee C.W. Dynamic optimization of the grinding process in batch production / C.W. Lee // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. – Vol. 131. – 2009. – P. 61-66.
2. Krajinik, P. Cycle optimization in cam-lobe grinding for high productivity / P. Krajinik, R. Drazumeric, J. Badger, F. Hashimoto // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – Vol. 630. – 2014. – P. 333-336.
3. Mikhel'kevich V.N. Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem / V.N. Mikhel'kevich. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 304p.
4. Shipulin L.V. Sovershenstvovanie metodiki proektirovaniia operatsii plosko-go shlifovaniia periferiei kruga na osnove kompleksnogo imitatsionnogo modelirovaniia protsessa: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Cheliabinsk, 2013. – 20p.
5. Stoliarov N.N. Postroenie tsiklov shlifovaniia dlia obrabotki sheek raspredelitel'nykh valov s korrektsiei rezhimov rezaniia za period stoikosti instrumenta / N.N. Stoliarov, S.N. Bratan // Progressivnye tekhnologii mashinostroeniia i sovremennost': tezis dokl. mezhdunarodnoi konf. (Donetsk, 21.05.2014g.). – Donetsk, 2014 – P. 172–182.
6. Nurkenov A.Kh. Povyshenie proizvoditel'nosti operatsii kruglogo vrezного shlifovaniia na stankakh s ChPU za schet ucheta fakticheskoi zhestkosti tekhnologicheskoi sistemy na stadii proektirovaniia tsikla shlifovaniia: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Moskva, 2016. – 18p.
7. Pereverzev P.P. Modelirovanie tekhnologicheskikh ogranichenii pri optimizatsii avtomaticheskikh tsiklov shlifovaniia / P.P. Pereverzev // Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie». – 2012. – iss. 12. – P. 165-168.
8. Pereverzev P.P. Modelirovanie i optimizatsii upravliushchikh programm v avtomatizirovannom mashinostroitel'nom proizvodstve / P.P. Pereverzev // Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie». – 2012. – iss. 12. – P. 152-157.
9. Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye / R. Bellman. – M.: izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1960. – 400 p.
10. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnosti pri abrazivnoi obrabotke. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 286 p.
11. Continuous variable feed rate: A novel method for improving infeed grinding processes / J. Alvarez, D. Barrenetxea, J.I. Marquinez, I. Begiaga, I. Gallego // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 73. – P. 53-61.
12. Continuous optimal infeed control for cylindrical plunge grinding, part 1: Methodology / S. Dong, K. Danai, S. Malkin, Deshmukh A. // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. – 2004. – Vol. 126. – P. 327-333.
13. Pereverzev P.P. Analiticheskoe modelirovanie vzaimosvazi sily rezaniia pri vnutrennem shlifovanii s osnovnymi tekhnologicheskimi parametrami / P.P. Pereverzev, A.V. Popova // Metalloobrabotka. – 2013. – iss. 3. – P. 24-30.
14. Pereverzev P.P. Modelirovanie protsessa s'ema metalla pri vnutrennem shlifovanii s uchedom osobennostei kinematiki rezaniia / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // СТИН. – 2016. – iss. 4. – P. 23-28.
15. Pereverzev P.P. Model' formirovaniia pogreshnostei vnutrishlifoval'noi obrabotki / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // СТИН. – 2016. – iss. 6. – P. 25-30.

УДК 621.923:621.90.17

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

С.М. Братан<sup>1</sup>, Ю.К. Новоселов<sup>1</sup>, Н.Н. Столяров<sup>1</sup>, Т.В. Стадник<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация

### Аннотация

Статья посвящена разработке зависимостей, позволяющих прогнозировать изменения числа и распределения зерен по глубине инструмента за период его стойкости. Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке адекватности предложенных моделей. Сопоставление полученных результатов подтверждают высказанную гипотезу о существенном изменении законов распределения режущих кромок по глубине инструмента в процессе шлифования. При работе круга в режиме самозатачивания наблюдается уменьшение их числа в слоях близлежащих к условной поверхности инструмента, при работе в режиме затупления, наоборот - их увеличение. Рассмотренные зависимости позволяют прогнозировать изменения распределений, что повышает точность моделей взаимодействия инструмента и заготовки.

**Ключевые слова:** шлифование, абразивный инструмент, абразивное зерно, износ, режущая кромка, распределение зерен, моделирование процесса.

## DEVELOPMENT OF MODELS FOR PERFORMANCE EVALUATION OF PROPERTIES OF ABRASIVE TOOLS

S.M. Bratan<sup>1</sup>, Y.K. Novoselov<sup>1</sup>, N.N. Stolyarov<sup>1</sup>, T.V. Stadnik<sup>1</sup><sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

The article proposes model of the variation of the number and distribution of the grains in the abrasive tool. Also there are the results of experimental studies for checking the adequacy of the proposed models. Comparison of the results confirms the hypothesis of a significant change in the laws of the distribution of the cutting edges of the tool depth in the grinding process. When working in the circle of self-sharpening mode, there is a decrease in their number in the layers close to the surface of the conventional tool, when working in blunting mode, on the contrary - their increase. Considered Depending possible to predict changes in distribution, which increases the accuracy of the models of interaction between tool and workpiece.

**Keywords:** grinding, abrasive tool, abrasive grains, wear, cutting edge, grain distribution, process modeling.

### Введение

Рабочая поверхность абразивного инструмента при системном анализе может рассматриваться как совокупность базовых участков, объединенных в единую конструкцию. Ее моделирование при этом сводится к определению параметров состояния базовых участков и формы инструмента.

Описание базового участка рабочей поверхности абразивного инструмента предусматривает определение геометрических размеров, числа, распределения режущих

кромок. Существующие методики позволяют оценивать эти параметры по характеристике круга и режиму его правки [1-3]. Экспериментальные исследования свидетельствуют о значительном изменении формы, числа распределения кромок за период стойкости инструмента [4].

Изменение формы режущих кромок связано с их износом и разрушением. Выполненными ранее исследованиями установлено, что в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, в процессе работы инструмента увеличивается радиус закругления при вершине зерна, в плоскости – па-

параллельной на вершине появляется площадка износа [5-8].

На основании вышеизложенного целью данной статьи является разработка зависимостей, позволяющих прогнозировать изменения числа и распределения зерен по глубине инструмента за период его стойкости.

### Результаты и обсуждение

Текущий радиус-вектор  $R_z(\varphi, \tau)$  точек контура зерна при отсутствии микросколов вычисляется по его исходному значению  $R_z(\varphi, 0)$  и величине износа  $h_z(\varphi, \tau)$

$$R_z(\varphi, \tau) = R_z(\varphi, 0) - h_z(\varphi, \tau).$$

Исходный радиус-вектор, по данным А.В. Королева [9], является случайной функцией полярного угла  $\varphi$

$$R_z(\varphi, 0) = r_z + \sum_{k=2}^p (x_k \sin \omega_k \varphi + y_k \cos \omega_k \varphi),$$

где  $r_z$  – радиус средней окружности профиля, определяемый как среднее значение функции  $R_z(\varphi, 0)$ ;  $x_k$  и  $y_k$  – случайные некоррелированные амплитуды, соответствующие  $k$ -той гармонике и имеющие равные дисперсии;  $\omega_k$  – произвольно выбранная частота.

Элементарное приращение величины износа в направлении полярного радиуса при движении вершины зерна в зоне контакта заготовки с инструментом может быть принято пропорциональным относительно износу  $h_0$  и приращению длины пути резания  $L_p$

$$dh_z(\varphi, \tau) = h_0 dL_p = h_0 (v_k \pm v_u) P_k(\varphi, \tau) d\tau, (1)$$

где  $P_k(\varphi, \tau)$  – вероятность контакта точки контура с материалом заготовки.

Вершина абразивного зерна может рассматриваться в общем его профиле как один из выбросов случайного поля. Текущий радиус закругления при вершине зерна  $\rho_z(\tau)$ , согласно выводам работы [10], может быть вычислен по зависимости

$$\rho_z(\tau) = \frac{[R_z^2(\varphi, \tau) + R_z'^2(\varphi, \tau)]^{3/2}}{R_z^2(\varphi, \tau) + 2R_z'^2(\varphi, \tau) - R_z(\varphi, \tau)R_z''(\varphi, \tau)}. (2)$$

При моделировании вершины зерна параболоидом вращения, зависимость (1), профиль изношенного зерна в плоскости перпендикулярной вектору скорости резания также может быть представлен в виде параболоида. Это утверждение подтверждено экспериментальными и теоретическими исследованиями, выполненными в работе [9]. Ширина режущей кромки изношенного зерна вычисляется по зависимости

$$b_{z\tau} = C_b \left( \frac{t_\phi - u}{t_\phi - u - h_z} \right)^m h_\tau^m, (3)$$

где  $h_\tau$  – координата точки профиля зерна от его изношенной вершины.

Профиль вершины изношенного зерна в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, однозначно определяется глубиной микрорезания и износом вершины абразивного зерна.

В плоскости, параллельной вектору скорости резания, размер площадки износа вычисляется

$$l_z = C_b \sqrt{(h_x + h_z)^{2m} - \left( \frac{t_\phi - u}{t_\phi - u - h_z} \right)^{2m}} h_x^{2m}, (4)$$

где  $h_x$  – координата точки профиля зерна от его центра в направлении, перпендикулярном вектору скорости резания.

При подстановке частных значений коэффициентов в (2) ( $C_b = 2\sqrt{2\rho}$ ,  $m = 0,5$ ) вычисляется текущий радиус закругления при вершине зерна

$$\rho_z(\tau) = \frac{\rho_z(0)t_\phi}{t_\phi - h_z}. (5)$$

Величина площадки износа в направлении вектора скорости резания соответственно определяется по зависимости

$$l_z = 2\sqrt{2\rho_z(0)h_z}. (6)$$

Для оценки адекватности полученных зависимостей выполнены экспериментальные исследования в лаборатории обработки

материалов резанием Мелитопольского моторного завода. В связи с тем, что проверялась геометрическая модель формы зерна, выбор обрабатываемого материала и индентора не имел принципиального значения. В качестве инденторов использовали конуса из стали 40X HRC 55...60, быстрорежущей стали P6M5, твердого сплава T15K6 с формой вершин в виде параболоида вращения. С целью получения заданной формы, вершины обрабатывались по шаблону на оптико-шлифовальном станке.

В качестве образцов применяли алюминиевые (АЛ-6) заготовки и заготовки из стали 45 (HRC 45-50) с размерами рабочей части 60мм x 120 мм. Поверхность образца с целью получения исходной шероховатости обрабатывали точением резбовым резцом на токарном станке, затем образцы устанавливали на оптический профилишлифовальный станок 395-МФ10 и на их поверхности резцом, закрепленным на диске, наносили риски до получения неравномерной нерегулярной поверхности. Таким образом, индентор работал по шероховатой поверхности.

Испытания проводили при скорости перемещения индентора 33м/с, скорости вращения образца 20м/мин, глубине резания  $t_{\phi} = 1,25H$ , где  $H$  – слой, в котором распределена шероховатость поверхности. Профили инденторов зарисовывали и фотографировали с экрана оптического профилишлифовального станка через заданные промежутки времени. Сравнение расчетных и экспериментальных размеров профилей, в плоскости перпендикулярной скорости резания (длины площадки износа) и в плоскости параллельной скорости резания, приводятся в таблице 1.

Анализ полученных данных свидетельствует о возможности использования приближенных зависимостей (3) и (4) для расчета параметров формы абразивного зерна при его износе.

Число режущих кромок на базовом участке рабочей поверхности инструмента может быть определено экспериментально и аналитически

Таблица 1. Расчетные (5), (6) и экспериментальные размеры профилей вершин абразивных зерен

| Материал детали | Материал индентора | Время работы индентора, с | Расстояние до вершины, мкм | Ширина профиля, мкм |        | Размер площадки износа, мкм |        |
|-----------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|--------|-----------------------------|--------|
|                 |                    |                           |                            | Эксперимент         | Расчет | Эксперимент                 | Расчет |
| АЛ-6            | P6M5               | 600<br>$h_3 = 50$ мкм     | 20                         | 280                 | 270    | 340                         | 335    |
|                 |                    |                           | 40                         | 360                 | 372    | 340                         | 335    |
|                 |                    |                           | 80                         | 520                 | 493    | 340                         | 335    |
| АЛ-6            | 40X                | 0<br>$h_3 = 0$ мкм        | 20                         | 220                 | 196    | 0                           | 0      |
|                 |                    |                           | 60                         | 320                 | 324    | 0                           | 0      |
|                 |                    |                           | 80                         | 360                 | 370    | 0                           | 0      |
|                 |                    | 10<br>$h_3 = 60$ мкм      | 20                         | 250                 | 260    | 320                         | 325    |
|                 |                    |                           | 40                         | 340                 | 358    | 320                         | 325    |
|                 |                    |                           | 80                         | 500                 | 491    | 320                         | 325    |
|                 |                    | 20<br>$h_3 = 100$ мкм     | 20                         | 280                 | 384    | 400                         | 410    |
|                 |                    |                           | 40                         | 360                 | 527    | 400                         | 410    |
|                 |                    |                           |                            |                     |        |                             |        |
| Сталь 45        | T15K6              | 0<br>$h_3 = 0$ мкм        | 20                         | 290                 | 281    | 0                           | 0      |
|                 |                    |                           | 40                         | 400                 | 402    | 0                           | 0      |
|                 |                    |                           | 60                         | 500                 | 498    | 0                           | 0      |
|                 |                    |                           | 80                         | 570                 | 578    | 0                           | 0      |
|                 |                    | 15<br>$h_3 = 20$ мкм      | 20                         | 320                 | 316    | 310                         | 281    |
|                 |                    |                           | 40                         | 460                 | 453    | 310                         | 281    |
|                 |                    |                           | 60                         | 560                 | 559    | 310                         | 281    |
|                 |                    |                           | 80                         | 630                 | 649    | 310                         | 281    |
|                 |                    | 60<br>$h_3 = 50$ мкм      | 20                         | 420                 | 403    | 500                         | 453    |
|                 |                    |                           | 40                         | 580                 | 578    | 500                         | 453    |
|                 |                    |                           |                            |                     |        |                             |        |
|                 |                    |                           |                            |                     |        |                             |        |

При экспериментальных исследованиях применяют методы непосредственного подсчета числа кромок с помощью оптических приборов, методы, основанные на регистрации импульсов от термопар, установленных в деталь, методы подсчета числа отпечатков на фольге, бумаге, стекле и т.д. По данным А. Н. Резникова [11], наиболее близкий результат по количеству активных зерен дает метод прокатки круга по фольге, толщина которой должна быть равна глубине резания. Недостатком метода, как и других, ранее перечисленных, является высокая трудоемкость, связанная с необходимостью визуального подсчета количества отпечатков, оставшихся на фольге. Наиболее перспективными способами контроля рабочей поверхности инструмента являются способы сканирования.

Схема одного из таких способов рассмотрена на рис. 1. Сущность способа заключается в автоматическом подсчете числа электрических импульсов, возникающих при прокатывании фольги 3 с изолирующим покрытием 4 между рабочей поверхностью инструмента 1 и специальным роликом 2.

Фольга и пластина 5 ролика подключаются к источнику тока. В момент прохождения вершины зерна зоны контакта, она, вдавливаясь в материал фольги, разрывает изолирующую пленку и замыкает электрическую цепь. В момент выхода вершины зерна из зоны электрическая цепь разрывается.

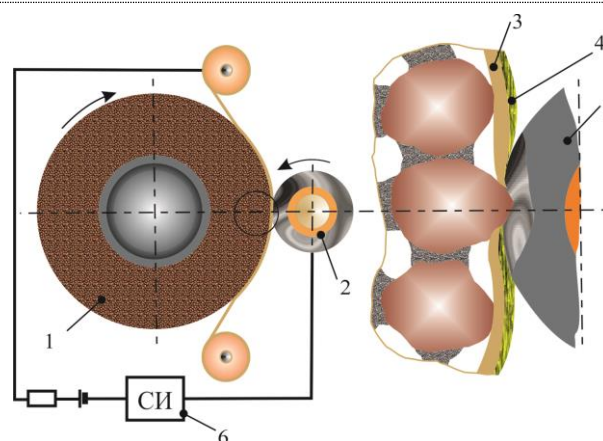


Рис. 1. Схема экспресс-метода определения числа зерен на рабочей поверхности инструмента: 1 – абразивный инструмент, 2 – оправка, 3 – фольга, 4 – изолирующее покрытие, 5 – токопроводящий ролик, 6 – счетчик импульсов

Новый электрический импульс возникает при прохождении зоны следующим абразивным зерном. Импульсы регистрируются либо электронным счетчиком импульсов. Число абразивных зерен на единицу поверхности инструмента вычисляется по числу зафиксированных импульсов и площади участка сканирования.

Точность определения числа режущих кромок по рассмотренному способу зависит от возможности наложения отдельных электрических импульсов и обеспечивается за счет выбора конструктивных параметров регистрирующей пластины ролика.

Таблица 2. Число режущих кромок на рабочей поверхности шлифовального круга 1 300x40x127 24A25HCM2K

| Способ определения числа кромок       | № замера | Длина трассы сканирования, мм | Количество импульсов, отпечатков | Расчетное число кромок мм <sup>2</sup> поверхности круга |
|---------------------------------------|----------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|
| По количеству электрических импульсов | 1        | 200                           | 68                               | 3.4                                                      |
|                                       | 2        | 200                           | 64                               | 3.2                                                      |
|                                       | 3        | 200                           | 72                               | 3.6                                                      |
|                                       | Ср.      | 200                           | 68                               | 3.4                                                      |
| По количеству отпечатков на фольге    | 1        | 200                           | 71                               | 3.5                                                      |
|                                       | 2        | 200                           | 69                               | 3.4                                                      |
|                                       | 3        | 200                           | 74                               | 3.7                                                      |
|                                       | Ср.      | 200                           | 71                               | 3.5                                                      |

Вероятность наложения импульсов будет совпадать с вероятностью события, заключающегося в том, что расстояние между двумя соседними кромками по длине участ-

ка сканирования будет меньше или равно длине контакта. При диаметре ролика 30 мм, толщине пластины 0,1 мм вероятность наложения импульсов для абразивных инструментов зернистостью 25 равна 0,052, т.

е. погрешность измерения числа зерен составляет около 5%.

Результаты экспериментального определения числа кромок на рабочей поверхности шлифовальных кругов 1 300x40x127 24A25HSM2K по предложенному способу и по отпечаткам на фольге приведены в таблице 2.

Аналитические зависимости для расчета числа зерен на рабочей поверхности инструмента приводятся в работах [1,12]. В основе вычислений лежит определение числа зерен, содержащихся в единице объема, по размерам зерен и структуре инструмента. В работе [1], кроме того, учитывается режим правки инструмента. В процессе шлифования число режущих кромок на рабочей поверхности инструмента не остается постоянным. При каждом контакте с заготовкой часть зерен будет разрушаться, а часть вырываться из связки круга. Одновременно в работу будут вступать новые кромки, лежащие в более глубоких слоях инструмента, так как диаметр инструмента уменьшается за счет износа. Учитывая эти процессы, вычислим число активных режущих кромок рабочей поверхности инструмента после  $i$ -го контакта

$$n_{zi} = n_{zi-1} + z_{zi} - n_{zi-1} \cdot P_{pi}, \quad (7)$$

где  $n_{zi-1}$  и  $n_{zi}$  - число зерен после  $i-1$ -го и  $i$ -го контактов;  $z_{zi}$  - число зерен, появляющихся на поверхности при износе круга;  $P_{pi}$  - вероятность разрушения и вырывания зерна при  $i$ -ом контакте.

В общем случае  $n_{zi}$  зависит от числа зерен на поверхности после правки  $n_{z0}$ , закона распределения зерен по глубине инструмента, радиального износа круга, прочности закрепления зерен, сил резания, возникающих в зоне контакта, которые являются случайными величинами. Если принять  $z_{zi}$  и  $P_{pi}$  постоянными, то решение зависимости (7) приводит к следующему соотношению:

$$n_{zi} = n_{z1} + \left( n_{z1} - \frac{z_3}{P_p} \right) \times \left\{ -1 + \left[ \begin{aligned} &1 - iP_p + \frac{i(i-1)}{2!} P_p^2 + \dots \\ &+ (-1)^j \frac{i(i-1)\dots(i+1-j)}{j!} P_p^j + \dots \\ &\cdot + (-1)^{i-1} P_p^{i-1} \end{aligned} \right] \right\}.$$

Члены квадратной скобки являются биномом с положительным показателем, на основании этого

$$n_z = \frac{z_3}{P_p} + \left( n_{z0} - \frac{z_3}{P_p} \right) (1 - P_p)^{i-1}. \quad (8)$$

Уравнение (8) справедливо для дискретного процесса, когда поверхность круга контактирует с заготовкой периодически, например один раз за оборот круга. При постоянном контакте заготовки с инструментом (суперфиниширование, хонингование и т. д.) рассмотрим непрерывный процесс  $n_z(\tau)$ . Для этого в уравнении (7) заменим  $n_{zi-1}$  на  $n_{zi} - \Delta n_{zi}$ , после преобразований получим

$$(1 - P_p) \Delta n_{zi} + n_{zi} P_p - z_3 = 0.$$

Полагая  $\Delta n_z = n'_z \tau_k$ , где  $\tau_k$  - время контакта поверхности с заготовкой, получим дифференциальное уравнение

$$n'_z + \frac{P_p}{\tau_k (1 - P_p)} n_z - \frac{z_3}{\tau_k (1 - P_p)} = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) при начальных условиях  $n_z(0+)$  и  $i = \nu_k \tau$  имеет вид

$$n_z(\tau) = \frac{z_3}{P_p} + \left( n_{z0} - \frac{z_3}{P_p} \right) e^{-P_p \nu_k \tau}, \quad (10)$$

где  $\nu_k$  - частота вращения круга.

В табл. 3 приводится сравнение значений  $n_z(\tau)$ , рассчитанных по зависимостям (8) и (10) при  $n_{z0} = 5,2 \cdot 10^6 \text{ 1/м}^2$ ;  $P_p = 0,1$  и  $0,01$ ;  $\nu_k = 32 \text{ 1/с}$ ;  $z_3 / P_p = 2 \cdot 10^6 \text{ 1/м}^2$ .

Рассмотренные данные указывают на существенное изменение числа зерен на рабочей поверхности инструмента в процессе шлифования. Для рассмотренного примера оно составляет до 250%, что вызывает необ-

ходимость учета этих изменений при расчете параметров процесса. Отклонения увеличиваются с повышением интенсивности процесса шлифования.

Таблица 3. Значения  $n_z(\tau)$ , полученные по зависимостям (11) и (14)

| Время работы инструмента, $\tau$ , с | Число контактов, $i$ | Расчетные значения $n_z(\tau)$ |           |                  |           |
|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------|------------------|-----------|
|                                      |                      | Зависимость (11)               |           | Зависимость (14) |           |
|                                      |                      | Pr = 0.1                       | Pr = 0.01 | Pr = 0.1         | Pr = 0.01 |
| 0.25                                 | 8                    | 4.3725                         | 4.9526    | 4.4388           | 4.9539    |
| 0.50                                 | 16                   | 2.5930                         | 4.7247    | 2.6461           | 4.7267    |
| 1.00                                 | 32                   | 2.1100                         | 4.3199    | 2.1306           | 4.3235    |
| 2.00                                 | 64                   | 2.0038                         | 3.6819    | 2.0054           | 3.6877    |
| 4.00                                 | 128                  | 2.0000                         | 2.8840    | 2.0000           | 2.8896    |
| 8.00                                 | 256                  | 2.0000                         | 2.2442    | 2.0000           | 2.2474    |
| 16.00                                | 512                  | 2.0000                         | 2.0186    | 2.0000           | 2.0191    |

При выводе зависимости (8) предполагалось, что плотность распределения режущих кромок по глубине инструмента постоянна. В действительности же она может меняться по сложному закону, поэтому с каждым оборотом круга будет меняться не только число разрушающихся кромок, но и число кромок, вступающих в работу.

Допустим, что в результате правки была сформирована рабочая поверхность с распределением кромок по глубине по нормальному закону. В этом случае при первом контакте круга с заготовкой будет участвовать только небольшая часть кромок:

$$n_{z1} = z_{z1} = \frac{n_z}{\sigma_{\xi_u} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u_i} e^{-\frac{(u-\xi_u)^2}{2\sigma_{\xi_u}^2}} du, \quad (11)$$

где  $\xi_u$  – среднее значение расстояний от условной наружной поверхности инструмента до вершин режущих кромок;  $\sigma_{\xi_u}$  – среднее квадратичное отклонение  $\xi_u$ .

При каждом последующем контакте круга с заготовкой в работу будут вступать новые режущие кромки. Число таких кромок на  $i$ -ом контакте будет определяться по уравнению (11) при замене нижнего предела интегрирования на  $u_{i-1}$ , верхнего предела на  $u_i$ , где  $u_{i-1}$  и  $u_i$  – расстояния до вершин абразивных зерен, наиболее удаленных от

условной наружной поверхности круга, которые проходят через зону контакта заготовки с инструментом при выполнении  $i-1$ -го и  $i$ -го оборотов круга.

При первых контактах круга с заготовкой число режущих кромок, вступающих в работу, будет больше числа разрушающихся. Вследствие этого число кромок на рабочей поверхности круга будет увеличиваться. После некоторого числа контактов число режущих кромок, вступающих в работу, будет уравниваться с числом разрушающихся, а затем становится меньше. Соответственно число режущих кромок в рабочем слое инструмента будет достигать максимума, а затем уменьшаться. Шероховатость шлифованной поверхности соответственно будет сначала уменьшаться, а затем увеличиваться.

Для экспериментальной проверки уравнений (7) и (11) были выполнены расчеты по изменению числа режущих кромок и шероховатости поверхности для случая шлифования образцов из стали 45, диаметром 50 мм, кругами 1 600x67x305 24A40HSM1K со скоростью круга – 30 м/с, скоростью детали – 0,78 м/с, продольной подачей –  $16 \cdot 10^{-3}$  м/с, поперечной подачей – 0,01 мм на ход стола. При расчетах принято, что тонкая правка круга выполнялась алмазом с продольной подачей – 0,01 мм/об. Шероховатость поверхности вычислялась для каждого образца

в порядке их обработки по приближенному уравнению работы [13].

При анализе расчетные значения шероховатости поверхности, рис. 2, кривая 2, сравнивались с экспериментальными, полученными А. А. Маталиным и В. С. Рысцовой [12], рис. 2, кривые 1. Сопоставление свидетельствует не только о хорошем соответствии экспериментальных и расчетных данных по абсолютной величине, но и о почти полной идентичности формы кривых.

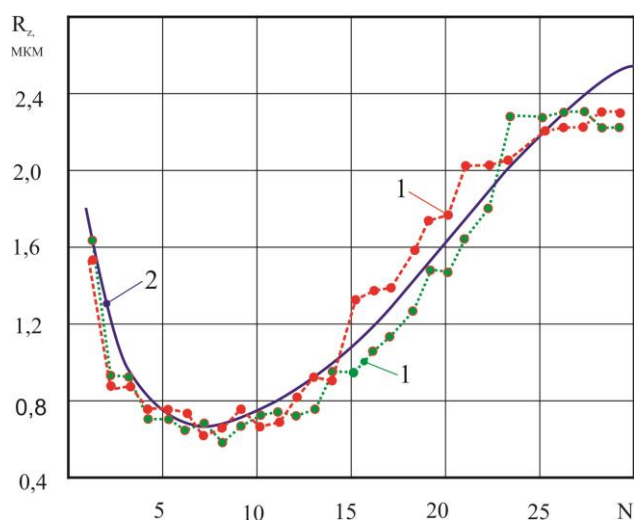


Рис.2. Изменение шероховатости шлифованных поверхностей за период стойкости инструмента при шлифовании с тонкой правкой круга: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные; N – номер обработанной детали

Параметры распределения режущих кромок по глубине рабочего слоя инструмента входят практически во все зависимости по моделированию процессов съема материала и износа абразивного инструмента. В выполненных теоретических и экспериментальных исследованиях нет единого мнения о виде распределения. Для моделирования предлагают применять нормальный закон распределения, бета и гамма распределения. Из разнообразия рекомендаций по форме распределения режущих кромок по глубине можно сделать заключение, что в процессе обработки оно может существенно изменяться. Теоретическое обоснование этому выводу выполнено в работах В. А. Носенко [14].

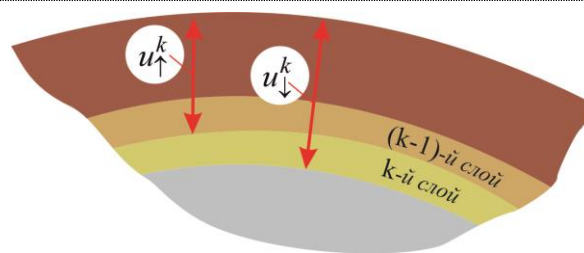


Рис. 3. Схема к расчету параметров состояния базового участка рабочей поверхности абразивного инструмента

Для выполнения анализа выделим в рабочем объеме круга слой, толщина которого, соизмерима с радиальным износом круга при одном контакте, рис. 3. При необходимости повышения точности расчетов он, может быть, подвергнут разбиению на более элементарные составляющие. К основным параметрам состояния выделенного слоя могут быть отнесены: число, величина износа и форма вершин абразивных зерен. Износ вершин зерен рассчитывается по уравнениям (1) и (2), форма вершин – по уравнениям (3) и (4). Для расчета числа вершин зерен в каждом из слоев, уравнение (7) должно быть дополнено рядом составляющих [15]. Число вершин в слое может как уменьшаться, так и увеличиваться.

Часть режущих кромок исчезнет по причине вырывания зерен из связки круга, некоторое количество кромок покинет слой в результате скалывания. Увеличение числа кромок происходит за счет попадания в слой кромок, появившихся в результате скола вершин в вышележащих слоях, и за счет перемещения кромок из вышележащих слоев при их износе. С учетом указанных процессов число кромок в k-ом слое после i-го контакта круга с заготовкой определится

$$n_i^k = n_{i-1}^k - \Delta n_{-ci}^k - \Delta n_{-pi}^k - \Delta n_{-ui}^k + \Delta n_{+ci}^k + \Delta n_{+ui}^k, \quad (12)$$

где  $n_i^k$  и  $n_{i-1}^k$  – количество вершин абразивных зерен в k-ом слое после i-го и i-1-го контактов;  $\Delta n_{-ci}^k$  – количество скалывающихся вершин зерен при i-ом контакте в k-ом слое инструмента;  $\Delta n_{-pi}^k$  – число абразивных зерен, вырванных из связки круга при вы-

полнении  $i$ -го контакта;  $\Delta n_{-ui}^k$  - число вершин абразивных зерен, убывающих из  $k$ -го слоя инструмента при выполнении  $i$ -го контакта вследствие износа.

Индексами + в уравнении (12) обозначены соответствующие величины числа вершин зерен, поступающих в слой при  $i$ -ом контакте с инструментом.

Определим каждую из составляющих уравнения (12). Для любого уровня инструмента (расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины) справедливо утверждение, что зерно разрушится в том случае, если равнодействующая сил резания превысит прочность зерна. Аналогично можно сформулировать и условие вырывания зерна из связки инструмента. Вероятности событий разрушения  $P(P)$  и вырывания  $P(B)$  могут быть определены соотношениями

$$P(P) = P(R_z \geq G_z),$$

$$P(B) = P(R_z \geq G_{ce}),$$

где  $R_z$  - сила, действующая на зерно при микрорезании;  $G_z$  и  $G_{ce}$  - прочность абразивного зерна и прочность его закрепления в инструменте соответственно.

Учитывая, что как прочность зерна, так и сила, действующая на зерно, являются величинами случайными, вероятность  $P(P)$  определится

$$P(P) = \int_{-\infty}^{\infty} f_g(G_z) \int_{G_z}^{\infty} f_r(R_z) dR_z dG_z,$$

где  $f_g(G_z)$  и  $f_r(R_z)$  - плотности вероятностей распределений прочности абразивного зерна и сил, действующих на зерно.

Аналогичная зависимость может быть получена и для вероятности вырывания зерен из связки круга. Силы, действующие на абразивные зерна, плотность вероятностей распределения прочности зерна и прочности их закрепления в связке круга могут быть определены по зависимостям работы [14]. При  $i$ -ом контакте из рабочего слоя вырываются и подвергаются разрушению наиболее слабо закрепленные зерна. В связи с

этим для анализа последующих контактов необходима коррекция законов распределения  $G_z$  и  $G_{ce}$ . Число вершин зерен, появляющихся в слое  $\Delta n_{+ci}^k$ , определяется по общему числу разрушившихся при  $i$ -ом контакте зерен  $n_{cui}$  и плотности вероятности распределения по глубине вновь образовавшихся вершин  $f_{nc}(u)$

$$\Delta n_{+ci}^k = \int_{u_{\uparrow}^k}^{u_{\downarrow}^k} n_{cui} f_{nc}(u) du,$$

где  $u_{\uparrow}^k$  и  $u_{\downarrow}^k$  - координата верхней (ближней) и нижней (дальней) границ рассматриваемого слоя относительно условной наружной поверхности инструмента, см. рис. 3.

Число вершин абразивных зерен, покидающих и приходящих в рассматриваемый слой вследствие износа, определяется интегрированием соответственно записанных зависимостей. Если износ инструмента при одном контакте намного меньше глубины резания, то можно считать, что в пределах рассматриваемого слоя режущие кромки распределены равномерно. В этом случае число кромок  $\Delta n_{-ui}^k$  и  $\Delta n_{+ui}^k$  приближенно определяются

$$\Delta n_{-ui}^k = \frac{\Delta h_{\downarrow i}^k}{u_{\downarrow}^k - u_{\uparrow}^k} n_{zi-1}^k,$$

$$\Delta n_{+ui}^k = \frac{\Delta h_{\downarrow i}^{k-1}}{u_{\downarrow}^{k-1} - u_{\uparrow}^{k-1}} n_{zi-1}^{k-1},$$

где  $\Delta h_{\downarrow}^k$  и  $\Delta h_{\downarrow}^{k-1}$  - износ вершин нижних границ  $k$ -того и  $k-1$ -го слоев.

