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

№ 6(6)
2017

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» (11 – 15 сентября 2017 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 17-08-20448)*

Севастополь 2017

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

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. (г. Севастополь)
МЕШКОВ В.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, 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. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СЕВРИКОВ В.В.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ФИЛИПОВИЧ О.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ХАРЧЕНКО А.О.	к. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Богущий В.Б., Шрон Л.Б. Определение глубины микрорезания при шлифовании со скрещенными в одной плоскости осями абразивного инструмента и заготовки	4
Бондарчук Н.Д., Феофанов А.Н., Бондарчук Е.Ю., Гришина Т.Г. Повышение конкурентоспособности предприятия с помощью современных методов управления	9
Бохонский А.И., Чалая Е.С., Шмидт Л.А. Компенсация перемещений, закрепленных в патроне и центре нежестких заготовок при токарной обработке	16
Гусаров А.В., Котобан Д.В., Жирнов И.В. Оптическая диагностика селективного лазерного плавления и контроль механизмов формирования единичного валика	21
Козлов А.А., Шарапов С.И. Влияние магнитного поля на формирование выпуклых знаков из реологической жидкости под диэлектрическим покрытием	30
Косарев В.А., Ходакова Е.В., Литвинчук Д.П. Исследование планетарной обработки отверстий в деталях способом ППД	35
Левченко Е.А. Методика расчета параметров боковых поверхностей отрезных кругов при абразивной резке.	39
Леонов С.Л., Иконников А.М., Силивакин В.С. Математическое моделирование процесса съема металла при магнитно-абразивной обработке.....	46
Максимов А.Б., Гадеев А.В., Ерохина И.С. Перспективы использования термически армированного проката в машиностроении.....	52
Сидоров В.А. Уравновешивание в опорах станков.....	56
Тарасов Ю.С., Радюк А.Г., Горбатюк С.М. Моделирование тепловых потерь и температуры воздушных фурм доменных печей.....	62

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.

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. (Sevastopol)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
VETROGON A.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
DUYUN T.A.	D.Sc., Prof. (Belgorod)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MESHKOV V.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NEMENKO A.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NICHKOVA L.A.	Ph.D., Associate Prof. (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. (Sevastopol)
KHARCHENKO A.O.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Bogutsky V.B., Shron L.B. Determination of the depth of microcutting at grinding with the crossed in the same plane as the axes of the abrasive tool and workpiece	4
Bondarchuk N.D., Feofanov A.N., Bondarchuk E.Y., Grishina T.G. Increase competitiveness of the enterprise with the help of modern management methods	9
Bokhonsky A.I., Chalaya E.S., Shmidt L.A. Compensation of nonrigid parts movements fixed in chuck and center during turning	16
Gusarov A.V., Kotoban D.V., Zhirnov I.V. Optical diagnostics of selective laser melting and monitoring of single-track formation	21
Kozlov A.A., Sharapov S.I. The influence of magnetic field on the formation convex marks from rheological fluid under a dielectric coating	30
Kosarev V.A., Hodakova E.V., Litvinchuk D.P. Structural analysis of the roundbroaches teeth grinding operations	35
Levchenko E.A. Method for calculating the parameters of lateral surfaces cutting circles	39
Leonov S.L., Ikonnikov A.M., Silivakin V.S. Mathematical modeling of the metal scheme process for magnetic abrasive treatment	46
Maksimov A.B., Gadeev A.V., Erokhina I.S. Prospects for the use of a thermally reinforced rolled in mechanical engineering	52
Sidorov V.A. Balancing is in supports of machine-tools	56
Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbayuk S.M. Simulation of heat losses and temperature of blast furnaces`tuyeres	62

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

УДК 621.92

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ МИКРОРЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СКРЕЩЕННЫМИ В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ ОСЯМИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ

В.Б. Богуцкий¹, Л.Б. Шрон¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Представлена методика расчета глубины микрорезания на основе анализа зоны контакта шлифовального круга с заготовкой в условиях, когда ось вращения круга расположена под некоторым углом к оси вращения заготовки. Выполнен анализ зоны контакта при наличии угла скрещивания осей тарельчатого шлифовального круга и заготовки в одной плоскости при заточке зуба цилиндрической протяжки по передней поверхности. Показано, что для этого случая зона контакта имеет форму криволинейного двуугольника. Получены математические зависимости, позволяющие определить эквивалентный диаметр шлифовального круга и текущее значение глубины микрорезания, которые могут быть использованы при расчетах величины размерного износа шлифовальных кругов.

Ключевые слова: шлифование, зона контакта, эквивалентный диаметр, глубина микрорезания, съем материала.

DETERMINATION OF THE DEPTH OF MICROCUTTING AT GRINDING WITH THE CROSSED IN THE SAME PLANE AS THE AXES OF THE ABRASIVE TOOL AND WORKPIECE

V.B. Bogutsky¹, L.B. Shron¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The presented method of calculating the depth microcutting based on the analysis of the contact zone of the grinding wheel with the workpiece under conditions where the axis of rotation of the grinding wheel located at an angle to the axis of rotation of the workpiece. Produced analysis of the zone of contact of the grinding wheel and the workpiece in the presence of the crossing angle of axes in the one plane for example, grinding the front surface of the teeth cylindrical broaches. It is shown that in this case the contact zone is in the shape of a curved biangle. Shows the mathematical dependence allowing to determine the equivalent diameter of the grinding wheel and the current depth value of microcutting, which can be used in the calculations value of dimensional wear of grinding wheels.

Keywords: grinding, zone contact, equivalent diameter, depth of microcutting, material removal.

Актуальность работы. Обзор литературных источников [1-4 и др.] показывает, что одной из наиболее сложных и трудоемких операций при производстве инструмента, является операция заточки зубьев по передней поверхности таких инструментов, как цилиндрические внутренние протяжки, модульные и цилиндрические фрезы. Обработка этих поверхностей выполняется профильным абразивным инструментом, ось которого расположена в одной плоскости с осью заготовки, но под некоторым углом к ней. Известно, что основой большинства процессов абразивной обработки является

микрорезание связанным зерном, которое определяет явления, протекающие в зоне контактного взаимодействия, характер разрушения обрабатываемого материала, влияет на технологические параметры и участвует в формировании качества обработки [5-10].

Поэтому определение значения глубины микрорезания для процесса шлифования при скрещивающихся в одной плоскости осях абразивного инструмента и заготовки является актуальной задачей.

Для оценки взаимодействия шлифовального круга и заготовки, рассмотрим более детально особенности их контакта.

Анализ геометрии зоны контакта при круглом врезном наружном шлифовании при параллельном расположении осей шлифовального круга и заготовки достаточно подробно выполнен в работах [11-13]. Однако, достаточно часто, ось вращения шлифовального круга расположена под некоторым углом к оси вращения заготовки (на пример, при заточке зубьев круглой внутренней протяжки по передней поверхности, см. рис. 1).

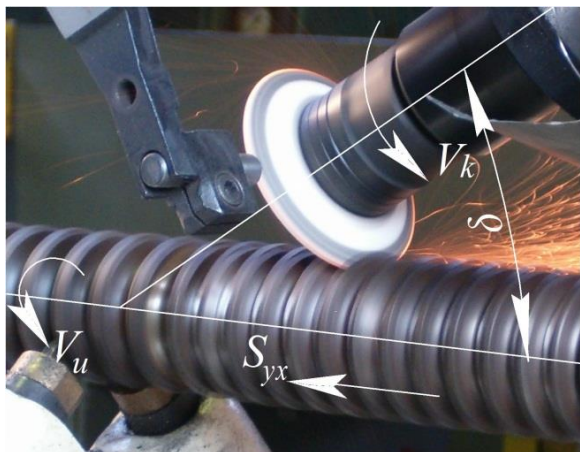


Рис. 1. Схема заточки круглой протяжки по передней поверхности зуба

Как видно из (рис. 1), заточка передней поверхности зуба выполняется конической поверхностью круга тарельчатой формы.

При выполнении технологической операции шлифовальному кругу диаметром D_k , установленному на шпиндель станка под углом δ к оси вращения заготовки, сообщают вращательное движение с окружной скоростью V_k , обрабатываемую заготовку устанавливают в центрах станка и приводят во вращение со скоростью V_u , [1, 14]. Шлифовальный круг вводят в стружечную канавку заготовки и затем заготовке сообщают продольную подачу S_{yx} .

При сближении задней поверхности шлифовального круга и заготовки, вследствие упругих отжатий, в технологической системе появляется осевое давление инструмента на поверхность заготовки и возникает упругопластический контакт. Под действием сил абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал до тех пор, пока упругие силы технологической системы не будут уравновешены суммарной нормальной реакцией [11, 12]. Величина действующих сил

определяет максимально возможную глубину микрорезания единичными абразивными зернами и геометрические параметры зоны контакта.

Как показано в [13, 15], в тех случаях когда оси вращения обрабатываемой заготовки и тарельчатого шлифовального круга расположены в одной плоскости и находятся под некоторым углом друг к другу, для анализа зоны контакта поверхности заготовки и абразивных зерен целесообразно выполнять сечение зоны контакта в плоскости, расположенной перпендикулярно обрабатываемой поверхности (рис. 2, сечение А-А).

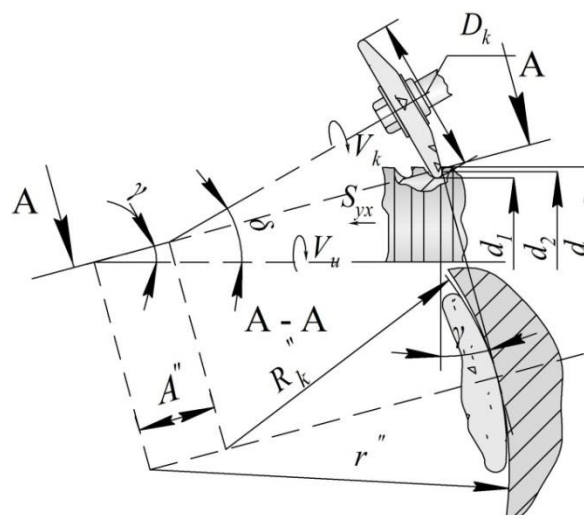


Рис. 2. Схема к расчету радиусов r'' и R_k''

Анализ схемы приведенной на (рис. 2) показывает, что процесс заточки передней конической поверхности зуба протяжки представляет собой процесс внутреннего круглого врезного шлифования заготовки с диаметром отверстия $d'' = 2r''$ шлифовальным кругом диаметром $D_k'' = 2R_k''$.

Из (рис. 4) (сечение А-А) радиусы r'' и R_k'' определяются как:

$$r'' = \frac{d_2}{\sin \gamma}, \quad R_k'' = \frac{D_k}{2 \sin(\delta - \gamma)}.$$

Если бы материал при шлифовании не срезался и абразивный круг не изнашивался, то в плоскости, перпендикулярной образующей обрабатываемой поверхности, зона контакта для процесса круглого внутреннего

врезного шлифования имела бы форму криволинейного двуугольника $ABCD$, (рис. 3).

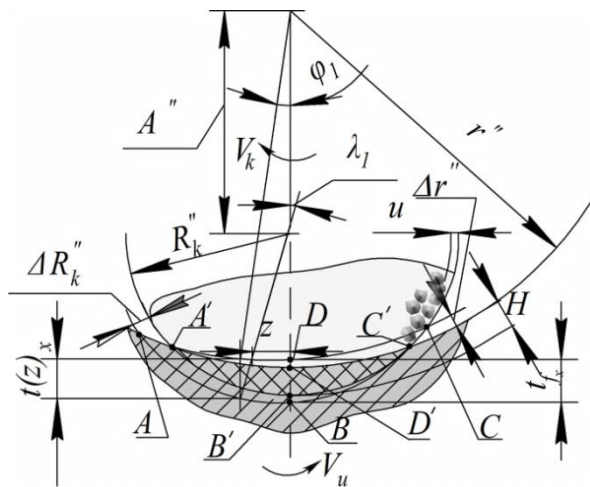


Рис. 3. Схема - зоны контакта заготовки с конической поверхностью тарельчатого шлифовального круга при круглом внутреннем шлифовании в случае расположения оси круга под углом к оси заготовки

При вращении заготовки обрабатываемая поверхность встречалась бы с абразивными зёрнами, наиболее удалёнными от центра вращения круга, в точке A . Контакт материала с зёрнами прерывался бы в точке C . Однако, вследствие наличия микрорезания после выхода из зоны контакта, радиус заготовки уменьшается на величину радиального съёма материала $\Delta r''$. На поверхности остаётся слой шероховатости поверхности H (граничная область материал-среда). Радиус круга в зоне контакта уменьшается на величину износа $\Delta R_k''$. Изменения размеров заготовки и круга приводят к изменению формы самой зоны. Обрабатываемая поверхность встречается с абразивными зёрнами, наиболее удалёнными от центра его вращения, не в точке A , а в точке A' , процесс микрорезания заканчивается не в точке C , а в точке C' . С учётом радиального съёма материала и износа круга, зона контакта будет иметь форму криволинейного двуугольника $A'B'C'D'$.

С уменьшением радиального съёма материала линия $C'D'A$ приближается к линии CDA . Также как и в случае круглого наружного врезного шлифования форма зоны изменяется за счёт возникновения упругих деформаций круга и заготовки. Под действием

сил, возникающих при микрорезании, абразивные зёрна утапливаются в связку инструмента, линия, ограничивающая зону контакта со стороны материала, будет смещаться к центру вращения круга.

Так как положение линии $A'D'C'$ зоны контакта определяется условиями выполнения процесса шлифования, то за начало отчёта необходимо брать дугу ADC , которая соответствует траектории движения наиболее выступающих вершин исходной шероховатости. Положение линии $A'D'C'$ вычисляется аналитически. Аналогично со стороны инструмента за начало отчёта необходимо брать дугу ABC , координаты линии $A'B'C'$ определяются также аналитически.

Значительное отличие в радиальном съёме материала и радиальном износе круга позволяют при анализе закономерностей удаления материала совмещать точку A' с точкой A и точку B' с точкой B . Если принять в качестве допущения незначительность влияния на размеры зоны температурных и упругих деформаций материалов круга и заготовки, то максимально возможная глубина может быть рассчитана как

$$t_{fx} = H + \Delta r''$$

При движении вершины зёрна в зоне от точки C (рис. 3) максимальная глубина резания увеличивается, становится максимальной, а затем начинает уменьшаться

Текущее значение глубины микрорезания $t(z)_x$ зависит от радиус-векторов заготовки r'' , круга R_k'' , угла наклона оси круга δ и межцентрового расстояния A'' (см. рис. 3). Для наиболее выступающих зёрен оно может быть определено по уравнению

$$t(z)_x = R_k'' \cos \lambda_1 - r'' \cos \varphi_1 + A'', \quad (1)$$

где λ_1 – угол между радиус-вектором поверхности круга и основной плоскостью; φ_1 – угол между радиус-вектором поверхности заготовки и основной плоскостью.