Подставляя в зависимость (12) выражения всех составляющих, получим рекуррентное соотношение

$$n_i^k = n_{i-1}^k (1 - P_i(P) - P_i(B)) + \int_{u_{\uparrow}^k}^{u_{\downarrow}^k} n_{cui} f_{nc}(u) du - \frac{n_{zi-1}^k \Delta h_{\downarrow i}^k}{u_{\downarrow}^k - u_{\uparrow}^k} + \frac{n_{zi-1}^{k-1} \Delta h_{\downarrow i}^{k-1}}{u_{\downarrow}^{k-1} - u_{\uparrow}^{k-1}}. (13)$$

При известном числе режущих кромок в каждом из слоев инструмента закон их распределения по глубине устанавливается по известным методикам.

Вычисление параметров состояния рабочей поверхности абразивного инструмента по зависимости (13) выполняется в следующей последовательности:

а) устанавливаются параметры состояния рабочей поверхности после правки;

б) рассчитываются параметры зоны контакта заготовки с инструментом при первом контакте и силы, действующие на абразивные зерна;

в) рассчитываются число режущих кромок в первом, втором и т.д. слоях инструмента и их геометрия после первого контакта;

г) уточняются законы распределения режущих кромок по глубине инструмента, законы распределения прочности абразивных зерен и прочности закрепления их в инструменте;

д) после расчета всех перечисленных параметров переходят последовательно к анализу второго, третьего и т. д. контактов инструмента с заготовкой.

В качестве примера в табл. 4 приводятся расчетные данные по изменению числа ре-

жущих кромок в рабочем слое инструмента для двух вариантов: а) износ инструмента происходит за счет износа режущих кромок без разрушения и вырывания зерен; б) при работе инструмента - кроме износа наблюдается разрушение режущих кромок и вырывание зерен из связки круга. Для анализа в рабочем слое инструмента выделен слой толщиной 1 мкм на расстоянии  $u = t_\phi$  от его наружной поверхности. Расчеты выполнены для процесса круглого наружного врезного шлифования закаленных образцов диаметром 50 мм кругами диаметром 300 мм с фактической глубиной микрорезания  $t_\phi = 20 \cdot 10^{-6}$  м. Радиальный износ круга принят равным  $\Delta R = 1 \cdot 10^{-6}$  м, число режущих кромок в выделенном слое -  $n_{30} = 70$  (1/м<sup>2</sup>мкм). При вычислении координат слоя по глубине учтено, что при каждом контакте условная наружная поверхность смещается к центру круга на величину радиального износа.

Таблица 4. Изменение числа режущих кромок в рабочем слое инструмента

| Число контактов поверхности круга с заготовкой | Координата слоя от текущей условной наружной поверхности, мкм | Число режущих кромок в слое, 1/м <sup>2</sup> мкм |                           |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------|
|                                                |                                                               | При износе с разрушением кромок                   | При износе без разрушения |
| 0                                              | 20                                                            | 70                                                | 70                        |
| 3                                              | 17                                                            | 72                                                | 73                        |
| 6                                              | 14                                                            | 73                                                | 79                        |
| 9                                              | 11                                                            | 70                                                | 87                        |
| 12                                             | 8                                                             | 61                                                | 97                        |
| 15                                             | 5                                                             | 37                                                | 112                       |
| 18                                             | 2                                                             | 12                                                | 129                       |

## Выводы

Сопоставление полученных результатов подтверждают высказанную гипотезу о существенном изменении законов распределения режущих кромок по глубине инструмента в процессе шлифования. При работе круга в режиме самозатачивания наблюдается уменьшение их числа в слоях близлежащих к условной поверхности инструмента, при работе в режиме затупления, наоборот - их увеличение. Рассмотренные зависимости

позволяют прогнозировать изменения распределений, что повышает точность моделей взаимодействия инструмента и заготовки. Однако данные модели не учитывают воздействия возмущающих факторов, которые могут оказывать существенное влияние на выходные показатели процесса шлифования. Учет вышеуказанных факторов представляет собой дальнейшие перспективы развития решения задачи прогнозирования изменения числа и распределения зерен по глубине инструмента за период его стойкости.

## Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304с.
2. Jackson Mark J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
3. Brian Rowe W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
4. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C. Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992. – 225 p.
5. Novoselov, Yu. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 809-814.
6. Абразивно-алмазная обработка и доводочные процессы: справочник; под ред. Масловского А.А. – М.: Машиностроение, 1986. – 196 с.
7. Bratan S. Modeling of cutting forces in diamond drilling/S. Bratan, Y. Novosyolov, S.Roshupkin// International Journal of Innovative and Information Manufacturing technologies. – 2015. – Number 2. – Pp. 59-63.
8. Узунян М. Д. Управление качеством – путь развития высоких технологий/ М.Д. Узунян // Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг: труды VII международного научно-технического семинара, 24-28 сентября 1997 г. – с. 246-248.
9. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. - 191 с.
10. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. Пособие /А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
11. Резников А. Н. Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной шероховатости поверхности /А.Н. Резников, О.Б. Федосеев// Вестник машиностроения. – 1976. - № 6. – С. 69.
12. Маталин А. А. Точность, производительность и экономичность механической обработки /А. А. Маталин, В. С. Рысцова; Под ред. А. А. Маталина. - Москва; Ленинград: Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1963. - 352 с.
13. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / А.Н. Резников, Е.И. Алексентев, Я.И. Барац и др.; Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.
14. Носенко В. А. Шлифование адгезионно-активных металлов/В.А. Носенко. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.
15. Новоселов Ю.К. Влияние состояния рабочей поверхности инструмента на оценку параметров формирующего фильтра /Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, Д. А. Каинов //Резание и инструмент в технологических системах.- Межд. научн.-техн. сборник. - Харьков: ХГПУ, 2002. - Вып.- 62.- С.84-88 .

## References

1. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia pov-erkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novose-lov. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 304s.
2. Jackson Mark J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
3. Brian Rowe W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
4. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C. Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992. – 225 p.
5. Novoselov, Yu. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 809-814.
6. Abrazivno-almaznaia obrabotka i dovodochnye protsessy: spravochnik; pod red. Maslovskogo A.A. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 196 s.
7. Bratan S. Modeling of cutting forces in diamond drilling/S. Bratan, Y. Novosyolov, S.Roshupkin// International Journal of Innovative and Information Manufacturing technologies. – 2015. – Number 2. – Pp. 59-63.
8. Uzunian M. D. Upravlenie kachestvom – put' razvitiia vysokikh tekhnologii/ M.D. Uzunian // Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: tendentsii razvitiia, menedzhment, marketing: trudy VII mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo semina-ra, 24-28 sentiabria 1997 g. – s. 246-248.
9. Korolev A. V. Issledovanie protsessov obrazovaniia poverkhnostei instrumenta i detali pri abrazivnoi obrabotke. - Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. - 191 s.
10. Teoreticheskie osnovy rezaniia i shlifovaniia mate-rialov: Ucheb. Posobie /А. V. Iakimov, F. V. Novikov, G. V. Novikov, B. S. Serov, A. A. Iaki-mov – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s.
11. Reznikov A. N. Vybora rezhimov shlifovaniia sin-teticheskimi sverkhтвердыми materialami pri zadan-noi sherokhovatosti poverkhnosti /А.Н. Reznikov, О.В. Fedoseev// Vestnik mashinostroeniia. – 1976. - № 6. – S. 69.
12. Matalin A. A. Tochnost', proizvoditel'nost' i ekonomichnost' mekhanicheskoi obrabotki /А. А. Matalin, V. S. Rystsova; Pod red. А. А. Matalina. - Moskva; Leningrad: Mashgiz. [Leningr. otd-nie], 1963. - 352 s.
13. Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov: Spravochnik / А.Н. Reznikov, Е.И. Aleksentsev, Iа.І. Barats i dr.; Pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. А.Н. Reznikova. – М.: Mashinostroenie, 1977. - 391 s.
14. Nosenko V. A. Shlifovanie adgezionno-aktivnykh metallov/V.A. Nosenko. – М.: Mashinostroenie, 2000. – 262 s.
15. Novoselov Iu.K. Vliianie sostoiianiia rabochei pov-erkhnosti instrumenta na otsenku parametrov formiruiushchego fil'tra /Iu.K. Novoselov, S.M. Bratan, D. A. Kainov //Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh.- Mezhd. nauchn.-tekhn. sbornik. - Khar'kov: KhGPU, 2002. - Vyp.- 62.-S.84-88 .

УДК 681.2.08

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ И ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ ПЛАСТИН

А.П. Васютенко<sup>1</sup>, Л.В. Ефремова<sup>1</sup>, А.Ю. Тараховский<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

### Аннотация

Основные направления средств измерительной техники, роль автоматических средства контроля размеров и форм деталей. Рассматриваются вопросы обеспечения требуемых тепловых режимов работы деталей радиоаппаратуры. На качество теплоотвода и теплопередачи влияет целый ряд параметров: площадь контакта, материалы контактирующих деталей, качество поверхностей контактирующих деталей, в том числе волнистость поверхности. Приводятся графические зависимости теплового сопротивления контакта от высоты волн неровностей поверхностей контактирующих деталей, кинематическая схема автоматизированного устройства для контроля толщины и отклонения формы поверхностей теплоотводящих пластин. Измерение осуществляется двумя индуктивными преобразователями соленоидного типа закрепленными на портале. Значение высоты оценивается в нескольких точках на поверхности измеряемой детали. Проведен анализ составляющих и расчет суммарной погрешности измерения, который показал, что величина погрешности составляет 1,26мкм, что характеризует предлагаемое средство контроля как высокоточное.

**Ключевые слова:** теплопроводящая пластина, теплообмен, шероховатость, волнистость, толщина, отклонение формы, погрешность.

## AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING AND THICKNESS WAVY SURFACE HEATSPREADER

A.P Vasenko<sup>1</sup>, L.V. Efremova<sup>1</sup>, A.Yu. Tarakhovskiy<sup>1</sup><sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

The main directions of measuring instruments, the role of automatic control means dimensions and shapes of parts. The questions provide the required thermal modes of radio parts. On the heat sink and the heat transfer quality is influenced by a number of parameters: the contact area, material contacting parts, the contacting surfaces of parts quality, including surface undulations. We give a graph of the thermal contact resistance of wave heights uneven surfaces wetted parts, kinematics of automated devices to control the thickness and the deviation form the heat-removing surface of the plates. Measurement is carried out by two inductive transducers solenoid type fixed on the portal. Height value measured at several points on the surface of the measured part. The analysis of the components and the calculation of the total measurement error, which showed that the error value is 1,26mkm that characterizes the proposed means of controlling both high precision.

**Keywords:** thermal transfer plate, heat, roughness, waviness, thickness, shape deviation, error.

### Введение

Основным направлением развития приборостроения является разработка средств измерительной техники, включающих приборы для измерения механических, электрических, магнитных, тепловых, оптических и других физических величин [4, 7, 11]. Измерительные приборы совместно с автоматическими управляющими и с исполнитель-

ными устройствами образуют техническую базу автоматизированных систем управления технологическими процессами [6, 9, 13]. Одной из главных особенностей развития приборостроения является решение проблем повышения эффективности и качества выпускаемой продукции. Важная роль в обеспечении высокого качества продукции принадлежит автоматическим устройствам, предназначенным для контроля размеров и

формы деталей и сортировки готовой продукции [4, 12, 15].

### Влияние контакта деталей на тепловое сопротивление

Решение вопроса отвода тепла от деталей радиоаппаратуры имеет важное практическое значение, так как обеспечение требуемых тепловых режимов их работы в значительной степени определяет стабильность их электрических параметров, долговечность и надежность работы [10]. На качество теплоотвода и теплопередачи влияет целый ряд параметров: площадь контакта, материалы контактирующих деталей, качество поверхностей контактирующих деталей, в том числе волнистость поверхности.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости теплового сопротивления  $R_{kv} = f \cdot (H_1 + H_2)$  контакта детали ( $H_1$ ) и теплоотводящей пластины ( $H_2$ ) от высоты волн ( $H$ ) неровностей поверхностей для двух видов межконтактной среды: воздух и теплоотводящая паста КПТ-8. Моделирование проводилось для различных сочетаний высоты волн ( $H_1$ ) и ( $H_2$ ) в диапазоне ( $H = 0,1 \dots 2,5$ ) мкм.

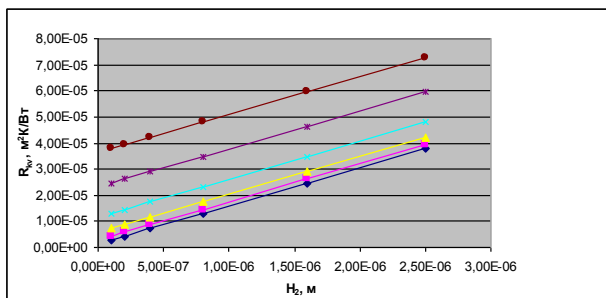


Рис. 1. Графики зависимости  $R_{kv} = f \cdot (H_1 + H_2)$  для воздуха

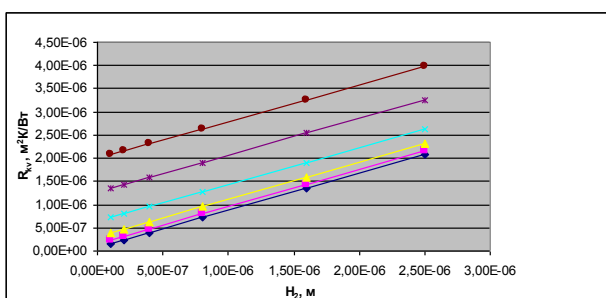


Рис. 2. Графики зависимости  $R_{kv} = f \cdot (H_1 + H_2)$  для теплоотводящей пасты

Анализ графиков показывает что с увеличением высоты волнистости поверхностей контактирующих деталей от 0,2 до 2,5 мкм тепловое сопротивление контакта  $R_{kv}$  увеличивается в 8 раз от  $0,1 \dots 0,8 \cdot 10^{-4}$  до  $0,8 \dots 1,6 \cdot 10^{-4}$  (м²К)/Вт. Поэтому разработка автоматизированных средств контроля размеров и формы теплоотводящих пластин является важной и актуальной задачей.

### Автоматизированное устройство контроля толщины и формы теплоотводящих пластин

На рис. 3 представлена схема устройства для измерения высоты и отклонения от плоскостности рабочих поверхностей токоотводящих пластин [1, 2]. Измерение осуществляется двумя индуктивными преобразователями соленоидного типа закрепленными на портале. Значение высоты оценивается в нескольких точках на поверхности измеряемой детали. Количество точек определяется в зависимости от требуемой точности измерения [5]. Так как необходимо оценивать отклонение от плоскостности двух рабочих поверхностей детали, то измерение производится за два цикла, а переустановка детали на измерительной позиции осуществляется автоматически манипулятором.

Принцип действия устройства следующий. Измеряемая деталь 1 устанавливается в подвижную каретку 2 шариковой направляющей, которая включает в себя каретку 2, неподвижную направляющую 3 и шарики 19, установленные в призматических пазах каретки 2 и направляющей 3. Шариковая направляющая предназначена для перемещения измеряемой детали под порталом 4. Регулирование конечного положения каретки 2 производится регулируемым упором 5. Перемещение каретки 2 осуществляется от пневмоцилиндра 6. На портале 4 установлены два измерительных параллелограмма с индуктивными преобразователями. В процессе линейного перемещения детали индуктивные преобразователи измеряют отклонение профиля плоскости в двух сечениях. Результаты измерения заносятся в запоминающее устройство. Вычислительное

устройство осуществляет определение значения высоты пластин и отклонения от плоскостности рабочих поверхностей деталей.

Пружинные параллелограммы включают в себя подвижную каретку 10, закреплённую на двух прямых плоских пружинах 8. Крепление пружин к подвижной каретке 10 и неподвижной каретке 9 осуществляется накладками 11. Для усиления угловой жёсткости пружинного параллелограмма служат накладки 12 и 13.

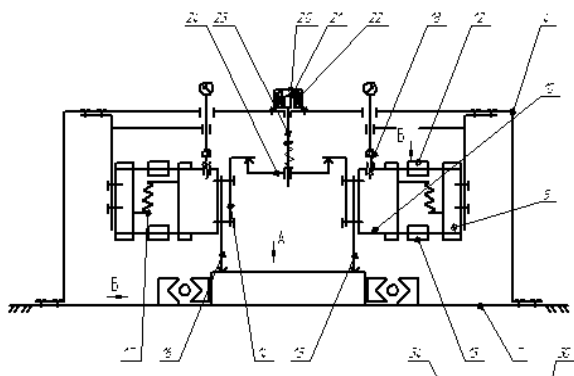


Рис. 3. Принципиальная кинематическая схема устройства измерения пластин

К подвижной каретке 10 пружинного параллелограмма крепятся уголок 14. Уголок 14 может переустанавливаться на каретке 19 при наладке на заданную величину арретирования. Усилие прижима измерительных наконечников 15, 16 к поверхности детали обеспечивается пружиной растяжения 17 закреплённой на стойках. В каретке 10 закреплён настроечный винт 18. Пружинные параллелограммы закреплены на портале 4, который в свою очередь установлен на общей плите 7. Арретирование измерительных наконечников 15, 16 осуществляется электромагнитом 20 соединенным штоком 23, который в свою очередь закреплён на планке 24. Электромагнит состоит из сердечника 21 и обмотки 22.

### Погрешность измерительного устройства

Погрешность измерительного устройства определялась как сумма следующих составляющих: инструментальная погрешность, погрешность рабочего эталона, по-

грешность вносимая объектом контроля, температурная погрешность [3, 8]. В табл. 1 и 2 представлены результаты расчета погрешности измерения высоты и отклонения от плоскостности теплоотводящих пластин.

Суммирование систематических  $\Delta_{Si}$  и случайных  $\sigma_i$  составляющих погрешностей измерения высоты и отклонения от плоскостности производится по формулам:

$$\Delta_{\Sigma B} = \sum_{i=1}^n \Delta_{S_{Bi}} \pm 2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{Bi}^2} \leq [\Delta_B];$$

$$\Delta_{\Sigma \Pi} = \sum_{i=1}^n \Delta_{S_{\Pi i}} \pm 2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{\Pi i}^2} \leq [\Delta_{\Pi}].$$

Таблица 1. Результаты расчетов погрешности измерения высоты

| №      | Группа влияния               | Наименование погрешности                                                            | $\Delta_{S_{Bi}}$ , мкм | $\sigma_{Bi}$ , мкм |
|--------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1      | Инструментальная             | 1.1 Погрешность базирования                                                         | 0                       | 0,6                 |
|        |                              | 1.2 Погрешность измерения высоты детали                                             | 0                       | 0,087               |
|        |                              | 1.3 Силовые погрешности                                                             | 0                       | 0,035               |
|        | Итого:                       |                                                                                     | 0                       | 0,722               |
| 2      | Погрешность рабочего эталона | 2.1 Погрешность установочной меры                                                   | 0                       | 0,43                |
| Итого: |                              |                                                                                     | 0                       | 0,43                |
| 3      | Температурные погрешности    | 3.1 Погрешность, вызванная разностью температур рабочего эталона и объекта контроля | 0,46                    | 0,2                 |
|        |                              | 3.2 Погрешность, возникающая из-за колебания температуры средства контроля          | 0                       | 0,2                 |
|        | Итого:                       |                                                                                     | 0,46                    | 0,4                 |

Предельная суммарная ошибка устройства при измерении высоты составит

$\Delta_{\Sigma B} = 2,28$  мкм, что меньше допускаемой погрешности измерения составляющей 4 мкм:  $\Delta_{\Sigma B} \leq [\Delta_B] = 4$  мкм,  $2,28 \text{ мкм} < 4 \text{ мкм}$ .

При измерении отклонения от плоскостности в суммарную погрешность измерения не входят погрешность рабочего эталона, температурные погрешности, погрешность связанная с величиной измерительного усилия. Суммарная погрешность измерения отклонения от плоскостности составит  $\Delta_{\Sigma \Pi} = 0,72$  мкм, что меньше допускаемой погрешности измерения равной 1,6 мкм:  $\Delta_{\Sigma \Pi} \leq [\Delta_{\Pi}] = 1,6$  мкм,  $0,72 \text{ мкм} < 1,6 \text{ мкм}$ . (табл. 2).

Таблица 2. Составляющие погрешности измерения отклонения от плоскостности

| №      | Группа влияния   | Наименование погрешности            | $\Delta_{\Sigma\Pi}$ , мкм | $\sigma_{\Pi}$ , мкм |
|--------|------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1      | Инструментальная | Погрешность базирования             | 0                          | 0,6                  |
|        |                  | Погрешность измерения высоты детали | 0                          | 0,087                |
| Итого: |                  |                                     | 0                          | 0,687                |

## Выводы

Проведенное моделирование зависимости теплового сопротивления контакта детали и теплоотводящей пластины от высоты волн ( $H$ ) неровностей поверхностей для двух видов меж контактной среды: воздух и теплоотводящая паста марки КПТ–8 позволило установить значительную зависимость теплового сопротивления контакта от качества поверхностей контактирующих деталей. Предложенная схема автоматизированного средства контроля размеров и формы теплоотводящих пластин, позволяет повысить точность, производительность и достоверность результата контроля геометрических параметров токоотводящих пластин. Проведенный анализ составляющих и расчет суммарных погрешностей измерения высоты и формы пластин показал, что величина погрешности не превышает 2,28 мкм при контроле высоты и 0,72 мкм при контроле отклонения от плоскостности пластин.

## Список литературы

1. Анурьев В.И. «Справочник конструктора-машиностроителя»: В 3-х т. Т. 1 - 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. -М.: Машиностроение, 2001. - 920 с.
2. Анурьев В.И. «Справочник конструктора-машиностроителя»: В 3-х т. Т. 2 - 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. -М.: Машиностроение, 2001. - 912 с.
3. Бойков Г.В. Лабораторный практикум по приборам точной механики / Г.В. Бойков. Минск: Высш. шк., 1983.
4. Васильев А.С. Основы метрологии и технические измерения / А.С. Васильев. - М.: Машиностроение, 1988.
5. Виноградов А.Н. Справочник контролера машиностроительного завода. Допуски, посадки и линейные измерения / А.Н. Виноградов и др.; Под ред. А. И. Якушева. М.: Машиностроение, 1980. 527с.
6. Воронцов Л.Н. Приборы автоматического контроля в машиностроении / Л.Н. Воронцов, С.Ф. Корндорф. - М.: Машиностроение, 1988. 380 с.
7. Зайцев С. А. Контрольно - измерительные приборы и инструменты / С. А. Зайцев, А. Н. Толстов, Д. В. Меркулов. – М.: Академия, 2005. – 463с.
8. Информационно- измерительная техника и электроника: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Г.Г. Раннев, В.А. Суругина, В.И. Калашников и др.]; под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Издательский центр «Академия», 2006.
9. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В.П. Легаев; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с.
10. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В.М. Попов. – М.: «Энергия», 1991. – 216с.
11. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника. Учебник / пер. с англ. Ю. А. Заболотной. - М.: Техносфера, 2004. - 376 с.
12. Степанковский Ю.В. Преобразующие устройства приборов / Ю.В.Степанковский. –К.: Корнійчук2002. – 208с.
13. Сучков А.А. Аналоговые и цифровые измерительные устройства: Семестровый курс лекций. – Ростов-на-Дону, 2008. – Электронное издание.
14. Шишмарев В.Ю. Средства измерений/ Учеб. пособие. - 4-е изд., стер./ В.Ю. Шишмарев - М.: Издательский центр "Академия", 2010. - 320 с.
15. <https://www.itmash.ru> (дата обращения 10.09.2016).

## References

1. Anur'ev V.I. «Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia»: V 3-kh t. T. 1 - 8-e izd., pererab. i dop. Pod red. I. N. Zhestkovoï. -M.: Mashinostroenie, 2001. - 920 s.
2. Anur'ev V.I. «Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia»: V 3-kh t. T. 2 - 8-e izd., pererab. i dop. Pod red. I. N. Zhestkovoï. -M.: Mashinostroenie, 2001. - 912 s.
3. Boikov G.V. Laboratornyi praktikum po pribo-ram tochnoi mekhaniki / G.V. Boikov. Minsk: Vyssh. shk., 1983.
4. Vasil'ev A.S. Osnovy metrologii i tekhnicheskie izmereniia / A.S. Vasil'ev. M.: Mashinostroenie, 1988.
5. Vinogradov A.N. Spravochnik kontrolera mashinostroitel'nogo zavoda. Dopuski, posadki i linei-nye izmereniia / A.N. Vinogradov i dr.; Pod red. A. I. Iakusheva. M.: Mashinostroenie, 1980. 527s.
6. Vorontsov L.N. Pribory avtomaticheskogo kontro-lya v mashinostroenii / L.N. Vorontsov, S.F. Korndorf. M.: Mashinostroenie, 1988. 380 s.
7. Zaitsev S. A. Kontrol'no - izmeritel'nye pribo-ry i instrumenty / S. A. Zaitsev, A. N. Tolstov, D. V. Merkulov. – M. : Akademiia, 2005. – 463s.
8. Informatsionno- izmeritel'naia tekhnika i elek-tronika : uchebnik dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii / [G.G. Rannev, V.A. Surogina, V.I. Kalashnikov i dr.]; pod red. G.G. Ranneva. – M.: Izdatel'skii tsentr «Akademiia», 2006.
9. Legaev V.P. Pribory avtomaticheskogo kontrolya i upravleniia v mashinostroenii: ucheb. posobie / V.P. Legaev; Vladim. gos. un-t. – Vladimir : Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 123 s.
10. Popov V.M. Teploobmen v zone kontakta raz"emnykh i neraz"emnykh soedinenii / V.M. Popov. – M.: «Energiia», 1991. – 216s.
11. Ratkhor T.S. Tsifrovye izmereniia. Metody i skhe-motekhnika. Uchebnik / per. s angl. Iu. A. Zabolotnoi. - M.: Tekhnosfera, 2004. - 376 s.
12. Stepankovskii Iu.V. Preobrazuiushchie ustroistva priborov / Iu.V.Stepankovskii. –K.: Korniiichuk2002. – 208s.
13. Suchkov A.A. Analogovye i tsifrovye izmeritel'-nye ustroistva.: Semestrovyy kurs leksii. – Rostov-na-Donu, 2008. – Elektronnoe izdanie.
14. Shishmarev V.Iu. Sredstva izmerenii/ Ucheb. po-sobie. - 4-e izd., ster./ V.Iu. Shishmarev - M.: Izda-tel'skii tsentr "Akademiia", 2010. - 320 s.
15. <https://www.itmash.ru> (data obrashcheniia 10.09.2016).

УДК 621.9-219.1-752

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Е.А. Владецкая<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

### Аннотация

Приведены результаты лабораторных исследований процесса шлифовальной обработки с учетом моделирования воздействий от морского волнения, в качестве внешних сил действующего на оборудование, а также соседнего работающего оборудования в условиях плавучей мастерской. Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовали экспериментальный стенд, включающий круглошлифовальный станок с комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, а также компрессор, размещаемый на разном удалении от станка, создающий при работе на разных режимах внешние вибрационные воздействия, имитирующие внешние возмущения через поверхность пола и фундамент на станину станка, соответствующие воздействиям внешней среды и работающего соседнего оборудования. Получены зависимости частоты механических колебаний (в зонах измерения – станина-фундамент и на направляющих стола станка в поперечном и вертикальном направлениях), амплитуды виброперемещения в указанных зонах от состояний круглошлифовального станка и уровней морского волнения. Определены изменения погрешности формы обрабатываемых деталей, шероховатости обрабатываемой поверхности, волнистости поверхностей шеек валов.

**Ключевые слова:** плавучая мастерская, шлифовальный станок, процесс шлифовальной обработки, морское волнение, виброметр, параметры вибраций, частота колебаний, амплитуда виброперемещения, погрешность формы, шероховатость поверхности, волнистость.

## MODELING VIBRATION EXPOSURE FROM EXTERNAL SOURCES WHEN GRINDING THE DETAILS UNDER LABORATORY CONDITIONS

Е.А. Vladetskaya<sup>1</sup><sup>1</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

The results of laboratory Research of grinding machining process based on modeling the impacts of sea waves, as the external forces acting on the equipment, as well as an adjacent operating equipment in a floating workshop. To determine the effect of external influences on the quality of treatment for grinding used experimental stand, including grinding machine with a set of test equipment, as well as a compressor that is placed at different distances from the machine that creates when running on different modes of external vibration effects that simulate external disturbances through the surface floor and basement on the machine stand, respective environmental effects and working nearby equipment. The dependence of frequency mechanical vibrations (in the areas of measurement - machine bed-base and to guide the machine table in the lateral and vertical directions), the amplitude of vibration displacement in these areas from the states of grinding machines and levels of sea waves. The changes in the form of error workpieces, machined surface roughness, waviness of the surfaces of the necks of shafts.

**Keywords:** floating workshop, grinding machine, grinding processing, sea waves, vibrometer, the parameters of vibration, oscillation frequency, amplitude of vibration displacement, the error form, surface roughness, waviness.

**Актуальность проблемы.** Для промышленности приморских городов характерно наличие таких мобильных мини-заводов, как плавучие мастерские (ПМ) и рейдовые плавучие мастерские (ПМР) с раз-

мещенными на палубах производственными участками, в том числе и механообрабатывающими, имеющими широкий спектр станочного оборудования, включая шлифовальные станки. ПМ и ПМР способны вы-

полнять сложные работы по изготовлению и модернизации высокотехнологичных изделий, узлов и агрегатов в удалённых от основных пунктов базирования районах. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных воздействием на него различных источников, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей в ходе технологического процесса [1, 2].

Повышение качества обработки деталей в условиях ПМ непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников, в том числе и от воздействий внешней среды — волнений водной поверхности.

Как правило, на палубах ПМ (рис. 1, а) фиксация станков обеспечивается фундаментом (рис. 1, б), который не обеспечивает достаточной виброизоляции вследствие значительных внешних колебательных воздействий, которые до настоящего времени являются малоизученными и их влияние на качество обработки, особенно на финишных операциях, усложнённых колебательными процессами разного уровня, не исследовалось.



а



б

Рис. 1. Общий вид плавучей мастерской (а) и пример установки ее оборудования (б)

**Целью данной статьи** является моделирование и экспериментальное исследование вибрационных воздействий от морского волнения и работающего соседнего оборудования на качество деталей при обработке на круглошлифовальном станке в лабораторных условиях, аналогичных условиям плавучей мастерской.

#### Методика проведения исследований.

Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовали лабораторное оборудование (рис. 2) в составе экспериментального стенда, включающего круглошлифовальный станок BUA 16, оснащенный комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, а также компрессором 1 (FINI Tiger 245), размещаемым на разном удалении ( $B_{k1} \dots B_{ki}$ ) от станка 2, создающим при работе на разных режимах внешние вибрационные воздействия на технологическую систему станка ( $f_{k1} \dots f_{ki}$ ), имитирующие внешние возмущения через поверхность пола и фундамент на станину станка, соответствующие воздействиям на станки в ПМ внешней среды (морского волнения) и работающего соседнего оборудования, вызывая вибрации и виброперемещения с амплитудами  $A_x, A_y, A_z$  соответственно в направлениях его осей координат.

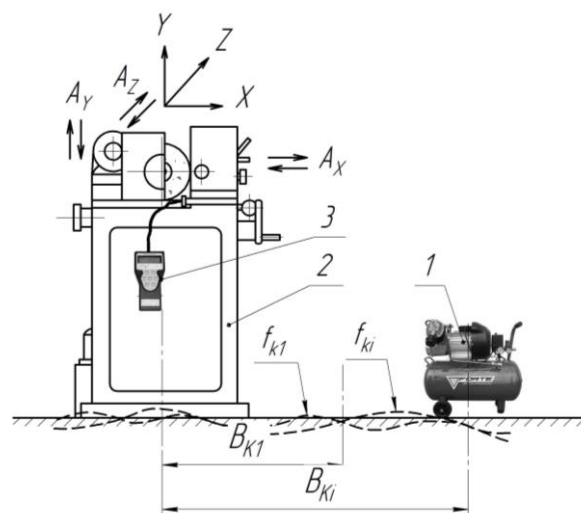


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для имитации внешних вибрационных воздействий при шлифовании, идентичных возникающим на ПМ: 1 – компрессор FINI Tiger 245; 2 – станок BUA 16; 3 – виброметр

Для определения параметров вибраций, амплитуды, виброскорости и виброускорения использовали виброметр 3 «Вибротест-МГ4.01». Проведенный этап имитационного моделирования позволил определить основные условия, при которых возможно проведение шлифовальной обработки на лабораторном оборудовании с получением показателей качества, соответствующих тем или иным условиям внешних воздействий (уровню волнения, работе внешнего оборудования) на круглое шлифование в плавучей мастерской [3, 4]. По разработанной методике и при заданных условиях проводили на универсальном круглошлифовальном станке ВУА 16 обработку поверхностей шеек валов ( $d = 26,00^{+0,050}_{-0,025}$ , мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие или отсутствие работающего внешнего оборудования.

### Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования показали, что значительное влияние на качество обработки при шлифовании в условиях плавучей мастерской оказывают внешние воздействия как от морского волнения, увеличивая погрешность обработки  $\Delta=f(h_{3\%})$  в 3,8...5,0 раз, так и от соседнего работающего оборудования – в 2,6...3,3 раза. При этом шероховатость  $Ra = f(h_{3\%})$  обрабатываемой поверхности возрастает соответственно в 1,6...2,5 раз от морского волнения и в 1,56...2,5 раз от работающего оборудования. Волнистость  $W=f(h_{3\%})$  поверхностей шеек валов возрастает в 1,23...2,75 раз от морского волнения и в 1,4...3,3 раза от работающего оборудования.

Для определения параметров вибраций использовали виброметр «Вибротест-МГ4.01» (рис. 3). Виброметр «Вибротест-МГ4.01» является современным отечественным прибором, предназначенным для измерений виброскорости, виброускорения, виброперемещения и частоты колебаний твердого тела как в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, так и в различных отраслях промышленности,

включая предприятия точного машиностроения.



Рис. 3. Виброметр «Вибротест-МГ4.01» для определения параметров вибраций

Так как дополнительные перемещения AZ вдоль оси вращения детали и оси вращения шлифовального круга не оказывают существенного влияния на качество обработки при врезном шлифовании, виброизмерения вдоль оси Z в рамках данной работы не производились.