Принимая во внимание, что

$$\cos \varphi_1 = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_1}; \quad \sin \varphi_1 \approx \frac{z}{r''};$$

$$\cos \lambda_1 = \sqrt{1 - \frac{(r_1'')^2}{R_k^2} \sin^2 \varphi_1}; \quad A'' = R_k + r'' - t_{fx}$$

после преобразования зависимости (1) получим

$$t(z)_x = R_k'' \sqrt{1 - \left(\frac{z}{R_k''}\right)^2} - r'' \sqrt{1 - \left(\frac{z}{r''}\right)^2} - (R_k'' - r'' - t_{fx}) \quad (2)$$

где z – расстояние сечения заготовки до основной плоскости.

Так как для реальных процессов шлифования величина z в пределах зоны контакта более чем на порядок меньше R_k'' и r'' , подкоренные выражения уравнения (2) могут быть представлены в виде степенных рядов.

$$\sqrt{1 - \left(\frac{z}{R_k''}\right)^2} = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{z^2}{R_k''^2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \frac{z^4}{R_k''^4} - \dots\right) \cong 1 - \frac{z^2}{2(R_k'')^2}; \quad (3)$$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{z}{r''}\right)^2} = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{z^2}{(r'')^2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \frac{z^4}{(r'')^4} - \dots\right) \cong 1 - \frac{z^2}{2(r'')^2} \quad (4)$$

Учитывая уравнения (3) и (4) и заменив радиусы круга и заготовки на соответствующие диаметры D_k'' и d'' получим

$$t(z)_x = t_{fx} + \frac{z^2 (D_k'' - d'')}{D_k'' d''} = t_{fx} + \frac{z^2 \left(\frac{D_k}{\sin(\delta - \gamma)} - \frac{d_2}{\sin \gamma} \right)}{\frac{D_k}{\sin(\delta - \gamma)} \cdot \frac{d_2}{\sin \gamma}} \quad (5)$$

или

$$t(z)_x = t_{fx} + \frac{z^2}{D_e} \quad (6)$$

где $D_e = \frac{D_k d_2}{D_k \sin \gamma - d_2 \sin(\delta - \gamma)}$ – эквива-

лентный диаметр шлифовального круга в плоскости перпендикулярной образующей обрабатываемой поверхности.

Для абразивных зерен, лежащих ближе к центру круга, на расстоянии u от максимально выступающего зерна, текущее значение глубины микрорезания будет также определяться как

$$t(z)_x = t_{fx} + \frac{z^2}{D_e} - u.$$

Выводы

Выполненный анализ зоны контакта абразивных зерен, расположенных на конической поверхности шлифовального круга показывает, что действительная глубина резания всегда остается меньше максимально возможной в связи с наличием радиального съема материала и износа инструмента. Величина радиального съема материала за одно касание поверхности с инструментом, как правило, бывает значительно больше радиального износа круга, что можно объяснить значительным различием времени прохождения сечений круга и заготовки через зону контакта и различием их физико-механических свойств. Получены математические зависимости позволяют определить текущее значение глубины микрорезания и могут быть использованы при расчетах величины размерного износа шлифовальных кругов.

Список литературы

1. Палей М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента/М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288с.
2. Васенко С.М. Применение шлифовальных кругов из микрокристаллического корунда для шлифования фасонного режущего инструмента/С.М. Васенко, В.К. Старков// Вестник МГТУ «Станкин», № 1 (19), Том. 2. 2012. С47-49.
3. Веткасов Н.И. Заточка инструмента композиционными шлифовальными кругами / Н.И. Веткасов, В.А. Щепочкин // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Сборник трудов 4-й межд. научно техн. конф. – Харьков: ХГПУ, 2001. – С. 92 – 95.

4. Исследование процессов шлифования сложнорежущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, отчет о НИР. – Одесса: ОПИ, 1974. – 216 с.
5. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
6. Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин. – СПб.: Политехника 2007. – 424 с.
7. Stephen Malkin. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives/ Stephen Malkin, Changsheng Guo. – New York: Industrial Press. –2008. – 369 p.
8. Сизый Ю.А. Статическая и динамическая характеристики технологической системы круглого врезного шлифования / Ю.А. Сизый // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.–техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2003. – Вып. 64. – С.185–192.
9. Tribology of abrasive machining processes/Ioan D. Marinescu, W. Brian Rowe, Boris Dimitrov, Ichiro Inasaki/ Cover Art by William Andrew, Inc., Norwich, US 2004. – 764p.
10. Shaw C. Milton. Principles of Abrasive Processing. Oxford Series on Advanced Manufacturing, 13. – New York: Oxford University Press 1996. – 592 p.
11. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке /Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304с.
12. Novoselov Y. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear/ Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutski // Procedia Engineering. Vol. 150, (2016) 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). – PP. 809-814.
13. Principles of modern grinding technology / W. Brian Rowe/ – Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 2009. – 421p.
14. Богуцкий В.Б. Моделирование процессов шлифования и заточки поверхностей зубьев протяжек / В.Б. Богуцкий, С.М. Братан // Вісник СевНТУ. Вып. 151/2014. – Севастополь, 2014. С.14-23.
15. Кальченко В.В. Научные основы эффективного шлифования со скрецающимися осями абразивного инструмента и обрабатываемое детали. Дисс. ... д–ра техн. наук. – Чернигов, 2006. – 488 с.
- V.K. Starkov// Vestnik MGTU «Stankin», № 1 (19), Tom. 2. 2012. PP.47-49.
3. Vetkasov N.I. Zatochka instrumenta kompozitsionnymi shlifoval'nymi krugami / N.I. Vetkasov, V.A. Shchepochkin // Fizicheskie i komp'iuternye tekhnologii v narodnom khoziaistve: Sbornik trudov 4-i mezhd. nauchno tekhn. konf. – Khar'kov: KhGPU, 2001. – PP. 92 – 95.
4. Issledovanie protsessov shlifovaniia slozhnorezhushchego instrumenta iz bystrorezhushchei stali R6M5, otchet o NIR. – Odessa: OPI, 1974. – 216 p.
5. Abrzivnaia i almaznaia obrabotka materialov: Spravochnik/ Pod red. A.N. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 391 p.
6. Tekhnologija shlifovaniia v mashinostroenii / Z.I. Kremen', V.G. Iur'ev, A.F. Baboshkin. – SPb.: Politekhnik. 2007. – 424 p.
7. Stephen Malkin. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives/ Stephen Malkin, Changsheng Guo. – New York: Industrial Press . –2008. – 369 p.
8. Sizi Iu.A. Staticheskaia i dinamicheskaia kharakteristiki tekhnologicheskoi sistemy kruglogo vreznogo shlifovaniia / Iu.A. Sizi // Cutting & tool in technological system: International Scientific-Technical Collection. – Khar'kov: KhGPU, 2003. – Ed. 64. – P.185–192.
9. Tribology of abrasive machining processes/Ioan D. Marinescu, W. Brian Rowe, Boris Dimitrov, Ichiro Inasaki/ Cover Art by William Andrew, Inc., Norwich, US 2004. – 764p.
10. Shaw C. Milton. Principles of Abrasive Processing. Oxford Series on Advanced Manufacturing, 13. – New York: Oxford University Press 1996. – 592 p.
11. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia povrkhnostei pri abrazivnoi obrabotke /Iu.K. Novoselov. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 304p.
12. Novoselov Y. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear/ Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutski // Procedia Engineering. Vol. 150, (2016) 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)/ Edited by Andrey A. Radionov pp. 809-814.
13. Principles of modern grinding technology / W. Brian Rowe/ – Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 2009. – 421p
14. Bogutskii V.B. Modelirovanie protsessov shlifovaniia i zatochki povrkhnostei zub'ev protiazhek / V.B. Bogutskii, S.M. Bratan // Visnik SevNTU. Vyp. 151/2014. – Sevastopol', 2014. S.14-23.PP. 14–23.
15. Kal'chenko V.V. Nauchnye osnovy effektivnogo shlifovaniia so skreshchivaiushchimisia osiami abrazivnogo instrumenta i obrabatyvaemoe detali. Diss. ... d–ra tekhn. nauk. – Chernigov, 2006. – 488 p.

References

УДК 658.005.5

ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ

Н.Д. Бондарчук¹, А.Н. Феофанов¹, Е.Ю. Бондарчук¹, Т.Г. Гришина¹¹ФГАОУ ВО «Московский Государственный Технический Университет «СТАНКИН», Москва, Российская федерация

Аннотация

С каждым днем предприятия всех стран ставят перед собой задачу улучшения и оптимизации процессов, также устранения или предотвращения несоответствий. При рассмотрении процесса, в общем, не дает детальную оценку всех воздействующих факторов. Некоторые из них могут быть неочевидными. На сегодняшний день все страны заинтересованы в снижении негативных факторов воздействия на процесс, а при невозможности устранения управлять ими. Данные факторы наиболее детально можно определить с помощью риск-ориентированного мышления с применением FMEA – анализа.

Ключевые слова: риск-ориентированное мышление, система менеджмента качества, риск, процесс, улучшение, оптимизация.

INCREASE COMPETITIVENESS OF THE ENTERPRISE WITH THE HELP OF MODERN MANAGEMENT METHODS

N.D. Bondarchuk¹, A.N. Feofanov¹, E.Y. Bondarchuk¹, T.G. Grishina¹¹Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow, Russian Federation

Abstract

Every day enterprises of all countries set themselves the task of improving and optimizing processes, as well as eliminating or preventing inconsistencies. In reviewing the process, in general, does not provide a detailed assessment of all factors affecting. Some of them may not be obvious. To date, all countries are interested in reducing the negative impact factors on the process, and if not possible to eliminate them, manage them. These factors can be determined in detail by means of risk-oriented thinking using FMEA analysis.

Keywords: risk-oriented thinking, quality management system, risk, process, improvement, optimization.

Оценка рисков и принятие решений, основанных на результатах этой оценки, является развитием и дополнением принципа «принятие решений, основанных на фактах». Применение технологий и методов оценки рисков дает возможность более эффективно проводить предупредительные мероприятия и мероприятия по улучшению [6].

Поэтому риск-ориентированное мышление означает необходимость количественного (и, в зависимости от условий функционирования организации, качественного) рассмотрения риска при принятии решения о строгости и глубине подхода к планированию и управлению как системой менедж-

мента качества, так ее процессами и видами деятельности [9].

Система менеджмента качества (СМК) – совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов, необходимых для общего руководства качеством. Она предназначена для постоянного улучшения деятельности, для повышения конкурентоспособности организации на национальном и мировом рынках, определяет конкурентоспособность любой организации. Она является частью системы менеджмента организации.

С 1946 года международная организация по стандартизации шла к риск-ориентированному мышлению, но только в

новой версии ИСО 9001:2015 появилось это требование. С 1 ноября 2015 вышла версия ИСО 9001:2015 подразумевающая применение риск-ориентированного подхода на всех этапах (P-D-C-A) функционирования системы менеджмента качества. Хотя риски должны идентифицироваться и учитываться, нет никаких требований для формального внедрения системы менеджмента рисков или документированного процесса управления рисками [7].

С помощью данного мышления можно избежать ошибок или снизить негативные эффект при его неизбежности. Каждая организация пыталась управлять своими рисками, но не всегда это получалось и давало результат. Спустя почти пол столетия эта проблема все еще актуальна и по сегодняшний день она до конца не решена [2].

В новой версии требование о принятии решений, основанном на рисках, сформулировано явно и тесно увязано с концепцией процессного подхода. При этом риск следует понимать не только как негативное явление, но и как возможность нахождения областей для улучшения в процессах.

В мировой практике конкурентоспособность продукции (услуги) определяется следующими факторами:

- соответствием качества продукции требованиям рынка и конкретного потребителя;
- совокупными затратами на закупку, доставку и эксплуатацию продукции;
- способностью предприятия выполнять поставки в сроки, удобные для потребителя;
- репутацией предприятия на рынке, наличием аргументов, подтверждающих надежность предприятия как партнера, и способность предоставить эти аргументы [1].

Риск-ориентированное мышление, прежде всего, подразумевает реализацию предприятием комплекса согласованных мероприятий и методов для управления и контроля многочисленными рисками (положительными и отрицательными), влияющими на её способность достигать запланированных целей [12].

Классификация рисков по сфере возникновения в производстве:

- технический;
- производственно-хозяйственной деятельности;
- коммерческий.

Риск можно снизить, но избежать полностью в инновационной деятельности невозможно, для этого следует тщательно анализировать инновационные проекты. Существует несколько методов снижения рисков:

1. распределение рисков – распределяется между участниками проекта, чтобы сделать ответственным за риск участника, который лучше всех сможет рассчитать и проконтролировать риски, наиболее устойчивого в финансовом отношении, способного преодолеть последствия от действия рисков;

2. диверсификация – позволяет реально уменьшить портфельные риски, направляя инвестиции в разных направлениях. Портфели формируются с условием, что если в результате наступления непредвиденных (неблагоприятных) событий один из проектов будет убыточным, то остальные проекты будут приносить прибыль. Это спасет организацию от банкротства;

3. страхование и хеджирование. Страхование – это создание специального фонда средств (страхового фонда) и его использование (распределение и перераспределение) для возмещения принесенного ущерба, вызванного страховыми случаями, путем выплаты страхового возмещения. Хеджирование – снижения риска неблагоприятного изменения ценовой конъюнктуры путем заключения срочных контрактов (фьючерсов и опционов). Покупая и продавая срочные контракты, можно защитить себя от колебания цен на рынке;

4. организация защиты коммерческой тайны. В некоторых случаях техническая и коммерческая информация о разрабатываемом в организации инновационном проекте провоцирует конкурентов на аналогичные разработки. Для обеспечения защиты коммерческой тайны вводится регламентируемый порядок работы с информацией и доступ к ней, включающий в себя комплекс правовых, административных, организационных, инженерно-технических, финансовых, социальных и иных мер, основываю-

щихся на правовых нормах РФ, и организационно-распорядительных документов организации [3].



Рис. 1. График градации риска

Риск может быть систематическим и несистематическим (рис. 1). Систематический (недиверсифицированный) риск означает, что выигрыши или убытки, происходящие от потенциальных рисков, произойдут скорее одновременно для всего портфеля в целом, а не для отдельного вида актива. Поэтому невозможно снизить систематический риск посредством диверсификации портфеля [8].

Ответственным за организацию разработки, введение процедуры и поддержание ее в актуальном состоянии является руководитель подразделения, ответственного за СМК (например, директор центра менеджмента качества). Распределение ответственности и полномочий подразделений и должностных лиц организации (табл. 1).

В таблице использованы следующие обозначения:

О — ответственный за этап процедуры;

У — должностное лицо, утверждающее документы, относящиеся к данному этапу процедуры;

С — должностное лицо, с которым в обязательном порядке согласуется документы, относящиеся к данному этапу процедуры.

Таблица 1. Распределение ответственности по управлению рисками

Этап процедуры	Подразделение / Должностное лицо					
	Руководитель организации	Заместитель руководителя организации, ответственный за направление деятельности	Начальник подразделения	Директор центра менеджмента качества	Руководитель подразделения, ответственный за процесс	Сотрудники подразделения, включенные в процесс
Составление реестра рисков	У	С	С	О	О	—
Оценка рисков	—	У	С	О, С	О	—
Разработка плана реагирования на риски	У	С	С	С	О	—
Выполнение мероприятий по реагированию на риски	—	У	С	О, С	О	О
Контроль выполнения мероприятий по реагированию на риски	—	У	С	О, С	О	—

В настоящее время понятие «риск-ориентированное мышление» упоминается довольно редко, это можно объяснить тем, что теоретическая база риск-ориентированного подхода еще не сформирована. ИСО 9001-2015 раскрывает значение данного понятия относительно риск-менеджмента: «риск-ориентированное мышление позволяет организации определять факторы, которые могут привести к отклонению от запланированных результатов процессов и системы менеджмента качества организации, а также использовать предупреждающие средства управления для минимизации негативных последствий и максимального использования возникающих возможностей» [4].

Продуктивность риск-ориентированного мышления определяется следующими основными качествами:

1. быстрота — способность находить правильные решения в условиях дефицита времени (одно из важнейших качеств, учитывая, что многие аварии можно предотвратить еще на стадии зарождения);

2. гибкость — умение изменять намеченный план действий, при изменении обстановки или изменении критериев правильного решения (нормативное законодательство

по промышленной безопасности довольно часто дополняется и изменяется, поэтому будущий инженер должен предусматривать эти обстоятельства в своей деятельности, своевременно внося корректировки во внутреннюю документацию предприятия в рамках своих компетенций);

3. глубина – степень проникновения в сущность изучаемого явления, способность выявлять существенные логические связи между элементами задачи (одно из важнейших качеств, характеризует уровень профессионализма в данной сфере);

4. критичность – способность при познании не оказываться под влиянием чужих мыслей, трезво оценивать сильные и слабые стороны своих и чужих решений (это качество мышления требует прочного теоретического и практического фундамента, т.к. для того чтобы грамотно оценивать и реагировать на критику своего и чужого мышления, необходимо быть компетентным в рассматриваемой сфере);

5. самостоятельность – умение, используя общественный опыт и независимость собственной мысли, увидеть и поставить новый вопрос, новую проблему и затем решить их своими силами (качество риск-ориентированного мышления, соответствующее творческому уровню овладения профессиональными компетенциями);

6. последовательность – умение соблюдать строгий логический порядок в рассмотрении того или иного вопроса (специфика деятельности в рассматриваемой сфере предполагает следование федеральным законам, подзаконным актам, инструкциям, исполнение предписаний различных органов) [5].

Виды мыслительных операций риск-ориентированного мышления обучающихся (табл. 2).

Все организации при реализации своих бизнес-процессов систематически сталкиваются с необходимостью управлять различными видами рисков. Поэтому высшее руководство компании должно добиться того, чтобы необходимость риск-менеджмента была признана всеми сотрудниками органи-

зации в качестве одного из факторов первостепенной важности.

Таблица 2. Виды мыслительных операций риск-ориентированного мышления обучающихся

Операция мышления	Сущность процесса	Примечание
Анализ	Мысленное разделение технического объекта, технологической цепочки, ЧС на составляющие элементы, выделение отдельных частей, событий	По функциональному назначению магистральный нефтепровод можно разделить на следующие элементы: линейные сооружения, головные и промежуточные перекачивающие насосные станции, резервуарные парки
Сравнение	Сопоставление выделенных элементов, явлений, событий (анализируемых технических объектов, технологических цепочек, ЧС), их свойств, выявление влияния друг на друга, общности и различия между ними	В развитии чрезвычайных ситуаций выделяют стадии зарождения, инициирования, кульминации, затухания, в зависимости от принятых превентивных мер, наличия сопутствующих факторов, эта последовательность может сохраняться, а может ограничиться стадией зарождения, поэтому данный этап предполагает проведение идентификации опасностей
Синтез	Объединение выделенных элементов, связей анализируемого технического объекта, технологической цепочки, явлений, событий ЧС в единое целое	Разрабатываются новые знания, подходы, процедуры, корректируются методики расчета, уточняются требования нормативных документов локального характера
Абстрагирование	Отвлечение от несущественных и выделение основных признаков (качеств, связей, закономерностей) выделенных элементов, явлений, событий	Производственные помещения обладают большим количеством характеристик, однако в отношении опасности поражения людей электрическим током учитываются такие факторы, как наличие влажности, токопроводящей пыли и полов, высокой температуры и т.д., т.к. именно эти факторы увеличивают риск поражения током
Обобщение	Объединение выделенных элементов, явлений, событий (анализируемых технических объектов, технологических цепочек, ЧС), по какому-то общему, существенному признаку	Классификация опасных производственных объектов, учитывающая степень риска возникновения и масштабы аварий необходима для осуществления контрольно-надзорных функций, составления графика профилактических ремонтов, планирования мероприятий по обеспечению безопасности

Базу для управления рисками образуют следующие основные особенности риск-менеджмента.

Управление рисками связано как с негативными, так и с благоприятными послед-

ствиями. Суть управления рисками состоит в том, чтобы определять потенциальные отклонения от запланированных результатов и управлять этими отклонениями для улучшения перспектив, сокращения убытков и улучшения обоснованности принимаемых решений. Управлять рисками означает определять перспективы и выявлять возможности для совершенствования деятельности, а также не допускать или сокращать вероятность нежелательного хода событий [15].

Управление рисками подразумевает тщательный анализ условий для принятия решений. Это путь, ведущий к обеспечению гарантированной результативности бизнес-процессов. Риск-менеджмент должен быть интегрирован в ежедневную работу организации.

Главные виды интеграции системы риск-менеджмента в систему управления организацией (рис. 2).

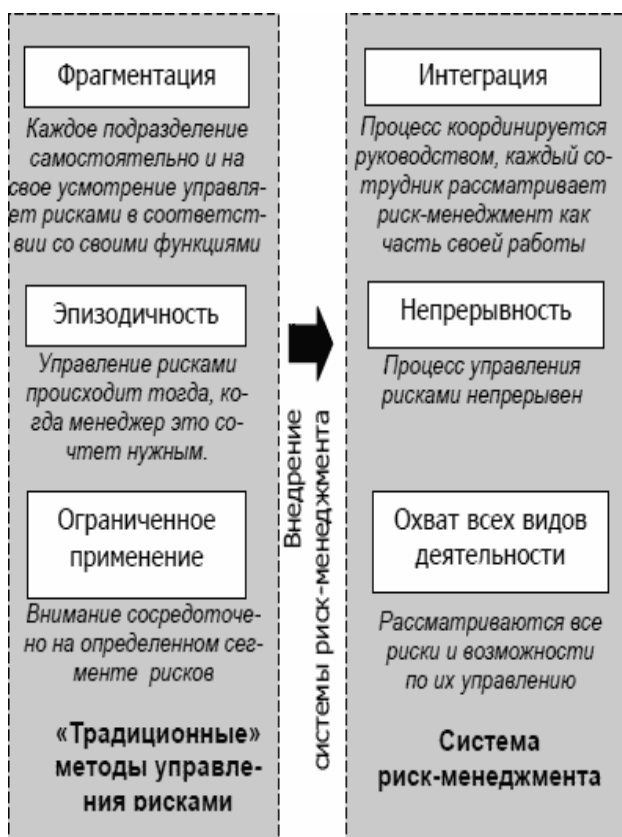


Рис. 2. Главные виды интеграции системы риск-менеджмента в систему управления организацией

Управление рисками требует четкого распределения ответственности и полномо-

чий, необходимых для принятия управленческих решений. Высшее руководство несет генеральную ответственность за управление рисками в организации. Его исключительной прерогативой является распределение между соответствующими сотрудниками ответственности и полномочий [14]. Решения, которые принимаются в процессе управления рисками, должны находиться в рамках законодательных требований и отвечать корпоративным целям. Таким образом, очень важно определить оптимальный баланс между ответственностью за риск и способностью контролировать этот риск.

Управление рисками зависит от эффективного процесса взаимодействия между участниками риск-менеджмента [10]. Процесс риск-менеджмента осуществляется как во внутренней, так и во внешней среде предпринимательства, поэтому необходимо взаимодействовать и с внутренними, и с внешними участниками этого процесса [13]. Чтобы обеспечить полноценное управление рисками, в первую очередь важно наладить эффективное взаимодействие внутри организации.

Управление рисками требует принятия сбалансированного решения. В процессе риск-менеджмента необходимо четко определять экономическую целесообразность уменьшения степени риска и достижения запланированных результатов.

Перечисленные особенности риск-менеджмента являются его базовыми факторами (рис. 3).

Процесс риск-менеджмента должен сопровождать управляющие решения на всех уровнях менеджмента организации (например, на высшем уровне, на уровне структурных подразделений или проектной группы), поэтому управление рисками необходимо интегрировать в менеджмент бизнес-процессов или их составных частей (этапов).

Процесс управления рисками должен сопровождать планирование и принятие решений по наиболее важным вопросам. Это относится, прежде всего, к изменениям в политике, представлению новых стратегий и процедур, управлению проектами, крупным денежным инвестициям или оптимизации

внутренних организационных конфликтов и противоречий.

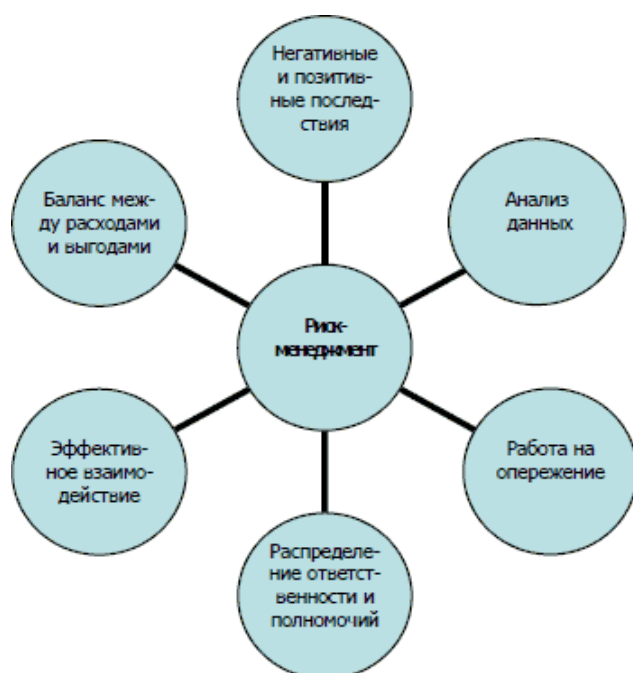


Рис. 3. Базовые факторы риск-менеджмента

Осуществление любого вида предпринимательской деятельности в той и иной степени связано с определенным уровнем риска.

Выводы

В связи с обязательностью перехода на новую версию стандарта ИСО 9001:2015 в течение трехлетнего периода, интерес к применению риск-ориентированного подхода при построении СМК непрерывно возрастает. Повышение конкурентоспособности предприятия при использовании риск-ориентированного мышления достигается за счет улучшения управления, обеспечения высокого качества продукции и услуг, повышение доверия и удовлетворённости потребителей.

Основной целью является снижение с помощью риск-ориентированного мышления количества возможных дефектов (несоответствий) процесса [11]. Оценка рисков и принятие решений, основанных на результатах этой оценки, является развитием и дополнением принципа «принятие решений, основанных на фактах». Применение техно-

логий и методов оценки рисков дает возможность более эффективно проводить предупредительные мероприятия и мероприятия по улучшению.

Поэтому риск-ориентированное мышление означает необходимость количественного (и, в зависимости от условий функционирования организации, качественного) рассмотрения риска при принятии решения о строгости и глубине подхода к планированию и управлению как системой менеджмента качества, так ее процессами и видами деятельности.

Список литературы

1. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров / Основы квалиметрии // Диссертация на соискание ученой степени к.э.н., 1979 – С. 92.
2. Бондарчук Н.Д. Повышение эффективности управления процессами организации на основе применения методов риск-ориентированного мышления // Диссертация на соискание академической степени магистра техники и технологии, 2016. – С.109.
3. Марцынковский Д.А. Руководство по риск-менеджменту / Ассоциация по сертификации «Русский Регистр», Береста, 2007. – ,186.
4. Латышевич Н. Д. Анализ и оценка риска // Инновационное развитие России: проблемы и перспективы: сборник статей IV Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА, 2015. – С 44.
5. Латышевич Н. Д. Методы расчета рисков в производственной среде / Н.Д. Латышевич, Т.Г. Гришина // Материалы студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии МГТУ «Станкин», 2015. – С 73.
6. Окрепилов В.В. Роль экономики качества в устойчивом социально-экономическом развитии России // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития, 2015. – № 1-2. – С. 41-51.
7. <http://www.garant.ru/news/1096978/>.
8. Феофанов А.Н. Автоматизация управления показателями качества продукции и работы организации / А.Н. Феофанов, К.С. Карасев // Технология машиностроения: обзорно-аналитический, научно-технический и производственный журнал, 2010. - N 8. – С. 50-51.
9. <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/60764/>
10. Феофанов А.Н Квалиметрия в машиностроении / А.Н. Феофанов, Р.М. Хвастунов // Издательство «Экзамен», 2009. – № 285. – С. 3.
11. Феофанов А.Н Расчет оптимального числа экспертов и объема выявляемых данных по результатам предварительного опроса / А.Н. Феофанов,

В.М. Корнеева // Сварочное производство, 2012. – № 8. – С. 54-56.