Полученные показатели имитации вибрационных воздействий на круглошлифовальный станок с помощью компрессора и дополнительного оборудования в лабораторных условиях свидетельствуют о том, что по частоте и виброперемещениям как в зоне измерения станина-фундамент ( $f_x, f_y, S_x, S_y$ ), так и в зоне направляющих стола ( $f_x', f_y', S_x', S_y'$ ), управляя производительностью ( $Q=100; 160; 245$  л/мин) компрессора и меняя расстояние ( $B_k = 4,5...16$  м) его удаления от станка, а также используя соседнее оборудование и вентиляцию, можно достичь вибрационных воздействий, моделирующих условия работы в плавучей мастерской с учетом слабого, значительного и сильного волнений водной поверхности, а также влияния внешнего оборудования на технологическую систему круглошлифовального станка. Полученные при этом эксперименте результаты соответственно частоты ( $f_{kx}, f_{ky}$ ) (рис. 4) и виброперемещения ( $S_{kx}, S_{ky}$ ) в зоне станина-фундамент, а также в зоне направляющих стола частоты ( $f_{kx}', f_{ky}'$ ) (рис. 5) и виброперемещения ( $S_{kx}', S_{ky}'$ ) незначительно отличаются от соответствующих показателей, полученных в производ-

ственных условиях плавучей мастерской, при этом наибольшая разница не превышала 5%.

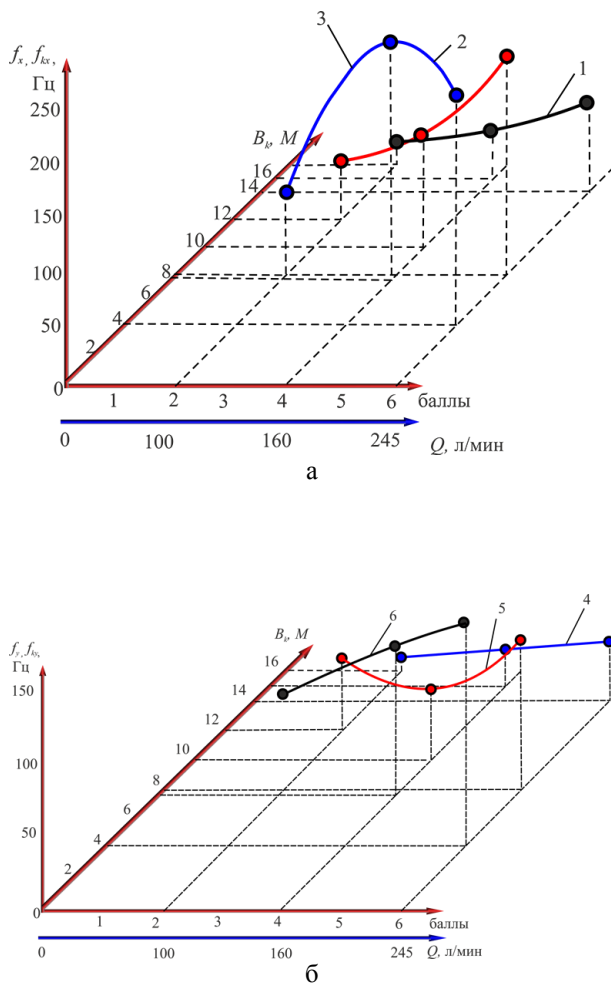


Рис. 4. Графики зависимостей  $f_{kx}=f(Q, B_k)$  (а) и  $f_{ky}=f(Q, B_k)$  (б) в зоне измерения станина-фундамент от состояний компрессора ( $Q$  – производительность,  $B_k$  – удаление от станка) и состояний станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), имитирующих соответствующие условия  $f_x=f(h_{3\%})$ ,  $f_y=f(h_{3\%})$  плавучей мастерской

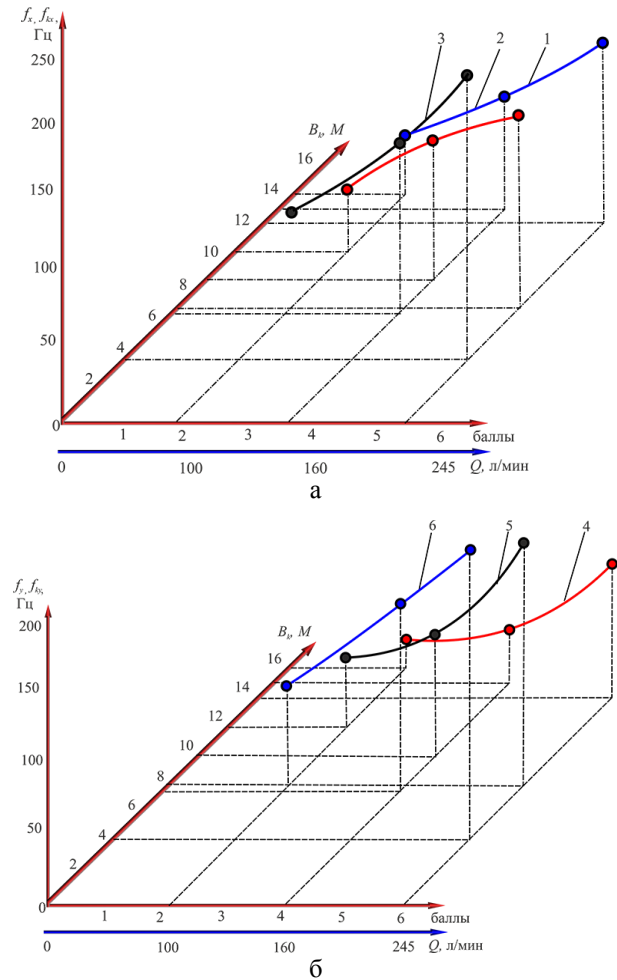


Рис. 5. Графики зависимостей  $f'_{kx}=f(Q, B_k)$  (а) и  $f'_{ky}=f(Q, B_k)$  (б) в зоне измерения направляющих стола от состояний компрессора ( $Q$  – производительность,  $B_k$  – удаление от станка) и состояний круглошлифовального станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), имитирующих соответствующие условия  $f'_x=f(h_{3\%})$ ,  $f'_y=f(h_{3\%})$  плавучей мастерской

Проведенный этап имитационного моделирования позволил определить основные условия, при которых возможно проведение шлифовальной обработки на лабораторном оборудовании с получением показателей качества, соответствующих тем или иным условиям внешних воздействий (уровню волнения, работе внешнего оборудования) на круглое шлифование в плавучей мастерской. По описанной ранее методике и при заданных условиях (табл. 1) проводили на универсальном круглошлифовальном станке BUA 16 обработку поверхностей шеек валов ( $d = 26,00^{+0,050}_{-0,025}$ , мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие

или отсутствие работающего внешнего оборудования.

Результаты проверки качества обработанных при этом поверхностей приведены в табл. 2. Наблюдались следующие отклонения формы цилиндрических поверхностей при круглошлифовальной обработке (рис. 6):  $a$  – от цилиндричности ( $L$  – длина нормиру-

емого участка,  $EFZ$  – отклонение профиля продольного сечения),  $b$  – от круглости ( $TFK$  – допуск круглости),  $c$  – овальность,  $d$  – огранка (отклонение от круглости),  $e$  – от профиля продольного сечения ( $EFP$  – отклонение от цилиндричности,  $TFP$  – допуск цилиндричности)

Таблица 1. Условия проведения исследований

| Обрабатываемые материалы | Габариты обрабатываемых деталей ( $D \times L$ ), мм | Требования к точности обработанных поверхностей, не более                                                                                             | Шлифовальный круг               | Режимы обработки                                                                                                         | СОТС                               |
|--------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Сталь:<br>– 45<br>– 40Х  | 30x200                                               | 1) постоянство диаметра в продольном сечении 0,002 мм<br>2) круглость 0,0006 мм<br>3) волнистость $W_z = 5,0$ мкм<br>4) шероховатость $Ra = 0,08$ мкм | ПП250x20x76<br>64С100<br>СТ13К5 | $V_{кр} = 20 \dots 30$ м/с<br>$V_o = 10 \dots 15$ м/мин<br>$t = 0,005 \dots 0,015$ мм<br>$S_{пр} = 0,03 \dots 5,0$ м/мин | Раствор эмульсола EL и воды (1:40) |

Таблица 2. Результаты проверки качества поверхностей шеек валов, обработанных на круглошлифовальном станке в лабораторных условиях

| Воздействие<br>внешнего обору-<br>дования | Биение опорных шеек<br>$\Delta$ , мкм |       |                                | Шероховатость поверхности $R_a$ ,<br>мкм |      |                                |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------|--------------------------------|------------------------------------------|------|--------------------------------|
|                                           | max                                   | min   | Дисперсия $\sigma^2$ ,<br>мкм2 | max                                      | min  | Дисперсия $\sigma^2$ ,<br>мкм2 |
| Слабое волнение                           |                                       |       |                                |                                          |      |                                |
| Нет                                       | 0,025                                 | 0,010 | 6,2x10-6                       | 0,63                                     | 0,41 | 1,3x10-3                       |
| Есть                                      | 0,048                                 | 0,009 | 4,2x10-5                       | 0,80                                     | 0,51 | 2,3x10-3                       |
| Значительное волнение                     |                                       |       |                                |                                          |      |                                |
| Нет                                       | 0,094                                 | 0,018 | 15,9x10-5                      | 1,00                                     | 0,46 | 8,1x10-3                       |
| Есть                                      | 0,123                                 | 0,008 | 3,7x10-6                       | 1,25                                     | 0,50 | 15,6x10-3                      |
| Сильное волнение                          |                                       |       |                                |                                          |      |                                |
| Нет                                       | 0,124                                 | 0,020 | 2,9x10-6                       | 1,6                                      | 0,50 | 3,3x10-2                       |
| Есть                                      | 0,162                                 | 0,023 | 5,4x10-4                       | 2,0                                      | 0,63 | 5,2x10-2                       |
|                                           | Показатели волнистости                |       |                                |                                          |      |                                |
|                                           | Слабое волнение                       |       |                                |                                          |      |                                |
|                                           | Wmax, мкм                             |       | Wz, мкм                        | Sw, мкм                                  |      | Lw, мкм                        |
| Нет                                       | 5,6                                   |       | 4,8                            | 192                                      |      | 960                            |
| Есть                                      | 7,2                                   |       | 5,3                            | 265                                      |      | 1457,5                         |
|                                           | Значительное волнение                 |       |                                |                                          |      |                                |
| Нет                                       | 6,9                                   |       | 5,4                            | 297                                      |      | 1782                           |
| Есть                                      | 10,2                                  |       | 5,8                            | 916                                      |      | 4580                           |
|                                           | Сильное волнение                      |       |                                |                                          |      |                                |
| Нет                                       | 15,4                                  |       | 9,9                            | 574                                      |      | 3920                           |
| Есть                                      | 23.8                                  |       | 10.6                           | 1328                                     |      | 6640                           |

Преимущественное значение имел показатель биения опорных шеек вала –  $\Delta$ , мкм,

оценивающий отклонения от круглости. Поскольку длина опорной шейки была соизме-

рима с шириной шлифовального круга, то отклонения от цилиндричности и от профиля продольного сечения изменялись при проведении экспериментов несущественно.

Условно границу между различными порядками отклонений поверхности устанавливают по значению отношения шага  $Sw$  к высоте неровностей  $Wz$ . При  $Sw/Wz < 40$  отклонения относят к шероховатости поверхности, при  $1000 \geq (Sw/Wz) \geq 40$  – к волнистости, при  $(Sw/Wz) > 1000$  – к отклонениям формы. Волнистость поверхности представляется совокупностью периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину  $l$ .

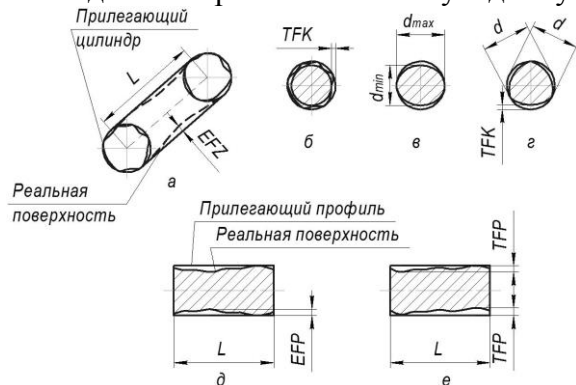


Рис. 6. Отклонения формы цилиндрических поверхностей при круглошлифовальной обработке: а – от цилиндричности ( $L$  – длина нормируемого участка,  $EFZ$  – отклонение профиля продольного сечения), б – от круглости ( $TFK$  – допуск круглости), в – овальность, г – огранка (отклонение от круглости), д, е – от профиля продольного сечения ( $EFP$  – отклонение от цилиндричности,  $TFP$  – допуск цилиндричности)

Шероховатость – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины. Шероховатость поверхности –  $Ra$ , мкм (рис. 7) и показатели волнистости –  $Wz$ , мкм (рис. 8) обработанной поверхности определяли по известным методикам с использованием профилометров-профилографов моделей 201 и «Talisurf 5M-120» [5, 6].

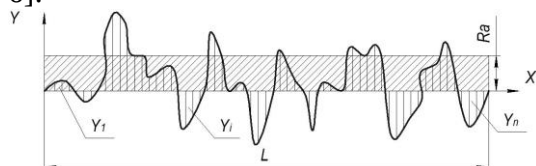


Рис. 7. Среднее арифметическое отклонение профиля

$$(Ra = 1/l \int_0^l |Y(x)| dx, \text{ приближенно: } Ra = 1/n \sum_{i=1}^n |Y_i|,$$

$l$  – базовая длина,  $n$  – число выбранных точек профиля на базовой длине,  $Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_n$  – высоты неровностей профиля)

Результаты исследований на графике зависимостей (рис. 9, а) отклонений формы  $\Delta = f(h_{3\%})$  для  $\Delta_{\max}$  (1, 3) и  $\Delta_{\min}$  (2, 4) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) показывают, что при усилении морского волнения биение опорных шеек  $\Delta_{\max}$  существенно возрастает: при значительном волнении и неработающем внешнем оборудовании – в 3,8 раза, при сильном – почти в 5 раз по сравнению с показателями при слабом волнении..

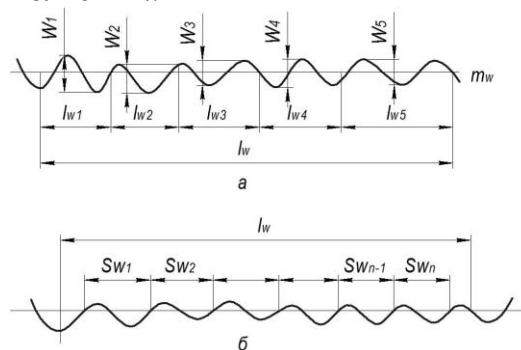


Рис. 8. Определение параметров волнистости: а – высота  $Wz = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5)/5$ , ( $m_w$  – средняя линия,  $L_w$  – участок измерения,  $L_{wi} = L_w/5$ ,  $W_{\max}$  – наибольшая высота волнистости); б – шаг

$$Sw = 1/n \sum_{i=1}^n Sw_i$$

Величина показателя  $TFK$  (т.е.  $\Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ ) при этом увеличивается соответственно в 5 и в 6,9 раза.

При обработке на станке одновременно с работающими соседним оборудованием и вентиляцией эти показатели соответственно для  $\Delta_{\max}$  – в 2,6 раза (при значительном волнении) и в 3,3 раза (при сильном волнении); для  $TFK$  – увеличение составило 2,7 раза (при значительном волнении) и 3,5 раза (при сильном волнении).

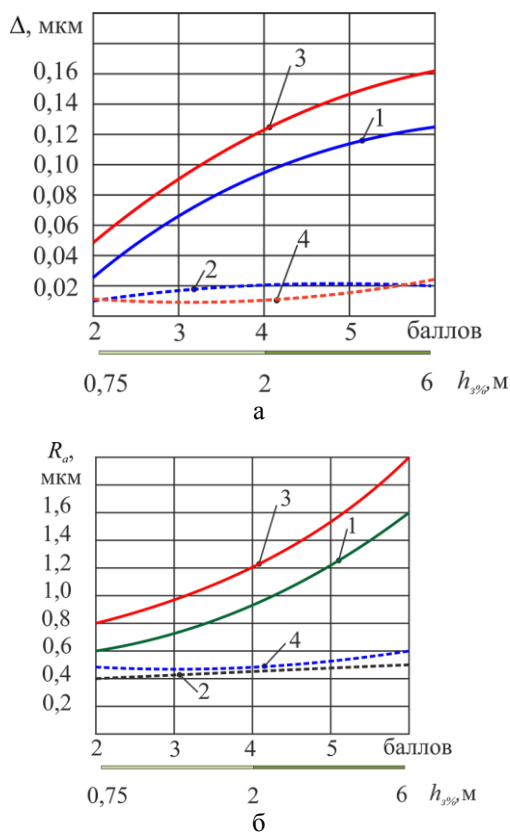


Рис. 9. Графики зависимостей отклонений формы  $\Delta=f(h_{3\%})$  для  $\Delta_{\max}$  (1, 3) и  $\Delta_{\min}$  (2, 4) (а) и шероховатости  $R_a=f(h_{3\%})$  для  $R_{a \max}$  (1, 3) и  $R_{a \min}$  (2, 4) (б) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией)

Параметры шероховатости  $R_a=f(h_{3\%})$  для  $R_{a \max}$  (1,3) и  $R_{a \min}$  (2, 4) (рис. 9, б) поверхностей шеек валов также зависят от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией).

При неработающем соседнем оборудовании  $R_a$  при значительном волнении увеличивается в 1,6 раза, при сильном – в 2,5 раза по сравнению с показателями при слабом волнении. При обработке на станке одновременно с работающими соседним оборудованием и вентиляцией эти показатели соответственно для  $R_a$  – в 1,56 раза (при значительном волнении) и в 2,5 раза (при сильном волнении) превышают показатели при слабом волнении.

Графики зависимостей показателей волнистости  $W=f(h_{3\%})$  для  $W_{\max}$  (1, 3) и  $W_z$  (2, 4) (рис. 10, а) поверхностей шеек валов от

внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и пример полученной круглограммы (б) показывают, что  $W_{\max}$  ( $W_z$ ) возрастают при значительном волнении и неработающем внешнем оборудовании – в 1,23 (1,12) раза, при сильном – в 2,75 (2,1) раз по сравнению с показателями при слабом волнении.

При обработке на станке одновременно с работающими соседним оборудованием и вентиляцией эти показатели соответственно для  $W_{\max}$  и  $W_z$  – в 1,4 и 1,1 раза (при значительном волнении), а также в 3,3 и в 2 раза (при сильном волнении) превышают показатели при слабом волнении.

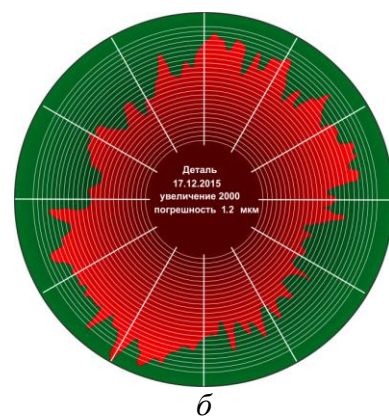
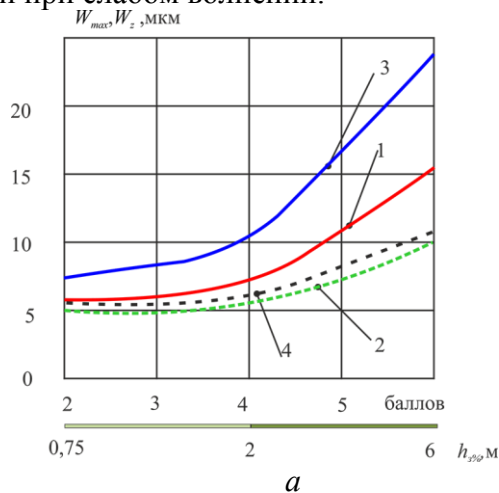


Рис. 10. Графики зависимостей показателей волнистости  $W=f(h_{3\%})$  для  $W_{\max}$  (1, 3) и  $W_z$  (2, 4) (а) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и пример полученной круглограммы (б)

Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают, что значительное влияние на качество обработки при шлифовании в условиях плавучей мастерской оказывают внешние воздействия как от морского волнения, увеличивая погрешность обработки в 3,8...5,0 раз, так и от соседнего работающего оборудования – в 2,6...3,3 раза. При этом шероховатость обрабатываемой поверхности возрастает соответственно в 1,6...2,5 раз от морского волнения и в 1,56...2,5 раз от работающего оборудования. Волнистость поверхностей шеек валов возрастает в 1,23...2,75 раз от морского волнения и в 1,4...3,3 раза от работающего оборудования [7]. Эти факты свидетельствуют о том, что традиционная виброизоляция станков в виде бетонных фундаментов на плавучих мастерских не способна защитить высокоточное оборудование, в частности, шлифовальные станки от негативного вибрационного воздействия, возникающего вследствие морского волнения и работающего соседнего технологического оборудования и обеспечить требуемое качество обработки, гарантированное техническими характеристиками станка.

## Выводы

Такой подход позволил экспериментально исследовать влияние на качество деталей при шлифовальной обработке морского волнения, действующего на плавучее основание мастерской, выявил необходимость оптимизации виброзащитной системы станка для решения задач обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования [8-15] и создания конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств. Полученные результаты являются основой для дальнейших экспериментальных исследований параметров и характеристик технологической системы круглошлифовального станка в условиях плавучей мастерской.

## Список литературы

1. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество

процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая. // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. — № 35 — С. 13-22.

2. Владецкая Е.А. Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. — Харків: НТУ «ХПІ», 2012. — Вип.7 — С. 103-111.
3. Владецкая Е.А. Оценка параметров качества шлифуемой поверхности / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Прогрессивные направления развития машино-приборостроения, транспорта и экологии: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., аспирант. и мол. ученых, г. Севастополь, 20-23 мая 2013 г. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013.— С. 186-188.
4. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем автоматизации виброзащиты станка в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Современные инженерные и инженерно-педагогические технологии: сб. статей науч.-практ. конфер. — Симферополь: ДАЙПИ, 2015.— С.82-85.
5. Владецкая Е.А. Обеспечение динамической стабилизации шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов.— Севастополь: СевГУ, 2016. — Вып.1.— С.21-41.
6. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.— Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314).— С.88-103.
7. Владецкая Е.А. Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Перспективы науки — 2016: Сб. докл. III Междунар. конк. науч.-иссл. работ, 29 апреля 2016 г. —Том III (Ест. и техн. науки). — Казань: ООО «Робета Союз», 2016. — С.247-257.
8. Владецкая Е.А. Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вісник СевНТУ. — Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013.— С. 14-20.
9. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. — Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. — С. 36-40.

10. Харченко А.О. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка / А. Харченко, С. Братан, Е. Владецкая // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
11. Владецкая Е.А. Анализ методов и средств виброзащиты динамических систем от вынужденных колебаний в машиностроении / Е.А. Владецкая // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., аспирант. и мол. ученых, г. Севастополь, 19-22 мая 2009 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – С. 79-81.
12. Владецкая Е.А. Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств / Е.А. Владецкая, А.О. Харченко, С.М. Братан // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь-2015: Сб. статей по материалам междунар. науч.-техн. конф. – г. Севастополь, 14-15 сентября 2015 г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. – С.139-148.
13. Долгин В.П. Реакция динамической системы на произвольный сигнал / В.П. Долгин, Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. – Вып. 43. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2014. – С. 53-58.
14. Харченко А.О. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской / А. Харченко, Е. Владецкая, В. Долгин, С. Братан // Monografie «Maszynu i procesy produkcyjne» (Машины и производственные процессы). – Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – С. 86-98.
15. Владецкая Е.А. Снижение вибрационных воздействий на технологическую систему шлифовального станка в плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, А.О. Харченко, С.М. Братан // Гуманистическая экономика и качество жизни: сб. статей по материалам международной научн.-практ. конф. с элем. научн. школы. – Ульяновск: УлГПУ, 2013. – С.255-268.
- Zb. nauk. prac'. – Harkiv: NTU «HPI», 2012. – Vip.7 — S. 103-111.
3. Vladeckaja E.A. Ocenka parametrov kachestva shlifuejmoj poverhnosti / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan // Progressivnye napravlenija razvitiya mashino-priborostroitel'nij, transporta i jekologii: materialy mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. stud., aspir. i mol. uchenyh, g. Sevastopol', 20-23 maja 2013 g. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2013. – S. 186-188.
4. Vladeckaja E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noj obrabotki putem avtomatizacii vibrozashhity stanka v uslovijah plavuchej masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Sovremennye inzhenernye i inzhenerno-pedagogicheskie tehnologii: sb. statej nauch.-prakt. konfer. – Simferopol': DAJPI, 2015. – S.82-85.
5. Vladeckaja E.A. Obespechenie dinamicheskoy stabilizacii shlifoval'noj obrabotki putem umen'shenija vneshnih vozmushhenij v uslovijah plavuchej masterskoj/ E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Vestnik sovremennyh tehnologii: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol': SevGU, 2016. – Vyp.1. – S.21-41.
6. Vladeckaja E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noj obrabotki putem umen'shenija vneshnih vozmushhenij v uslovijah plavuchej masterskoj/ E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). – S.88-103.
7. Vladeckaja E.A. Povyshenie kachestva shlifoval'noj obrabotki v uslovijah plavuchej masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan // Perspektivy nauki – 2016: Sb. dokl. III Mezhdunar. konk. nauch.-issl. rabot, 29 aprelja 2016 g. –Tom III (Est. i tehn. nauki). – Kazan': OOO «Roketa Sojuz», 2016. – S.247-257.
8. Vladeckaya E.A. Optimizaciya struktury vibrozashchitnyh sistem shlifoval'nogo stanka na osnove morfologicheskogo analiza / E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Visnik SevNTU. – Vip.140: Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – S. 14-20.
9. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchej remontoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
10. Harchenko A.O. Povyshenie tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoj vibroizoljacii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow

## References

1. Bratan S.M. Analiz vlijaniya kolebanij, peredaemyh cherez fundament stanka, na kachestvo processa shlifovaniya / S.M. Bratan, E.A. Vladeckaja. // Vestnik NTU «HPI»: Sb. nauchn. trudov. — Har'kov: NTU «HPI», 2008. — № 35 — S. 13-22
2. Vladeckaja E.A. Povyshenie vibroustojchivosti shlifoval'nyh stankov plavuchih remontnyh masterskih / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Suchasni tehnologij v mashinobuduvanni:

- Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
11. Vladeckaya E.A. Analiz metodov i sredstv vibrozashchity dinamicheskikh sistem ot vynuzhdennykh kolebanij v mashinostroenii / E.A. Vladeckaya // Progressivnye napravleniya razvitiya mashinopriborostroitel'nyh otraslej i transporta: materialy mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. stud., aspir. i mol. uchenyh, g. Sevastopol', 19-22 maya 2009 g. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2009. – S. 79-81.
12. Vladeckaya E.A. Povyshenie dinamicheskogo kachestva shlifoval'nogo stanka na osnove optimizacii vibroizoliruyushchih ustrojstv / E.A. Vladeckaya, A.O. Harchenko, S.M. Bratan // Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii. Sevastopol'-2015: Sb. statej po materialam mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. – g. Sevastopol', 14-15 sentyabrya 2015 g. – Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2015.–S.139-148.
13. Dolgin V.P. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal / V.P. Dolgin, E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan // Uchyonye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. – Vyp. 43. Tekhnicheskie nauki.– Simferopol': NIC KIPU, 2014.– S. 53-58.
14. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal na primere stanka v usloviyah plavuchej masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Mashiny i proizvodstvennye processy).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015.– S. 86-98.
15. Vladeckaya E.A. Snizhenie vibracionnykh vozdeystvij na tekhnologicheskuyu sistemu shlifoval'nogo stanka v plavuchih remontnykh masterskikh / E.A. Vladeckaya, A.O. Harchenko, S.M. Bratan // Gumanisticheskaya ehkonomika i kachestvo zhizni: sb. statej po materialam mezhdunarodnoj nauchn.-prakt. konf. s ehlem. nauchn. shkoly.– Ul'yanovsk: UIGPU, 2013.– S.255-268.

УДК 621.793

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО И ХРОМОНИКЕЛЕВОГО ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА СТЕНКАХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

А.А. Герасимова<sup>1</sup>, А.Г. Радюк<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва, Российская Федерация

### Аннотация

Для повышения срока службы кристаллизаторов МНЛЗ в работе на их узких стенках из меди М1 перед последним ремонтом создавали жаростойкий износостойкий слой напылением алюминиевого и хромоникелевого покрытий. Предварительно исследовали структуру покрытий, состав фаз, твердость и микротвердость поверхностных слоев. Хромоникелевое газотермическое покрытие после исследования толщиной 0,5–0,6 мм было нанесено на поверхность пары узких стенок кристаллизатора. Нанесение хромоникелевого покрытия с алюминиевым подслоем для повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ возможно при условии достижения связи пористого слоя с  $\alpha$ -фазой или уменьшения пористости слоя.

**Ключевые слова:** кристаллизатор МНЛЗ, узкая стенка, газотермическое покрытие, структура, фазовый состав, микротвердость, износостойкий слой, твердость, алюминиевый подслои, диффузия.

## THE USE OF ALUMINUM AND CHROME-NICKEL THERMAL COATINGS ON THE WALLS OF THE CONTINUOUS CASTING MOLD

A.A. Gerasimova<sup>1</sup>, A.G. Radyuk<sup>2</sup><sup>1</sup> National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation

### Abstract

Studies on enhancing the service life of moulds continuous casting machine at their narrow walls of copper M1 before the last repair by creating heat spraying wear-resistant layer of chrome-nickel coating have been carried out. Preliminary were studied coating's structure, phase composition, skin hardness and microhardness of chromium-nickel coating. Chrome-nickel thermal coating thickness 0.5 mm -0.6 was applied to the surface of the wall thick-walled narrow pair crystallizer. Applying a chrome-nickel coating with aluminium layer to increase the resistance of the narrow walls of a continuous casting mold is possible  $\alpha$ -phase or reduce the porosity of the layer.

**Keywords:** mold (CCM), narrow wall, thermal coating, structure, phase composition, microhardness, wear layer, hardness, aluminum sublayer, the diffusion

### Введение

Многие детали оборудования металлургического производства (кристаллизаторы, конвертерные и доменные фурмы и т.д.) изготавливают из меди и ее сплавов, которые имеют высокие электро- и теплопроводность [1]. В то же время медь имеет низкие жаростойкость и износостойкость [2]. Опыты показали, что оксиды меди не сопротивляются

тепловым ударам и разрушаются после первой же теплосмены, а также отслаиваются при испытании на трение.

Одним из способов повышения эксплуатационных свойств изделий из меди является термодиффузионное насыщение поверхности легирующими элементами [3]. Одним из основных элементов, используемым для насыщения, является алюминий. Алитирование можно проводить, например, методом

насыщения в порошковой смеси, состоящей из 50% алюминиевой пудры, 49%  $Al_2O_3$  и 1%  $NH_4Cl$  [4]. Износостойкость алитированных образцов из меди увеличивается в 1,3 раза [5]. Однако метод диффузионного насыщения в порошковых смесях является сравнительно трудоемким и обладает низкой производительностью.

Наиболее перспективным направлением снижения интенсивности износа рабочих поверхностей стенок кристаллизатора МНЛЗ в настоящее время считается нанесение различных покрытий на стенки кристаллизатора [6]. ООО "Корад" организовало работы по нанесению гальванического покрытия на бывшие в эксплуатации стенки кристаллизатора и провело испытания в условиях ОАО "Северсталь" [7]. В ходе испытаний наносили покрытия двух видов фирмы "КМЕ Europa Metal AG" (Германия): из никеля твердостью 220 HV, и из сплава никеля с кобальтом твердостью 400 HV. В результате получено увеличение стойкости стенок кристаллизатора по износу для обоих видов покрытий. Однако гальванические покрытия используются только на тонкостенных щелевых кристаллизаторах МНЛЗ и не применяются для толстостенных кристаллизаторов.

Решить проблему повышения стойкости стенок толстостенных кристаллизаторов, может применение газотермических покрытий [8-10]. Технологический процесс напыления позволяет получать требуемую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью [11].

В результате напыления алюминиевого газотермического покрытия на медь и последующей термообработки образуется диффузионный слой [12] с жаростойкостью и износостойкостью, не уступающим свойствам, полученным с использованием метода диффузионного насыщения из порошков.

Как показали эксперименты, термообработка стенок с алюминиевым газотермическим покрытием в защитной среде при температуре 900 °С и времени выдержки 10 ч, необходимых для создания требуемой толщины диффузионного слоя, приводит к их

короблению в результате данного процесса, которое не устраняется механическим способом [13-15].

## Результаты и обсуждение

Поэтому необходимо было корректировать режимы термообработки или наносить на стенки материал, не уступающий по свойствам Cu–Al диффузионному слою и не требующий термообработки. Так покрытие из никелевого сплава было нанесено на всю рабочую поверхность двух узких стенок. Требуемый класс чистоты рабочей поверхности стенок был обеспечен с помощью механической обработки. При осмотре кристаллизатора с опытными стенками после разливки 11 плавов высокомарганцовистой стали S355JR было установлено, что износ покрытия в углах нижней части стенок составил 0,6 – 0,75 мм.

В данной работе для повышения стойкости узких стенок использовали покрытие из хромоникелевого сплава. Сначала покрытие напыляли на образцы из меди М1.

Исследовали структуру покрытия, состав фаз, твердость и микротвердость поверхностных слоев.

Структура Cr–Ni слоя на образцах 1 и 2 идентична (рис.1, 2). На границе раздела «покрытие – медная основа» участков несплошного прилегания Cr–Ni слоя не наблюдается. Глубина диффузии никеля в медную основу составляет 30 мкм, глубина диффузии хрома – до 5 мкм (микронзондовое исследование).

Толщины нанесенных слоев приведены в (табл. 1).