12. Феофанов А.Н Информационно-аналитические системы управления промышленным предприятием / А.Н. Феофанов, А.В. Капитанов // Технология машиностроения, 2010. – № 7. – С. 50-57.
13. Феофанов А.Н Значение экспертных систем для повышения качества продукции в автотракторной отрасли / А.Н. Феофанов, С.А. Зайцев // Технология машиностроения, 2015. – №7. – С. 55-64.
14. Феофанов А.Н Оценка надёжности производственного процесса с применением аппарата нечёткой логики / А.Н. Феофанов, Г.В. Юдин // Качество и жизнь, 2016. – № 4. – С. 58-62.
15. Феофанов А.Н. О задачах квалиметрии в машиностроении / А.Н. Феофанов, Р.М. Хвастунов //Технология машиностроения, 2006. – №3. – С.34-37.

References

1. Azgal'dov G.G. Teoriia i praktika otsenkikachestva tovarov / Osnovy kvalimetrii // Dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni k.e.n., 1979 – S. 92.
2. Bondarchuk N.D. Povyshenie effektivnosti upravleniia protsessami organizatsii na osnove primeneniia metodov risk-orientirovannogo myshleniia // Dissertatsiia na soiskanie akademicheskoi stepeni magistra tekhniki i tekhnologii, 2016. – S.109.
3. Martsynkovskii D.A. Rukovodstvo po risk-menedzhmentu / Assotsiatsiia po sertifikatsii «Russkii Registr», Beresta, 2007. – .186.
4. Latyshevich N. D. Analiz i otsenka riska // Innovatsionnoe razvitie Rossii: problemy i perspektivy: sbornik statei IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii / MNITs PGSKhA, 2015. – S 44.
5. Latyshevich N. D. Metody rascheta riskov v prizvodstvennoi srede / N.D. Latyshevich, T.G. Grishina // Materialy studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Avtomatizatsiia i informatsionnye tekhnologii «Stankin», 2015. – S 73.
6. Okrepilov V.V. Rol' ekonomiki kachestva v ustoichivom sotsial'noekonomicheskom razvitii Rossii // Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiia, 2015. – № 1-2. – S. 41-51.
7. <http://www.garant.ru/news/1096978/>.
8. Feofanov A.N. Avtomatizatsiia upravleniia pokazateliami kachestva produktsii i raboty organizatsii / A.N. Feofanov, K.S. Karasev // Tekhnologiiia mashinostroeniia: obzorno-analiticheskii, nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi zhurnal, 2010. - N 8. – S. 50-51.
9. <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/60764/>
10. Feofanov A.N Kvalimetriia v mashinostroenii / A.N. Feofanov, R.M. Khvastunov // Izdatel'stvo «Ekzamen», 2009. – № 285. – S. 3.
11. Feofanov A.N Raschet optimal'nogo chisla ekspertov i ob'ema vyivliaemykh dannykh po rezul'tatam predvaritel'nogo oprosa / A.N. Feofanov, V.M. Korneeva // Svarochnoe proizvodstvo, 2012. – № 8. – S. 54-56.
12. Feofanov A.N Informatsionno-analiticheskie sistemy upravleniia promyshlennym predpriiatiem / A.N. Feofanov, A.V. Kapitanov // Tekhnologiiia mashinostroeniia, 2010. – № 7. – S. 50-57.
13. Feofanov A.N Znachenie ekspertnykh sistem dlia povysheniia kachestva produktsii v avtotraktornoi otrasli / A.N. Feofanov, S.A. Zaitsev // Tekhnologiiia mashinostroeniia, 2015. – №7. – S. 55-64.
14. Feofanov A.N Otsenka nadezhnosti proizvodstvennogo protsessa s primeneniem apparata nechetkoi logiki / A.N. Feofanov, G.V. Iudin // Kachestvo i zhizn', 2016. – № 4. – S. 58-62.
15. Feofanov A.N. O zadachakh kvalimetrii a masinostroenii / A.N. Feofanov, R.M. Khvastunov //Tekhnologiiia mashinostroeniia, 2006. – №3. – S.34-37.

УДК 621+658.012+531

КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ В ПАТРОНЕ И ЦЕНТРЕ НЕЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

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

Аннотация

Деформации нежестких заготовок в процессе обработки являются главной причиной образования погрешностей формы и размеров детали. Использование традиционных технологий, таких как стабилизация процесса резания, повышение жесткости узлов станка, во многих случаях не позволяет достичь необходимой точности изготовления нежестких деталей с обеспечением требуемой производительности. Одним из путей решения проблемы является применение процессов обработки с управляемым деформированием заготовок.

Для уменьшения погрешности формы детали при токарной обработке используется компенсирующее (или управляющее) локальное воздействие в виде сосредоточенной силы, которое находится из условия равенства нулю перемещения нежесткой заготовки по направлению радиальной составляющей силы резания, обусловленного упругими изгибными деформациями заготовки в процессе обработки.

Ключевые слова: токарная обработка, нежесткая заготовка, компенсация упругих перемещений.

COMPENSATION OF NONRIGID PARTS MOVEMENTS FIXED IN CHUCK AND CENTER DURING TURNING

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

Abstract

Deformations of nonrigid parts during machining are the main cause of form errors and size of parts. It is difficult to achieve the necessary accuracy of manufacturing of nonrigid detail demand using only traditional technologies such as cutting operation or machine unit stiffening. The application of production process by control parts deformation is one way of solution the problems.

It is important to use a compensating (or controlling) local action in a form of concentrated force to reduce form errors during turning, that is found from a condition of indicating the nulling of nonrigid part's moving under the radial machining force component that is caused by elastic deformation of the workpiece during lathe machining.

Keywords: turning, nonrigid workpiece, part, compensation of elastic displacements.

Введение

В работах [1-13] приведены результаты исследований оптимального управления упругим деформированием нежестких заготовок при медленно движущейся силе резания в процессе автоматической токарной обработки. Компенсация упругих перемещений по направлению радиальной составляющей силы резания в сечении, где эта сила приложена, является частным случаем непрерывного управления для обработки на малых участках.

В предшествующих исследованиях приведены теоретические и экспериментальные

управления деформированием для различных типов нежестких заготовок и схем приложения локальных управляющих воздействий.

Ряд исследований, как правило, заканчивались экспериментальной проверкой предложенных технических решений для практической реализации методов компенсации упругих перемещений обрабатываемой нежесткой заготовки – с целью снижения погрешности обработки.

Схема упругой компенсации для последующей экспериментальной проверки предполагает предварительное моделирование с использованием основ автоматизации тех-

нологического процесса, теории автоматического регулирования, методов механики деформируемого твердого тела.

Цель исследований – создание экспериментального стенда для проверки модели компенсации перемещений нежестких заготовок (валов), закрепленных в патроне и в центре (жесткое и шарнирное закрепление) при токарной обработке.

1. Аналитическое определение компенсирующего воздействия (метод начальных параметров)

Схема нагружения нежесткого вала силой резания P_y и компенсирующим воздействием в процессе обработки изображена на (рис. 1).

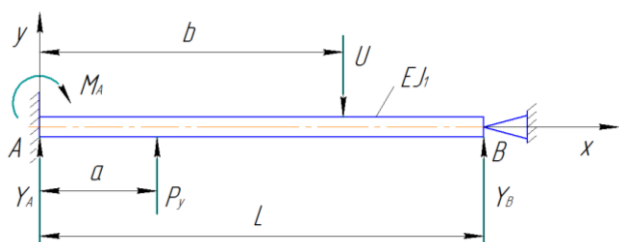


Рис. 1. Схема обработки вала

Для описания деформируемого состояния один раз статически неопределимой заготовки использованы статические условия равновесия в сочетании с известным в механике деформируемого твердого тела методом начальных параметров.

Система алгебраических уравнений для определения реакций и компенсирующего воздействия имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^4 P_{ky} &= Y_A + P_y - U + Y_B = 0, \\ \sum_{k=1}^4 M_B &= -Y_A \cdot L - M_A - P_y \cdot (L - a) + U \cdot (L - b) = 0, \\ W_B &= \frac{M_A \cdot L^2}{2} + \frac{Y_A \cdot L^3}{6} + \frac{P_y \cdot (L - a)^3}{6} - \frac{U \cdot (L - b)^3}{6} = 0, \\ W(a) &= \frac{M_A \cdot a^2}{2} + \frac{Y_A \cdot a^3}{6}, \end{aligned} \quad (1)$$

где L – длина заготовки; a – координата силы резания; b – координата компенсирующего воздействия. В системе (1) последние

два уравнения означают равенство нулю перемещения опоры B и перемещения по направлению P_y , вызванное изгибными деформациями заготовки; в этих уравнениях множители $\frac{1}{EJ}$ опущены; E – модуль упругости первого рода; J – осевой момент инерции круглого поперечного сечения заготовки.

При $b = \frac{3L}{4}$ выражение для компенсирующего воздействия как функции координаты a силы резания P_y имеет вид:

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

Численный анализ осуществлялся при следующих исходных данных: $L = 0,2\text{ м}$; $d = 0,012\text{ м}$; $P_y = 400\text{ Н}$; $E = 2,1 \cdot 10^{11}\text{ Па}$;

График компенсирующего воздействия $U(a)$ построен в пределах $b \geq a \geq 0$ (изображен на рис. 2).

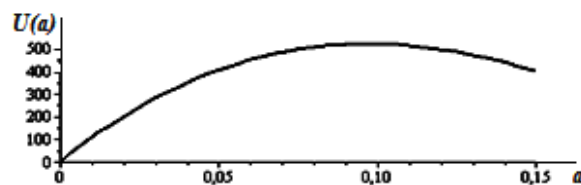


Рис. 2. График компенсирующего воздействия

Из графика (рис. 2) следует, что при $a = L/2$ компенсирующая сила максимальна; при $a = 3L/4$ она равна по модулю значению P_y . Интересно, что в случае $a = L/2$ компенсирующее воздействие $U = 520,93\text{ Н}$.

Принципиально важно, что в каждой точке с координатой a перемещение по направлению силы P_y равно нулю. Для $a = L/2$ уравнения прогиба $W(x)$ на участке $a \geq x \geq 0$ имеет вид:

$$W(x) = 0,00653x^2 - 0,06523x^3. \quad (3)$$

График функции [3] изображен на (рис. 3).

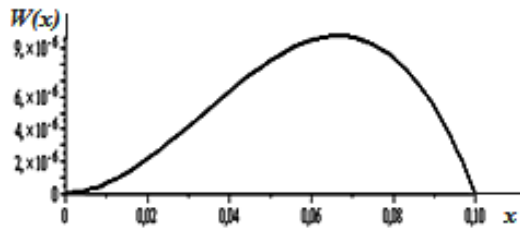


Рис. 3. График $W(x)$

Если $U=0$ (без компенсации), то при $a=L/2$ $W(a) \neq 0$ и образуется бочкообразность.

2. Использование метода Ритца

Для описания деформируемого состояния при проверке достоверности выражения $U(a)$ согласно (2) дополнительно использовался метод Ритца. Накопленная полная энергия в результате деформирования заготовки принимает минимальное значение:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = \frac{1}{2} EJ \int_0^L [W''(x)]^2 dx - P_y W(a) + \\ + U \cdot W(b) = \min, \end{aligned} \quad (4)$$

где $W''(x) = \frac{d^2 W}{dx^2}$; $W(a)$ – перемещение по направлению P_y ; $W(b)$ – перемещение по направлению U . Согласно методу Ритца принята функция прогиба:

$$W(x) = \sum_{i=1}^3 C_i x^{i+1}, \quad (5)$$

где C_i – константы $i=1,2,3$. Функция (5) автоматически удовлетворяет условию жесткого закрепления (на левом конце), а из условия $x=L$ найдено соотношение между константами:

$$C_3 = -\frac{C_1 + C_2 L}{L^2}. \quad (6)$$

Константы C_1 и C_2 найдены из необходимых условий минимума функционала полной энергии (4):

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_1} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_2} = 0. \quad (7)$$

Из условия $W(a)=0$ следует выражение для компенсирующего воздействия:

$$U(a) = \frac{256 P_y a^2 (6L^3 - 16aL^2 + 15La^2 - 5a^3)}{(9L - 5a)L^4}. \quad (8)$$

При прежних исходных данных график функции (8) для всей заготовки изображен на (рис. 4).

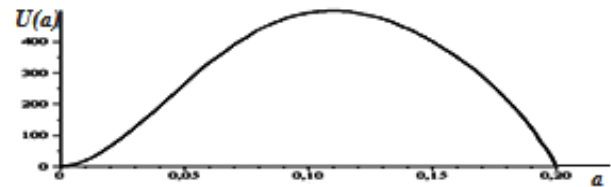


Рис. 4. График $U(a)$

Метод Ритца позволяет, в отличие от метода начальных параметров, описывать перемещение заготовки единой аналитической функцией без существенной потери точности.

По методу Ритца при $a=L/2$ и $b=3L/4$ получено $U(a)=492,3H$, что хорошо согласуется со значением компенсирующего воздействия, полученного с использованием метода начальных параметров.

При $U=0$ (обработка без компенсации) график $W(x)$ для координаты силы резания $a=L/2$, т.е. точение шейки по середине заготовки, изображен на рис. 5. Видно, что максимальное перемещение заготовки наблюдается на расстоянии $x=3L/4$.

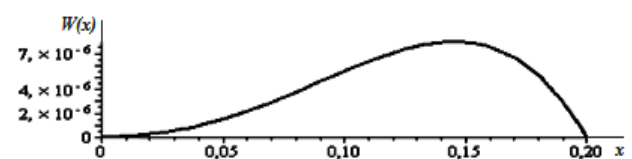


Рис. 5. График деформирования заготовки (при $a=L/2$, $U=0$)

Именно поэтому координата компенсатора выбрана из условия $b=3L/4$. В экспериментальных исследованиях предусмотрено точение шейки по середине заготовки, на участке $\Delta L=0,02m$. При этом принято $U=520H$. Для экспериментальной настройки компенсатора на данное усилие по деформации его пружины (при $P_y=0$) решена задача определения перемещения

сечения заготовки с координатой b только от компенсирующего воздействия. Если при настройке компенсатора перемещение сечения при $b = 3L / 4$ достигает $|W(b)| = 0,00013898\text{ м}$, то компенсирующее воздействие приближенно равно 520 Н.

Выполненные исследования используются для создания САУ деформациями нежестких заготовок.

Система автоматического управления, обеспечивающая непрерывную реализацию силового воздействия согласно зависимости (2), фактически приведет к обработке мгновенно жесткой заготовки, обеспечивая тем самым снижение погрешностей изготавливаемых деталей.

Список литературы

1. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированным состоянием твердых тел и систем // тез. докл. VII Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике, 12.09.91 г. – М.: 1991. – С.60-61.
2. Бохонский А.И. Построение управлений деформациями твердых тел при медленно движущейся внешней нагрузке // Изв. Вузов. Машиностроение. 1989. – № 10. – С. 124-128.
3. Бохонский А.И., Рыжкова Н.П. Управление линейными и угловыми деформациями нежестких заготовок при токарной обработке // Станки и инструменты. –1985. – №4. – С. 28-31.
4. Бохонский А.И., Вохмянин А.Н. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке: Монография. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. – 240 с.
5. Бохонский А.И. Оптимальное управление в некоторых задачах механики/ А.И. Бохонский. «Сб.» Сопротивление материалов и теория сооружений. №41. К: Будівельник, 1982. – С. 21-26.
6. Бохонский А.И. Построение управлений деформациями твердых тел при медленно движущейся внешней нагрузке. /А.И. Бохонский. – Известия вузов. Машиностроение. №10. Издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 1989. – С. 124-128.
7. Бохонский А.И., Вохмянин А.И. Повышение точности токарной обработки нежестких заготовок // Станки и инструменты. №9, 1994. – С. 27 – 31.
8. Бохонский А.И., Шмидт Л.А. Вариационные методы поиска управлений деформированием нежестких заготовок при токарной обработке. //Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк ДонГТУ, 2002. – № 20. – С. 56 – 60.
9. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Вариационное и реверсионное исчисление в механике: моно-

графия. Под ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, СевНТУ, 2012. – 212 с.

10. Бохонский А.И., Шмидт Л.А. Вариационные методы поиска управлений деформированием нежестких заготовок при токарной обработке/ А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт //Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк. – № 11. – С. 115 – 119.
11. Бохонский А.И. Система автоматического управления медленными и быстрыми перемещениями при токарной обработке нежестких заготовок/ А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт// Машиностроение и техносфера XXI века: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк, 2007. – С. 130 – 133.
12. Бохонский А.И. Свойства деформационных критериев качества при управлении деформированием объектов / Бохонский А.И., Шмидт Л.А. // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – Вып. 11. – С. 44 – 47.
13. Бохонский А.И. Методы Ритца и множителей лагранжа в задачах оптимального управления деформированием стержней / Бохонский А.И., Шмидт Л.А. // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – Вып. 97. – С. 11 – 15.
14. Кудинов В.К., Тараненко В.А. К проблеме оптимизации режимов резания на металлорежущих станках/ Приборостроение: Сб. науч. Тр. – Киев.: Техника, 1979.Л. – Вып. 26 – С. 82-84
15. Соколовский А.П. Расчет точности обработки на металлорежущих станках. – Л: Машгиз, 1952. – 286 с.

References

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

7. Bokhonsky A.I., Vokhmianin A.N. Substantially improving of nonrigid parts during turning. *Stanki i instrumenty*, 1994, №9. pp. 27 – 31.
8. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Variational methods of control searching a deformation of nonrigid parts during turning. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia: Mezhdunar. sb. nauchnykh trudov. Donetsk DonTTU*, 2002, № 20. pp. 56 – 60.
9. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Variational and reversion calculus in mechanics: monographia; Under gen. edit. A.I. Bokhonsky. – Sevastopol: SevNTU Publishing, 2012. – 212 p.
10. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Variational methods of searching the control of nonrigid parts deformations during turning. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia: Mezhdunar. sb. nauchnykh trudov. Donetsk. № 11*. pp. 115 – 119.
11. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Automatic control system for slow and fast movements when non-rigid workpieces are turning. *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: Mezhdunar. sb. nauchnykh trudov. Donetsk*, 2007. pp. 130 – 133.
12. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Properties of deformation criterion quality during control of object deformation. *Optimizatsiia proizvodstvennykh protsessov : sb. nauch. tr. Sevastopol: SevNTU*, 2009. № 11. pp. 44 – 47.
13. Bokhonsky A.I., Shmidt L.A. Ritz and Lagrange multiplier methods in optimal control tasks of rods deformation. *Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiia : sb. nauch. tr. Sevastopol: SevNTU*, 2009. № 97. pp. 11 – 15.
14. Kudinov V.K., Taranenko V.A. To the problem of cutting conditions optimization on metal-cutting machines. *Priborostroenie: Sb. nauch. Tr. – Kiev.: Tekhnika*, 1979. № 26. pp. 82-84.
15. Sokolovskii A.P. Calculation of the machining accuracy on metal-cutting machines. – L: Mashgiz, 1952. – 286 p.

УДК 681.786.42

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЬ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНИЧНОГО ВАЛИКА

А.В. Гусаров¹, Д.В. Котобан¹, И.В. Жирнов¹¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская федерация

Аннотация

Статья представляет результаты оптической диагностики процесса формирования единичного валика в процессе селективного лазерного плавления. Показано детектирование дефектов валика (формирование отдельных сфер, зоны свободной от порошка, вылет частиц порошка); показана визуализация консолидации отдельных частиц в монолитный валик. Определено, что важным физическим явлением является испарение материала и формирование особых газодинамических условий в зоне ванны расплава. Оценены скорости вылета частиц из ванны расплава, скорости их вовлечения и скорость газового потока. Полученные данные позволяют оценить кинетику массопереноса при селективном лазерном плавлении и показывают, что качественные характеристики материала после селективного лазерного плавления сильно зависят от сформировавшегося теплового поля в облучаемой зоне. Это, в свою очередь, становится базой для разработки систем оптического контроля и диагностики процессов лазерного выращивания, основанных на контроле температуры ванны расплава и прилегающих областей.

Ключевые слова: оптическая диагностика, селективное лазерное плавление, термография, яркостная температура, консолидация, металлический порошок, испарение.

OPTICAL DIAGNOSTICS OF SELECTIVE LASER MELTING AND MONITORING OF SINGLE-TRACK FORMATION

A.V. Gusarov¹, D.V. Kotoban¹, I.V. Zhirnov¹¹MSTU "STANKIN", Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of the optical diagnostic of the single-track formation process during selective laser melting. The detection of the track defects (as balling effect, denudation, particle sweeping) is shown and the powder particles consolidation is visualized. It was defined, that the evaporation and thus formation of the specific gas-dynamic conditions is the significant physical effect in the melt pool zone. The particle in-flight velocity during coming in and out from the melt pool and the gas flow velocity were evaluated. The results allow evaluating the kinetics of the mass-transfer process during selective laser melting. It was clearly shown the material quality properties after the selective laser melting are strongly influenced by the formed thermal field in the laser-irradiated zone. This could be the basis for developing of the optical control and diagnostic system based on the melt pool and adjacent zones temperature.

Keywords: optical diagnostics, selective laser melting, thermography, brightness temperature, consolidation, metal powder, evaporation.

Введение

Первая стратегия научно-технологического развития, состоящая в переходе к новым производствам непосредственно связана с аддитивным производством – технологиями синтеза трёхмерных деталей из металлов, керамики и полимеров. Современные аддитивные технологии – это

новая парадигма разработки и производства деталей промышленности с новым качеством [1, 2]. Обратной стороной экстенсивного развития аддитивного производства являются ограниченные возможности, такие как: ограничения по материалам, низкая воспроизводимость и низкая производительность [3]. Наиболее распространённые и перспективные технологии аддитивного

производства (селективное лазерное или электронно-лучевое плавление, трёхмерная лазерная наплавка) не обеспечивают ни достаточного контроля процесса, ни контроль качества материала в процессе [4].

Базой для создания систем активного контроля являются результаты исследований оптической диагностики процесса селективного лазерного плавления (СЛП) [5, 6]. В предыдущих работах были получены принципиальные результаты: определён способ оценки действительной температуры в зоне воздействия лазерного излучения [7, 8], оценено влияние параметров обработки и формирование валика [9], оценено влияние внешних условий процесса [10]. Визуализация зоны обработки и математическое моделирование позволили полно учесть все физические факторы и явления в процессе лазерной обработки [11, 12].

Оптическая диагностика предполагает использование высокоскоростной ПЗС-камеры, позволяющей контролировать быстропротекающие процессы с высоким разрешением, инфракрасной камеры, позволяющей анализировать термоцикл зоны обработки, пирометра, позволяющего измерять усреднённую температуру небольшой области зоны обработки [13, 14]. Серьёзной проблемой на пути широкого внедрения технологий аддитивного производства является необходимость комплексного подхода к квалификации процессов аддитивных технологий для промышленного производства. Настоящая работа посвящена комбинированию накопленных знаний и новых научных исследований в области контроля формирования валика, кинетики процессов, оценки температуры ванны расплава.

Материалы и методы

Оптическая диагностика проводилась на экспериментальной установке, разработанной в лаборатории инновационных аддитивных технологий МГТУ «СТАНКИН» по схеме на рис. 1. В качестве источника энергии использовался волоконный лазер ЛК-200 (НТО «ИРЭ-Полус», Россия) с максимальной мощностью в 200 Вт, длина волны излу-

чения 1070 нм. Диаметр луча в фокусе – 100 мкм, гауссово поперечное распределение энергии в пятне.

В качестве измерительных устройств использовались высокоскоростная (ВС) камера видимого диапазона Photron SA5 (США) с частотой 10 кГц (кадров/с) (выдержка $\approx 0,1$ мс) и пространственным разрешением 0,1 пкс/мкм, а также инфракрасная (ИК) камера FLIR Phoenix RDAC (Flir, США) (диапазон рабочих длин волн 1100–1700 нм) с частотой 340 Гц (выдержка ≈ 3 мс) и разрешением 0,87 пкс/мкм. Частота и разрешение съёмки ограничивается ёмкостью шины передачи данных. Для исключения засветки матрицы ВС-камеры лазерным излучением, использовался узкополосный фильтр, отсекающий длину волны 1064 ± 20 нм. Оптические приборы были установлены в рабочей камере под углом не менее 45° к поверхности подложки.

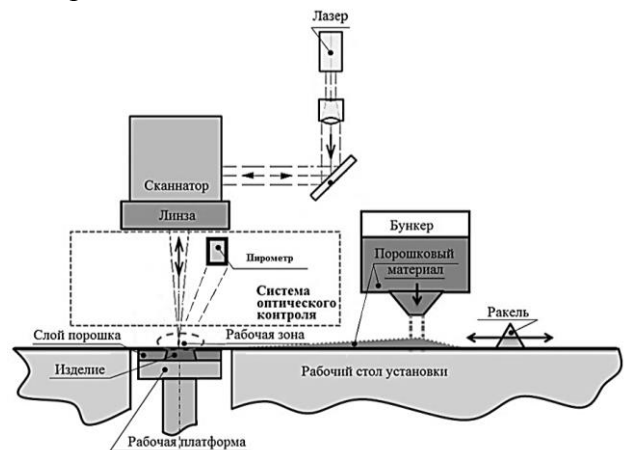


Рис. 1. Схема оптической диагностики в установке селективного лазерного плавления

В работе применяли порошки аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т (гранулометрия: 0–40 мкм, АО «Полема», Россия) и молибдена Мо 99,5% (гранулометрия: 30–75 мкм, Amdry 313X, Oerlicon Metco). В качестве подложки применяли стальные листы 12Х18Н10Т толщиной 4 мм. Элементный состав порошка стали представлен в табл. 1. Порошки получены методом распыления газом, имеют сферическую формы частиц и равномерное распределение гранулометрии. Порошки просеивались на сите 0,050 (размер ячеек 50 мкм) и просушивались в вакуумном шкафу при температуре 120 °С в те-

чение 2 ч. Подложку подвергали пескоструйной обработке, поверхность очищали спиртом.

Первые опыты по диагностике процесса СЛП проводили с порошком стали 12Х18Н10Т, равномерно расстеленном на подложке толщиной 100 мкм (контроль обеспечивался автоматической системой расстилки). Лазерным лучом сканировали квадрат $\square 15$ мм по поверхности порошка с заданными параметрами: шаг 100 мкм, мощность излучения – 30 Вт, скорость сканирования – 50-300 мм/с. Полученные данные видеосъемки и термографии сохранялись.

Второй этап проводили с порошком молибдена на следующих режимах обработки: толщина слоя расстилки – 100 мкм, мощность лазерного излучения – 100 и 170 Вт, и скорость сканирования луча по подложке 50, 75 и 100 мм/с.

Таблица 1. Элементный состав порошка стали 12Х18Н10Т, % масс

Fe	C	Si	Mn	Ti	Cr	Ni	S	P	H ₂ O
осн.	0,1	0,68	0,9	0,92	17,1	9,7	0,01	0,03	0,022

На третьем этапе эксперимента аналогичное исследование проводили с порошком стали с мощностью лазерного излучения – 100 Вт, и скоростью сканирования луча по подложке 50, 75 и 100 мм/с. Целью данного исследования было выявить основные различия в процессе с молибденом.

Заключительный этап проводили без использования порошка, сканируя очищенную

подложку из стали 12Х18Н10Т со скоростью 20 мм/с и 300 мм/с и подводимой мощностью лазерной излучения 170 Вт.

На каждом этапе снимали картинку в видимом и ИК диапазонах длин волн и проводили комплексный анализ изображений (в том числе измерения скорости по отслеживанию траектории или по следу частиц).

Результаты и обсуждение

Результаты первого исследования показали деградацию валика (на одиночные сферы, balling effect (см. рис. 2а) и наличие изменяющейся зоны без порошка, окружающей сплавленный валик (см. рис. 3). Очевидно, что формирование отдельных сфер в валике есть результат снижения погонной энергии, пришедшейся на единицу длины валика. Данные ИК-камеры (рис. 2) показывают, что при снижении мощности, максимальная температура практически не изменяется, а распределение температур изменяется значительно. Поэтому пирометрия, где значение сигнала усредняется по приёмной матрице), покажет качественное изменение в рабочей области, однако провести исследование практически не представляется возможным. Между тем, равномерность ванны расплава можно оценить, если применить методы фильтрации и измерения координат, а также по количеству прерываний на продольной трассе.