Таблица 1. Толщины нанесенных слоев исследуемых образцов

| № образца | Общая толщина нанесенных слоев, мкм |     |     | Средняя толщина Cr–Ni слоя, мкм |
|-----------|-------------------------------------|-----|-----|---------------------------------|
|           | средняя                             | min | max |                                 |
| 1         | 150                                 | 100 | 210 | 150                             |
| 2         | 140                                 | 80  | 230 | 140                             |

Локальный химический анализ фаз диффузионных слоев проведен на растровом

электронном микроскопе (диапазон анализируемых элементов от Be до U, диаметр зонда ~1 мкм, предел чувствительности 0,1%).

Покрытие на образцах с Cr-Ni слоем состоит из трех фаз: темной, содержащей наибольшее количество хрома и кислорода: [Cr] до 63,4%, [O] до 33,4%, [Ni] 3,2-9,1%; светлой, в составе которой обнаружено максимальное количество никеля до 89% и серой фазы: [Ni]=63,9-73,5%, [Cr] до 12,4%, [O]=22-24,9%, [Fe] до 3,4%, [Si]=0,3-0,5%.

Элементный состав фаз на образцах идентичен и представлен в (табл. 2).

Таблица 2. Локальный химический состав фаз, %

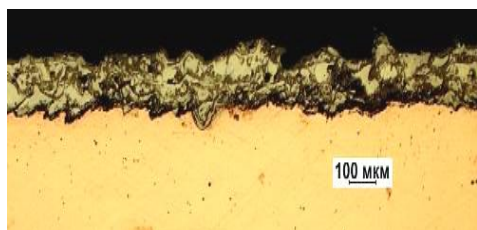
| Хим. элементы | Cr-Ni слой   |             |            |
|---------------|--------------|-------------|------------|
|               | светлая фаза | темная фаза | серая фаза |
| Si            | 0,5          |             | 0,3-0,5    |
| Ni            | 83,9-89,0    | 3,2-9,1     | 63,9-73,5  |
| Cr            | 9,2-14,4     | 59,5-63,4   | 10,5-12,4  |
| Fe            | 1,2-1,3      |             | 1,0-3,4    |
| O             |              | 31,4-33,4   | 21,9-24,9  |

Средние значения микротвердости фаз исследуемых образцов приведены в (табл. 3).

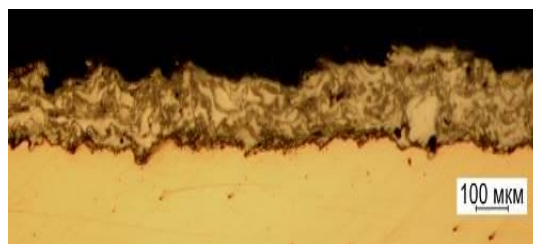
Таблица 3. Средние значения микротвердости, МПа

| № образца | основа | Cr-Ni слой   |             |            |
|-----------|--------|--------------|-------------|------------|
|           |        | светлая фаза | темная фаза | серая фаза |
| 1         | 580    | 2440         | 9970        | 3900       |
| 2         | 580    | 3000         | 9900        | 4100       |

При твердости медной основы равной 53,2 HR15T твердость поверхностных слоев на исследованных образцах ~ одинаковая и составляет 68,9-70,0 HR15T, т.е. в 1,3 раза больше твердости основного металла.



образец 1



образец 2

Рис.1. Образы медного листа с Cr-Ni напылением

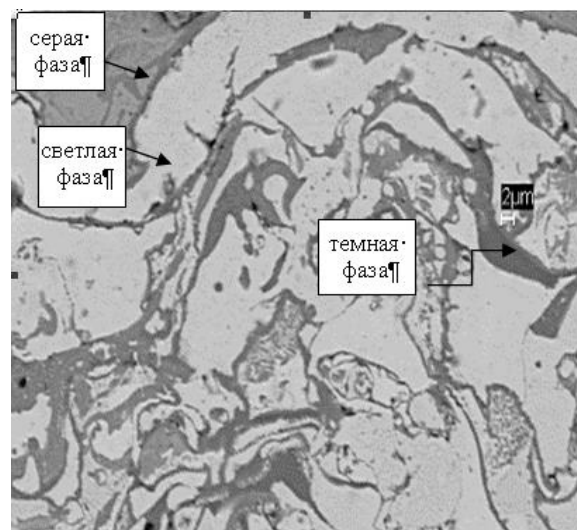
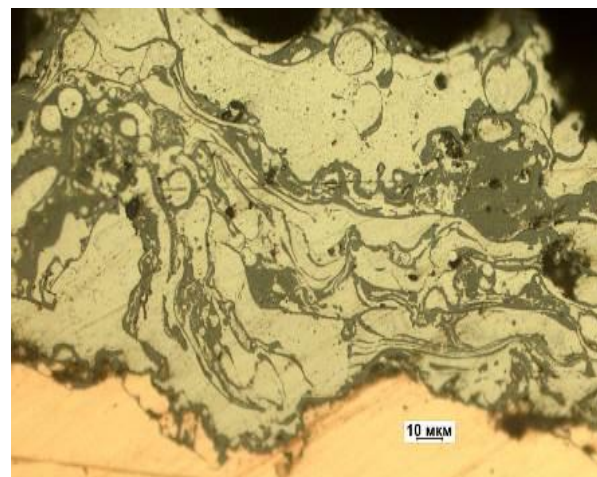


Рис.2. Структура Cr-Ni слоя

Хромоникелевое газотермическое покрытие толщиной 0,5–0,6 мм с выше исследованной структурой и свойствами было нанесено на поверхность пары узких стенок толстостенного кристаллизатора (рис.3).



Рис.3. Стенка кристаллизатора после напыления хромоникелевого покрытия

В связи с тем, что для получения требуемого класса чистоты поверхности стенок необходима их механическая обработка шлифованием, требуется проведение работ по увеличению толщины хромоникелевого покрытия. При толщине хромоникелевого покрытия более 0,8 мм возможно его отслоение. Поэтому для повышения прочности сцепления хромоникелевого покрытия с медной основой рассмотрели возможность использования алюминиевого подслоя.

## Выводы

Таким образом, нанесение хромоникелевого покрытия с алюминиевым подслоем для повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ возможно при условии достижения связи пористого слоя с  $\alpha$ -фазой или уменьшения пористости слоя.

## Список литературы

1. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов [текст] / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 С.
2. Радюк А.Г. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов [текст] / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, А.Е. Украинцев // Цветные металлы. – 2007. – №5. – С. 95–97.

3. Зайт В. Диффузия в металлах [текст] / В. Зайт. – М.: Металлургия, 1966. – 654 С.
4. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [текст] / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 С.
5. Дубинин Г.Н. Жаростойкость и коррозионная стойкость меди и бронзы после алитохромирования [текст] / Г.Н. Дубинин, В.С. Соколов // Защитные покрытия на металлах. – 1979. – вып. 13. – С. 79–82.
6. Ушаков С.Н. Результаты применения кристаллизаторов с упрочняющим покрытием в слябовой МНЛЗ с вертикальным участком в электроплавильном цехе ОАО «ММК» [текст] / С.Н. Ушаков, Ю.М. Желнин, А.Г. Алексеев и др. // Горный журнал. Черные металлы. Специальный выпуск. – 2012. – С 49-50.
7. Куклев А.В. Российский опыт применения покрытий на медных стенках слябовых кристаллизаторов [текст] / А.В. Куклев, Ю.М. Айзин, А.А. Макрушин и др. // Сталь. – 2007. – №3. – С. 17-18.
8. Радюк А.Г. Совершенствование работы деталей металлургического оборудования из меди напылением газопламенных покрытий [текст] / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Сталь. – 2011. – №3. – с. 7–9.
9. Use of electric-arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds. A. G. Radyuk, S. M. Gorbatyuk and A. A. Gerasimova // Metallurgist, Vol. 55, No. 5–6, September, 2011 P.419-423.
10. Gerasimova A.A., Radyuk A.G. The improvement of the surface quality of workpieces by coating // CIS Iron & Steel Review. –2014. –pp. 33–35.
11. Поляк М.С. Технология упрочнения [Текст]: в 2-х т. / М. С. Поляк. – М.: Машиностроение, Т.1. – 1995. – 832 С.
12. Радюк А.Г. Свойства поверхностного слоя на меди, образующегося после нанесения и термообработки алюминиевого газотермического покрытия [текст] / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Э.М. Самедов // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2007. – №3. – с. 70–74.
13. A.A. Gerasimova, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, Creation of a diffusional aluminum layer on thenarrow walls of continuous-casting molds, Steel in Translation. –2015. – No. 45 – P. 185–187.
14. Gorbatyuk S.M., Gerasimova A. A., Radyuk A. G. Using the Coating for the Diffusion Layer Obtaining on the Walls of the Mold (CCM) //Metallurgical and mining industry, issue No. 9 – 2015. – pp. 1085-1088.
15. Gerasimova A. A., Radyuk A. G. The Use of Coatings to Obtainthe Diffusion Layer on the Walls of Molds // International Journal of Materials Science and Applications, volume 5, Issue 1, Jan. 2016. – pp. 1-4.

## References

1. Novikov I.I. Teoriya termicheskoy obrabotki metallov [Theory of heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgy, 1986. 480 p (in Rus)
2. Radyuk A. G., Titlyanov A. G., Ukrainians A. E. Formation of diffusion layers on the surface of copper and its alloys. TSvetnye metally, 2007, no. 5, pp. 95-97 (in Rus)
3. Zeit V. Diffuziya v metallakh [Diffusion in metals]. Moscow: Metallurgy, 1966, 654 p (in Rus)
4. Minkevich A. N. Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov [Chemical heat treatment of metals and alloys]. Moscow: Mechanical engineering, 1965, 491 p (in Rus)
5. Dubinin G. N., Sokolov V. S. The heat resistance and the corrosion resistance of copper and bronze after alite chromizing. Zashhitnye pokrytiya na metallakh. 1979. Iss. 13, pp. 79–82 (in Rus)
6. Ushakov S.N., Zhelnin Y. M., Alekseev G. A., etc. The results of applying the mold with a reinforcing coating in the slab continuous casting machine with a vertical plot in the arc-furnace melting shop of JSC "MMK. Gornyj zhurnal. Chernye metally. Special'nyj vypusk., 2012, pp 49-50 (in Rus)
7. Kuklev A.V., Ajzin J. M., Makrushin A.A., etc. The Russian experience in the application of coatings on the copper walls of the mold labovich. Stal'. 2007, no. 3. – pp. 17-18 (in Rus)
8. Radyuk A. G., Titlyanov A. E. Improving the performance of parts of metallurgical equipment from copper-coated gas-flame coatings. Stal' 2011, no. 3. pp. 7–9 (in Rus)
9. Use of electric-arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds. A. G. Radyuk, S. M. Gorbatyuk and A. A. Gerasimova // Metallurgist, Vol. 55, No. 5–6, September, 2011 P.419-423. (English)
10. Gerasimova A.A., Radyuk A.G. The improvement of the surface quality of workpieces by coating // CIS Iron & Steel Review. –2014. –pp. 33–35. (English)
11. Polyak M. S. Tekhnologiya uprochneniya: v 2-kh t. [The technology of hardening, vols 1-2] Vol. 1. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 832 p (in Rus)
12. Radyuk A. G., Titlyanov A. E., Samedov E. M. The properties of the surface layer on copper, formed after application and heat treatment of aluminum thermal spray coatings Izv. VUZov. TSvetnaya metallurgiya. 2007, no. 3, pp. 70–74 (in Rus)
13. A.A. Gerasimova, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, Creation of a diffusional aluminum layer on thenarrow walls of continuous-casting molds, Steel in Translation. –2015. – No.45 – P. 185–187. (English)
14. Gorbatyuk S.M., Gerasimova A. A., Radyuk A. G. Using the Coating for the Diffusion Layer Obtaining on the Walls of the Mold (CCM) //Metallurgical and mining industry, issue No. 9 – 2015. – pp. 1085-1088. (English)
15. Gerasimova A. A., Radyuk A. G. The Use of Coatings to Obtainthe Diffusion Layer on the Walls of Molds // International Journal of Materials Science and Applications, volume 5, Issue 1, Jan. 2016. – pp. 1-4. (English)

УДК 621.9

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Т.А. Дуюн<sup>1</sup>, О.Б. Бешевли<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация

### Аннотация

Представлена методика оптимизации режимов резания в процессе ремонтной обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников скольжения. В качестве метода обработки рассматривается фрезерование с использованием специализированного ремонтного оборудования. При оптимизации в качестве целевой функции принята максимальная производительность процесса, в качестве технических ограничений – требуемая стойкость инструмента, заданная мощность привода главного движения, обеспечиваемая шероховатость обрабатываемой поверхности, технологические возможности ремонтного оборудования. Предложенный оптимизационный алгоритм позволяет обоснованно назначать технологические режимы обработки, обеспечивающие максимальную производительность процесса при заданных технических ограничениях.

**Ключевые слова:** крупногабаритные подшипники скольжения, оптимизация режимов резания при фрезеровании баббита, максимизация производительности при заданных технических ограничениях.

## OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES MILLING SURFACE SLIDING LARGE BEARINGS USING SPECIAL EQUIPMENT

T.A. Dujun<sup>1</sup>, O.B. Beshevli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

### Abstract

The technique of optimization of cutting conditions during the maintenance treatment of large bearing surface friction bearings. As the processing method is considered milling using specialized maintenance equipment. When optimizing the objective function as adopted by the maximum productivity of the process, as technical limitations - the required tool life defined Main drive power provided by the roughness of the treated surface, the technological capabilities of the repair equipment. The proposed optimization algorithm can reasonably assign technological modes of processing to ensure maximum productivity of the process for the given technical limitations.

**Keywords:** large-sized bearings, optimization of cutting conditions when milling babbitt, maximizing performance for the given technical limitations.

### Введение

Крупногабаритные подшипники скольжения нашли широкое применение в строительной и горнорудной промышленности в составе таких агрегатов, как мельницы самоизмельчения, мельницы полусамозмельчения, сушильные барабаны, бутары и прочее крупногабаритное вращающееся оборудование [1,2]. В качестве антифрикционного материала опор подшипников скольжения

наибольшее распространение получили баббиты – легкоплавкие антифрикционные сплавы на основе олова или свинца. Под воздействием силы трения на вкладыш подшипника скольжения в течение длительного времени увеличивается зазор между цапфой и обоймой подшипника, что приводит к перекосу оси мельницы и как следствие нестабильной работе, вибрациям и повышенному расходу электроэнергии [3,4]. Возникает необходимость ремонта нижнего сегмента, т.к. он принимает основную часть нагрузки

при эксплуатации подшипника, следовательно, его опорная поверхность скольжения подвергается максимальному износу. В процессе ремонтной обработки крупногабаритных подшипников в качестве окончательного метода обработки опорной поверхности используют ручное шабрение, имеющее ряд недостатков, основными из которых являются высокая трудоемкость и нестабильное обеспечение качества поверхности. В качестве альтернативы ручному шабрению предлагается применять механическую обработку фрезерованием с использованием специального ремонтного оборудования [5,6]. Для повышения эффективности выполнения ремонтной обработки необходимо оптимизировать технологические параметры максимизируя производительность при заданных технических ограничениях.

### Результаты и обсуждение

Для выполнения ремонтной обработки антифрикционного слоя крупногабаритных подшипников предлагается использовать специализированное оборудование (рис.1) [7,8].

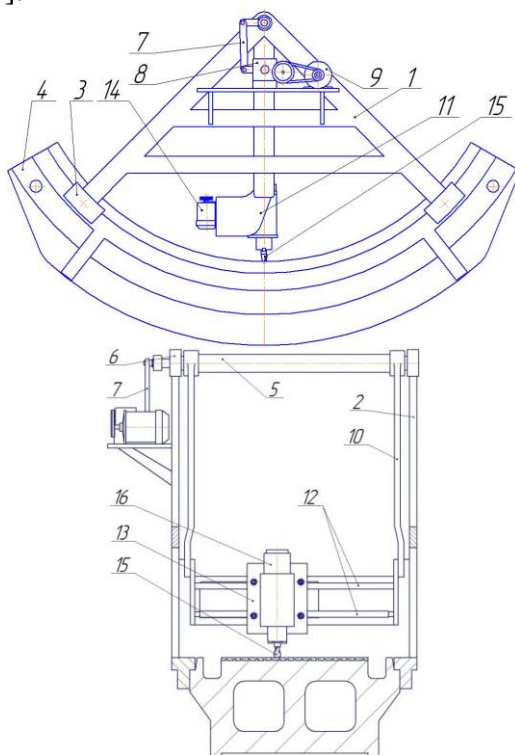


Рис. 1. Конструктивная схема станка

Переносной станок содержит корпус 1, выполненный в виде двух плоских рам 2. Каждая плоская рама 2 в нижней части имеет два опорных элемента 3, выполненных, например, в виде башмаков. Опорные элементы 3 предназначены для установки переносного станка на обрабатываемом изделии 4 (корпусе подшипника). В верхней части плоские рамы 2 соединены приводным валом 5, который опирается на подшипниковые узлы 6 плоских рам 2. Приводной вал 5 является конечным звеном кривошипно-коленного механизма 7 привода маятниковой круговой подачи. Кроме того, в привод входят редуктор 8 и электродвигатель 9. На приводном валу 5 жестко закреплена качающаяся рама 10. В нижней части рамы 10 размещен рабочий узел 11. Рабочий узел 11 имеет направляющие 12, на которых установлена подвижная каретка 13. Подвижность каретки 13 обеспечивается за счет кинематической связи ее с приводом продольного перемещения 14. Подвижная каретка 13 оснащена обрабатывающим лезвийным инструментом 15, фрезой. Обрабатывающий инструмент (фреза) 15 получает рабочее движение от привода главного движения 16.

Для обеспечения высокой производительности процесса фрезерования при ремонтной обработке поверхности скольжения крупногабаритных подшипников скольжения необходимо подобрать технологические режимы, таким образом, чтобы обеспечить оптимальные значения стойкости режущего инструмента, достаточной для выполнения обработки одного перехода без необходимости остановки оборудования и переточки инструмента и мощности привода главного движения, обеспечивающей стабильный процесс обработки во всем диапазоне выбранных технологических режимов [9]. Кроме того, необходимо обеспечить требуемую шероховатость поверхности, а эффективная мощность резания должна удовлетворять мощности привода главного движения. Технологические режимы имеют сложные взаимодействия: увеличение скорости резания с целью повышения производительности снижает стойкость инструмента, уменьшение подачи с целью обеспечения

требуемого качества обрабатываемой поверхности увеличивает путь резания при обработке [10], следовательно, повышает требования к периоду стойкости, увеличение глубины резания и подачи на зуб повышает мощность резания [11].

Для обеспечения высокой эффективности процесса обработки необходимо выполнить оптимизацию технологических параметров с целью достижения максимальной производительности процесса резания при обеспечении заданных технологических ограничений.

В качестве целевой функции примем максимальную производительность процесса обработки.

В качестве оптимизируемых параметров примем подачу инструмента на зуб и глубину резания [12].

В качестве технологических ограничений примем:

- мощность привода главного движения;
- режущие возможности инструмента;
- время обработки одного перехода, соответствующее стойкости инструмента;
- минимальные и максимальные значения технологических параметров, соответствующие техническим возможностям применяемого ремонтного оборудования;
- необходимая шероховатость поверхности.

Входными параметрами при проведении оптимизации процесса фрезерования являются: диаметр фрезы, количество зубьев, ширина фрезерования, частота вращения шпинделя. Внешние факторы, характеризующие условия выполнения процесса: допустимая мощность резания, заданная стойкость инструмента, требуемая шероховатость поверхности. Выходными параметрами являются: максимальные значения глубины резания и подачи на зуб, обеспечивающие эффективную мощность резания, стойкость инструмента, время обработки и шероховатость поверхности, соответствующие заданным условиям (рис. 2).

В качестве метода оптимизации примем метод линейного программирования.

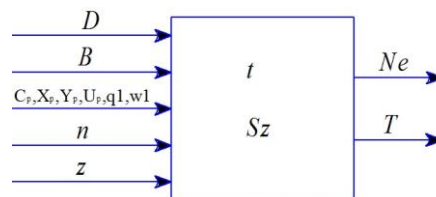


Рис. 2. Структурная модель оптимизации

Для выполнения оптимизации необходимо установить математические зависимости, связывающие оптимизируемые параметры с целевой функцией и системой технологических ограничений [13].

Ограничение по мощности резания устанавливает связь между эффективной мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и мощностью привода главного движения [14,15]. Математическое выражение мощности привода главного движения при фрезеровании баббита имеет вид:

$$Ne = \frac{Pz \cdot V}{1000 \cdot 60} \quad (1)$$

$$\text{где } Pz = \frac{10 \cdot Cp \cdot t^x \cdot Sz^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3)$$

$Cp=22,6$ ;  $x=0,86$ ;  $y=0,72$ ;  $u=1$ ;  $q=0,86$ ;  $w=0,15$ .

Подставим выражения (2) и (3) вместе со значениями коэффициентов в (1):

$$Ne = \frac{11,3 \cdot t^{0,86} \cdot Sz^{0,72} \cdot B^1 \cdot z \cdot \pi \cdot D \cdot n}{3 \cdot 10^6 \cdot D^{0,86} \cdot n^{0,15}} \quad (4)$$

после упрощения получим:

$$Ne = 3,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^{0,86} \cdot Sz^{0,72} \cdot B \cdot z \cdot \pi \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85} \quad (5)$$

Перенесем оптимизируемые параметры  $Sz$  и  $t$  в левую часть выражения:

$$t^{0,86} \cdot Sz^{0,72} = \frac{Ne}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}} \quad (6)$$

Полученное уравнение необходимо привести к линейному виду логарифмированием. Так как глубина резания и подача являются дробными числами, умножим подачу на 100, а глубину резания на 10 для получения логарифмов величин одного порядка, в результате преобразований получим выражение:

$$(10 \cdot t)^{0,86} \cdot (100 \cdot Sz)^{0,72} = \frac{Ne \cdot 10^{0,86} \cdot 100^{0,72}}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}} \quad (7)$$

Прологарифмируем полученное равенство с целью линеаризации:

$$\begin{aligned} 0,86 \ln(10 \cdot t) + 0,72 \ln(100 \cdot Sz) = \\ = \ln\left(\frac{Ne \cdot 10^{0,86} \cdot 100^{0,72}}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим:

$$\ln(10t)=x_1 \quad (9)$$

$$\ln(100Sz)=x_2 \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{Ne \cdot 10^{0,86} \cdot 100^{0,72}}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,14} \cdot n^{0,85}}\right) = b_1 \quad (11)$$

Получаем линейное неравенство, являющееся ограничением, устанавливающим связь между оптимизируемыми параметрами и эффективной мощностью резания :

$$0,86 \cdot x_1 + 0,72 \cdot x_2 \leq b_1 \quad (12)$$

Ограничение, связанное с режущими возможностями инструмента, регламентируется заданной стойкостью инструмента и выражается через допустимую скорость резания:

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot Sz^y \cdot B^u \cdot z^p} \quad (13)$$

Коэффициенты имеют значения:  $C_v=185,5$ ;  $x=0,3$ ;  $y=0,2$ ;  $u=0,1$ ;  $q=0,45$ ;  $m=0,33$ ;  $p=0,1$ .

Если приравнять выражения (13) и (3), вынести  $Sz$  и  $t$  в левую часть, умножить подачу на 100, глубину на 10 и прологарифмировать, в результате преобразований получим выражение:

$$\begin{aligned} 0,3 \ln(10 \cdot t) + 0,2 \ln(100 \cdot Sz) = \\ = \ln\left(\frac{9,29673 \cdot 10^5}{\pi \cdot D^{0,55} \cdot n \cdot T^{0,33} \cdot B^{0,1} \cdot z^{0,1}}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

Обозначив  $\ln(10t)=x_1$ ,  $\ln(100Sz)=x_2$ , логарифм правой части уравнения -  $b_2$ , запишем техническое ограничение, устанавливающее связь между заданной стойкостью инструмента и оптимизируемыми параметрами:

$$0,3 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 \leq b_2 \quad (15)$$

Так же необходимо ввести ограничение по времени обработки. Данное ограничение

необходимо для того, чтобы время работы фрезы в процессе одного технологического перехода не превышало периода стойкости.

Время обработки вкладыша выразим зависимостью:

$$T = \frac{H \cdot L}{S_{min} \cdot B} \quad (16)$$

где  $H$  – ширина вкладыша, мм;  $L$  – длина сектора вкладыша по радиусной поверхности, мм;  $S_{min}$  – минутная подача инструмента, мм/мин;  $B$  – ширина фрезерования, мм.

$$S_{min} = Sz \cdot z \cdot n \quad (17)$$

где  $Sz$  – подача на зуб, мм/зуб;  $z$  – количество зубьев фрезы;  $n$  – частота вращения фрезы, мин<sup>-1</sup>.

$$T = \frac{H \cdot L}{Sz \cdot z \cdot n \cdot B} \quad (18)$$

отсюда следует:

$$Sz = \frac{H \cdot L}{T \cdot z \cdot n \cdot B} \quad (19)$$

Домножим  $Sz$  на 100 и прологарифмируем полученное выражение:

$$\ln(100 \cdot Sz) = \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot n \cdot B}\right) \quad (20)$$

Обозначим

$$\ln(100Sz)=x_2, \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot n \cdot B}\right) = b_3$$

получим третье техническое ограничение при фрезеровании баббита.

$$x_2 \geq b_3 \quad (21)$$

Ограничения по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме имеют вид:

$$\ln(Sz \min \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz \max \cdot 100) \quad (22)$$

$$\ln(t \min \cdot 10) \leq x_2 \leq \ln(t \max \cdot 10) \quad (23)$$

Для учета ограничение по шероховатости поверхности используем разработанные эмпирические модели формирования шероховатости в зависимости от технологических режимов:

для баббита Б16

$$\begin{aligned} Ra(Sz, v, t) = 8,35 - 6,7 \cdot 10^{-3} v + 11,26 Sz - \\ - 3,8 t + 3,33 \cdot 10^{-2} v Sz - 6,1 \cdot 10^{-1} Szt + \\ + 3 \cdot 10^{-4} v^2 + 8,2 Sz^2 + 1,3 t^2 \end{aligned} \quad (24)$$

для баббита Б83

$$\begin{aligned} Ra(Sz, v, t) = & 12,625 - 7,8 \cdot 10^{-1} v + 10,5 Sz - \\ & - 5,3 t + 5,4 \cdot 10^{-2} v Sz - 9,5 \cdot 10^{-3} v t + \\ & + 3,8 \cdot 10^{-4} v^2 + 7,1 Sz^2 + 1,4 t^2 \end{aligned} \quad (25)$$

где  $Sz$  – подача на зуб, мм/зуб;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $t$  – глубина резания, мм.

Запишем систему ограничений в виде неравенств (12), (15) и (21), добавив к ним ограничение по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме (22) и (23):

$$\begin{cases} 0,86 \cdot x_1 + 0,72 \cdot x_2 \leq b_1 \\ 0,3 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 \leq b_2 \\ x_2 \geq b_3 \\ \ln(Sz \min \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz \max \cdot 100) \\ \ln(t \min \cdot 10) \leq x_2 \leq \ln(t \max \cdot 10) \end{cases} \quad (26)$$

Целевая функция имеет вид:

$$y = x_1 + x_2 \rightarrow \max \quad (27)$$

Представленная система (26) не содержит ограничения по шероховатости поверхности, так как функция шероховатости от технологических параметров является функцией второго порядка, имеет квадратные и парные члены, поэтому не может быть приведена к линейному виду логарифмированием. В связи с этим оптимизационный алгоритм будем выполнять в два этапа: первый этап с учетом ограничения по шероховатости поверхности, второй этап с учетом остальных ограничений системы (26). Данная последовательность выбрана исходя из предварительных расчетов, показывающих, что ограничение по шероховатости поверхности для выбранных интервалов изменения оптимизируемых параметров, является лимитирующим.

Представленный алгоритм выполнен для следующих исходных данных и условий обработки: обрабатываемый материал – баббит Б16; диаметр фрезы – 45 мм; количество зубьев фрезы – 6; ширина фрезерования – 36 мм; частота вращения привода главного движения – 750 об/мин; вид обработки – черновое фрезерование; стойкость инструмента – 120 мин; мощность привода главного движения – 1,2 кВт; шероховатость поверхности –  $Ra10$ .

Скорость резания, соответствующая диаметру фрезы 45 мм и частоте вращения привода главного движения 750 об/мин, составляет 106 об/мин.

Диапазоны изменения оптимизируемых параметров: глубина резания  $t_{\min}=3$  мм,  $t_{\max}=4$  мм, подача на зуб  $s_{\min}=0,1$  мм/зуб,  $s_{\max}=0,3$  мм/зуб.

Область допустимых значений оптимизируемых параметров для обеспечения заданной шероховатости  $Ra10$  представлена на рис. 3. По координатным осям представлены оптимизируемые параметры в заданных интервалах.

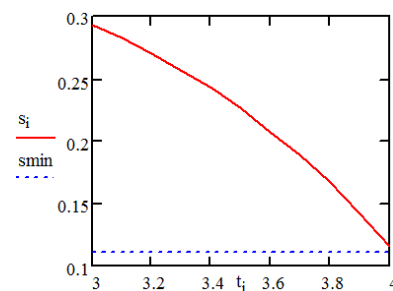


Рис. 3. Область допустимых значений оптимизируемых параметров для обеспечения заданной шероховатости  $Ra10$

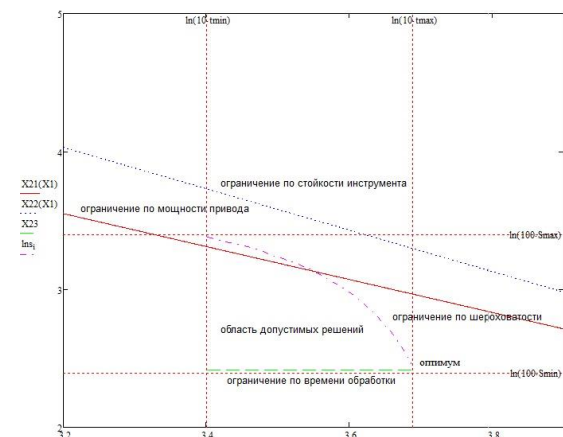


Рис. 4. Графическое представление максимизации целевой функции с учетом технических ограничений

С учетом скорректированного диапазона и системы неравенств (26) максимизируем целевую функцию. Графическое представление приведено на рис. 4.

Ограничение по мощности привода оказывает большее влияние и частично перекрывает ограничение по шероховатости. Лимитирующим ограничением является ограничение по шероховатости поверхности. Оптимум расположен на пересечении ограничения по шероховатости и максимальной глубины резания:  $t_{\text{opt}}=4$  мм,  $S_{\text{opt}}=0,12$  мм/зуб.

Предложенный оптимизационный алгоритм фрезерования баббита позволяет повысить эффективность ремонтной обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников за счет определения сочетания технологических параметров, обеспечивающих максимальную производительность при заданных технических ограничениях.

### Список литературы

1. Чернавский С.А. Подшипники скольжения / С.А. Чернавский. – Москва: МАШГИЗ, 1963. – 243 с.
2. Бауман В.А. Клушанцев Б.В. Мартынов В.Д. / Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. В.А. Бауман, Б.В. Клушанцев, В.Д. Мартынов – Москва: Машиностроение, 1981.-328 с.
3. Wehr. Roller mill successes of the 1990s / R. Wehr // INTERNATIONAL CEMENT REVIEW. – 1999. №4.
4. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 1 / W. Stroiber // Cement International. – 2003. - №2.
5. Самойлов С.И. Технология тяжелого машиностроения / С.И. Самойлов, В.М. Горелов, В.М. Браславский и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 594 с.
6. Солод Г.И. Технология машиностроения и ремонт горных машин / Г.И. Солод, В.И. Морозов, В.И. Русихин. – Москва: Недра, 1988. – 421 с.
7. Дуганов В.Я., Бешевли О.Б. и др. Станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения // Патент России № 132012. 2013. Бюл. №25
8. Бешевли О.Б. Разработка расчетной схемы оборудования для ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения. / О.Б. Бешевли // Технические науки в мире: от теории к практике: тезисы докл. Международная научно-практическая конф. (Ростов-на-Дону, 10 августа 2015 г.) – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 27-31
9. Hackmann, von T. Пути повышения эффективности процессов механической обработки деталей / Hackmann von T. // Maschinenmarkt. – 2007. - № 6. – Р. 20-23.
10. Бешевли О.Б. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббита / О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – Т 1, №2 С. 112-117.
11. Дуюн Т.А. Зависимость температуры в зоне резания и качества обработанной поверхности от режимов резания при фрезеровании баббитов различных марок / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: тезисы докл. Международная

научно-техническая конф. (Севастополь 14-15 сентября 2015г.). – Севастополь, 2015. – С. 31-35.

12. Лозовая С.Ю. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращающихся агрегатов / С.Ю. Лозовая, О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн, Н.Д. Воробьев // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №7. – С. 60-66.
13. Лозовая С.Ю. Обеспечение технологических параметров фрезерования баббита при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения / С.Ю. Лозовая, О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн, Н.Д. Воробьев // Фундаментальные исследования. – 2015. – №9 (часть 2). – С. 273-278
14. Дуюн Т.А. Эмпирические модели шероховатости поверхности при фрезеровании баббита / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – Т 1, №7 С. 122-128.
15. Бешевли О.Б. Оптимизация технологических параметров при фрезеровании баббита в условиях ремонтной обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников / О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – Т 1, №8 С. 142-148.