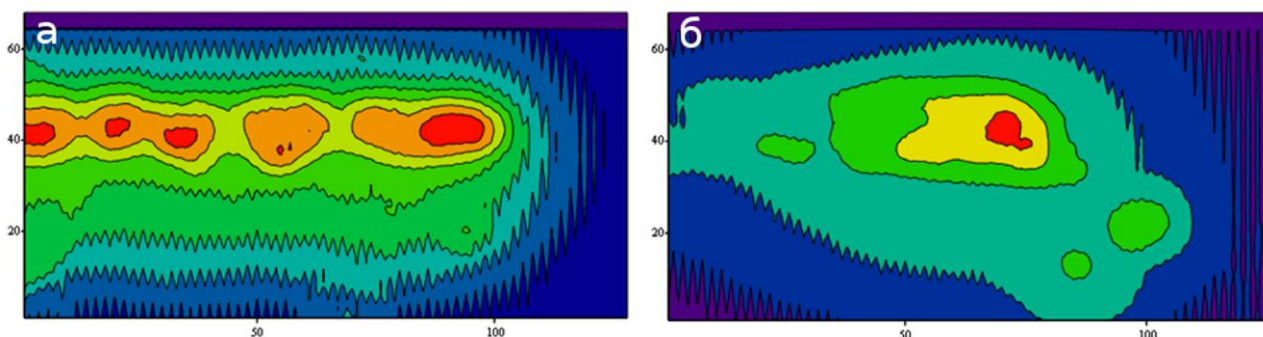


Рис. 2. Распределение сигнала ИК-камеры, соответствующее процессу формирования нестабильного (а) и стабильного трека (б). Параметры процесса: мощность лазера 30 Вт, скорость (а) 300 мм/с, (б) 100 мм/с

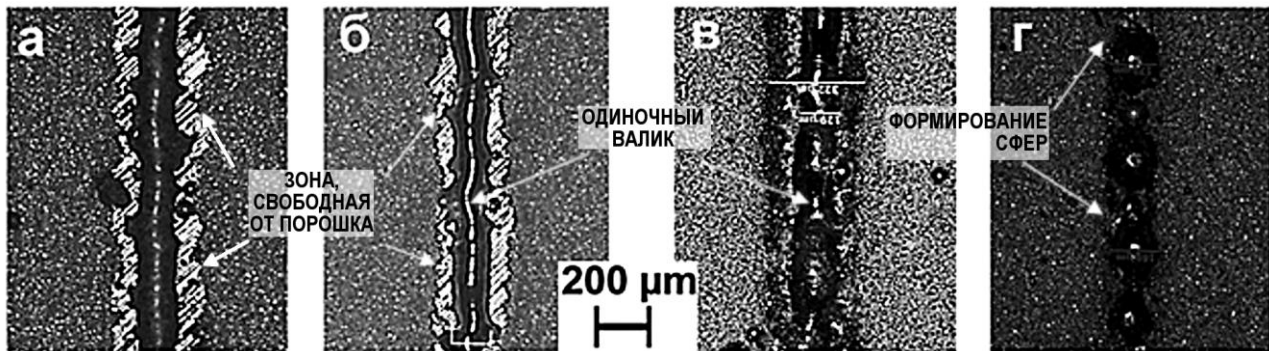


Рис. 3. Сформированные на различных режимах валики из стального порошка (вид сверху, порошок не очищен, оптический микроскоп): а) мощность ЛИ – 30 Вт, скорость сканирования – 100 мм/с, б) 30 Вт, 150 мм/с, в) 30 Вт, 200 мм/с, г) 30 Вт, 300 мм/с

Формирование зоны без порошка сопровождается процессом СЛП практически всегда. Видеоизображения показали, что в ходе нагрева и консолидации частиц порошка в монолитный валик, их движение направлено к центру облучаемой зоны, причём зависит в большей степени от количества погонной энергии. Для порошка стали 12Х18Н10Т консолидация оказалась настолько быстрой, что не позволяла детально исследовать и изучить механизм сплавления частиц. Очевидно, время консолидации может характеризовать этот процесс [15]. Для стандартных металлов и сплавов времена плавления и сплавления между собой оказались менее или порядка 1 мс, благодаря их жидкотекучести.

Для второго этапа экспериментов были получены одиночные валики после сканирования порошка молибдена. Выбор молибдена обусловлен крайне высокой температурой плавления ($T_m = 2620^\circ\text{C}$). Оптическая диагностика процесса показала чёткую картину испарения из зоны лазерного воздействия (рис. 4). Вследствие высокой температуры плавления используемого порошка, отдельные частички порошка вне ванны плавления не консолидируются между собой и находятся в движении под действием газового потока испарения. Единичный кадр на рис. 4а показывает зону свободную от порошка, возникающую в процессе движения частиц, соседствующих с зоной, облучаемой лазерным излучением (т.е. ванны плавления).

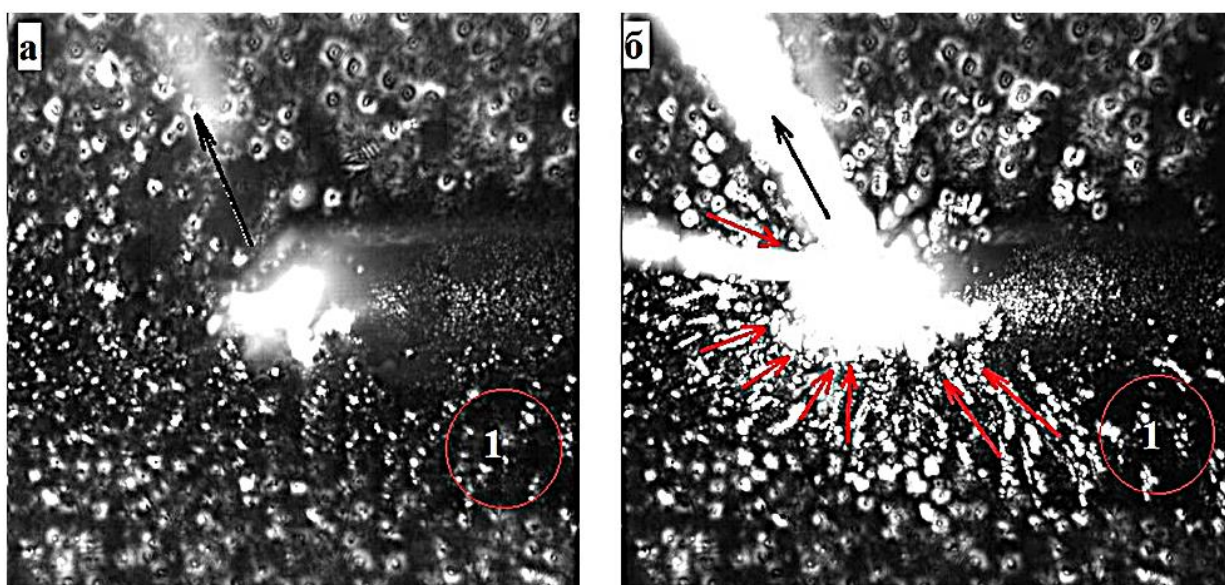


Рис. 4. Изображения полученные с помощью системы визуализации в процессе СЛП молибденового порошка: а) единичный кадр, б) 16 комбинированных кадров, 1- зона свободная от порошка (впоследствии)

ния). Эти частицы не имеют металлургического контакта с подложкой и под действием газодинамических сил свободно перемещаются. Наложение последовательных изображений (рис. 4б) позволяет определить траекторию частиц. Как видно на изображении, все движущиеся частицы на подложке устремлены в центр ванны расплава, также можно видеть движение расплавленных частиц, вылетающих из жидкой ванны расплава. Очевидно, что неизбежно формирующийся поток испарения, направленный перпендикулярно поверхности ванны расплава, образует зону пониженного давления в прилегающей к ванне расплава области, а образующиеся потоки газов захватывают частицы порошка. Аналогично был проведён третий этап работ с порошком стали. Используя последовательные изображения при наблюдении за движением одних и тех же частиц получены скорости их перемещения, а также рассчитаны значения силы, которая приводит их в движение (табл. 2, 3).

В табл. 2 указаны расчётные значения для частиц двух различных порошков, вылетающих из зоны расплава, полученные обработкой видеоизображений с помощью автоматизированного ПО расчёта по методам PTV (Particle tracking velocimetry, метод измерения скорости по отслеживанию траектории частиц). Можно отметить, что для более плотных частиц порошка молибдена значения силы подъёма значительно выше, чем для частиц порошка 12X18H10T.

Табл. 3 содержит данные по расчётам скорости движения частиц, перемещающихся по направлению к центру ванны расплава. Здесь для более плотных частиц порошка стали 12X18H10T скорости вовлечения в ванну расплава значительно выше, чем для частиц порошка молибдена. Это сходится с данными табл. 2, т.е. скорость частиц молибдена ниже скорости частиц стали. Повидимому, частицы молибдена требуют больше времени на разгон (т.к. их инерционность выше из-за массы), могут развить большую скорость. Более детальные сведения могут быть получены из математического моделирования. В настоящее время очевидно, что движущей силой перемещения

частиц является поток испарения из зоны лазерного воздействия, направленный перпендикулярно поверхности ванны расплава.

Проведение экспериментов по визуализации и расчёта скорости движения газового

Таблица 2. Параметры, характеризующие перемещение частиц в газодинамических потоках при СЛП от ванны расплава по направлению газового потока

	12X18H10T	Mo
Радиус сферы, м	$45 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$
Объем, м ³	$3,82 \cdot 10^{-13}$	$2,68 \cdot 10^{-13}$
Плотность, кг/м ³	7760	10220
Масса, мг	$2961 \cdot 10^{-6}$	$2738 \cdot 10^{-6}$
Время наблюдения, с	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Расстояние перемещения, м	$159 \cdot 10^{-6}$	$88 \cdot 10^{-6}$
Скорость частицы, м/с	0,53	0,30
Ускорение, м/с ²	1767	978
Сила подъёма, Н	$5,23 \cdot 10^{-6}$	$2,68 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3. Параметры, характеризующие перемещение частиц в газодинамических потоках при СЛП от расстеленного порошка к ванне расплава

	12X18H10T	Mo
Радиус сферы, м	$27,8 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$
Объем, м ³	$8,95 \cdot 10^{-14}$	$5,09 \cdot 10^{-14}$
Плотность, кг/м ³	7760	10220
Масса, мг	$694 \cdot 10^{-6}$	$521 \cdot 10^{-6}$
Время наблюдения, с	$2 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$
Расстояние перемещения, м	$59 \cdot 10^{-6}$	$146 \cdot 10^{-6}$
Скорость частицы, м/с	0,30	0,12
Ускорение, м/с ²	1475	101
Сила подъёма, Н	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$5,28 \cdot 10^{-8}$

потока испарения проходило без использования порошка. Это обусловлено тем, что нагретые/расплавленные частички, вылетающие из ванны расплава, засвечивали область газового потока, а также была необходимость проверить, что скорость потока испарения значительно превышает скорость движения частиц.

Это доказывает, что движение частиц порошка при СЛП осуществляется за счёт

газового потока испарения. На данном этапе экспериментов плавление подложки осуществлялось без порошка (рис. 5). При расчёте скорости движения пара использовался масштаб изображения 10 мкм – 1 пиксель изображения. В табл. 4 приведены данные расчёта скорости движения газового потока при сканировании подложки 12X18Н10Т со скоростью 20 мм/с. Среднее значение скорости пара для нескольких точек на изображении составляет 3 м/с, что значительно превышает скорость сканирования и скорости движения частиц при СЛП слоя порошка. Табл. 5 содержит данные для экспериментов со скоростью сканирования 300 мм/с.

Стандартные отклонения содержат достаточно высокие цифры относительно среднего значения, что, очевидно, будет зависеть от выборки исследуемых частиц в каждом случае. Скорость потока в различных точках будет отличаться, в соответствии с чем рассчитаны средние значения с отклонениями, которые репрезентативны качественно.

Стоит отметить, что с увеличением скорости сканирования скорость движения газового потока испарения из ванны расплава значительно увеличивается. По-видимому, это связано с уменьшением сечения потока испарения при сохранении расхода.

Механизм формирования зоны без порошка, таким образом, состоит в формировании газодинамического потока среды в области, облучаемой лазерным излучением, индуцированный тягой, создаваемой испарением на поверхности ванны расплава. При этом частички порошка увлекаются вместе с потоком газа, вовлекаясь в ванну расплава, либо выбрасываясь в виде искр. Поток испарения, по-видимому, напрямую зависит от температурного поля на поверхности ванны расплава, т.е. связан с параметрами процесса. Простые выводы позволяют показать, что испарение, вкупе с гидродинамическим поведением ванны расплава под воздействием лазерного излучения, формируют ограничения в технологии лазерного послойного син-

теза деталей, а также в иных лазерных технологиях.

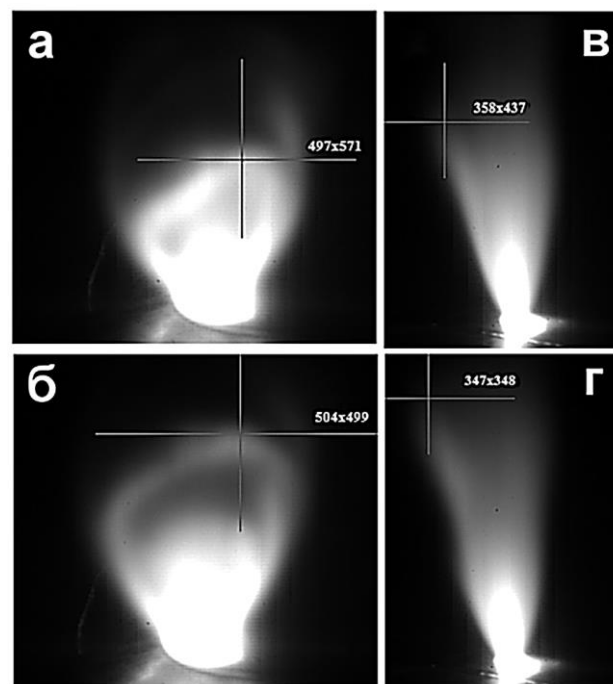


Рис. 5. Последовательные изображения лазерного плавления металлической подложки 12X18Н10Т. Мощность ЛИ – 170 Вт. а, б) скорость сканирования 20 мм/с, в, г) скорость сканирования 300 мм/с

Аналогичный результат был получен в работе [16], где авторы обнаружили схожие эффекты и описали поведение среды в газодинамике СЛП.

Комплекс параметров, имеющих значительное влияние на физические процессы в зоне плавления, необходимо контролировать. Как показано, вероятно, температура, её распределение или исходный сигнал (или яркостная температура) ИК-камеры или пирометра могут применяться для бесконтактного контроля процесса, на основе разработанных критериев. Особую трудность приобретают задачи оценки действительных значений температур на поверхности ванны расплава в силу специфики методик и прямой зависимости сигнала от излучения из зоны обработки. Кроме того, в настоящее время решается вопрос о калибровке оптических элементов в комплексе всего оптического тракта установки СЛП.

Таблица 4. Расчёт скорости движения пара при скорости сканирования 20 мм/с

	х	у	Расстояние перемещения, пкс.	Расстояние перемещения, м	Время наблюдения, с	Скорость пара, м/с	Средн. знач.	Станд. отклон.
1	501	595	26	0,00026	0,0001	3	3	1,14
	509	570						
2	405	649	20	0,00020	0,0001	2		
	400	630						
3	497	571	28	0,00028	0,0001	3		
	505	544						
4	497	571	72	0,00072	0,0002	4		
	504	499						
5	158	483	49	0,00049	0,0001	5		
	153	434						

Таблица 5. Расчёт скорости движения пара при скорости сканирования 300 мм/с

	х	у	Расстояние пе- ремещения, пкс.	Расстояние пере- мещения, м	Время наблюдения, с	Скорость движения пара, м/с	Средн. знач.	Станд. отклон.
1	654	428	79	0,00079	0,0001	8	9	0,93
	648	349						
2	679	402	81	0,00081	0,0001	8		
	692	322						
3	602	433	99	0,00100	0,0001	10		
	612	334						
4	358	437	90	0,00090	0,0001	9		
	347	348						

Выводы

Применение таких диагностических инструментов как высокоскоростная камера и ИК-камера, позволяют изучить процессы, происходящие в зоне лазерного плавления, диагностировать причины движения частиц, приводящих к образованию неравномерного распределения объёма переплавляемого материала. Такой неблагоприятный процесс может влиять на качество изделия, которое является суперпозицией одиночных валиков, уложенных друг рядом с другом.

Результаты исследования показали кинетику консолидации частиц в монолитный валик и газодинамический механизм формирования зоны без порошка вокруг валика. В ходе исследования были получены значения скорости движения частиц, вовлекаемые в ванну расплава и частиц, вылетающих из зоны обработки. Установлено значение скорости движения газового потока испарения, который является причиной движения ча-

стиц в процессе СЛП. Показаны способы и ограничения управления газовым потоком.

Полученные данные позволили оценить кинетику массопереноса при СЛП и будут использованы для дальнейшего решения задачи, направленной на предотвращение образования остаточных дефектов порошкового слоя при консолидации частиц.

Данная работа финансировалась из средств Российского Научного Фонда (соглашение №15-19-00254 от 18.05.2015 г.).

Список литературы

1. Григорьев С.Н. Возможности технологии аддитивного производства для изготовления сложно-профильных деталей и получения функциональных покрытий из металлических порошков / С.Н. Григорьев, Т.В. Тарасова // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 10 (724). С. 5-10.
2. Frățilă D. Additive manufacturing—a sustainable manufacturing route / D. Frățilă, H. Rotaru // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 94. – С. 03004.
3. Baumer M. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and tech-

- nology-push / M. Baumer, P. Dickens, C. Tuck, R. Hague // *Technological forecasting and social change*. – 2016. – T. 102. – C. 193-201.
4. Kruth J.-P. Selective laser melting of iron-based powder / J.-P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – T. 149, № 1. – C. 616-622.
 5. Smurov. Laser process optical sensing and control // IV International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing – Munich, 2007. – C. 537-546.
 6. Doubenskaia M. Optical system for on-line monitoring and temperature control in selective laser melting technology / M. Doubenskaia, M. Pavlov, Y. Chivel. // *Key Engineering Materials*. – 2010. – T. 437. – C. 458-461.
 7. Doubenskaia M. A. Determination of true temperature in selective laser melting of metal powder using infrared camera / M. A. Doubenskaia, I. V. Zhirnov, V. I. Teleshevskiy, P. Bertrand, I. Y. Smurov, // *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications, 2015. – T. 834. – C. 93-102.
 8. Перетягин П.Ю. Исследование влияния моды лазерного излучения на геометрические особенности единичных треков при селективном лазерном плавлении / П.Ю. Перетягин, И.В. Жирнов, Ю.Г. Владимиров, Т.В. Тарасова, А.А. Окункова // *СТИН*. 2014. № 12. С. 32-35.
 9. Zhirnov I. New Approach of True Temperature Restoration in Optical Diagnostics Using IR-Camera / I. Zhirnov, C. Protasov, D. Kotoban, A. V. Gusarov T. Tarasova // *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017. – T. 26. – №648. – C. 1-13.
 10. Doubenskaia M. Study of oxygen effect on the melting pool temperature during selective laser melting / M. Doubenskaia, D. Kotoban, I. Zhirnov // *Mechanics & Industry*. – 2016. – T. 17. – №. 7. – C. 707.
 11. Zhirnov I. Optical Monitoring and Numerical Simulation of Temperature Distribution at Selective Laser Melting of Ti6Al4V Alloy / I. Zhirnov, I. Yadroitsava, I. Yadroitsev // *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications, 2015. – T. 828. – C. 474-481.
 12. Kovaleva I. O. Non-disturbing boundary conditions for modeling of laser material processing / I. O. Kovaleva, S. N. Grigoriev, A. V. Gusarov // *Physics Procedia*. – 2014. – T. 56. – C. 421-428.
 13. Lott P. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM) / P. Lott, H. Schleifenbaum, W. Meiners, K. Wissenbach, C. Hinke, J. Bültmann // *Physics Procedia*. – 2011. – T. 12. – C. 683-690.
 14. Kruth J.-P., P. Feedback control of selective laser melting / J.-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, T. Craeghs // *Proceedings of the 3rd international conference on advanced research in virtual and rapid prototyping* –, 2007. – C. 521-527.
 15. Protasov C. E. Selective laser melting of fused silica: Interdependent heat transfer and powder consolidation / C. E. Protasov, R. S. Khmyrov, S. N. Grigoriev, A. V. Gusarov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – T. 104. – C. 665-674.
 16. Matthews M. J. Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes / M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. M. Rubenchik, P. J. Depond, W. E. King // *Acta Materialia*. – 2016. – T. 114. – C. 33-42.

References

1. Grigoriev S. N. Possibilities of the Technology of Additive Production for Making Complex-Shape Parts and Depositing Functional Coatings from Metallic Powders / S. N. Grigoriev, T. V. Tarasova // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – T. 57. – №. 9-10. – C. 579-584
2. Frățilă D. Additive manufacturing—a sustainable manufacturing route / D. Frățilă, H. Rotaru // *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2017. – T. 94. – C. 03004.
3. Baumer M. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push / M. Baumer, P. Dickens, C. Tuck, R. Hague // *Technological forecasting and social change*. – 2016. – T. 102. – C. 193-201.
4. Kruth J.-P. Selective laser melting of iron-based powder / J.-P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – T. 149, № 1. – C. 616-622.
5. Smurov. Laser process optical sensing and control // IV International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing – Munich, 2007. – C. 537-546.
6. Doubenskaia M. Optical system for on-line monitoring and temperature control in selective laser melting technology / M. Doubenskaia, M. Pavlov, Y. Chivel. // *Key Engineering Materials*. – 2010. – T. 437. – C. 458-461.
7. Doubenskaia M. A. Determination of true temperature in selective laser melting of metal powder using infrared camera / M. A. Doubenskaia, I. V. Zhirnov, V. I. Teleshevskiy, P. Bertrand, I. Y. Smurov, // *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications, 2015. – T. 834. – C. 93-102.
8. Peretyagin P. Y. Track geometry in selective laser melting / P. Y. Peretyagin, I. V. Zhirnov, Y. G. Vladimirov, T. V. Tarasova, A. A. Okunkova, // *Russian Engineering Research*. – 2015. – T. 35. – №. 6. – C. 473-476.
9. Zhirnov I. New Approach of True Temperature Restoration in Optical Diagnostics Using IR-Camera / I. Zhirnov, C. Protasov, D. Kotoban, A. V. Gusarov T. Tarasova // *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017. – T. 26. – №648. – C. 1-13.
10. Doubenskaia M. Study of oxygen effect on the melting pool temperature during selective laser melting / M. Doubenskaia, D. Kotoban, I. Zhirnov // *Mechanics & Industry*. – 2016. – T. 17. – №. 7. – C. 707.

11. Zhirnov I. Optical Monitoring and Numerical Simulation of Temperature Distribution at Selective Laser Melting of Ti6Al4V Alloy / I. Zhirnov, I. Yadroitsava, I. Yadroitsev // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2015. – T. 828. – C. 474-481.
12. Kovaleva I. O. Non-disturbing boundary conditions for modeling of laser material processing / I. O. Kovaleva, S. N. Grigoriev, A. V. Gusarov // Physics Procedia. – 2014. – T. 56. – C. 421-428.
13. Lott P. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM) / P. Lott, H. Schleifenbaum, W. Meiners, K. Wissenbach, C. Hinke, J. Bültmann // Physics Procedia. – 2011. – T. 12. – C. 683-690.
14. Kruth J.-P., P Feedback control of selective laser melting / J.-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, T. Craeghs // Proceedings of the 3rd international conference on advanced research in virtual and rapid prototyping –, 2007. – C. 521-527.
15. Protasov C. E. Selective laser melting of fused silica: Interdependent heat transfer and powder consolidation / C. E. Protasov, R. S. Khmyrov, S. N. Grigoriev, A. V. Gusarov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – T. 104. – C. 665-674.
16. Matthews M. J. Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes / M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. M. Rubenchik, P. J. Depond, W. E. King // Acta Materialia. – 2016. – T. 114. – C. 33-42.

УДК 621.9.047

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВЫПУКЛЫХ ЗНАКОВ ИЗ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

А.А. Козлов¹, С.И. Шарапов¹¹ ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Российская федерация

Аннотация

Для идентификации ответственных изделий в многономенклатурном производстве на них наносят маркировочные знаки. Применяемые в настоящее время способы используют специальные инструменты, на рабочей поверхности которых нанесен контур маркируемого знака, что требует дополнительных расходов при смене знаков.

Электрохимический метод маркирования вызывает нарушение поверхности детали и может привести к образованию концентратора напряжений. При наличии на маркируемой поверхности защитного диэлектрического покрытия его предварительно удаляют, а после нанесения маркировки - восстанавливают.

Предлагается проводить маркирование поверхностей с упругим диэлектрическим покрытием растровым электродом-инструментом с использованием реологической жидкости без нарушения целостности покрытия. Представлена схема нанесения маркировочного знака и показано, что наложение магнитного поля при маркировании позволяет регулировать высоту и ширину знака.

Ключевые слова: маркирование, эластичное диэлектрическое покрытие, реологическая жидкость.

THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE FORMATION CONVEX MARKS FROM RHEOLOGICAL FLUID UNDER A DIELECTRIC COATING

A.A. Kozlov¹, S.I. Sharapov¹¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

Abstract

To identify the responsible products in the multinomenclature production, markers are applied on them. Currently used methods use special tools, on the working surface of which the contour of the mark to be marked is marked, which requires additional costs when changing signs.

The electrochemical marking method causes a violation of the surface of the part and can lead to the formation of a stress concentrator. If there is a protective dielectric coating on the surface to be marked, it is first removed, and after marking - restored.

It is proposed to mark the surfaces with an elastic dielectric coating with a raster electrode tool using rheological fluid without violating the integrity of the coating. A scheme for applying a mark is presented and it is shown that the application of a magnetic field during marking makes it possible to regulate the height and width of the sign.

Keywords: marking, elastic dielectric coating, rheological fluid

В связи с переходом промышленности на производство изделий небольшими партиями, номенклатура изготавливаемых деталей заметно возрастает. Это требует нанесения качественной информации, содержащей сведения об объекте, порядковом номере, дате выполнения операции и исполнителе работы. На машиностроительном производстве получило применение электрохимическое маркирование, позволяющее создавать информационные символы на металличе-

ских деталях [1]. Развитием такого метода является технология электрохимического маркирования универсальным растровым инструментом [2, 3], позволяющая быстро менять информацию без изготовления дорогостоящих индивидуальных клеев.

Вместе с тем, маркирование значительно усложняется при необходимости нанесения информации на металлические детали с диэлектрическим покрытием. В этом случае возникает проблема электрического взаимо-

действия с металлической поверхностью и диэлектрическое покрытие приходится удалять, а затем – вновь восстанавливать. Исследователями установлено [4 - 11], что возможно локализовать зону удаления покрытий, но исключить необходимость вскрытия защитных слоев не удалось и требуется их последующее восстановление, которое трудно осуществимо в процессе эксплуатации изделий.

Анализ покрытий, применяемых в машиностроении показал, что большинство из них – лаки, краски, полиуретан, резина – имеют свойства эластичности, т.е. восстанавливают свою форму после деформации растяжением. Для эластичных материалов при больших давлениях струи электролитической жидкости можно обеспечить временное раскрытие для прохождения электролита к зоне обработки. При этом под действием упругих сил покрытия отверстие закрывается, а попавший электролит в герметичном пространстве не нарушает качества поверхности под покрытием.

Технологические возможности маркирования можно расширить, используя реологические жидкости с металлическим наполнителем [12 - 14].

Контур знака на внутренней поверхности покрытия можно получить, используя реологические жидкости, которые под действием локального электрического поля формируют информационный массив. Для более удобного чтения информационного массива контур знаков следует представить в зеркальном отображении.

Наличие герметичного эластичного покрытия гарантирует сохранение информации при любых внешних воздействиях (механических, химических, магнитных).

На рис. 1 показано формирование фрагмента знака, где к источнику тока подключен электрод-инструмент 1. В этом случае создаётся магнитное поле. Такое же поле можно сформировать, если электрод-инструмент выполнить из постоянного магнита, поместив маркируемую поверхность

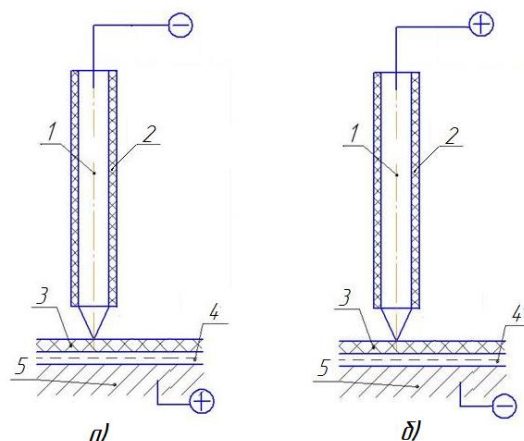


Рис. 1. Создание магнитных полей при маркировании металлических деталей с диэлектрическим покрытием:

- а) – деталь из ферромагнитного материала;
б) – деталь немагнитная.