### References

1. Chernavskii S.A. Podshipniki skol'zheniia / S.A. Chernavskii. – Moskva: MASHGIZ, 1963. – 243 s.
2. Bauman V.A. Klushantsev B.V. Martynov V.D. / Mekhanicheskoe oborudovanie predpriatii stroitel'nykh materialov, izdelii i konstruktssii. V.A. Bauman, B.V. Klushantsev, V.D. Martynov – Moskva: Mashinostroenie, 1981.-328 s.
3. Wehr. Roller mill successes of the 1990s / R. Wehr // INTERNATIONAL CEMENT REVIEW. – 1999. №4.
4. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 1 / W. Stroiber // Cement International. – 2003. - №2.
5. Samoilov S.I. Tekhnologiiia tiazhelego mashinostroeniia / S.I. Samoilov, V.M. Gorelov, V.M. Braslavskii i dr. – Moskva: Mashinostroenie, 1967. – 594 s.
6. Solod G.I. Tekhnologiiia mashinostroeniia i remont gornyx mashin / G.I. Solod, V.I. Morozov, V.I. Rusikhin. – Moskva: Nedra, 1988. – 421 s.
7. Duganov V.Ia., Beshevli O.B. i dr. Stanok dlia obrabotki vkladyshei krupnogabaritnykh podshipnikov skol'zheniia // Patent Rossii № 132012. 2013. Biul. №25
8. Beshevli O.B. Razrabotka raschetnoi skhemy oborudovaniia dlia remontnoi obrabotki krupnogabaritnykh podshipnikov skol'zheniia. / O.B. Beshevli // Tekhnicheskie nauki v mire: ot teorii k praktike: tezisy dokl. Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konf. (Rostov-na-Donu, 10 avgusta 2015 g.) – Rostov-na-Donu, 2015. – S. 27-31
9. Hackmann, von T. Puti povysheniia effektivnosti protsessov mekhanicheskoi obrabotki detalei /

- Hackmann von T. // Maschinenmarkt. – 2007. - № 6. – P. 20-23.
10. 10. Beshevoli O.B. Vliianie tekhnologicheskikh parametrov na temperaturnyi rezhim i poluchaemoe kachestvo poverkhnosti pri frezerovanii babbita / O.B. Beshevoli, T.A. Duiun // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2015. – T 1, №2 S. 112-117.
11. 11. Duiun T.A. Zavisimost' temperatury v zone rezaniia i kachestva obrabotannoi poverkhnosti ot rezhimov rezaniia pri frezerovanii babbity razlichnykh marok / T.A. Duiun, O.B. Beshevoli // Sovremennye napravleniia i perspektivy razvitiia tekhnologii obrabotki i oborudovaniia v mashinostroenii: tezisy dokl. Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konf. (Sevastopol' 14-15 sentiabria 2015g.). – Sevastopol', 2015. – S. 31-35.
12. 12. Lozovaia S.Iu. Povyshenie effektivnosti remontnoi obrabotki opornykh uzlov krupnogabaritnykh vrashchaiushchikhsia agregatov / S.Iu. Lozovaia, O.B. Beshevoli, T.A. Duiun, N.D. Vorob'ev // Vest-nik IrGTU. – 2015. – №7. – S. 60-66.
13. 13. Lozovaia S.Iu. Obespechenie tekhnologicheskikh parametrov frezerovaniia babbita pri remont-noi obrabotke krupnogabaritnykh podshipnikov skol'zheniia / S.Iu. Lozovaia, O.B. Beshevoli, T.A. Duiun, N.D. Vorob'ev // Fundamental'nye issledovaniia. – 2015. – №9 (chast' 2). – S. 273-278
14. 14. Duiun T.A. Empiricheskie modeli sherokhovatosti poverkhnosti pri frezerovanii babbita / T.A. Duiun, O.B. Beshevoli // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2016. – T 1, №7 S. 122-128.
15. 15. Beshevoli O.B. Optimizatsiia tekhnologicheskikh parametrov pri frezerovanii babbita v uslovi-iakh remontnoi obrabotki opornoj poverkhnosti skol'zheniia krupnogabaritnykh podshipnikov / O.B. Beshevoli, T.A. Duiun // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2016. – T 1, №8 S. 142-148.

УДК 621.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Т.А. Дуюн<sup>1</sup>, В.М. Пчёлкин<sup>1</sup>, Д.В. Сахаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация

### Аннотация

В статье представлена методика определения периода стойкости режущего инструмента на примере фрез для обработки легированной стали. Период стойкости рассчитывается на основе экспериментальных данных с учетом физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов, режимов резания и геометрии режущего инструмента. Второй частью работы является исследование шероховатости поверхности при фрезеровании в зависимости от скорости, подачи и ширины фрезерования. Получены модели позволяющие прогнозировать значения стойкости инструмента и шероховатости поверхности в зависимости от технологических параметров.

**Ключевые слова:** инструмент, фрезерование, качество поверхности, износ инструмента, стойкость.

## STUDY OF RESISTANCE AND SURFACE ROUGHNESS AT MILLING ALLOY STEEL

T.A. Dujun<sup>1</sup>, V.M. Pchelkin<sup>1</sup>, D.V. Saharov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

### Abstract

The article presents a method of determination period stability of the cutting tool on the example of milling cutters for machining stainless steel. Resistance period is calculated on the basis of experimental data, taking into account the physical and mechanical properties of the tool and processed materials, cutting conditions and the geometry of the cutting tool. The second part of the work is to study the surface roughness in milling, depending on the speed, feed and milling width. We get the model allowing to predict the values of tool life and surface finish, depending on the process parameters.

**Keywords:** tool, milling, surface finish, tool wear resistance.

### Введение

Легированная сталь применяется для изготовления таких деталей как коленчатые валы, клапаны, шатуны, ответственные болты и силовые шпильки, шестерни, кулачковые муфты и другие тяжело нагруженные детали сложной конфигурации [8].

Целью работы является исследование стойкости режущего инструмента и шероховатости поверхности при фрезеровании в зависимости от скорости, подачи и ширины фрезерования.

Для проведения исследования был выбран вертикально-фрезерный обрабатывающий центр HAAS модели VF-2S (рис.1).

В качестве режущего инструмента использовалась фреза диаметром 16 мм производства СКИФ-М MT190-016Z16R02AP10, оснащенная пластинами APHT1003PDSR-S с маркой твердого сплава HCP25C (рис. 2, 3) [6-7].



Рис. 1. Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр HAAS модели VF-2S



Рис. 2. Фреза MT190-016Z16R02AP10 оснащенная пластинами APHT1003PDSR-S



Рис. 3. Оправка TH-C2-NC40Z16-070AD

Эксперимент был поставлен по программе центрального композиционного рототабельного планирования второго порядка [1].

Уровни факторов и интервалов варьирования выбраны по результатам предварительных поисковых экспериментов [4-5].

Таблица 1. Уровни и интервалы планирования факторов

| Факторы                                | Уровни     |            |           | Интервалы варьирования |
|----------------------------------------|------------|------------|-----------|------------------------|
|                                        | Верхний +1 | Основной 0 | Нижний -1 |                        |
| $x_2$ - скорость $v$ , м/мин           | 160        | 130        | 100       | 30                     |
| $x_1$ - подача $f$ , мм/зуб            | 0,15       | 0,115      | 0,08      | 0,03                   |
| $x_3$ - ширина фрезерования $a_c$ , мм | 11         | 8          | 5         | 3                      |

Реализованные восемь опытов полного факторного эксперимента и шесть опытов в центре плана [9], дополнили шестью опытами в «звездных» точках. Величина «звездного» плеча  $\alpha$  в рассматриваемом случае равна 1,628 [2].

### Результаты и обсуждение

Получили следующие значения коэффициентов:  $b_0=63,034$ ;  $b_1=-32,717$ ;  $b_2=-3,951$ ;  $b_3=-11,703$ ;  $b_{12}=6,875$ ;  $b_{13}=14,125$ ;  $b_{23}=-4,875$ ;  $b_{11}=8,248$ ;  $b_{22}=-1,129$ ;  $b_{33}=-5,152$ .

Таким образом, математическая модель, полученная в результате рототабельного планирования второго порядка, приняла вид:

$$y = 63,034 - 32,717x_1 - 3,951x_2 - 11,703x_3 + 6,875x_1x_2 + 14,125x_1x_3 - 4,875x_2x_3 + 8,248(x_1)^2 - 1,129(x_2)^2 - 5,152(x_3)^2 \quad (1)$$

Для проверки адекватности модели (1) нашли дисперсию  $s_{ad}^2$  адекватности и определили расчетное значение  $F$ -критерия:

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} = 2,57.$$

Значение  $F_p < F_T$ , поэтому модель следует признать адекватной [10]. Уравнение (1) неудобно для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому его преобразовали по формулам перехода от кодированных значений  $(x_1, x_2, x_3)$  к натуральным значениям факторов  $(v, f, a_c)$ :

$$x_1 = \frac{v-130}{30};$$

$$x_2 = \frac{f-0,115}{0,03};$$

$$x_3 = \frac{a_c-8}{3}.$$

Таким образом, уравнение (1) можно представить следующим выражением:

$$y = 63,034 - 1,1 \cdot (v-130) - 131,7 \cdot (f-0,115) - 3,9 \cdot (a_c-8) + 7,6 \cdot (v-130) \cdot (f-0,115) + 47,1 \cdot 10^{-2} \cdot (v-130) - 162,5 \times \\ \times (f-0,115) + 27,5 \cdot 10^{-2} \cdot (v-130)^2 - 376,3 \cdot (f-0,115)^2 - 1,7 \cdot (a_c-8)^2$$

Полученное уравнение адекватно и может быть использовано для расчета стойкости инструмента [3]. На (рис. 4-5) представлены результаты использования полученной модели.

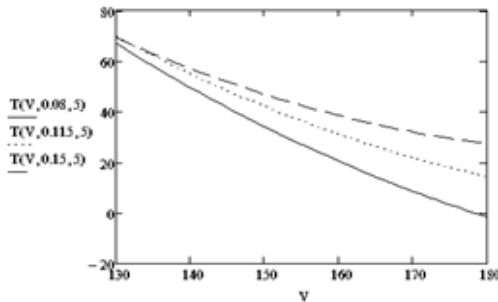


Рис. 4. Зависимость стойкости от скорости обкатывания и ширины фрезерования: влияние скорости обкатывания при подачах 0,08, 0,115 и 0,15 мм/зуб

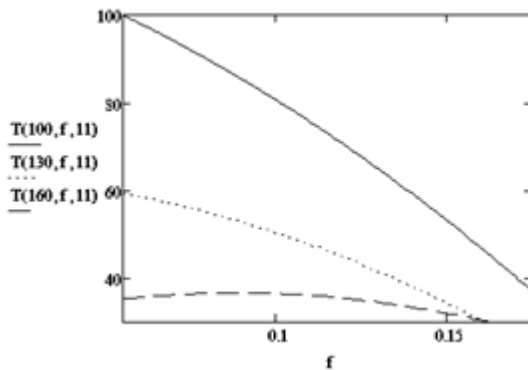


Рис. 5. Зависимость стойкости ширине фрезерования 5, 8 и 11 мм

Совместно со стойкостью режущего инструмента были произведены замеры значения шероховатости поверхности для каждого эксперимента (табл. 2).

Таблица 2. Результаты значения шероховатости в центре плана и в «звездных» точках

| Содержание плана          | № опыта | y     |
|---------------------------|---------|-------|
| Опыты в центре плана      | 1       | 1,23  |
|                           | 2       | 0,579 |
|                           | 3       | 0,539 |
|                           | 4       | 1,03  |
|                           | 5       | 0,588 |
|                           | 6       | 0,243 |
| Опыты в «звездных» точках | 7       | 0,49  |
|                           | 8       | 0,45  |
|                           | 9       | 0,49  |
|                           | 10      | 0,45  |
|                           | 11      | 0,49  |
|                           | 12      | 0,45  |

Получили следующие значения коэффициентов уравнения регрессии:  $b_0 = 0,484$ ;  $b_1 = 0,122$ ;  $b_2 = -0,074$ ;  $b_3 = 0,033$ ;  $b_{12} = -0,079$ ;

$$b_{13} = 0,053;$$

$$b_{23} = -0,005125;$$

$$b_{11} = 0,117;$$

$$b_{22} = 0,075; b_{33} = -0,065.$$

В связи с тем, что коэффициент  $b_{23}$  по абсолютной величине меньше соответствующего доверительного интервала, его можно признать статистически незначимым и исключить из уравнения регрессии[11].

Таким образом, математическая модель, полученная в результате рототабельного планирования второго порядка, приняла вид:

$$y = 0,484 + 0,053x_1x_3 + 0,117x_1^2 + 0,075x_2^2 - 0,065x_3^2 \quad (2)$$

Для проверки адекватности модели (2) нашли дисперсию  $s_{ad}^2$  адекватности и определили расчетное значение F-критерия:

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} = 5,0104$$

Значение  $F_p < F_T$ , поэтому модель следует признать адекватной[12-14]. Уравнение (2) неудобно для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому его преобразовали по формулам перехода от кодированных значений ( $x_1, x_2, x_3$ ) к натуральным значениям факторов ( $v, f, a_c$ ):

$$x_1 = \frac{v-130}{30};$$

$$x_2 = \frac{f-0,115}{0,03};$$

$$x_3 = \frac{a_c-8}{3}.$$

Таким образом, уравнение (2) можно представить следующим выражением:

$$Ra = 0,484 + 0,0176 \cdot \frac{(v-130)}{30} \times \\ \times (a_c-8) + 13 \cdot 10^{-5} \cdot (v-130)^2 + \\ + 83,34 \cdot (f-0,115)^2 - 72 \cdot 10^{-4} \cdot (a_c-8)^2$$

Полученное уравнение адекватно и может быть использовано для расчета шероховатости при фрезеровании легированной стали[15]. На (рис. 6–8) представлены результаты использования полученной модели.

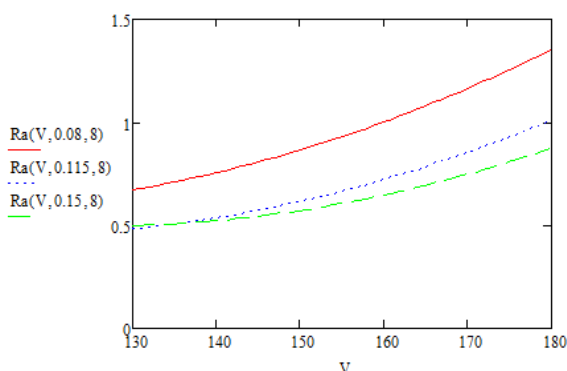


Рис. 6. Зависимость шероховатости от скорости обкатывания и ширины фрезерования: при ширине 8 мм и при подачах 0,08, 0,115 и 0,15 мм/зуб

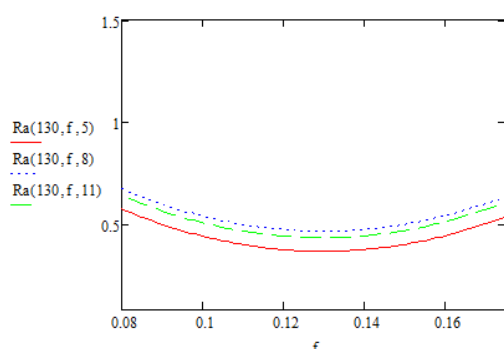


Рис. 7. Зависимость шероховатости от подачи: при скорости 160 м/мин и ширине фрезерования 5, 8 и 11 мм

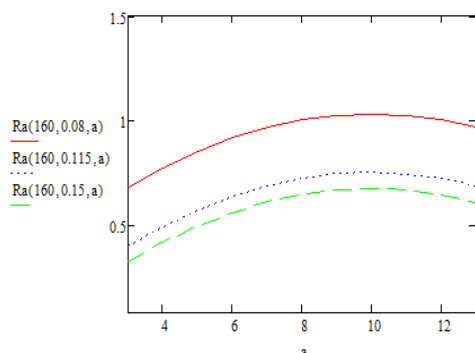


Рис. 8. Зависимость шероховатости от ширины фрезерования: при скорости 160 м/мин и подачах 0,08, 0,115 и 0,15 мм/зуб

## Выводы

Влияние технологических параметров не является однозначным. С увеличением скорости резания стойкость инструмента падает (рис. 4), а шероховатость увеличивается (рис. 6).

Ширина фрезерования была выбрана 11 мм, как самая оптимальная, при скорости Т (100, f, 11) стойкость снижается, а при Т

(160, f, 11) изменение подачи не оказывает влияние на стойкость (рис. 5).

Шероховатость принимает минимальное значение при подаче в интервале 0,1-0,15 мм/зуб (рис. 7). При фиксированной скорости и ширине фрезерования в интервале 5-11 мм шероховатость принимает максимальное значение (рис. 8).

Таким образом, можно считать скорость резания, равную 160 м/мин, оптимальным значением, обеспечивающим наиболее стабильный процесс резания.

Представленная модель позволяет прогнозировать значение стойкости инструмента в зависимости от технологических параметров, дает возможность оптимизировать технологические параметры.

## Список литературы

1. Бойко А.Ф. Теория планирования и организация многофакторных экспериментов / А.Ф. Бойко, М.Н. Воронкова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. 73 с.
2. Реброва И.А. Планирование эксперимента. / И.А. Реброва. – Омск: СибАДИ, 2010. 105 с.
3. Мурыгина Л. В. Моделирование чистовой обработки базовых поверхностей опор технологических барабанов / Л.В. Мурыгина, И.В. Шрубченко // Технология машиностроения. – 2011. – №9. – С.57-60.
4. Дуюн Т.А. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббита / Т.А.Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – №2. – С. 112-117.
5. Лозовая С.Ю. Обеспечение технологических параметров фрезерования баббита при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения / С.Ю. Лозовая, О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн, Н.Д. Воробьев // Фундаментальные исследования. – 2015. – №9-2.
6. Шпур Г. Справочник по технологии резания материалов / Г. Шпур, Т. Штеферле // – М.: Машиностроение, 1985. – 616 с.
7. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г. С. Тысячник // – Киев: Техника, 1991. – 151 с.
8. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. Пчёлкин В.М. Особенности износа твердосплавных пластин при высокоскоростной обработки / В.М. Пчёлкин // Образование, наука, производство. – 2015. – Т.1, БГТУ им. В.Г. Шухова. С.1703-1707.

10. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
11. Рубанов В.Г. Моделирование экстремальных систем управления в среде Matlab и Simulink, как средство анализа динамики / В.Г. Рубанов, Д.А. Бушуев. // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. - 2012, №19 (138), вып. 24/1, С. 169-175
12. Scianna M. Tackling Stainless Steel [Электронный ресурс] <http://shopmetaltech.com/cutting-tools/tackling-stainless-steel.html> (дата обращения 25.01.2016)
13. Галлагер, Р., Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; пер. с англ. Н.В. Баничука. - М.: Мир, 1984. - 428 с.
14. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. - М.: Машиностроение, 2006. - 384 с.
15. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 1 / W. Stroiber // Cement International. – 2003. - №2.
5. Lozovaia S.Iu. Obespechenie tekhnologicheskikh para-metrov frezerovaniia babbita pri remontnoi obra-botke krupnogabaritnykh podshipnikov skol'zheniia / S.Iu. Lozovaia, O.B. Beshevli, T.A. Duiun, N.D. Voro-b'ev // Fundamental'nye issledovaniia. – 2015. – №9-2.
6. Shpur G. Spravochnik po tekhnologii rezaniia materi-alov / G. Shpur, T. Shteflerle // – М.: Mashinostroe-nie, 1985. – 616 s.
7. Ostaf'ev V.A. Diagnostika protsessa metaloobra-botki / V.A. Ostaf'ev, V.S. Antoniuk, G. S. Tysiach-nik // – Kiev: Tekhnika, 1991. – 151 s.
8. Sorokin V. G. Marochnik stalei i splavov / V. G So-rokin, A. V. Volosnikova, S. A Viatkin. – М.: Mashinostroenie, 1989. — 640 s.
9. Pchelkin V.M. Osobennosti iznosa tverdosplavnykh plastin pri vysokoskorostnoi obrabotki/ V.M. Pchel-kin // Obrazovanie, nauka, proizvodstvo. – 2015. – Т.1, BGTU im. V.G. Shukhova. С.1703-1707.
10. Spiridonov A.A. Planirovanie eksperimenta pri is-sledovanii tekhnologicheskikh protsessov / A.A. Spi-ridonov – М.: Mashinostroenie, 1981. 184 s.
11. Rubanov V.G. Modelirovanie ekstremal'nykh sistem upravleniia v srede Matlab i Simulink, kak sredstvo analiza dinamiki / V.G. Rubanov, D.A. Bushuev. // Nauchnye vedomosti BelGU. Seria: Istoriia. Polito-logiia. Ekonomika. Informatika. - 2012, №19 (138), vyp. 24/1, S. 169-175
12. Scianna M. Tackling Stainless Steel [Elektronnyire-surs]<http://shopmetaltech.com/cutting-tools/tackling-stainless-steel.html> (data obrashcheniia 25.01.2016)
13. Gallager, R., Metod konechnykh elementov. Osno-vy / R. Gallager; per. s angl. N.V. Banichuka. - М.: Mir, 1984. - 428 s.
14. Vasin S. A. Prognozirovanie vibroustoichivosti in-strumenta pri tochenii i frezerovanii / S. A. Va-sin. - М.: Mashinostroenie, 2006. - 384 s.
15. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy con-sumption. Part 1 / W. Stroiber // Cement Inter-rational. – 2003. - №2.

## References

1. Boiko A.F. Teoriia planirovaniia i organizatsiia mno-gofaktornykh eksperimentov / A.F. Boiko, M.N. Vo-runkova. – Belgorod: Izd-vo BGTU im. V.G. Shukhova, 2013. 73 s.
2. Rebrova I.A. Planirovanie eksperimenta. / I.A. Reb-rova. – Omsk: SibADI, 2010. 105 s.
3. Murygina L. V. Modelirovanie chistovoi obrabotki bazovykh poverkhnostei opor tekhnologicheskikh bara-banov / L.V. Murygina, I.V. Shrubchenko // Tekhnolo-giia mashinostroeniia. – 2011. – №9. – S.57-60.
4. Duiun T.A. Vliianie tekhnologicheskikh parametrov na temperaturnyi rezhim i poluchaemoe kachestvo po-verkhnosti pri frezerovanii babbita / T.A.Duiun, O.B. Beshevli // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2015. – №2. – S. 112-117.

УДК 621.93

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

А.А. Дьяконов<sup>1</sup>, И.В. Шмидт<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), Челябинск, Российская Федерация

### Аннотация

Описано, что металлобетонная базовая конструкция металлорежущего станка представляет собой отливку, которая выполнена в виде основной массивной неметаллической части, пространственного арматурного каркаса и комплекта закладных металлических деталей. Показано, что применяемые металлобетонные базовые элементы металлорежущих станков не уступают по характеристикам базовым элементам из чугуна и стали, а их производство является более эффективным по сравнению с базовыми элементами из традиционных конструкционных материалов. А применение современных модифицированных высокопрочных цементных бетонов является более эффективным и экологичным по сравнению с полимербетонами при производстве неметаллической части металлобетонных базовых конструкций металлорежущих станков.

**Ключевые слова:** токарный станок, металлобетон, композитные материалы, базовые элементы

## TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS AND EFFECTIVENESS OF MANUFACTURING OF THE METAL-CONCRETE STRUCTURES OF THE METAL-CUTTING MACHINES

A.A. Dyakonov<sup>1</sup>, I.V. Shmidt<sup>1</sup>

FSS-FEI of HPE «South Ural State University» (national research university), Chelyabinsk, Russian Federation

### Abstract

It is described that basic structure of the metal-cutting machine is a cast component, manufactured in the form of main solid non-metal part, spatial reinforcing cage, and set of embedded metal components. It is indicated that used metal-concrete elements of metal-cutting machines have equal characteristics with the basic components, manufactured of cast iron and steel, but their manufacturing is more effective if to compare with traditional structural materials. When manufacturing non-metal part of metal-concrete basic structures of the metal-cutting machines, using modern modified high strength cement concretes is more effective and environmental friendly than using polymer-concretes.

**Keywords:** the turning machine, the metal-concrete, composite materials, basic elements

### Введение

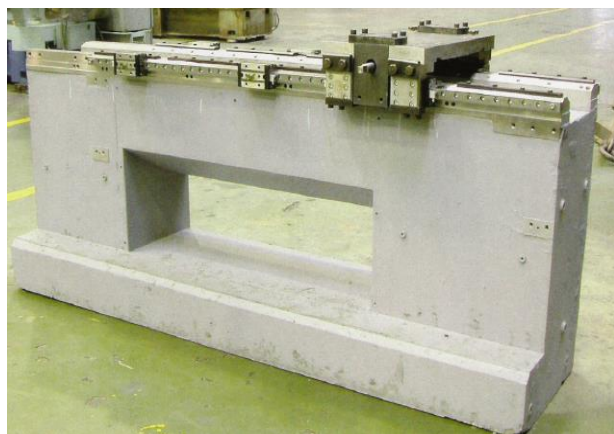
Мировая станкостроительная промышленность широко применяет различные полимерные бетоны для изготовления металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков, заменяя тем самым традиционные элементы из чугуна [1–16].

Металлобетонные базовые элементы металлорежущих станков представляют собой пространственный металлический каркас с комплектом закладных металлических дета-

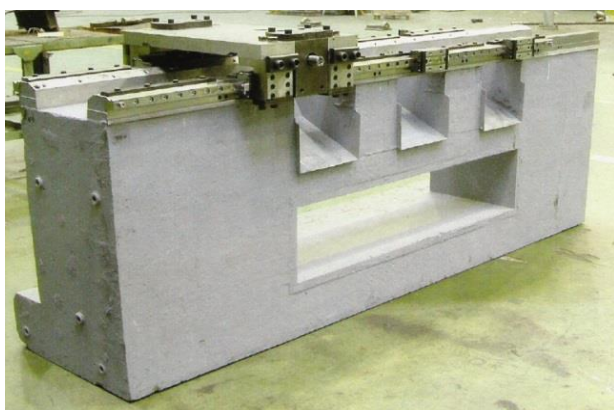
лей, заполненный полимерным бетоном. Общий вид металлобетонной базовой конструкции токарного станка представлен на рис. 1.

В качестве неметаллической части металлобетонной конструкции, которая формирует основное массивное сечение конструкции, используются бетоны на различных вяжущих и реактивных смолах (современные полимербетоны) или модифицированном портландцементе (современные высокопрочные цементные бетоны с активизи-

рующими химическими добавками). Такие бетоны включают в себя не менее трех фракций разноразмерного сортированного и мытого высокопрочного гранитного щебня и двух фракций кварцевого песка.



а



б

Рис. 1. Металлобетонная базовая конструкция токарного станка:  
а – фасадная часть; б – вид сзади

Улучшение бетонов путем фракционирования высокопрочных горных пород, составляющих до 70% массы бетонной смеси, и кристаллических песков совместно с применением высокопрочным модернизированным портландцементным вяжущим с активными химическими добавками позволяет получить современный цементный бетон высококачественным специальным материалом с повышенной статической и динамической прочностью (до 200 МПа) [2, 5]. Полученный цементный бетон обладает высокой скоростью набора прочности и, как следствие минимальной усадкой в процессе

отверждения. Такие свойства сближают цементный бетон с традиционным конструкционным материалом – чугуном и бетонами, приготовленными на вяжущем из реактивных смол.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики различных материалов, применяемых при изготовлении базовых элементов станочного оборудования [2, 4].

Так же стоит отметить, что массивность сечения металлобетонной конструкции базовых элементов позволяет уменьшить собственные колебания конструкции и улучшить демпфирующие и термозависимые характеристики, такие как: гашение колебаний, передающихся на станок из вне и возникающих в системе приводных и исполнительных органов; температурная стабильность деформаций от нагрева элементов станка и их охлаждения, в результате уменьшенной теплопроводности материала и др.

При близких по конструктивным и деформативным параметрам свойствам цементных и полимерных бетонов первые оказываются в 3 – 4 раза более эффективными по стоимостным показателям. Кроме этого цементные бетоны являются более экологичными по сравнению с полимербетонами и обладают более высокой технологичностью при изготовлении изделий. Компонента вредных химических воздействий от полимерных вяжущих, существующая при изготовлении, использовании и утилизации полимербетонных базовых деталей, при применении цементных вяжущих полностью отсутствует.

### Результаты и обсуждение

В данной работе рассматриваются технологические особенности производства металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков, основанные на многолетнем опыте исследований и производства конструкций. Неметаллическая часть рассматриваемых металлобетонных базовых элементов станков выполнялась с использованием вяжущего в виде современных модифицированных портландцементов.

Пространственный арматурный каркас металлобетонных конструкций выполняют из стальных стержней строительной арматуры, свариваемых или скрепляемых другими способами в объемную жесткую конструк-

цию, которая гарантированно фиксирует все растягивающие деформации в сечениях массивного изделия и препятствует образованию трещин в материале.

Таблица 1. Характеристики материалов

| Характеристики материала                                        | Материал            |                            |                              |                     |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|
|                                                                 | Серый чугун         | Mineralguss RHENOCAST      | Металлобетон                 | Акрилбетон          |
|                                                                 | Сырье и вяжущее     |                            |                              |                     |
|                                                                 | Металл              | Ерохуdharz, щебень         | Цемент, щебень, песок, сталь | ММА, песок, щебень  |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                    | 7,1                 | 2,3 – 2,45                 | 2,6 – 2,7                    | 2,34 – 2,4          |
| Модуль упругости, кН/мм <sup>2</sup>                            | 100 – 105           | 40 – 45                    | 50 – 65                      | 30 – 43             |
| Прочность при сжатии, Н/мм <sup>2</sup>                         | 100 – 140           | 100 – 120                  | 80 – 200                     | 145                 |
| Прочность при растяжении, Н/мм <sup>2</sup>                     | 20                  | 15 – 20                    | 15 – 25                      | 12                  |
| Прочность на растяжение при изгибе, Н/см <sup>2</sup>           | 400 – 500           | 28 – 30                    | 15 – 28                      | 12 – 15             |
| Температурный коэффициент линейного расширения, К <sup>-1</sup> | 13·10 <sup>-6</sup> | 11,5 – 14·10 <sup>-6</sup> | 9,5 – 12·10 <sup>-6</sup>    | 16·10 <sup>-6</sup> |
| Коэффициент Пуассона при 30 Н/мм <sup>2</sup>                   | 0,14                | 0,2 – 0,28                 | 0,18 – 0,25                  | 0,2                 |
| Логарифмический декремент затухания колебаний                   | 0,001 – 0,0045      | 0,03 – 0,1                 | 0,04 – 0,08                  | 0,063 – 0,075       |
| Линейная усадка при изготовлении, %                             | –                   | 0,3                        | 0,01                         | 0,22                |

Для перемещения механических приводных и исполнительных узлов в металлорежущем станке в каркас металлобетонной конструкции устанавливают конструктивные металлические закладные детали и элементы (направляющие бруски, пластины, пластики, закладные бобышки и др.). Закладные детали, имеющие специальные анкерные устройства для крепления в теле бетона, как правило, точно фиксируют на внутренних поверхностях формы или во внешней несъемной металлической обечайке базовой металлобетонной конструкции в местах гарантированного обеспечения контакта металлобетонной базовой конструкции с исполнительными, управляющими и технологическими элементами металлорежущего станка.

В готовой металлобетонной базовой конструкции закладные металлические элементы проходят такой же цикл механической обработки, что и в чугунных или сварных базовых элементах станков. При этом

возможность предварительной индивидуальной обработки закладных деталей (в стадии полуфабрикатов) и точность их фиксации в формах позволяют резко сократить припуски под окончательную механическую обработку, а, следовательно, сократить время загрузки станочного парка завода, состоящего из тяжелых станков.

Жесткие требования, предъявляемые к конструкциям по ограничению их деформаций и обеспечению их долговременной стабильности, обусловили необходимость установления новых зависимостей для применяемых материалов, новых конструктивных и аналитических подходов для расчета конструкций и новых технологических приёмов изготовления изделий по сравнению с рядовыми и специальными строительными конструкциями.

При анализе и выборе оптимальных конструктивных решений и подборе материалов для изготовления металлобетонных базовых конструкций необходимо обращать

особое внимание на такие динамические характеристики, как виброползучесть и способность эффективно рассеивать энергию механических колебаний, которая характеризуется логарифмическим декрементом затухания колебаний.

Демпфирующие характеристики неметаллического материала определяют при прямых измерениях амплитуд колебаний конструкции, изменяющихся во времени и оцениваемых по величине изменения амплитуды колебаний (в секундах за секунду). Сравнительные демпфирующие характеристики различных материалов, полученные при испытании образцов однотипных брус-

ков различных материалов по идентичной методике импульсных возбуждений нагрузки, приведены в табл. 2 [2, 4].

Проведенные научно-исследовательские и опытные работы позволили оценить возможности и преимущества применения металлобетонных базовых конструкций, их технологическую и экономическую эффективность. Также выявлены специфические особенности, сопровождающие процесс разработки конструкций, изготовления и механической обработки металлобетонных базовых конструкций, продолжительность необходимой выдержки их до механической обработки и монтажа.

Таблица 2 Демпфирующие характеристики материалов

| Материал                                 | Параметры колебаний |                     |                     |
|------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                          | Собственная частота | Собственная частота | Собственная частота |
| Отвержденная смола: ЭД – 20<br>ФАЭД      | 441,3               | 0,064               | 13,1                |
|                                          | 420,13              | 0,075               | 11,1                |
| Полимербетоны на: ММА<br>ФАЭД<br>ЭД – 20 | 890,1               | 0,063               | 13,3                |
|                                          | 973,4               | 0,067               | 12,5                |
|                                          | 903                 | 0,027               | 31                  |
| Дерево (сосна)                           | 1290                | 0,023               | 36,3                |
| Цементный бетон                          | 955,7               | 0,046               | 12,7                |
| Габро – диабаз                           | 1589                | 0,005               | 167,2               |
| Сталь (марки Ст3)                        | 1277,6              | 0,0008              | 1000                |

Учитывая специфическую особенность металлобетонных базовых конструкций металлорежущих станков и предъявляемые к ним требования необходимо усовершенствовать технологический процесс изготовления конструкций. Эти усовершенствования касаются как использования и приготовления высокосортных исходных материалов (оптимальных аналитически установленных составов композита), так и ряда специальных элементов оборудования и самих технологических операций в их составе, порядке и последовательности.

К технологическим операциям по подготовке материалов относятся подготовка заполнителя, цемента и приготовление бетонной смеси.

Подготовка крупного заполнителя состоит в проведении анализа его прочности, лещадности, фракционного состава щебня, пыленности и однородности. Прочностные

характеристики щебня устанавливаются в соответствии с данными поставочного сертификата. Остальные характеристики определяют в процессе визуального освидетельствования материала при его мойке и отсеу.

Мойка щебня производится в специализированной моечной установке, где порции щебня тщательно промывают под давлением воды в специальных устройствах ящичного типа с мелкорешетчатым дном. После промывки щебень складывают в мерных емкостях и высушивают, после чего производят его рассев по фракциям, который осуществляется с использованием вибросита с различными размерными отверстиями.

Для получения высокопрочного бетона предпочтительны фракции крупного заполнителя принимать по весовому составу в следующей пропорции: фракции 5 – 10 мм – 25%; фракции 10 – 15 мм – 30%; фракции 15 – 20 мм – 45%. Фракционный состав круп-

ного заполнителя можно уточнить, используя расчетные методики, приведенные в соответствующих рекомендациях, и в обязательном порядке проверить экспериментально.

Для обеспечения высокой прочности бетона и его характеристик по вибропоглощению и деформативности необходим строгий контроль содержания лещадных частиц в каждой из фракций, который не должен превышать 3%.

После завершения просеивов крупного заполнителя путем пропорционального смешивания формируется его комплексный состав и организовывается его складирование в емкостях бункерного или ящичного типов.

Мелкий заполнитель. При подработке фракционного состава и проверке пылевого содержания мелкого заполнителя также используют вибросито. При этом в высежку попадают пылевидные частицы и всевозможные комкообразные включения глины или камня. Предпочтительно приобретать подготовленные промывкой крупнозернистые пески, однако необходимо выполнять обязательно их просеивание. Подготовленный к использованию мелкий заполнитель также хранят в бункерных или ящичных емкостях.

Цемент. Специфические условия эксплуатации конструкций и высокие требования к прочности, демпфированию, агрессивной стойкости и ограниченной деформативности бетона, используемого для изготовления металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков, определяют весьма жесткие условия и требования к качеству цементов, применяемых в виде вяжущего. В связи с ограниченным по массе расходом материала при производстве базовых элементов металлорежущих станков при длительном хранении даже самые качественные цементы комкуются и теряют свои свойства, поэтому необходимо установить порционность поставки цементов на производство в соответствии с программой выпуска деталей.

Приготовление бетонной смеси осуществляется в бетономешалке принудитель-

ного перемешивания, обеспечивающей надежное перемешивание всех компонентов бетонной смеси при порционной периодической их подаче в чашу перемешивания при помощи скипового подъемника.

Рецептура состава бетонной смеси устанавливается расчетом по соответствующим рекомендованным методикам и проверяется выполнением специальных опытных замесов. Состав компонентов бетонной смеси в виде весовых долей различных материалов комплектуется в скиповом подъемнике перед их загрузкой в чашу бетономесителя. Подвижность и удобство укладываемой бетонной смеси проверяют в процессе ее замешивания при помощи замеров осадки бетонного конуса по специальной методике.

Для проверки характеристик изготовленного бетона по деформативности и прочности используются результаты испытаний в прессовых установках бетонных контрольных образцов размером 100×100×100 мм и призм. Испытания позволяют выявить динамику набора бетоном прочности в процессе твердения, а также его марочные характеристики по прочности, условный модуль упругости материала и предел его упругой работы в конструкции. Конструкции, а также контрольные образцы и призмы изготавливаются в специальных формах с уплотнением бетонной смеси в процессе ее укладки на вибростолах, имеющих различные размеры и возбуждающие усилия.

Параметрический контроль показателей бетонов в процессе набора ими прочности в течение первых 28 дней и до трехмесячного хранения, а также определение марочной прочности бетона и его модуля упругости осуществляют при испытании контрольных образцов и призм в гидравлическом прессе с усилием 250 тс.

Для изготовления металлобетонных базовых конструкций металлорежущих станков с открытой внешней бетонной поверхностью используют специальные металлодеревянные формы, учитывающие как технологические требования по установке и фиксации закладных металлических деталей, так и технологические требования по обеспечению качественной укладки бетонной

смеси, ее нормального твердения и набора бетоном заданной прочности, а также распаковки изделия в задаваемый технологическим регламентом срок.

При индивидуальном производстве металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков эффективно и целесообразно изготавливать их с использованием несъемной внешней металлической тонколистовой обечайки, в которую встроены закладные металлические детали, образующие контактные и привалочные поверхности изделия.

### Выводы

Таким образом, применяемые металлобетонные базовые элементы металлорежущих станков не уступают по характеристикам базовым элементам из чугуна и стали, а их производство является более эффективным по сравнению с базовыми элементами из традиционных конструкционных материалов.

Также показано, что применение современных модифицированных высокопрочных цементных бетонов является более эффективным и экологичным по сравнению с полимербетонами при производстве неметаллической части металлобетонных базовых конструкций металлорежущих станков.

*Результаты работы получены в ходе выполнения проекта «Разработка конструкций и технологии полного цикла изготовления металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков», реализуемого в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.577.21.0170.*

### Список литературы

1. Балан Т.А. Определяющие соотношения для структурно – неоднородных материалов при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. 1985. № 12. С. 106 – 115.

2. Бетонные конструкции машин и оборудования / под ред. М.И. Браиловского. М.: НИИЖБ. 1990. 223 с.
3. Браиловский М.И., Зак М.Л., Римшин В.И. К расчету прочности и жесткости ригелей железобетонных станин прессов. Бетонные конструкции машин и оборудования. М.: НИИЖБ. 1990. 145 с.
4. Браиловский М.И. Рекомендации по проектированию базовых деталей и опорных конструкций под блоки агрегатированного оборудования из железобетона и специальных бетонов. М.: АООТ РОСЭП 2000. 112 с.
5. Гамбаров Г.А. Ползучесть и усадка трехосно напряженного бетона // Бетон и железобетон. 1962. № 1. С. 25 – 27.
6. Гвоздев А.А. Ползучесть бетона // Механика твердого тела. М.: Наука, 1966. С. 38 – 52.
7. Гениев Г.А., Кисюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория прочности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
8. Зак М.Л., Гуца Ю.П. Аналитическое представление диаграммы сжатия бетона // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций: Сб. науч. трудов. М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. С. 103 – 107.
9. Горшков Б.М. Экспериментальное исследование влияния силовых деформаций составной станины прецизионного станка на точность обработки // Металлообработка. 2003. №4. С. 2 – 3.
10. Рогов В.А., Ахмед Оссамя М.Е., Махов А.А. Статические исследования композиционной станины особо точного станка // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: инженерные исследования. 2004. №1. С. 70 – 75.
11. Гусаков С.В., Рогов В.А., Сидоренко С.Н. Экспериментальное исследование динамических характеристик большеразмерных станин прецизионных станков из синтеграна // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2012. №4(23). С. 184 – 188.
12. Горшков Б.М. Разработка алгоритма оптимизации размещения жестких опор прецизионного координатно-расточного станка с составной станиной // Металлообработка. 2003. №3. С. 4 – 6.
13. Ferreira A.J.M., Ribeiro M.C.S., Marques A.T. Analysis of hybrid beams composed of GFRP profiles and polymer concrete // Int J Mech Mater Des. 2004. no. 1(2). P.143–155.
14. Vipulanandan C., Paul E. Characterization of polyester polymer and polymer concrete // J Mater Civil Eng. 1993. no. 5(1). P. 83 – 94.
15. Suh J., Lee D. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high speed CNC milling machine // Int J Mech Mater Des. 2008. no.2. P. 113–121.
16. Kumar V. A., Venkatesh G.V. Modelling and Analysis of CNC Milling Machine Bed with Composite Material // International Journal for Scientific Research and Development. 2014. no.2 (9). P. 5 – 8.

## References

1. Balan T.A. Opredeľaiushchie sootnosheniia dlia strukturno – neodnorodnykh materialov pri slozhnom napriazhennom sostoianii // Problemy prochnosti. 1985. no. 12. P. 106 – 115.
2. Betonnye konstruksii mashin i oborudovaniia / pod red. Brailovskogo M.I. M.: NIIZhB. 1990. 223 p.
3. Brailovskii M.I., Zak M.L., Rimshin V.I. K raschetu prochnosti i zhestkosti rigelei zhelezobetonnykh stanin pressov. Betonnye konstruksii mashin i oborudovaniia. M.: NIIZhB. 1990. 145 p.
4. Brailovskii M.I. Rekomendatsii po proektirovaniu bazovykh detalei i opornykh konstruksii pod bloki agregatirovannogo oborudovaniia iz zhelezobetona i spetsial'nykh betonov. M.: AOOT ROSEP, 2000. 112 p.
5. Gambarov G.A. Polzuchest' i usadka trekhosno napriazhennogo betona // Beton i zhelezobeton. 1962. no. 1. P. 25 – 27.
6. Gvozdev A.A. Polzuchest' betona // Mekhanika tverdogo tela. M.: Nauka, 1966. P. 38 – 52.
7. Geniev G.A., Kisiuk V.N., Tiupin G.A. Teoriia prochnosti betona i zhelezobetona. M.: Stroizdat, 1974. 316 p.
8. Zak M.L., Gushcha Iu.P. Analiticheskoe predstavlenie diagrammy szhatiia betona // Sovershenstvovanie metodov rascheta staticheskoi neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruksii: Sb. nauch. trudov. M.: NIIZhB Gosstroia SSSR, 1987. P. 103 – 107.
9. Gorshkov B.M. Eksperimental'noe issledovanie vliianiia silovykh deformatsii sostavnoi staniny pretsizionnogo stanka na tochnost' obrabotki // Metalloobrabotka. 2003. no. 4. P. 2 – 3.
10. Rogov V.A., Akhmed Ossamia M.E., Makhov A.A. Staticheskie issledovaniia kompozitsionnoi staniny osobo tochnogo stanka // Vestnik rossiiskogo univer-siteta družby narodov. Seriya: inzhenernye issledo-vaniia. 2004. no.1. P. 70 – 75.
11. Gusakov S.V., Rogov V.A., Sidorenko S.N. Eksperimental'noe issledovanie dinamicheskikh kha-rakteristik bol'sherazmernykh stanin pretsizionnykh stankov iz sintegrana // Vestnik MGTU STANKIN. 2012. no. 4(23). P. 184 – 188.
12. Gorshkov B.M. Razrabotka algoritma optimizatsii razmeshcheniia zhestkikh opor pretsizionnogo koordinat-no-rastochno stanka s sostavnoi staninoy // Metalloobrabotka. 2003. no. P. S.4 –6.
13. Ferreira A.J.M., Ribeiro M.C.S., Marques A.T. Analysis of hybrid beams composed of GFRP profiles and polymer concrete // Int J Mech Mater Des. 2004. no.1(2). P.143–155.
14. Vipulanandan C., Paul E. Characterization of polyester polymer and polymer concrete // J Mater Civil Eng. 1993. no.5(1). P. 83 – 94.
15. Suh J., Lee D. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high speed CNC milling machine // Int J Mech Mater Des. 2008. no.2. P. 113–121.
16. Kumar V. A., Venkatesh G.V. Modelling and Analysis of CNC Milling Machine Bed with Composite Material // International Journal for Scientific Research and Development. 2014. no.2(9). P. 5 – 8.

УДК 621.923

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В.А. Титков<sup>1</sup>, В.Б. Богущкий<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

### Аннотация

Проведенные исследования и практика производства показали, что эффективность применения алмазов может быть значительно повышена при условии приведения в соответствие динамических характеристик станков с уникальными технологическими возможностями алмазов.

При создании нового оборудования, отвечающего условиям применения алмазного инструмента, необходимо знать количественные характеристики периодических сил, возникающих при обработке и зависящих как от физико-химических и механических свойств обрабатываемого материала, так и от характеристик алмазного инструмента, динамического качества станка, режимов обработки. При этом важно оценить не только абсолютное значение сил, возникающих при шлифовании, но и их частотный состав.

**Ключевые слова:** динамическая система, алмазное шлифование, эффективность.

## RESEARCH OF THE EFFECT DYNAMIC TECHNOLOGICAL SYSTEM ON THE EFFICIENCY OF DIAMOND GRINDING

V.A. Titkov<sup>1</sup>, V.B. Bogutsky<sup>1</sup><sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

The study and practice of production showed that the efficacy of diamond can be significantly improved, subject to the harmonization of the dynamic characteristics of machine tools with unique technological capabilities diamonds.

When you create a new equipment that meets the conditions of application of diamond tools, it is necessary to know the quantitative characteristics of periodic forces occurring during processing and which depends both on the physico-chemical and mechanical properties of the processed material, and the characteristics of the diamond tool, the dynamic qualities of the machine tool, machining modes. It is important to evaluate not only the absolute value of forces generated during grinding, but also their frequency composition.

**Keywords:** dynamic system, diamond grinding, efficiency.

### Введение

На машиностроительных предприятиях достаточно остро стоит проблема обеспечения качества выпускаемой продукции. Окончательное качество формируется на финишных операциях, таких как шлифование. Шлифование является одним из распространенных и эффективных технологических процессов. Объем шлифовальных работ занимает в среднем до 30%, а в отдельных отраслях промышленности – до 70% всех видов работ [1].

Примерно 80% финишных операций, начиная с прецизионной обработки деталей

электронной техники и заканчивая высокопроизводительным шлифованием проката и валков прокатных станков, производится абразивным инструментом. При этом более чем 32% видов металлорежущего оборудования оснащено таким инструментом.

Абразивная обработка охватывает широкий диапазон скоростей резания (0,1...300 м/с) и широкий диапазон снимаемых припусков (0,01...30 мм), отличается большим многообразием способов реализации, что позволяет эффективно использовать её вместо лезвийной. В ряде случаев, когда иные методы не могут быть применены, шлифо-

вание является единственным процессом высокоточной обработки деталей. [6, 7, 8]

### Результаты и обсуждение

При создании нового оборудования, отвечающего условиям применения алмазного инструмента, необходимо знать количественные характеристики периодических сил, возникающих при обработке и зависящих как от физико-химических и механических свойств обрабатываемого материала, так и от характеристик алмазного инструмента, динамического качества станка, режимов обработки [2, 3]. При этом важно оценить не только абсолютное значение сил, возникающих при шлифовании, но и их частотный состав. Это, в частности имеет особое значение при использовании алмазных инструментов для глубинного шлифования, при котором силы достигают весьма больших величин и часто вызывают явления резонанса, приводящим к интенсивным относительным колебаниям инструмента и детали ухудшению основных показателей процесса шлифования (рис.1).

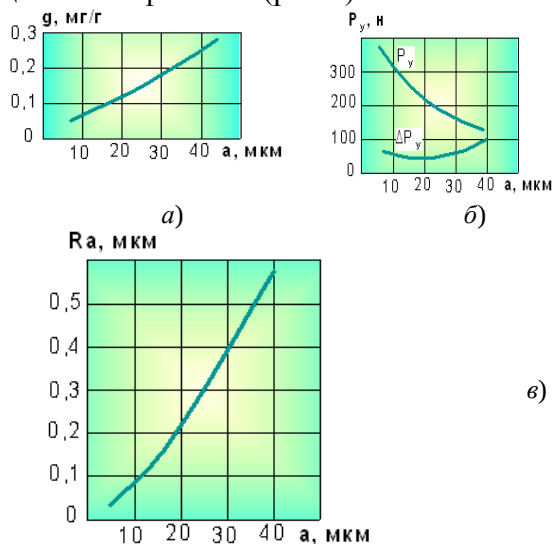


Рис.1. Влияние амплитуды относительных колебаний шлифовальной головки и приспособления с обрабатываемым образцом на: а - удельный расход алмазов; б - составляющую силы резания  $P_y$ ;  $\Delta P_y$  - пульсацию составляющей силы резания  $P_y$ ; в - шероховатость обработанной поверхности.

Исследования показали, что колебания сил шлифования имеют сложный характер и лежат в широком диапазоне частот. В связи

с этим для исследования особенностей динамики глубинного алмазного шлифования нами была применена специальная методика.

В результате опытов на различных режимах были получены усредненные амплитудные спектры составляющих сил шлифования  $P_y(f)$  и  $P_z(f)$  (рис.2).

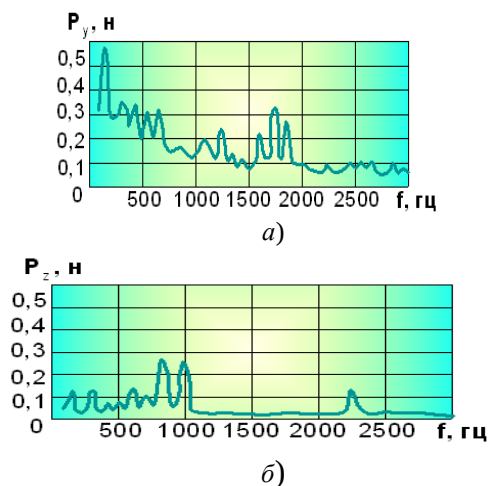


Рис.2. Амплитудные спектры составляющих сил шлифования  $P_y$  (а) и  $P_z$  (б).

С целью получения энергетических спектральных характеристик построены кривые распределения квадратов амплитуд сил по частотам, соответствующим энергетической спектральной плотности составляющих колебательного процесса, которая равна [12]:

$$E(f) = 2\pi \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{U_D^2(f, f + \Delta f)}{\Delta f}$$

Так как при измерениях применялась одна и та же измерительная и регистрирующая аппаратура и было известно сопротивление цепи, в которой создается падение напряжения  $U_D$ , то можно определить среднюю мощность составляющих спектра  $P_{y,z}(f, f + \Delta f)$  на любом интервале  $\Delta f$  и найти спектральную плотность мощности. Зная спектральные плотности колебательных процессов, представляется возможным получить энергетические соотношения (рис. 3) между амплитудами колебаний на одном и том же частотном участке  $\Delta f$ .

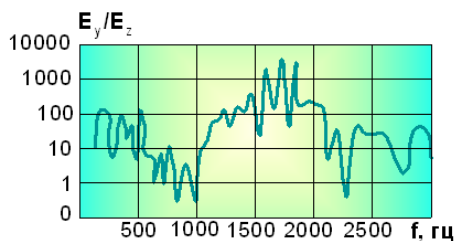


Рис.3. Относительный энергетический спектр составляющих сил шлифования

Такой анализ составляющих сил шлифования был проведен при различных режимах обработки и позволил, во-первых, измерить частотно-амплитудный состав сил шлифования в широком диапазоне, во-вторых - количественно оценить колебательную энергию, передаваемую в технологическую систему при обработке и в-третьих, определить наиболее опасные в связи с явлениями резонанса частоты (в данной случае 1500...2000 Гц по оси  $y$ ). Можно сделать вывод, что среди наиболее важных аспектов динамики алмазного шлифования большое значение приобретают вопросы, связанные с колебаниями составляющих сил шлифования. При алмазном шлифовании осцилляция сил происходит в широком частотном диапазоне, определяемом как динамическими особенностями механической системы, так и режимам шлифования. Для количественной оценки периодических сил, возникающих при обработке, а также колебательной энергии, передаваемой в системе СПИЗ, может быть эффективно использован спектральный анализ.

Многими исследователями [5, 9, 13, 14, 15], как правило, колебательные процессы, изучаются дифференцировано в узком низкочастотном диапазоне (50...500 Гц), что в ряде случаев не позволяет объяснить с достаточной достоверностью полученные результаты, особенно из-за взаимодействия различных источников колебаний, имеющих весьма сложный характер при шлифовании [11]. Поэтому колебательные процессы при алмазном шлифовании изучались также путем оценки волновых смещений непосредственно на обрабатываемой поверхности.

Для решения поставленной задачи использовалась специальная методика и разра-

ботан широкополосный приемник вибрационных смещений с чувствительным элементом, изготовленным из пьезокерамики.

Приемник вибросмещений устанавливался на свободном участке обрабатываемой поверхности таким образом, чтобы исключить его удары о поверхность, вызываемые вибрацией станка, а также обеспечить устойчивый акустический контакт.

Эксперименты показали, что при шлифовании на обрабатываемой поверхности возбуждаются упругие волны широкого спектрального состава, имеющие в общем случае нестационарно-периодический характер [4, 10]. Их анализ позволил выделить и количественно определить спектральные составляющие, обусловленные различными источниками: вибрацией вращающихся деталей, собственными колебаниями отдельных агрегатов станка и т.д. Установлено также, что основные по величине гармоники являются следствием процесса резания и занимают, как правило, диапазон средних и высоких частот - звуковой и ультразвуковой. Частота и амплитуда колебаний поверхности (изменяющаяся от десятков ангстрем до нескольких микрон) формируются путем сложения ряда колебательных процессов и зависят также от объемной и структурной реверберации упругих волн в шлифуемой детали или образце.

Было обнаружено, что параметры волновых смещений связаны с качественными показателями процесса шлифования. Например, наименьшему удельному расходу алмазов при высоком качестве поверхности соответствовали волновые смещения, имеющие в своем составе существенные по величине ультразвуковые составляющие в диапазоне частот 16...40 кГц, что, по видимому, обусловлено самоочисткой круга и обрабатываемой поверхности в результате микрокавитационных явлений в зоне шлифования, наиболее легко протекающих именно при возбуждении в этом диапазоне частот. При увеличении биения круга амплитуда этих составляющих резко упала, что сопровождалось ухудшением чистоты поверхности [4, 5] и увеличением удельного расхода алмаза.

Полученные результаты исследования позволяют не только эффективно оценивать некоторые динамические особенности оборудования на холостом ходу и при работе, но и определять наиболее благоприятные условия алмазного шлифования с учетом качества инструмента, свойств обрабатываемой поверхности, режимов шлифования.

Исследования особенностей динамики алмазно-электролитического шлифования в зависимости от времени протекания рабочего процесса и некоторых технологических факторов позволили сделать следующие выводы: характер протекания рабочего процесса при алмазно-электролитическом шлифовании непостоянен во времени и зависит от примененной схемы (жесткая, упругая, глубинная), динамических особенностей оборудования, режимов шлифования, механических и физико-химических свойств алмазносодержащего слоя и обрабатываемого материала; упругая схема при исследованных режимах ( $V_{кр}=25\text{ м/с}$ ;  $P=1,0\text{ МПа}$ ;  $U=6\text{ В}$ ;  $I=0,35\text{ А/мм}^2$  и жесткая схема с мощностью шлифования ниже определенного значения (в наших опытах 2 кВт) не создают условий, необходимых для нормального протекания рабочего процесса алмазно-электролитического шлифования; удовлетворительная производительность поддерживается только в первые 3...4 минуты; при жесткой (врезной) схеме с постоянной мощностью системы СПИЗ должна обеспечивать возможность появления кратковременных нестационарно-периодических колебаний, изменяющих условия протекания рабочего процесса и способствующих увеличению производительности; производительность алмазного шлифования можно существенно повысить, используя специальные методы управления колебательными процессами в зоне шлифования.

## Выводы

Примененная методика исследования колебательных процессов и их статистическая оценка позволили: определить длительность эффективной работы алмазных кругов различных характеристик; исследовать ха-

рактер протекания переходных процессов в зависимости от различных условий шлифования; определить оптимальные характеристики алмазных кругов; разработать некоторые специальные требования к динамическому качеству станков для алмазного шлифования; оценить роль связки в возникновении быстропротекающих колебательных процессов в зоне резания. Проведенные исследования показали также решающее значение динамической (ударной) плотности алмазных зерен в процессе алмазно-электролитического шлифования.

## Список литературы

1. Зубарев Ю.М. Современные конкурентоспособные технологии абразивно-алмазной обработки заготовок / Ю.М.Зубарев, З.И.Кремень, Ю.М.Ермаков, Ю.С.Степанов // Научно-технический и производственный журнал "Справочник. Инженерный журнал". – Выпуск №5. – Москва. – 2011. – С. 39-42.
2. [Каинов, Д.А.] Моделирование износа инструмента при программном управлении операцией шлифования / [Д.А. Каинов], В.Б. Богущкий, В.А. Титков // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С. 210-215.
3. Новоселов, Ю.К. Расчет размерного износа абразивных зерен при наружном круглом шлифовании / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, В.Б. Богущкий // Ползновский альманах. №1. – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2012. – С. 279-283.
4. Novoselov, Y Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / [Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutski, Y. Gutsalenko] // Journal Fiability & Durability Supplement. – 2013. – №1. – P. 5 – 15. Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu.
5. Новоселов, Ю.К. Аналитическая оценка параметров шероховатости шлифованных поверхностей / Ю.К. Новоселов, В.Б. Богущкий, С.М. Братан //Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 208 – 222.
6. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. д-ра техн. наук. Одесса, 2006.
7. W. B. Rowe, Principles of Modern Grinding Technology, William Andrew Applied Science Publishers, Burlington, Vt, USA, 2009.
8. J. Webster and M. Tricard, "Innovations in abrasive products for precision grinding," Annals of the Co-

- operative Institutional Research Program, vol. 53, no. 2, pp. 597–617, 2004.
9. Киселев Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением сож. / Е.С. Киселев - Ульяновск: УлГТУ, 2001. —171 с.
10. Титков В.А. Экспериментальная установка вибрационной обработки деталей на операциях круглого наружного шлифования. //Вісник СевНТУ: зб. Наук. Пр. Вип. 140/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2013. – С. 184-189.
11. Титков В.А. Формирование рабочего профиля шлифовального круга в процессе правки / В.А. Титков, Ю.К. Новосёлов, Д.А. Каинов //Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. – Вип. 128/2012. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2012. – С. 242-248.
12. Физический энциклопедический словарь. / А.М. Прохоров— М.: Советская энциклопедия, 1983.
13. Новосёлов Ю.К., Татаркин Е. Ю. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1988. – 128 с.
14. Brian R.W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
15. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C.Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992.-225 p.
4. Novoselov, Y Calculation of surface roughness parameters for an external cylindrical grinding / [Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutski, Y. Gutsalenko] // Journal Fiability & Durability Supplement. – 2013. – No. 1. – P. 5 – 15. Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu.
5. Novoselov, Y. K. Analytical evaluation of parameters of roughness of sanded surfaces / Y. K. Novoselov, Bogutskiy V. B., S. M. Bro //Cutting and tool in technological-ray systems: Intern. scientific.-tech. sat. – Kharkov: NTU "KHPI", 2013. – Vol. 83. – S. 208 – 222.
6. Bro S. M. Technological basis for ensuring the quality and stability of high performance finishing and fine-grinding of th: dis. d-RA tekhn. Sciences. Odessa, 2006.
7. W. B. Rowe, Principles of Modern Grinding technology, William Andrew Applied Science Publishers, Burlington, Vt, USA, 2009.
8. J. Webster and M. Tricard, "Innovations in abrasive products for precision grinding," Annals of the Co-operative Institutional Research Program, vol. 53, No. 2, pp. 597-617, 2004.
9. Kiselyov E. S., the physics changes shlifoval-circles with the use of coolant. / E. S. Kiselyov, Moscow: Mashinostroenie, 2001. -171 C.
10. Titkov V. A. Experimental setup the vibration of workpiece on the operation s round external grinding. //SevNTU]: ZB. Sciences. PR. VIP. 140/2013. Series: Machinereadable the transport. – Sevastopol, 2013. – S. 184-189.
11. Titkov V. A. formation of the working profile of the grinding wheel in the process of editing / V. A. Titkov, Y. K. Novoselov, D. A. Cain //SevNTU]: ZB. Sciences. St. – VIP. 128/2012. Series: Machinereadable the transport. – Sevastopol, 2012. – Pp. 242-248.
12. Physical encyclopedic dictionary. / A. M. Prokhorov, M.: Soviet encyclopedia, 1983.
13. Novoselov Y. K., Tatarkin E. Y. stability of accuracy and detail in slivova-NII. – Saratov: Publishing house Sarat. University press, 1988. – 128 p.
14. Brian R.W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
15. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C.Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992.-225 p.
1. Zubarev Yu. M., Modern competitive technology of abrasive diamond machining / Yu. Zubarev, I. Z. Kremen, Y. M. Ermakov, Yu. s. Stepanov // Scientific-technical and production journal "Directory. Engineering journal". – Issue # 5. – Moscow. – 2011. – S. 39-42.
2. Cain, D. A. Modeling of tool wear during software management operations-sanding / D. A. Cain, Bogutskiy V. B., V. A. Titkov // Cutting and tool in technological systems: Intern. scientific.-tech. sat. – Kharkov : NTU "KHPI", 2006. – Vol. 70. – Pp. 210-215.
3. Novoselov, Yu. K. Calculation of size of wear of the abrasive grains in the outer round grinding / Y. K. Novoselov, S. M. Bro, Bogutskiy V. B. // Polzunovskii almanac. No. 1. – Barnaul: AltGTU im. I. I. Polzunov, 2012. – Pp. 279-283.

## References

УДК 621.9.015

## ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

А.В. Храмов<sup>1</sup>, И.В. Семдянкин<sup>1</sup>, Е.С. Киселев<sup>2</sup><sup>1</sup>ФБГОУ ВО "Ульяновский государственный технический университет", г. Ульяновск, Российская Федерация<sup>2</sup>ГК "НПК ХАЛТЕК", г. Ульяновск, Российская Федерация

### Аннотация

Представлены результаты опытно-промышленных испытаний новой конструкции концевой корпусной фрезы конструкции ГК "НПК ХАЛТЕК" (аналог двухзубой корпусной фрезы японской фирмы Sumitomo WEX3040EL). В результате испытаний при обработке стальных и титановых заготовок с варьированием в широком диапазоне элементов режима фрезерования, как открытых поверхностей, так и пазов, установлено, что новая разработка по всем критериям технологической эффективности (период стойкости, шероховатость, нагрузка на фрезерный шпиндель) не уступает своему аналогу, отличаясь меньшей (на 30%) стоимостью. Максимальный съем материала в обоих случаях составлял 0,14 л/мин при обработке стальных заготовок и 0,01 л/мин при обработке титановых образцов.

**Ключевые слова:** корпусная фреза, режимы резания, титановый сплав, сталь, импортозамещение, производительность, шероховатость.

## IMPORT SUBSTITUTION AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF MODERN CUTTING TOOLS FOR MACHINING CENTERS

A.V. Khramov<sup>1</sup>, I.V. Semdyankin<sup>1</sup>, E.S. Kiselev<sup>2</sup><sup>1</sup> Ulyanovsk state technical University, Ulyanovsk, Russian Federation<sup>2</sup> GK "NPK "HALTEK", Ulyanovsk, Russian Federation

### Abstract

Presents the results of pilot testing of new design end mills Cabinet design Ledger "SPC KHALTEK" (analogue duhabi Cabinet cutters Japanese firm Sumitomo WEX3040EL). In the test result when machining steel and titanium workpieces with variation in a wide range of elements in the mode of grinding, as open surfaces and grooves, it was found that new development according to all criteria of technical efficiency (period of resistance, the roughness, the load on the milling spindle) is not inferior to its counterpart, differing only at 30% cost. Maximum material removal in both cases was 0.14 l/min in the processing of steel billets and 0.01 l/min when machining titanium samples.

**Keywords:** case cutter, metalworking, cutting speed, feed, titanium alloy, steel billet, import substitution, opportunistic detail, performance, the period of durability, roughness.

### Введение

После длительного периода переосмысления будущего развития промышленного производства и включения механизма международных санкций, в России началось усиление внимания к собственному машиностроению (в первую очередь – к его оборонным отраслям). В соответствии с планом содействия импортозамещению в промышленности, утвержденного распоряжением Прави-

тельства Российской Федерации от 30 сентября 2014 г. № 1936-р, в Министерстве промышленности и торговли России были сформированы планы мероприятий по импортозамещению и, в том числе станкоинструментальной отрасли. Подтверждением этого было большое число отечественных экспонатов на международной выставке «МЕТАЛЛООБРАБОТКА - 2016» в Москве. Однако при внимательном их изучении бросается в глаза их не только внешнее сходство, но и прямое копирование внутреннего содер-

жания далеко не лучших образцов продукции передовых промышленно развитых стран. Такое "импортозамещение" вряд ли сможет вернуть нам передовые позиции среди промышленно развитых стран. Особенно это относится к металлорежущему инструменту, от качества которого напрямую зависит как производительность труда, так и качество, а следовательно - себестоимость и конкурентоспособность выпускаемой продукции. Этот путь развития машиностроения никогда не приводил к ликвидации нашего отставания и дальнейшей зависимости отечественной промышленности от импорта передовых технологий в металлообработке [1-15]. Только разработка новых технических решений на основе изучения передового опыта в мире может вновь вернуть наше машиностроение на достойное место среди промышленно развитых стран.

### Результаты и обсуждение

ГК «НПК ХАЛТЕК» (г. Ульяновск) с самого основания в основу своей деятельности положила это принцип и в настоящее время производит цельный твердосплавный инструмент (концевые фрезы, сверла, развертки и т.п.), применяемый на предприятиях авиационной, аэрокосмической, моторной и прочих отраслей отечественного машиностроения. Такие инструменты изготавливаются из высококачественных (но, к сожалению, пока импортных) твердосплавных заготовок (стержней) диаметром 0,5-60 мм по собственной оригинальной геометрии, отвечающей самым высоким мировым требованиям по качеству, производительности и периоду стойкости. По своим характеристикам эти инструменты, несмотря на меньшую стоимость (~30%) не уступают лучшим аналогам ведущих зарубежных производителей. Выполненные на отечественных предприятиях промышленные испытания показывают, что применение инструмента ГК «НПК ХАЛТЕК» позволяет в несколько раз снизить себестоимость обработки за счёт увеличения производительности и увеличить привлекательность благодаря конкурентоспособной цене[2]. Производство инструмента сертифицировано по стандарту ISO 9001:2008. Данный инструмент находит широкое при-

менение на промышленных предприятиях авиационно-космической отрасли при изготовлении нежестких деталей, имеющих сложную пространственную форму, в том числе криволинейные участки. Как правило заготовки таких деталей обрабатываются концевыми фрезами на многоцелевых обрабатывающих центрах.

В настоящее время в ГК «НПК ХАЛТЕК» приступил к выпуску более экономичных в эксплуатации корпусных концевых фрез, оснащенных быстросменными твердосплавными пластинами. Основной целью разработки новых корпусных фрез является создание, на основе обобщения передового опыта лучших производителей подобного инструмента, новой конструкции, не уступающих по жесткости (а, следовательно, и по производительности) лучшим зарубежным образцам и цельным твердосплавным концевым фрезам при высокопроизводительной обработке заготовок из конструкционных сталей и авиационных материалов на современных обрабатывающих центрах.

Рассмотрим основные отличия и преимущества предлагаемого инструмента на примере концевых корпусных фрез для обработки фасонных поверхностей заготовок нежестких деталей из конструкционных сталей и труднообрабатываемых материалов.

Большинство нежестких деталей, применяемых в авиационно-космической отрасли, имеют сложную пространственную форму, в том числе криволинейные участки, обрабатываемые фрезерованием на многоцелевых обрабатывающих центрах. Механическую обработку заготовок осуществляют цельными твердосплавными или корпусными двухперыми фрезами со сферической или тороидальной формой торца твердосплавной фрезы или твердосплавной пластины, причем выбор каждый раз определяется возможностями применяемого оборудования, жесткостью технологической системы, геометрическими параметрами конкретной пластины или фрезы, экономической целесообразностью и т.д. Основным фактором, ограничивающим производительность обработки и, как следствие, себестоимость конечного продукта, является малая ширина среза, влияющая на высоту гребешков обработанной поверхности. Очевидно, чем больше эффективный радиус кон-

такта пластины или фрезы и заготовки и меньше величина шага между двумя последовательными проходами, а также значение радиального биения фрезы, тем меньше высотные параметры шероховатости обработанной поверхности. С уменьшением вели-

чины шага производительность обработки также существенно уменьшается.

На рис. 1 представлена конструкция корпусного инструмента собственного производства ГК "НПК ХАЛТЕК" (аналог Sumitomo WEX3040EL - 2 зуба)



Рис.1. Корпусная двухперая фреза производства ГК "НПК ХАЛТЕК" с карманами под пластину AXMT 170508 PEER-E ACP300 компании SUMITOMO

Увеличение эффективного радиуса достигается применением концевых фрез большего диаметра, что соответственно увеличивает радиус сферической части или радиус тора. Известно, что наименьшие высотные параметры обработанной поверхности достигаются за счет применения монолитных (как правило, твердосплавных) фрез, но применение таких фрез с диаметром более 32 мм, как правило до сих пор, считается экономически нецелесообразным из-за их высокой стоимости.

Все режущие элементы концевой фрезы – радиусная часть, периферические и торцевые части пластины (зубья) могут принимать участие в резании, однако следует отметить, что при обработке сложнопрофильных криволинейных поверхностей, когда припуск на обработку относительно невелик, в резании участвует, как правило, только лишь радиусная часть пластин фрезы.

В связи с этим разработка достаточно жесткой корпусной концевой фрезы, сочетающей в себе все преимущества сферической и тороидальной формы торца твердосплавной фрезы и способной вести высокопроизводительную обработку заготовок нежестких деталей, является актуальной задачей. Учитывая жесткие допуски на корпусную часть фрезы, технология её изготовления также имеет свои

особенности и сложности в базировании и закреплении заготовки при обработке. Поэтому основная часть переходов при изготовлении опытной партии корпусной фрезы была осуществлена на многоцелевом станке Integrex-1200 фирмы MAZAK.

Испытания собранной корпусной фрезы осуществляли при обработке заготовок из стали 45 и титанового сплава BT-22 на станке HCN-6800 фирмы MAZAK. За базу для сравнения принимали результаты, полученные при фрезеровании заготовок фрезой Sumitomo WEX 3040EL в аналогичных условиях. В процессе испытаний корпусной инструмент производства ГК "НПК ХАЛТЕК" и компании SUMITOMO с одинаковыми пластинами AXMT 170508 PEER-E ACP300 SUMITOMO одной партии поставки был закреплен в оправку BBT50-MEGA32 DS-105. Вылет инструмента из оправки составлял 2d (основная часть испытаний) и 3d (d-диаметр фрезы). Крепление заготовок в процессе обработки осуществляли в тисках SCHUNK KSD-125. Варьируемыми параметрами в ходе испытаний при обработке стальных заготовок были: скорость резания V (190 и 300 м/мин), подача S (0,16 и 0,2 мм/об), глубина резания Ap (5 и 8мм), ширина фрезерования Ae (от 5 до 30 мм); при обработке титановых заготовок ско-

рость резания, глубина и ширина резания, были постоянными ( $V=40$  м/мин;  $A_p=5$  мм;  $A_e=10$  мм), а подача изменялась от 0,16 до 0,2 мм/об. Испытания проводились как при обработке в сухую, так и при подаче СОЖ через каналы внутри инструментов.

Оценка эффективности испытуемых инструментов осуществляли с использованием следующих критериев:

- нагрузка на фрезерный шпиндель станка (в % от максимума);
- период стойкости режущего инструмента, мин;
- шероховатость (по среднему отклонению профиля  $R_a$ , мкм).

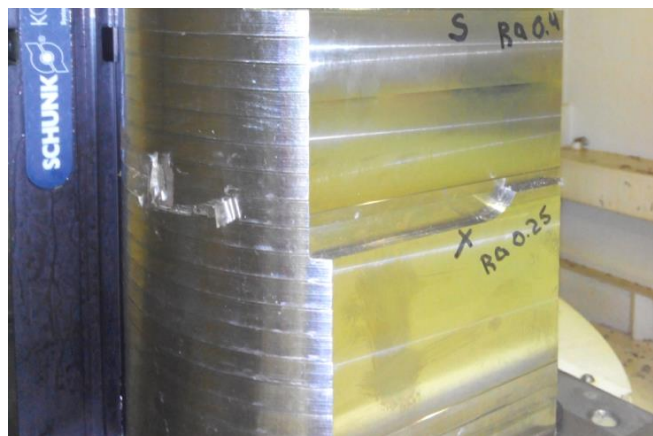


Рис. 2. Шероховатость поверхности заготовки (ВТ-22) в процессе обработки фрезами ХАЛТЕК (Х) и SUMITOMO (S)

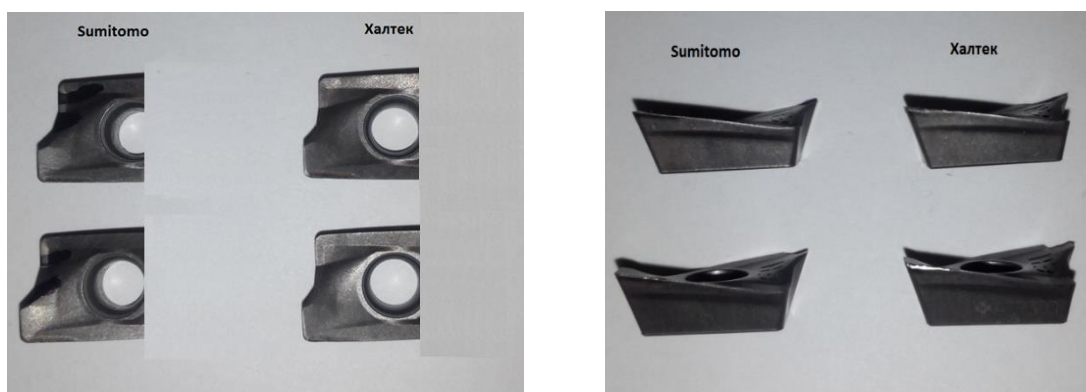


Рис. 3. Изображение износа пластин после работы инструментом в паз ( $A_p=5$ мм;  $A_e=40$ мм,  $t_{\text{маш}}=32$ мин. заготовка ВТ-22)

Контроль шероховатости осуществляли с использованием прибора HOMMEL TESTER T500.

В процессе испытаний визуально контролировали также наличие сколов и износ режущих пластин по задней грани (рис. 3).

Результаты сравнительных испытаний показали, что новая разработка корпусного инструмента ГК "НПК ХАЛТЕК" по всем параметрам не уступает своему зарубежному аналогу. Максимальный съем материала в обоих случаях составлял 0,14 л/мин при обработке стальных заготовок и 0,01 л/мин при обработке титановых образцов. Инструмент показал свою работоспособность при нагруз-

ках на фрезерный шпиндель до 12% с обеспечением шероховатости на обработанных поверхностях по  $R_a=0,25$  мкм при одинаковых значениях периода стойкости режущих пластин.

### Выводы

Учитывая результаты выполненных испытаний, можно утверждать, что новые конструкции корпусных фрез ГК "НПК ХАЛТЕК" найдут свое широкое применение в машиностроении. Это позволит укрепить статус отечественных разработок в нашей общей практике.

Таким образом, при организации работ по импортозамещению следует не слепо копировать лучшую продукцию передовых промышленно развитых стран, а шире предлагать отечественные разработки, не уступающие или превосходящие зарубежные аналоги по своим эксплуатационным свойствам и отличающиеся меньшей стоимостью.

*\*Исследования проведены в рамках выполнения гранта РФФИ по проекту 15-48-02633*

## Список литературы

1. Малышев, В.И. Становление и развитие науки о резании материалов. Тольятти: Издательство ТГУ, 2015. – 508 с.
2. Храмов, А.В. Особенности импортозамещения металлорежущего инструмента в современных условиях / А.В. Храмов, И.В. Семдянкин, Е.С. Киселев и др. // СТН, 2016, №1, с. 21-26.
3. Малышев, В.И. Технология изготовления режущего инструмента. Тольятти: Издательство ТГУ, 2013. – 368 с.
4. Боровский, Г.В. Справочник инструментальщика / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов. - М. Машиностроение, 2005. - 464 с.
5. Верещака, А.С. Резание материалов: Учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. - М.: Высшая школа, 2009. - 535 с.
6. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Учебное пособие // Под ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с.
7. Справочник по технологии резания металлов. В 2-х кн./Пер. с нем. Под ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Машиностроение, 1985. - 616 с.
8. Киселев Е.С. Повышение качества твердосплавных инструментов и деталей путем создания заданного уровня остаточных напряжений в поверхностном слое / Е.С. Киселев, М.В. Назаров // Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2015, №2(32-2), с.81- 86.
9. Степанов Ю.С. Методы поискового конструирования технологической оснастки / Ю.С. Степанов, Шукин А.Е. Орел: Орловский филиал Московского института приборостроения, 1993. 146 с.
10. Грановский Г.И. Резание металлов: Учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.
11. Васин С.А. Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учебник / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 448 с.
12. Getting to know special steel. Special metallurgy / R. Ebner, P. Hellman, F. Kooch, R. Pontu Sgargi, A. Schidler. - Milano: Edizioni sipiel, 2005. - P.135.
13. Gerhard Ihle Hartmetalle + Werkzeuge e. K. [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.ihle.com/main/index.phplang=en> (дата обращения 12.10.2010).
14. LMT Boehlerit [Электронный ресурс]. URL: <http://www.boehlerit.at> (дата обращения 12.10.2010).
15. Precision Carbide Tools Ltd [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.precision-carbide.com> (дата обращения 12.10.2010).

## References

1. Malyshev, V.I. Stanovlenie i razvitie nauki o rezanii materialov. Tol'iatti: Izdatel'stvo TGU, 2015. – 508 s.
2. Khramov, A.V. Osobennosti importozameshcheniia metallorazhushchego instrumenta v sovremennykh usloviakh / A.V. Khramov, I.V. Semdiankin, E.S. Ki-selev i dr. // STIN, 2016, №1, s. 21-26.
3. Malyshev, V.I. Tekhnologiiia izgotovleniia rezhushche-go instrumenta. Tol'iatti: Izdatel'stvo TGU, 2013. – 368 s.
4. Borovskii, G.V. Spravochnik instrumental'shchika / G.V. Borovskii, S.N. Grigor'ev, A.R. Maslov. - M. Mashinostroenie, 2005. - 464 s.
5. Vereshchaka, A.S. Rezanie materialov: Uchebnik / A.S. Vereshchaka, B.S. Kushner. - M.: Vysshaia shkola, 2009. - 535 s.
6. Rabochie protsessy vysokikh tekhnologii v mashinostroenii: Uchebnoe posobie // Pod red. A.I. Grabchenko. - Khar'kov: KhGPU, 1999. - 436 s.
7. Spravochnik po tekhnologii rezaniia metallov. V 2-kh kn./Per. s nem. Pod red. Iu.M. Solomentseva. - M.: Mashinostroenie, 1985. - 616 s.
8. Kiselev E.S. Povyshenie kachestva tverdosplavnykh instrumentov i detalei putem sozdaniia za-dannogo urovnia ostatochnykh napriazhenii v po-verkhnostnom sloe / E.S. Kiselev, M.V. Nazarov //Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universi-teta, 2015, №2(32-2), s.81- 86.
9. Stepanov Iu.S. Metody poiskovogo konstruiro-vaniia tekhnologicheskoi osnastki / Iu.S. Stepanov, Shchukin A.E. Orel: Orlovskii filial Moskovsko-go instituta priborostroeniia, 1993. 146 s.
10. Granovskii G.I. Rezanie metallov: Uchebnik / G.I. Granovskii, V.G. Granovskii. - M.: Vysshaia shko-la, 1985. - 304 s.
11. Vasin S.A. Rezanie metallov: Termomekhaniche-skii podkhod k sisteme vzaimosviazei pri rezanii: Uchebnik / S.A. Vasin, A.S. Vereshchaka, B.S. Kush-ner. - M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2001. - 448 s.
12. Getting to know special steel. Special metallurgy / R. Ebner, P. Hellman, F. Kooch, R. Pontu Sgargi, A. Schidler. - Milano: Edizioni sipiel, 2005. - P.135.
13. Gerhard Ihle Hartmetalle + Werkzeuge e. K. [Elektronnyi resurs]. - URL: <http://www.ihle.com/main/index.phplang=en> (data obrashcheniia 12.10.2010).
14. LMT Boehlerit [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.boehlerit.at> (data obrashcheniia 12.10.2010).
15. Precision Carbide Tools Ltd [Elektronnyi resurs]. - URL: <http://www.precision-carbide.com> (data obrashcheniia 12.10.2010).

УДК 621.923

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Э.Э. Ягьяев<sup>1</sup><sup>1</sup> ГБОУ ВО «Крымский инженерно-педагогический университет», г. Симферополь, Российская Федерация

### Аннотация

В статье рассмотрена подсистема корректора в системе мониторинга технологического процесса шлифования на основе анализа динамики изменения выходных переменных и параметров состояния технологической системы. Ставится и решается задача поиска отклонений параметров состояния системы по известным изменениям выходных переменных. Предложена методика математического описания и анализа системы мониторинга процессом шлифования. Данный процесс имеет четко выраженные периоды квантования, изменения каждого параметра технологической системы имеют свои частотные, скоростные и временные характеристики. Для анализа технологической системы процесса шлифования можно использовать метод Z-преобразования передаточной функции, что позволит обеспечить высокую эффективность процесса шлифования и возможность ее применения в автоматизированном производстве. Применение Z-преобразования позволяет отразить основные операции цифровой обработки сигналов: задержки на определенное число тактов, умножения отсчетов сигнала на весовые коэффициенты и сложения.

**Ключевые слова:** мониторинг, диагностика, управление, шлифование, алгоритм, корректор Z-преобразование.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE MONITORING PROCESS FINISH GRINDING ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF DYNAMICS OF CHANGE OF THE OUTPUT VARIABLES

E.E. Yagyaev<sup>1</sup><sup>1</sup> Crimean Engineering and Pedagogical University, Russian Federation

### Abstract

The article describes subsystem corrector in the grinding process' monitoring system on the basis of the output variables change dynamics analysis and parameters of the technological system's state. The block diagram of a correction subsystem and a hierarchical diagram of corrections structure are depicted. Problems of parameters deviations search from the known state of the system changes with output variables are formulated and solved. The type of correction is installed in the decision module, the necessity of its implementation is assessed. Grinding process is characterized as signs of discrete and continuous systems. There is a powerful, well-studied mathematical apparatus constructed on the basis of the Laplace transform for continuous systems. But the application of this transformation to the digital system is impossible. To analyze the technological process of grinding the method of Z-transformation of the transfer function, which will ensure high efficiency of the grinding process and the possibility of its use in automated production, can be used. Z-transformation application allows reflecting the basic operations of digital signal processing: delay for a certain number of cycles, the multiplication of signal samples to weights and addition.

**Keywords:** monitoring, diagnosis, management, grinding, algorithm, corrector, Z-transformation.

### Введение

Машиностроительное производство предъявляет повышенные требования к стабильности, качеству и точности обработанных изделий. Качество готовой продукции определяется технологическим процессом,

который должен обладать высокой степенью надежности и гарантированно обеспечивать заданные параметры изготавливаемых деталей. Важной составляющей технологического процесса является автоматизированное технологическое оборудование.

В современных шлифовальных станках с ЧПУ функции регулятора или корректи-

рующего устройства выполняет ЭВМ. Они имеют решающее значение в управлении технологическими процессами, в которых совместная работа ЭВМ и исполнительного устройства обеспечивает выполнение ответственных операций. Одним из направлений обеспечения качества изготовления деталей на операциях круглого наружного шлифования является применение системы мониторинга процесса резания и технологического оборудования. Это в свою очередь требует математического описания системы мониторинга операции шлифования на основе анализа скоростных параметров изменения выходных переменных.

Существует множество методов диагностики и управления, обеспечивающих максимальную производительность и качество изготовления деталей.

В числе первых были системы диагностики и адаптивного управления, разработанные под руководством Б. С. Балакшина [1] и получившие дальнейшее развитие в работах [2–8] и других исследователей.

Несмотря на значительный объем работ в этой области существующие методы не полностью учитывают особенности технологического процесса шлифования. Это связано с большим влиянием на производительность и качество параметров технологической системы, изменяющихся в процессе обработки.

Исследования в области теории абразивной обработки, достаточная изученность динамики круглошлифовальных станков, развитие теории точности, а также возможности современной вычислительной техники создали предпосылки для дальнейшего совершенствования математических моделей, методов расчета и управления процессом шлифования.

Компьютерные системы управления нашли широкое применение в шлифовальных станках с ЧПУ. За последние десять лет быстродействие и производительность ЭВМ, входящих в состав систем управления, используемых в промышленности, значительно выросло. Стоимость ЭВМ и логических элементов, входящих в их состав, уменьшилось по экспоненте. Это позволило автома-

тизировать многие производственные процессы, используя ЭВМ непосредственно в системе управления.

При применении цифровых систем управления имеется ряд преимуществ:

повышенная точность измерений;

использование цифровых сигналов (кодов), датчиков, преобразователей, и микропроцессоров;

меньшая чувствительность к шумам и помехам;

возможность легко менять алгоритм управления в программном обеспечении.

Использование цифровых сигналов дает возможность использовать большое количество цифровых устройств и коммуникаций, которые способны эффективно измерять, передавать сигналы и связывать между собой различные системы.

Анализ экспериментальных данных, выполненный в работе [9–10], показывает, что изменения каждого параметра технологической системы имеют свои частотные, скоростные и временные характеристики. Они не образуют непрерывного спектра и достаточно хорошо различимы при наличии контроля динамики выходных переменных операций шлифования.

Имея данные по динамике выходных переменных, всегда возможно определить вид возмущения и изменения технической системы и ввести коррекцию в управление процессом обработки, а также рассчитать интервалы времени, через которые необходимо учитывать те или иные изменения технологической системы.

## Результаты и обсуждение

Поскольку рассматриваемый нами процесс шлифования имеет четко выраженные периоды квантования, рассмотренные согласно работе [11], необходимо предложить метод математического описания и анализа системы мониторинга и управления.

Цель работы – разработка методики математического описания и структуры корректирующей подсистемы в системе мониторинга процесса круглого наружного шли-

фования на основе анализа скоростных параметров изменения выходных переменных.

Изложение основного материала. Для построения эффективной системы мониторинга необходимо разработать научное обоснование технических решений, а также методологию системы и принципы ее функционирования.

В соответствии с разработанной в работе [12] функциональной схемой системы диагностики и управления рис. 1 основными задачами корректора являются изменения управления при закономерных или случайных отклонениях параметров технологической системы от прогнозируемых. Алгоритм работы корректирующей системы рассмотрен на рис. 2

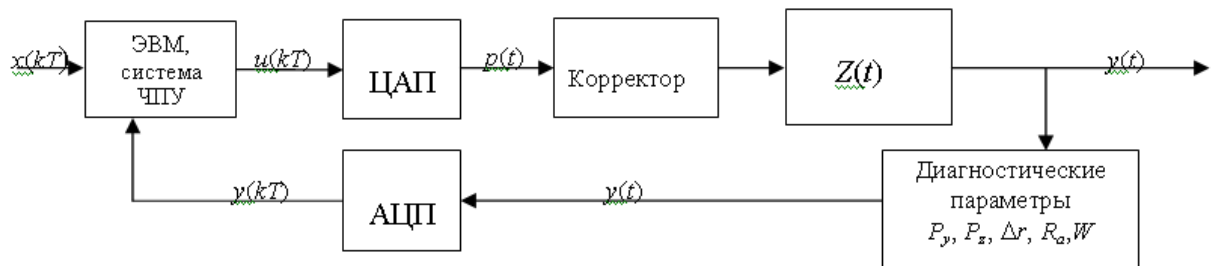


Рис. 1. Функциональная схема цифровой системы мониторинга и управления круглошлифовального станка с коррекцией цикла

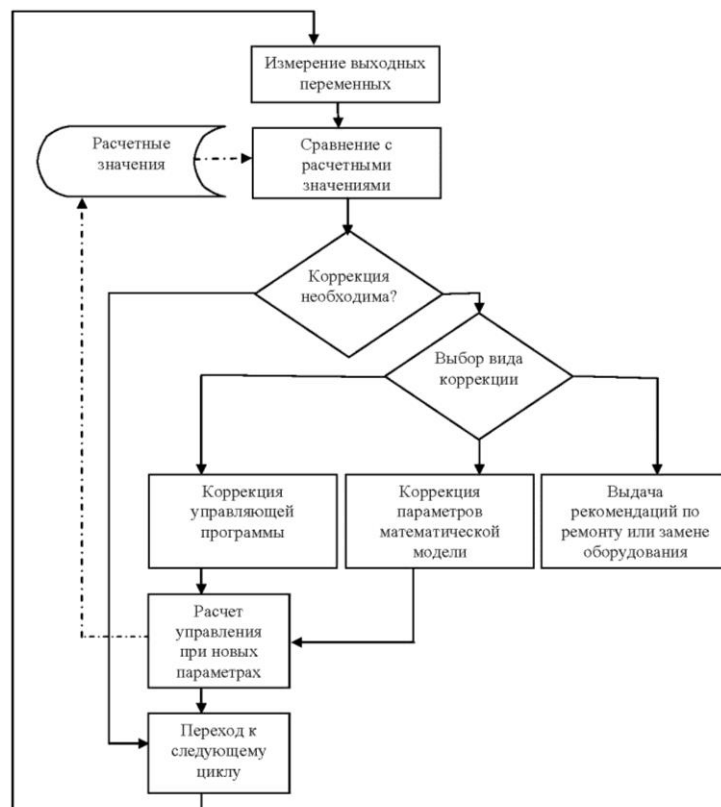


Рис. 2. Блок-схема корректирующей системы операции шлифования

Он включает в себя следующие модули: обнаружение отклонений выходных переменных от прогнозируемых; выявление причин отклонений; принятие решения о необходимости проведения и вида коррекции; коррекции параметров цикла шлифования;

коррекции математической модели; коррекции одной из подсистем.

При разработке корректора предполагается, что система автоматизированной технологической подготовки производства обеспечивает проектирование циклов шли-

фования с учетом изменений, возникающих в технологической среде. Вопросы проектирования циклов рассматриваются в выполняемых исследованиях в соответствии с имеющимися рекомендациями [13], они вычисляются методом покоординатного спуска по быстродействию. Необходимость модуля выявления отклонений выходных переменных вызвана наличием возмущающих воздействий, в результате которых выходные переменные являются случайными величинами. Задача сводится к оценке отклонений вектора наблюдаемых значений выходных переменных от вектора прогнозируемых методами математической статистики и теории случайных процессов. В общем, виде запишем:

$$|\Delta Y| = |Y(t) - Y(t)| \geq |\Delta Y_{\text{пор}}|, \quad (1)$$

где  $Y(t)$  – наблюдаемые значения выходных переменных;

$Y(t)$  – прогнозируемые значения выходных переменных;

$\Delta Y_{\text{пор}}$  – пороговый уровень обнаружения отклонений.

Задача обнаружения отклонений осложняется большой задержкой во времени результатов обработки и получения необходимой для анализа информации, что связано со сложностью ее накопления непосредственно на рабочем месте. Например, размер обработанной поверхности может быть определен прибором активного контроля на станке или сразу же после обработки. Измерения же шероховатости, эксцентриситета, волнистости поверхности производятся на специальных установках в лабораторных условиях.

Модуль выявления причин отклонений выходных переменных от прогнозируемых является одним из наиболее сложных. Ставится и решается задача поиска вектора отклонений  $\Delta Z$  по известному вектору  $\Delta Y$ :

$$\Delta Y \rightarrow \Delta Z. \quad (2)$$

В модуле принятия решения устанавливается вид коррекции и производится оценка необходимости ее проведения. Структура процедуры принятия решения о виде коррекции поясняется иерархической схемой на рис. 3.

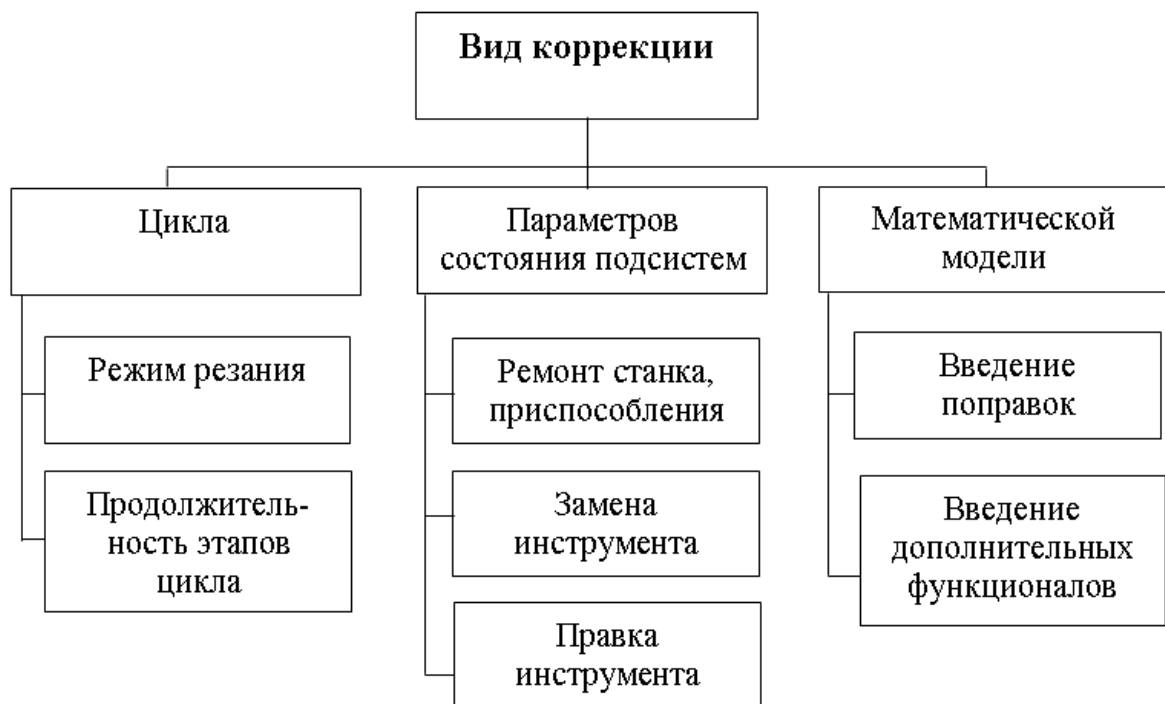


Рис. 3. Иерархическая схема структуры коррекций

Вид коррекции устанавливается на основе анализа вектора отклонений  $\Delta Z$ . При оценке необходимости проведения коррекции возможны две ситуации. Если отклонения  $\Delta Y$  выходят за пределы допустимых техническими требованиями, то коррекция, безусловно, должна быть проведена. Если отклонения  $\Delta Y$  не выходят за пределы допустимых, то коррекция выполняется, если затраты на ее осуществление оказываются меньше прибыли, получаемой при проведении коррекции, что может быть выражено соотношением:

$$K(\Delta Z) = \begin{cases} 1, C_z > C_{\text{кор}} \\ 0, C_z \leq C_{\text{кор}} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{кор}}$  и  $C_z$  – соответственно, стоимость коррекции и прибыль, получаемая в результате ее проведения.

Коррекция параметров цикла может проводиться как при настройке системы на обработку партии заготовок, так и в процессе обработки. Коррекция математической модели может быть выполнена только после накопления достаточного объема информации о процессе при эксплуатации системы или в результате ее специальных испытаний.

Процессу шлифования свойственны как признаки дискретных, так и непрерывных систем. Существует мощный, хорошо изученный математический аппарат, построенный на базе преобразования Лапласа для непрерывных систем. Но применение этого преобразования к дискретным системам невозможно.

Для анализа технологической системы процесса шлифования можно использовать метод  $Z$ -преобразования передаточной функции [14-15], что позволит достаточно просто определить характеристики системы управления, в которой функции регулятора или корректирующего устройства выполняет ЭВМ. На рис. 1 приведена функциональная схема цифровой системы мониторинга и управления круглошлифовального станка с коррекцией цикла. В цифровой системе управления ЭВМ получает и обрабатывает сигнал в цифровом (численном) виде, а не в виде непрерывной переменной. Преобразование непрерывного выходного аналогового

сигнала  $y(t)$ , полученного от диагностических датчиков, осуществляет аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Выходной дискретный управляющий сигнал  $u(kT)$  от компьютера (цифровой) преобразуется в непрерывный аналоговый сигнал  $p(t)$  с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Переменные  $x(kT)$ ,  $y(kT)$  и  $u(kT)$  являются дискретными сигналами, а  $y(t)$  и  $p(t)$  – непрерывными функциями времени.

Дадим математическое описание процесса цифровой обработки сигналов, основанного на представлении их в виде функции дискретного времени:

$$y(0), y(1), y(2), y(3), \dots y(k), \quad (4)$$

где индексы 0, 1, 2, 3, ...  $k$  имеют смысл текущего времени.

Если указать значение периода квантования  $T$  непрерывного выходного сигнала  $y(t)$ , то устанавливается однозначная связь между этим сигналом и числовой последовательностью. При этом каждое число последовательности  $y(k)$  равно значению непрерывного сигнала в момент времени  $t = kT$ :

$$y(t) = y(kT). \quad (5)$$

Это равенство показывает, что одной и той же последовательности  $y(k)$  соответствуют различные непрерывные сигналы, отличающиеся только масштабом по оси времени.

Поскольку выходной квантованный сигнал  $y^*(t)$  представляет собой последовательность импульсов с амплитудами  $y(kT)$ , то его можно описать выражением

$$y^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT) \delta(t - kT), \quad (6)$$

где  $y(t)$  существует для  $t > 0$ .

Преобразовав по Лапласу выражение (3), получим:

$$L\{y^*(t)\} = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT) e^{-ksT} \quad (7)$$

Это выражение представляет собой бесконечный ряд по степеням члена  $e^{-sT}$ .

Введем комплексную переменную

$$z = e^{sT}, \quad (8)$$

которая осуществляет конформное отображение с  $s$ -плоскости на  $z$ -плоскость.

Тогда можем определить новое преобразование, называемое  $Z$ -преобразованием:

$$Z\{y(t)\} = Z\{y^*(t)\} = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)z^{-k}. \quad (9)$$

В общем случае будем определять  $Z$ -преобразование функции как

$$Z\{y(t)\} = Y(z) = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)z^{-k}. \quad (10)$$

Из выражения (7) следует, что при помощи  $Z$ -преобразования мы получили из дискретной последовательности  $y(kT)$  непрерывную функцию  $Y(z)$ . При этом  $Y(z)$  – это не просто функция, а функция комплексного переменного. То есть  $Y(z)$  определена на комплексной плоскости  $z$ , и значения  $Y(z)$  – тоже комплексные величины.

Данное преобразование называется прямым. Существует и обратное  $Z$ -преобразование, когда из функции комплексного переменного  $Y(z)$  может быть получена исходная последовательность  $y(kT)$ .

Прямое и обратное  $Z$ -преобразование:

$$\begin{aligned} Z\{y(t)\} &= Y(z), \\ y(t) &= Z^{-1}\{Y(z)\}. \end{aligned} \quad (11)$$

$Z$ -преобразование позволяет отразить основные операции цифровой обработки сигналов: задержки на определенное число тактов, умножения отсчетов сигнала на весовые коэффициенты и сложения.

Для дальнейшего анализа сигналов и дискретных цепей рассмотрим важные свойства  $Z$ -преобразования.

**Свойство линейности.** Если последовательности  $x(n)$  соответствует  $Z$ -преобразование  $X(z)$ , а последовательности  $y(n)$  соответствует  $Z$ -преобразование  $Y(z)$ :

$$\begin{aligned} x(n) &\leftrightarrow X(z) \\ y(n) &\leftrightarrow Y(z), \end{aligned} \quad (12)$$

то суперпозиции этих последовательностей соответствует суперпозиция их  $Z$ -преобразований:

$$ax(n) + by(n) \leftrightarrow aX(z) + bY(z), \quad (13)$$

где  $a$  и  $b$  – матрицы коэффициентов.

**Свойство задержки сигнала на целое число периодов дискретизации.** Если после-

довательности  $x(n)$  соответствует  $Z$ -преобразование  $X(z)$ , то такой же последовательности, но сдвинутой на  $k$  отсчетов в сторону запаздывания соответствует  $Z$ -преобразование  $z^{-k}X(z)$ :

$$x(n-k) \leftrightarrow z^{-k}X(z). \quad (14)$$

Следовательно, задержка последовательности приводит к умножению ее  $Z$ -преобразования на  $z^{-k}$ .

**Свойство свертки последовательностей – эквивалент интеграла наложения для аналоговых цепей.** Если последовательности  $x(n)$  соответствует  $Z$ -преобразование  $X(z)$ , а последовательности  $y(n)$  соответствует  $Z$ -преобразование  $Y(z)$ , то дискретной свертке последовательностей  $x(n)$  и  $y(n)$  соответствует произведение их  $Z$ -преобразований:

$$x(n) \times y(n) \leftrightarrow X(z)Y(z). \quad (15)$$

## Выводы

Таким образом, для обеспечения максимальной эффективности мониторинга необходима корректирующая подсистема, включающая в себя следующие модули: обнаружение отклонений; выявление причин отклонений; принятие решения о необходимости проведения и вида коррекции; коррекции математической модели; восстановление эксплуатационных свойств одной из подсистем. Разработанная структура корректирующей подсистемы обеспечивает адаптацию системы диагностики и управления при изменении объекта производства и свойств технологической среды.

Подсистемы шлифовального станка и процесса шлифования имеют различные периоды квантования, поэтому при построении цифровых систем мониторинга и управления возникает задача определения частоты квантования каждой из имеющихся подсистем.

Применение математического аппарата теории дискретных систем  $Z$ -преобразования позволяет решить задачи анализа устойчивости и качества систем мониторинга и управления процессом шлифования.

За период квантования ЭВМ способна сформировать выходной сигнал системе управления, который затем используется корректирующим устройством для управления процессом шлифования.

## Список литературы

1. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 358 с.
2. Базров Б. М. Повышение точности деталей путем управления процессом их обработки / Б. М. Базров // Машиностроитель. – 1979. – № 3 – С. 11–12.
3. Подураев В. Н. Технология физико-механических методов обработки / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
4. Михелькевич В. Н. Автоматическое управление шлифованием / В. Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
5. Соломенцев Ю. М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, К. В. Рыбкин, В. А. Тимерязев. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
6. Петраков Ю. В. Теория автоматического управления технологическими системами / Ю. В. Петраков, О. И. Драчев. – М.: Машиностроение, 2009. – 336 с.
7. Пуховский Е. С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства / Е. С. Пуховский. – К.: Вища школа, 1989. – 240 с.
8. Игнатьев А. А. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А. А. Игнатьев, М. В. Виноградов, В. В. Горбунов и др. – Саратов: СГТУ, 2004. – 124 с.
9. Новоселов Ю. К. Диагностика операций чистового шлифования по динамике изменения выходных переменных и параметров состояния технологической системы / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев, Н. Р. Кириенко // Вестник Севастопольского национального технического университета: сборник научных трудов. Вып. 107. – Севастополь, 2010. – С. 170–173.
10. Ягьяев Э. Э. Диагностика процесса шлифования по динамике изменения выходных переменных. / Э. Э. Ягьяев, Л. Б. Шпрон // Technologia i Automatyzacja Montażu – zespołów, maszyn i urządzeń. ISSN 1230-7661. Nr 2(80) – Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Warszawa, 2013. – 60с., стр.53-57.
11. Ту Ю. Современная теория управления / Ю. Ту. – М.: Машиностроение, 1971. – 472 с.
12. Ягьяев Э. Э. Система диагностики и управления процессом шлифования с коррекцией цикла обработки / Э. Э. Ягьяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 35. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2012. – С. 71–75.
13. Новоселов К. Ю. Анализ возмущений при обработке заготовок на станках с ЧПУ / К. Ю. Новоселов // Оптимизация производственных процессов: научно-технический сборник. Выпуск. 6. – Севастополь, 1997. – С. 87–93.
14. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; [пер. с англ. Б. И. Копылова]. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
15. Ушаков А.В., Вундер (Полинова) Н.А./ Современная теория управления: Учебное пособие для университетов / Под ред. А. В. Ушакова -СПб.: Университет ИТМО, 2015. 182 с., 43 ил.

## References

1. Balakshin B. S. Osnovy tehnologii mashino-stroeniya / B. S. Balakshin. – M.: Mashinostroyeniye, 1969. – 358 s.
2. Bazrov B. M. Povyisheniye tochnosti detaley putem upravleniya protsessom ih obrabotki / B. M. Bazrov // Mashinostroyitel. – 1979. – № 3 – S. 11–12.
3. Poduraev V. N. Tehnologiya fiziko-mehaniche-skih metodov obrabotki / V. N. Poduraev. – M.: Mashinostroyeniye, 1988. – 264 s.
4. Mihelkevich V. N. Avtomaticheskoye upravleniye shlifovaniyem / V. N. Milkevich. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 304 s.
5. Solomentsev Yu. M. Adaptivnoye upravleniye tehnologicheskimi protsessami / Yu. M. Solomentsev, V. G. Mitrofanov, K. V. Ryibkin, V. A. Timeryazev. – M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 536 s.
6. Petrakov Yu. V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tehnologicheskimi sistemami / Yu. V. Petrakov, O. I. Drachev. – M.: Mashinostroyeniye, 2009. – 336 s.
7. Puhovskiy E. S. Tehnologicheskie osnovy gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva / E. S. Puhovskiy. – K.: Vischa shkola, 1989. – 240 s.
8. Ignatev A. A. Monitoring stankov i pro-tsessov shlifovaniya v podshipnikovom proizvodstve / A. A. Ignatev, M. V. Vinogradov, V. V. Gorbunov i dr. – Saratov: SGTU, 2004. – 124 s.
9. Novoselov Yu. K. Diagnostika operatsiy chis-tovogo shlifovaniya po dinamike izmeneniya vyihod-nyih peremennyih i parametrov sostoyaniya tehnologicheskoy sistemy / Yu. K. Novoselov, E. E. Yagyaev, N. R. Kirienko // Vestnik Sevastopolskogo natsio-nalnogo tehnikeskogo universiteta : sbornik nauchnyih trudov. Vyip. 107. – Sevastopol, 2010. – S. 170–173.
10. YAg'yaev E. E. Diagnostika processa shlifova-niya po dinamike izmeneniya vyihodnyh peremennyih. / E. E. YAg'yaev, L. B. SHron // Technologia i Automatyzacja Montażu – zespołów, maszyn i urządzeń. ISSN 1230-7661. Nr 2(80) – Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Warszawa, 2013. – 60с., str. 53-57.
11. Tu Y. Sovremennaya teoriya upravleniya / Y. Tu. – M.: Mashinostroyeniye, 1971. – 472 s.
12. YAg'yaev E. E. Sistema diagnostiki i uprav-leniya processom shlifovaniya s korrekciey cikla obrabotki / E. E. YAg'yaev // Uchenye zapiski Krym-skogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vypusk 35. Tekhnicheskie nauki. – Simferopol': NIC KIPU, 2012. – S. 71–75.
13. Novoselov K. YU. Analiz vozmushcheniy pri obrabotke zagotovok na stankah s CHPU / K. YU. Novoselov // Optimizatsiya proizvodstvennyh processov: nauchno-tekhnikeskij sbornik. Vypusk. 6. – Sevastopol', 1997. – S. 87–93.
14. Dorf R. Sovremennye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop; [per. s angl. B. I. Kopylova]. – M.: Laboratoriya bazovyh znaniy, 2002. – 832 s.
15. Ushakov A.V., Vunder (Polinova) N.A./ Sovremen-naya teoriya upravleniya: Uchebnoye posobie dlya universitetov / Pod red. A. V. Ushakova -SPb.: Universitet ITMO, 2015. 182 s., 43 il.

УДК 621.993. 51–74

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИВЕДЕННОГО СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА ПРИ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ

А.С. Ямников<sup>1</sup>, А.О. Ямникова<sup>1</sup><sup>1</sup>ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация

### Аннотация

В статье описаны аналитические зависимости и методика определения составляющих силы резания на каждом зубе метчика с помощью известной методики определения сил резания по критериям подобия, разработанной С.С. Силиным и преобразованной для резания метчиками. Развита и дополнена теория В.В. Матвеева о том, что приведенный средний диаметр резьбы состоит из трех основных составляющих: производящего среднего диаметра метчика, погрешности параметра винтового движения и упругих деформаций детали. Показано, что кроме разбивания профиля резьбы вследствие действия неуравновешенных составляющих сил резания на метчик, будет образовываться накопленная погрешность шага, для определения диаметральной компенсации возникающей которой найдена аналитическая зависимость.

**Ключевые слова:** нарезание резьбы метчиками, метод критериев подобия, приведенный средний диаметр резьбы, диаметральная компенсация.

## ANALYTICAL DEFINITION OF ERRORS OF THE SPECIFIED AVERAGE DIAMETER WHEN CUTTING THE CARVING TAPS

A.S. Yamnikov<sup>1</sup>, A.O. Yamnikova<sup>1</sup><sup>1</sup>The FEDERAL IN Tula state University, Tula, Russian Federation

### Abstract

In article analytical dependences and a technique of definition of components of force of cutting on each tooth of a tap by means of the known technique of determination of forces of cutting by criteria of similarity developed by S. S. Silin and transformed for cutting by taps are described. V. V. Matveev's theory that the specified average diameter of a carving consists of three main components is developed and added: the making average diameter of a tap, an error of parameter of the screw movement and elastic deformations of a detail. It is shown that except dissecting of a profile of a carving owing to action unbalanced the making cutting forces on a tap, the saved-up step error, for definition of the diametrical compensation arising which has found analytical dependence will be formed.

**Keywords:** cutting of a carving of taps, a method of criteria of similarity, the specified average diameter of a carving, diametrical compensation.

### Введение

Для совершенствования конструкции метчиков и технологии их изготовления нужно установить связь между параметрами метчиков и погрешностью нарезаемой резьбы. Наилучшим вариантом следует считать аналитическое определение погрешностей при нарезании резьбы различными по конструкции метчиками.

Согласно теории В.В. Матвеева [1] и продолжателей его учения [2 – 8] приведен-

ный средний диаметр винтовой канавки состоит из трех основных составляющих: производящего среднего диаметра метчика, погрешности параметра винтового движения и упругих деформаций детали.

Под производящим средним диаметром метчика понимают некоторый условный размер, численно равный приведенному среднему диаметру резьбового отверстия, образованного метчиком при условии, что ось его во время работы неподвижна и параметр винтового движения выдерживается идеально. При этих условиях он будет зави-

сеть от точности изготовления собственно среднего диаметра метчика и отклонений от номинала шагов и углов профиля метчика. На основании ГОСТа на изготовление метчиков получим, погрешность производящего среднего диаметра метчика  $\Delta d_n^M$ , обусловленная погрешностями изготовления инструмента, составит от 10 до 15 % допуска на приведенный средний диаметр винтовой канавки. Из этого можно сделать вывод о том, что получение заданной точности возможно, если погрешность винтового движения и упругие деформации секторов не будут вносить в процесс значительных дополнительных погрешностей.

Для исследования погрешностей параметра винтового движения необходимо установить величины сил, возникающих при вырезании резьбового профиля. В работе В.В.Матвеева [1], рассматриваются в основном только составляющие суммарной силы резания, возникающие при работе метчиками. Определить составляющие силы резания на каждом режущем зубе по ним практически невозможно. Кроме этого все полученные зависимости являются эмпирическими и могут быть использованы только для условий, сходных с условиями эксперимента, то есть. ограничены обрабатываемыми материалами, типом резьбы, геометрическими параметрами инструмента и т.д.

При определении составляющих силы резания на отдельном режущем зубе принята расчетная схема со следующими допущениями [9 – 10]:

а) представление стружкообразования при нарезании резьбы как установившегося ламинарного процесса;

б) представление процесса резания на смежных участках лезвий как процесса свободного резания;

в) направление схода стружки определяется как суперпозиция сил от каждого режущего лезвия зуба метчика;

г) величины нормальных и касательных составляющих силы резания считаются пропорциональными площадям срезаемых слоев, а коэффициент трения и угол сдвига приняты постоянными по всей площади контакта со стружкой.

## Результаты и обсуждение

Система сил, действующих на контактные площадки режущих зубьев, показана на рис. 1.

Составляющие силы резания определяются по следующим зависимостям:

$$P_{ti} = N \cos \gamma_N \cos \lambda_\phi + F (\sin \eta \sin \lambda_\phi + \cos \eta \sin \gamma_N \cos \lambda_\phi) + F'; \quad (1)$$

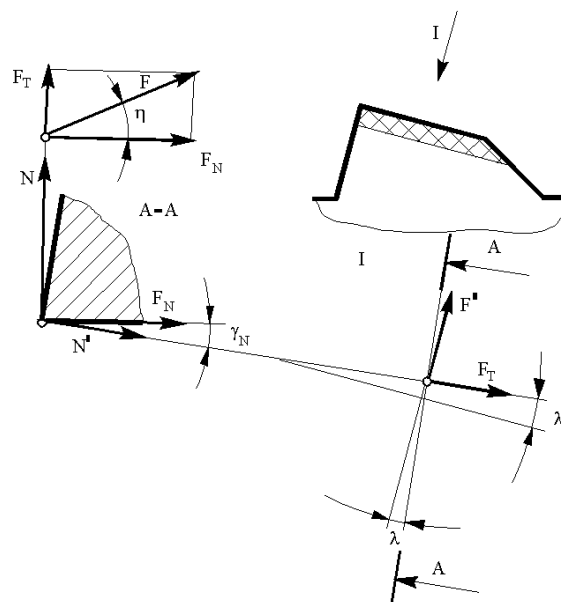


Рис. 1. Система сил, действующих на контактные площадки режущего зуба метчика

$$P_{ri} = F (\cos \eta \cos \gamma_N \cos \phi - \cos \eta \sin \gamma_N \times \sin \lambda_\phi \sin \phi + \sin \eta \cos \lambda_\phi \sin \phi) - N (\cos \gamma_N \sin \lambda_\phi \sin \phi + \sin \gamma_N \cos \phi) + N' \cos \phi; \quad (2)$$

$$P_{xi} = F (\cos \eta \cos \gamma_N \sin \phi + \cos \eta \sin \gamma_N \times \sin \lambda_\phi \cos \phi - \sin \eta \cos \lambda_\phi \cos \phi) + N (\cos \gamma_N \sin \lambda_\phi \sin \phi - \sin \gamma_N \sin \phi) + N' \sin \phi; \quad (3)$$

где  $\phi$  – угол заборного конуса инструмента;  $\gamma_N$  – передний угол режущего зуба, измеренный в плоскости, перпендикулярной главной режущей кромке;  $\lambda_\phi$  – угол наклона главной режущей кромки;

$$\operatorname{tg} \lambda_\phi = \operatorname{tg} \lambda \sin \phi \pm \operatorname{tg} \omega \cos \phi;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_N = (\operatorname{tg} \gamma \mp \operatorname{tg} \lambda_\phi \sin \phi) \cos \phi;$$

где  $\gamma$  – передний угол заточки инструмента, измеренный в плоскости, перпендикулярной оси метчика.

Для расчета составляющих силы резания по формулам (1)–(3) необходимо определить составляющие  $F$ ,  $N$ ,  $F'$ ,  $N'$  и угол схода стружки  $\eta$ .

Угол схода стружки  $\eta$  определяется по методике, предложенной проф. В.Ф. Бобровым [11 – 13]. В основе методики лежит следующее положение: среднее направление схода стружки по передней поверхности должно совпадать с направлением суммарной силы трения, являющей геометрической суммой сил трения, действующих на главной и вспомогательных режущих кромках инструмента, если бы эти кромки работали самостоятельно. Принимая величины сил трения на режущих кромках пропорциональными их длинам, получим

$$\eta = \lambda_{\varphi} + \Psi_2 - \Psi_1,$$

где

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Psi_1 &= \frac{\cos(\varphi + \alpha_1 - \lambda_{\varphi} + \lambda_1)}{\frac{l_{\varphi}}{l_1} + \sin(\varphi + \alpha_1 - \lambda_{\varphi} + \lambda_1)}; \\ \operatorname{tg} \Psi_2 &= \frac{\cos(\alpha_2 + \lambda_2 + \lambda_{\varphi} - \Psi_1)}{\frac{l'}{l_2} + \cos(\alpha_2 + \lambda_2 + \lambda_{\varphi} - \Psi_1)}; \end{aligned}$$

$$l' = \sqrt{l_{\varphi}^2 + l_1^2 - 2l_{\varphi}l_1 \sin(\Psi - \alpha_1)};$$

где  $l_{\varphi}$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  – длины соответственно главной и вспомогательных режущих кромок;  $\lambda_{\varphi}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – углы наклона соответственно главной и вспомогательных режущих кромок.

Силы  $F$ ,  $N$ ,  $F'$ ,  $N'$  определяются по зависимостям, предложенным проф. С.С. Силиным [9, 10].

$$F = \tau_p a_1 b_1 \left( \frac{\cos \gamma_N + \sin \gamma_N}{B} - \cos \gamma_N + \sin \gamma_N \right) / \cos(\gamma_{\varphi} - \gamma_N); \quad (4)$$

$$N = \tau_p a_1 b_1 \left( \frac{\cos \gamma_p + \sin \gamma_p}{B} - \cos \gamma_p + \sin \gamma_p \right) / \cos(\gamma_{\varphi} - \gamma_N), \quad (5)$$

где  $\gamma_N$  – передний угол режущего зуба метчика, измеренный в плоскости, перпендикулярной главной режущей кромке;  $\gamma_{\varphi}$  – передний угол режущего зуба метчика, измеренный в плоскости, проходящей через векторы сил  $N$  и  $F$ , и связанный с углом  $\gamma_N$  следующей зависимостью

$$\sin \gamma_{\varphi} = \frac{\sin \gamma_N}{\cos \eta} + \sin \eta \sin \lambda_{\varphi};$$

$B = \operatorname{tg} \beta_1$  – величина, характеризующая степень пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя обрабатываемой детали.

$$\begin{aligned} B &= ((PeB - 2) \operatorname{erf}(0,5\sqrt{PeB}) + \\ &+ 1,125\sqrt{PeB} \exp(-0,25PeB)) (PeB)^{-1/2} \times \\ &\times (\sqrt{Pe} + 0,325FD^{0,3}(1 - \sin \gamma)^{0,25})^{-1} + \\ &+ \frac{0,665 \operatorname{erf}(0,5\sqrt{PeB})}{\sqrt{PeB}} + \\ &+ \frac{0,145F^{0,8}D^{0,25} \operatorname{erf}(0,5\sqrt{PeB})}{Pe^{0,5}B^{0,2}(1 - \sin \gamma)^{0,95}} + \\ &+ PeB[\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)] \times \\ &\times (1 - \sin \gamma)^{0,4}(\cos \gamma + B \sin \gamma)^{-1} \times \\ &\times [Pe(1 - \sin \gamma)^{0,4} + 0,225FD^{0,3}]^{-1} - 1, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $Pe$ ,  $F$ ,  $D$  – безразмерные комплексы (критерии подобия), определяемые выражениями:

$Pe = Va_1/a$  – критерий Пекле, характеризующий степень влияния режимных условий процесса  $Va_1$ , по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала  $a$ ;  $F = \lambda_p \beta \varepsilon / \lambda$  – критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и отклонение теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов;  $D = a_1/b_1$  – критерий, характеризующий геометрию сечения среза.

Входящие в критерии  $Pe$ ,  $F$ ,  $D$  и в уравнение (6) параметры имеют следующие смысл и размерность:  $V$  – скорость резания, м/с;  $\lambda_p$  и  $\lambda$  – коэффициенты теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов, Дж/м×с×град;  $a = \lambda/c_p$  – коэффициент температуропроводности обра-

бываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $c_p$  – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/м<sup>3</sup>×град;  $\beta = \pi/2 - (\alpha + \gamma)$  – угол заострения режущего зуба метчика, рад;  $\alpha$  и  $\beta$  – задний и передний углы режущего зуба метчика, рад;  $\varepsilon = \alpha_1 + \alpha_2$  – угол режущего зуба метчика в плане, рад;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы профиля винтовой канавки, рад;

$\text{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$  – интеграл вероятности.

Сила  $F'$  определяется по формуле

$$F' = 0,625 \tau_p \rho_1 l_\Sigma \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}, \quad (7)$$

где  $\rho_1$  – радиус скругления режущей кромки;  $l_\Sigma$  – суммарная длина режущих кромок, участвующих в работе

$$l_\Sigma = l_\varphi + l_1 + l_2,$$

$\alpha$  – задний угол режущего зуба метчика.

Для нормальной силы  $N'$  на задней поверхности формула имеет вид

$$N' = \frac{F}{\mu} = 0,625 \frac{\tau_p \rho_1 l_\Sigma}{\mu} \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}, \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения на задней контактной площадке.

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\frac{\cos \gamma_N + \sin \gamma_N}{B} - \cos \gamma_N + \sin \gamma_N}{\frac{\cos \gamma_\varphi - \sin \gamma_\varphi}{B} + \cos \gamma_\varphi - \sin \gamma_\varphi}.$$

Определив силы резания на каждом режущем зубе метчика, можно найти составляющие суммарной силы резания, действующей на метчик во время работы (рис. 2).

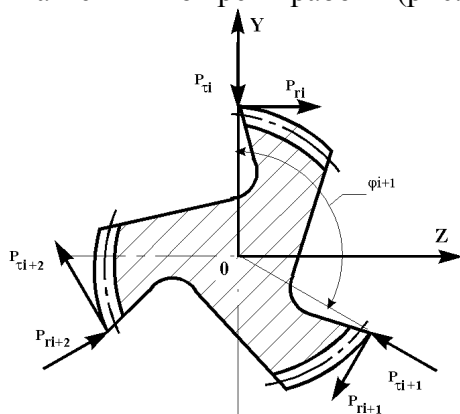


Рис. 2. Схема определения суммарных сил, действующих на метчик

$$P_{Y\Sigma} = -\sum_{i=1}^n P_{ri} \cos \varphi_i - \sum_{i=1}^n P_{ti} \sin \varphi_i; \quad (9)$$

$$P_{Z\Sigma} = -\sum_{i=1}^n P_{ri} \sin \varphi_i + \sum_{i=1}^n P_{ti} \cos \varphi_i; \quad (10)$$

$$P_{X\Sigma} = -\sum_{i=1}^n P_{xi}; \quad (11)$$

где  $i$  – порядковый номер режущего зуба метчика по винтовой линии;  $n$  – число режущих зубьев на заборном конусе метчика;  $\varphi_i$  – угловая координата  $i$ -го режущего зуба метчика, относительно первого режущего зуба, определяемая по формуле

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) (i-1),$$

где  $z$  – число режущих перьев метчика;  $P$  – шаг резьбы,  $T_\omega$  – шаг винтовой стружечной канавки метчика.

В формуле знак (+) соответствует правому направлению стружечных канавок, знак (–) – левому. Зная величины составляющих суммарной силы резания, переходим к определению погрешностей, вызванных действием этих сил. Определение погрешности приведенного среднего диаметра, связанной с погрешностью параметра винтового движения будем производить отдельно в плоскости, перпендикулярной оси детали (погрешность собственно среднего диаметра  $\Delta I_R^M$ ), и вдоль оси детали (диаметральная компенсация накопленной погрешности шага винтовой канавки  $\Delta I_L^M$ ).

Под действием суммарной радиальной составляющей силы резания  $P_r = \sqrt{P_{Y\Sigma}^2 + P_{Z\Sigma}^2}$  будет происходить смещение инструмента по радиусу от центра (рис. 3).

При этом будет изменяться толщина срезаемого слоя на отдельных режущих зубьях инструмента до тех пор, пока не установится силовое равновесие.

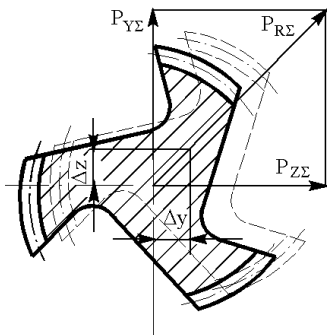


Рис. 3. Схема определения радиального смещения метчика от действия некомпенсированной радиальной силы резания

Принимая изменение радиальной и тангенциальной составляющих силы резания на отдельных зубьях метчика пропорциональными изменению толщины срезаемого слоя, получим следующие зависимости для определения величины смещения инструмента от действия некомпенсированной радиальной составляющей суммарной силы резания

$$r = \left( P_{Y\Sigma}^2 + P_{Z\Sigma}^2 \right) \left( A_1 P_{Y\Sigma} + A_2 P_{Z\Sigma} \right)^2 + \left( A_3 P_{Y\Sigma} + A_4 P_{Z\Sigma} \right)^2 \cos^{-1} \varphi, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \sum_{i=1}^n \frac{P_{ri}}{a_i} \cos^2 \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{ti}}{a_i} \sin \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \times \right. \\ &\times \cos \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \Bigg); \\ A_2 &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{ri}}{a_i} \sin \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \times \right. \\ &\times \cos \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \Bigg) + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{P_{ti}}{a_i} \sin^2 \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A_3 &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{ri}}{a_i} \sin \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \times \right. \\ &\times \cos \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \Bigg) + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{P_{ti}}{a_i} \cos^2 \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right); \\ A_4 &= \sum_{i=1}^n \frac{P_{ri}}{a_i} \sin^2 \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{ti}}{a_i} \sin \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \times \right. \\ &\times \cos \left( \frac{2\pi(i-1)}{z} \left( 1 \pm \frac{P}{T_\omega} \right) \right) \Bigg). \end{aligned}$$

Погрешность собственно среднего диаметра составит  $\Delta IT_R^M = 2(r_{\max} - r_{\min})$ .

Под действием осевой составляющей суммарной силы резания будет происходить смещение метчика в сторону действия этой силы. При этом боковые режущие кромки зубьев заборного конуса и калибрующей части будут срезать дополнительные слои металла, подрезая профиль резьбы, а ведущие зубья, вступая в контакт с готовым профилем винтовой канавки, упруго деформировать его. В период установившегося резания метчик будет перемещаться с шагом  $P_k$ , меньшим его собственного шага  $P_m$ . В этом случае смещение каждого последующего зуба относительно предыдущего составит  $\Delta_{oc} = (P_m - P_k)/z$ . После прохождения всех режущих зубьев через определенный виток канавки профиль ее будет иметь вид, представленный на рис. 4.

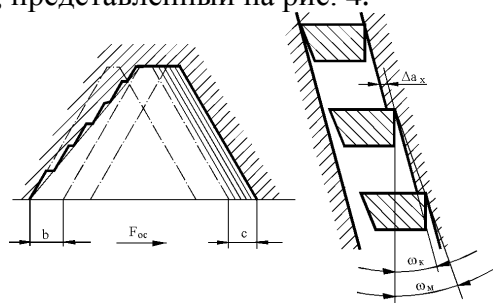


Рис. 4. Определение погрешности в осевом направлении

Величина  $b$  представляет собой погрешность профиля, образованную зубьями заборного конуса инструмента, а величина  $c$  – разбивание профиля канавки зубьями калибрующей части. Погрешность приведенного среднего диаметра, определяемая разбиванием профиля винтовой канавки, может быть вычислена по зависимости

$$\Delta P_d = \Delta a_{oc} \left[ \frac{k}{tg\alpha_1} + \frac{2(m-k)}{tg\alpha_2} \right], \quad (14)$$

где  $k$  – число режущих зубьев на заборном конусе инструмента;  $m$  – число режущих и калибрующих зубьев на рабочей части метчика.

Но как отмечалось выше, метчик может подрезать профиль канавки лишь в том случае, если он перемещается с шагом, меньше его собственного.

Поэтому кроме разбивания профиля канавки будет образовываться погрешность шага. Диаметральную компенсацию возникающей накопленной погрешности шага можно определить по зависимости

$$\Delta P_p = \frac{2\Delta a_{oc} zL}{P(tg\alpha_1 + tg\alpha_2)}, \quad (15)$$

где  $L$  – длина резьбы.

Общая величина погрешности, вызванной неточностью перемещения метчика по шагу, определится по формуле

$$\Delta P_L^m = \Delta a_{oc} \left( \frac{k}{tg\alpha_1} + \frac{2(m-k)}{tg\alpha_2} + \frac{zL}{tg\alpha_1 + tg\alpha_2} \right). \quad (16)$$

Таким образом, чтобы найти погрешность параметра винтового движения от погрешности шага, необходимо определить величину  $\Delta a_{oc}$ .

Перемещаясь с шагом, меньше своего собственного, режущие зубья метчика будут срезать с боковых сторон профиля канавки слои металла. Возникающая при этом осевая составляющая силы резания определится по формуле

$$F_{ocp} = \frac{(\Delta a_{oc} \cos \alpha_2 + k_1 k_2) \cos \alpha_2}{k_1} \times \left[ \sum_{i=2}^k l_{2i} + (m-k)l_{2k} \right], \quad (17)$$

где  $l_{2i}$  – длина боковой режущей кромки на зубьях заборного конуса;  $l_{2k}$  – длина боковой режущей кромки на зубьях калибрующей части;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала.

Ведущие зубья, вдавливаясь в боковую поверхность винтовой канавки, также будут создавать осевую силу, которая определяется зависимостью

$$F_{ocв} = 1,51 \cos \alpha_2 \sqrt{GR} \times \sum_{i=m+1}^n \sqrt{\left[ \left( \Delta a_{oc} - \frac{\Delta_1}{2} tg\alpha_2 \right) \sin \alpha_2 \right]^3}, \quad (18)$$

где  $n$  – общее число зубьев на рабочей части метчика;  $G$  – модуль сдвига материала детали;  $R$  – радиус скругления опорной площадки ведущего элемента;  $\Delta_1$  – величина перепада между диаметрами режущих и калибрующих зубьев.

Возникающие дополнительные осевые составляющие от силы резания  $F_{ocp}$  при срезании дополнительных слоев металла с боковых сторон профиля канавки и от силы вдавливания ведущих элементов  $F_{ocв}$  должны уравновесить осевую составляющую от суммарной силы резания  $P_{\Sigma}$

$$P_{\Sigma} = \frac{(\Delta a_{oc} \cos \alpha_2 + k_1 k_2) \cos \alpha_2}{k_1} \times \left[ \sum_{i=2}^k l_{2i} + (m-k)l_{2k} \right] + 1,51 \cos \alpha_2 \sqrt{GR} \times \sum_{i=m+1}^n \sqrt{\left[ \left( \Delta a_{oc} - 0,5\Delta_1 tg\alpha_2 \right) \sin \alpha_2 \right]^3}. \quad (19)$$

## Выводы

Решая полученное уравнение относительно  $\Delta a_{oc}$ , и подставляя эту величину в зависимость (16), получим значение погрешности приведенного среднего диамет-

ра, определяемую неточностью перемещения инструмента по шагу.

### Список литературы

1. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
2. Кузнецов В.П. Определение сил, действующих на режущую часть метчика / В.П. Кузнецов, А.С. Ямников, К.Н. Якунин [и др.] // Технология машиностроения. 1999, №0 (пилотный выпуск). С. 13–16.
3. Кузнецов В.П. Теория получения резьб в длинных нежестких деталях: Монография. Тул. гос. ун-т. Тула, 1999, 256 с.
4. Mirnov, I.Y., Malikov, A.A., Sandgarten, I.L., Yamnikov, A.S. Manufacture of thread-cutting tools with smoothing elements (2010) Russian Engineering Research 30 (7) PP. 742 – 744 doi: 10.3103/S1068798X10070245
5. Маликов А.А., Ямников А.С., Сандгартен И.Л. Устойчивость продольного перемещения метчиков с ведущими элементами относительно обрабатываемой резьбы / Известия ТулГУ, Технические науки, 2010. Вып. 1. С. 105–108.
6. Сандгартен И.Л., Маликов А.А., Ямников А.С. Метчики для нарезания трапецидальных резьб. Проектирование и технология изготовления / Монография, Изд-во Ламберт, ФРГ. 2012. 143 с.
7. Ямников А.С., Ямникова О.А. Экспериментальное определение силы резания при фрезоточении резьбы / Известия ТулГУ, Технические науки, 2015. Вып. 1. С. 82–93.
8. Ямников А.С., Красильников В.М., Моисеев Е.Ф. Метчики с ведущими элементами / Известия ТулГУ, 2014, Выпуск 11. Часть 1. С. 199–207.
9. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979, 152 с.
10. Силин С.С. Теоретическое определение параметров процесса резания. – В кн.: Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин. Межведомственный сборник научных трудов, № 6, Ярославль, изд-во Ярославского политехн. ин-та, 1977. С. 3–15.
11. Бобров В.Ф., Моисеев А.В. Определение окружного усилия при нарезании резьбы резцом. – Станки и инструмент. 1974, № 4. С. 25–27.
12. Бобров В.Ф. Многопроходное нарезание крепёжных резьб резцом. М.: Машиностроение, 1982. 104 с.

13. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975, 344 с.

### References

1. Matveev V. V. Cutting of exact carvings. – 2nd prod., reslave. and additional M.: Mechanical engineering, 1978. – 88 pages.
2. V.P. Kuznetsov. Determination of forces operating on the cutting part of tap / Accusative. Smiths, A. S. Yamnikov, K.N. Yakunin [etc.]/Technology of mechanical engineering. 1999, No. 0 (pilot release). Page 13–16.
3. V.P. Kuznetsov. The theory of receiving carvings in long nonrigid details: Monograph. Toole. state. un-t. Tula, 1999, 256 pages.
4. Mirnov, I.Y., Malikov, A.A., Sandgarten, I.L., Yamnikov, A.S. Manufacture of thread-cutting tools with smoothing elements (2010) Russian Engineering Research of 30 (7) PP. 742 – 744 doi: 10.3103/S1068798X10070245.
5. Malikov A.A., Yamnikov A.S., Sandgarten I.L. Ustoychivost of longitudinal movement of taps with the leading elements concerning TULGU processed carvings / News, Technical science, 2010. Issue 1. Page 105–108.
6. Sandgarten I.L., Malikov A.A., Yamnikov A.S. Taps for cutting of trapezoidal carvings. Design and manufacturing techniques / Monograph, Publishing house Lambert, Germany. 2012. 143 pages.
7. Yamnikov A.S., Yamnikova O. A. Experimental determination of force of cutting at a frezotocheniye of carving / News of TULGU, Technical science, 2015. Issue 1. Page 82–93.
8. Yamnikov A.S., Krasilnikov V. M., Moiseyev E.F. Taps with the leading elements / Izvestiya TULGU, 2014, Release 11. Part 1. Page 199–207
9. Silin S. S. A similarity method when cutting materials. M.: Mechanical engineering, 1979, 152 pages.
10. Silin S. S. Theoretical determination of parameters of process of cutting. – In book: Productive processing and technological reliability of details of cars. Interdepartmental collection of scientific works, No. 6, Yaroslavl, publishing house Yaroslavl politehn. in-that, 1977. Page 3–15.
11. Bobrov V. F., Moises A.V. Definition of district effort when cutting a carving a cutter. – Machines and tool. 1974, No. 4. Page 25–27.
12. Bobrov V. F. Multipass cutting of fixing carvings cutter. M.: Mechanical engineering, 1982. 104 pages.
13. Bobrov V. F. Bases of the theory of cutting of metals. M.: Mechanical engineering, 1975, 344 pages.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов  
**Выпуск № 4 2016**

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Машиностроение и машиноведение (05.02.00)
- Информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00)
- Транспорт (05.22.00)
- Безопасность деятельности человека (05.26.00)
- Технология продовольственных продуктов (05.18.00)

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](mailto: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.