- 1 – электрод-инструмент; 2 – диэлектрическое покрытие электрода-инструмента;
3 – диэлектрическое покрытие детали;
4 – реологическая жидкость; 5 – деталь

между его полюсами. Перед началом маркирования под слой диэлектрического покрытия (поз.3) должна быть впрыснута реологическая жидкость 4 в количестве, достаточном для формирования всей требуемой информации. Если покрытие 3 эластичное, то появляется возможность подать жидкость 4 в пространство между ним и деталью 5 без разрушения покрытия, например, струей высокого (более 20 МПа) давления или специальной иглой [15].

Механизм формирования информационных знаков из магнитных жидкостей под слоем эластичного диэлектрического покрытия зависит от электропроводности используемой реологической жидкости.

В случае слабопроводящей жидкости между электродом-инструментом и деталью возбуждается переменное электрическое поле, которое характеризуется током смещения в диэлектрическом покрытии и реологической жидкости, плотность которого

$$\vec{j} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

где $\vec{D}$ - электрическое смещение.

При гармоническом напряжении, когда $U = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, между полюсами источника тока плотность тока смещения меняет-

ся также по гармоническому закону, а его амплитуда $j_m = \frac{\varepsilon_0 \cdot \omega \cdot U_m}{d}$ зависит от амплитуды подаваемого напряжения U_m , его циклической частоты ω , электрической постоянной ε_0 и расстояния d между электродом и деталью.

Напряженность $\vec{H}$ магнитного поля, возбуждаемого током смещения, зависит от расстояния r от оси проводника тока

$$H(r) = \begin{cases} \frac{j(r) \cdot r}{2}, & r \leq R \\ \frac{j(r) \cdot R^2}{r}, & r > R \end{cases}$$

Магнитное поле "азимутальное" (охватывает ток) и меняет направление напряжения на обратное с изменением полярности подаваемого напряжения.

Полагая $j(r) \approx \text{const}$ в пределах "токового шнура", границы которого определяются радиусом электрода, получим линейный рост напряженности H магнитного поля от оси тока до его границы, где H достигает максимума, а затем падает обратно пропорционально r . В результате в радиальном направлении возникает градиент индукции магнитного поля

$$\frac{\partial B}{\partial r} = \begin{cases} \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot j}{2}, & r \leq R \\ -\frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot j \cdot R^2}{r^2}, & r > R \end{cases}$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость реологической жидкости, зависящая от концентрации находящихся в ней частиц ферромагнетика.

В неоднородном магнитном поле на частицы, обладающие магнитным моментом $\vec{p}_m$, действует сила, направленное в данном случае радиально

$$F_r = p_{mr} \cdot \frac{\partial B}{\partial r}.$$

Внутри "токового шнура" это сила направлена к его периферии и определяется формулой

$$F_r = p_{mr} \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot j \cdot R^2.$$

За пределами "токового шнура" сила, действующая на ферромагнитные частицы, направлена к оси тока

$$F_r = -p_{mr} \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot j \cdot R^2,$$

и быстро убывает с ростом r .

Таким образом, частицы ферромагнетика под действием магнитного поля, возбуждаемого переменным электрическим полем в реологической жидкости, перемещаются к границе области "занятой" током смещения, создавая контур знака наносимой информации. Регулируя амплитуду и частоту переменного напряжения можно менять время формирования и (или) высоту знаков.

В случае использования проводящей жидкости-электролита подается постоянное напряжение между электродом-инструментом и деталью. Возникающий в электролите ток проводимости имеет плотность порядка 1-10 А/мм², на несколько порядков превышающей ток смещения в диэлектрической жидкости. Механизм воздействия возбуждаемого магнитного поля на частицы ферромагнетика такой же, однако интенсивность воздействия существенно выше. Для достижения такой же высоты знака требуется меньше времени и меньшее значение подводимого напряжения.

При нанесении выпуклых знаков на поверхность немагнитного металла при протекании тока происходит осаждение ионов металла из электролита. Возникающее постоянное магнитное поле играет роль аксиальной магнитной линзы, фокусное расстояние которой $F = p \cdot c^2 \cdot R^2 / 2 \cdot q \cdot I$ зависит от импульса p и заряда q ионов, величины тока I и радиуса "токового шнура". Меняя ток и радиус электрода R можно регулировать ширину контура знака.

При маркировании деталей из ферромагнетика происходит вынос ионов металла с его поверхности под действием тока в электролите. В результате, в области эрозии металла, магнитное поле становится заметно неоднородным. В эти области неоднородности перемещаются ферромагнитные частицы, что позволяет формировать информационные знаки. Одним из основных показателей качества любой информации (особенно растровой) является контрастность знаков, что определяет их читаемость. Согласно литературным источникам [7], оценку читаемости выполняют путем экспертных испытаний с удалением от места информации на 40 ... 50 см.

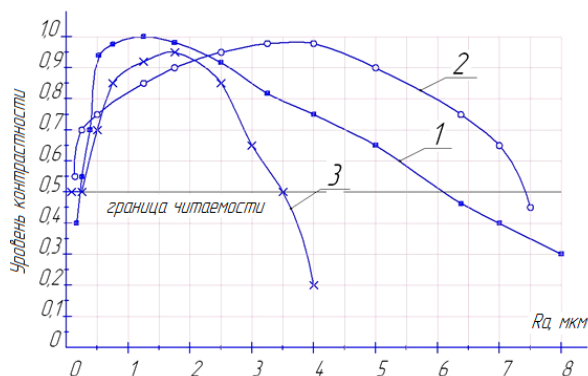


Рис. 2. Читаемость шрифтов при стандартных испытаниях в зависимости от шероховатости поверхности детали (Шрифт №5. Рабочая среда – электролит с добавками; материал детали – сталь конструкционная): 1 – растровое маркирование поверхности без покрытия; 2 – маркирование с локальным вскрытием покрытия; 3 – маркирование без вскрытия покрытия с нанесением контрастного слоя по контуру знака

По руководящим техническим материалам принято, что если три независимых эксперта с такого расстояния прочтут информацию с испытуемым шрифтом, допустив неточности, не искажающие смысл надписи или требующие уточнения не более одной цифры, то это соответствует 50 % уровню контрастности (рис. 2) и является границей читаемости (предполагается, что сомнительные знаки можно уточнить путем сближения объекта испытаний с экспертом и устранить неточность).

Оценку читаемости ограничивает не только уровень контрастности наносимых знаков, но и шероховатость исходной поверхности. В [7] рекомендуется применять электрохимическое маркирование поверхностей с шероховатостью (R_a) не выше 3...4 мкм. Растровое маркирование (кривая 1, рис. 2) позволяет значительно расширить область использования электрохимического маркирования деталей. Экспериментально установлено, что читаемые, контрастные знаки можно наносить на поверхности с шероховатостью $R_a = 5 \dots 6$ мкм (шрифт №5), а в случае применения изделий с диэлектрическим покрытием (кривая 2) повышенная контрастность на границах вскрытого покрытия обеспечивает читаемость информации при высоте неровностей (R_a) до $R_a = 7 \dots 7,5$ мкм.

Список литературы

1. Смоленцев В. П., Смоленцев Г. П., Квасова Л. В. Способ растрового маркирования металлов информацией с переменной шириной штриха и устройство для его осуществления / Патент России №2284882. 2006. Бюл. изобр. №28.
2. Смоленцев В.П., Козлов А.А., Смоленцев Е.В., Козлов А.М. Устройство для электрохимического маркирования поверхности металлической детали под упругим диэлектрическим покрытием и способ с его применением / Патент России №2542216. 2015. Бюл. №5.
3. Козлов, А.А. Расчет и проектирование инструмента для растрового маркирования / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, Г.Н. Климова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2013. № 6. - С. 38-42.
4. Осеков А.Н. Комбинированное маркирование деталей с диэлектрическим покрытием / А.Н. Осеков, И.Ю. Кузнецов, А.М. Козлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2011. №4 (288). – С. 93-99.
5. Козлов А.М. Нанесение надписей на металлические поверхности с вязким электроизоляционным покрытием / А.М. Козлов, А.Н. Осеков // Вести высших учебных заведений Черноземья – 2011, №2 (24). - С. 96-100.
6. Осеков А.Н. Обоснование предельной высоты и глубины знаков при нанесении информации на металлы с диэлектрическим покрытием / А.Н. Осеков, И.Т. Коптев, А.С. Белякин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011, Т7, №8. – С. 86-91.
7. Смоленцев В.П. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. - Москва: Машиностроение, 1983. – С. 72.
8. Смоленцев Г.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев // Воронеж: ВГТУ. 2000. – С. 103.
9. Садыков З.Б. Малоотходное чистовое разделение дефицитных материалов комбинированным методом / З.Б.Садыков, И.И. Хафизов, А.Р. Закирова. – Казань, Изд-во Казан. гос. тех. ун-та. – 2014. – С. 136.
10. Козлов А.А. Подготовка поверхности деталей с диэлектрическим покрытием под электрохимическое маркирование / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, А.М. Козлов, Б.И. Омигов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. №3-1. - С. 73-76.
11. Смоленцев В.П. и др. Способ маркирования деталей из токопроводящих материалов / А.с. СССР № 973271. 1982. Бюл. изобр. №42.
12. Козлов А.А. Нанесение информации на металлические детали с покрытиями с использованием реологической жидкости / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государ-

ственного технического университета. – 2013. Т. 9. № 6.1. – С. 59-63.

13. Болдырев А.А. Повышение точности базирования деталей реологическими средами с переменной плотностью / А.А. Болдырев, В.П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №6. – С. 29-33.
14. Смоленцев В.П. Механизм управления процессом базирования индивидуальных заготовок в реологической жидкости / В.П. Смоленцев, А.А. Болдырев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. №2/3 (292). – С. 56-60.
15. Некрасов А.Н. и др. Способ заточки пустотелых колющих медицинских инструментов / Патент России №2237569. 2004. Бюл. изобр. №28.

References

1. Smolentsev V. P., Smolentsev G. P., Kvasova L. V. Sposob rastrovogo markirovaniya metallov informatsiej s peremennoj shirinoj shtrikha i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya / Patent Rossii №2284882. 2006. Byul. izobr. №28.
2. Smolentsev V.P., Kozlov A.A., Smolentsev E.V., Kozlov A.M. Ustrojstvo dlya ehlektrokhimicheskogo markirovaniya poverkhnosti metallicheskoj detali pod uprugim dielektricheskim pokrytiem i sposob s ego primeneniem / Patent Rossii №2542216. 2015. Byul. №5.
3. Kozlov, A.A. Raschet i proektirovanie instrumenta dlya rastrovogo markirovaniya / A.A. Kozlov, V.P. Smolentsev, G.N. Klimova // Uprochnyayushhie tekhnologii i pokrytiya. – 2013. № 6. – P. 38-42.
4. Osekov A.N. Kombinirovannoe markirovanie detalej s dielektricheskim pokrytiem / A.N. Osekov, I.YU. Kuznetsov, A.M. Kozlov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2011. №4 (288). – P. 93-99.
5. Kozlov A.M. Nanesenie nadpisej na metallicheskie poverkhnosti s vyazkim ehlektroizolyatsionnym pokrytiem / A.M. Kozlov, A.N. Osekov // Vesti vysshikh uchebnykh zavedenij CHernozem'ya – 2011, №2 (24). – P. 96-100.
6. Osekov A.N. Obosnovanie predelnoj vysoty i glubiny znakov pri naneshii informatsii na metally s dielektricheskim pokrytiem / A.N. Osekov, I.T. Koptev, A.S. Belyakin // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011, T7, №8. – P. 86-91.
7. Smolentsev V.P. Elektrokhimicheskoe markirovanie detalej / V.P. Smolentsev, G.P. Smolentsev, Z.B. Sadykov. – Moskva: Mashinostroenie, 1983. – P. 72.
8. Smolentsev G.P. Teoriya ehlektrokhimicheskoy obrabotki v nestatsionarnom rezhime / G.P. Smolentsev, I.T. Koptev, V.P. Smolentsev // Voronezh: VGTU. 2000. – P. 103.
9. Sadykov Z.B. Malootkhodnoe chistovoe razdelenie defitsitnykh materialov kombinirovannym metodom / Z.B.Sadykov, I.I. Khafizov, A.R. Zakirova. – Kazan', Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2014. – P. 136.
10. Kozlov A.A. Podgotovka poverkhnosti detalej s dielektricheskim pokrytiem pod ehlektrokhimicheskoe markirovanie / A.A. Kozlov, V.P. Smolentsev, A.M. Kozlov, B.I. Omigov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. T. 9. №3-1. – S. 73-76.
11. Smolentsev V.P. i dr. Sposob markirovaniya detalej iz tokoprovodyashchikh materialov / A.s. SSSR № 973271. 1982. Byul. izobr. №42.
12. Kozlov A.A. Nanesenie informatsii na metallicheskie detali s pokrytiami s ispol'zovaniem reologicheskoy zhidkosti / A.A. Kozlov, V.P. Smolentsev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. T. 9. №6.1. – S. 59-63.
13. Boldyrev A.A. Povyshenie tochnosti bazirovaniya detalej reologicheskimi sredami s peremennoj plotnost'yu / A.A. Boldyrev, V.P. Smolentsev // Uprochnyayushhie tekhnologii i pokrytiya. 2013. №6. – S. 29-33.
14. Smolentsev V.P. Mekhanizm upravleniya protsessom bazirovaniya individual'nykh zagotovok v reologicheskoy zhidkosti / V.P. Smolentsev, A.A. Boldyrev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2012. №2/3 (292). – S. 56-60.
15. Nekrasov A.N. i dr. Sposob zatочки pustotelykh kolyushchikh meditsinskikh instrumentov / Patent Rossii №2237569. 2004. Byul. izobr. №28

УДК 621.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТАРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ СПОСОБОМ ППД

В.А.Косарев¹, Е.В. Ходакова¹, Д.П. Литвинчук¹¹ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», Москва, Российская федерация

Аннотация

Обработка деталей путем холодного давления обработки давлением на многоцелевых станках с ЧПУ имеют ряд существенных преимуществ, по сравнению с обработкой резания и является перспективным в области металлообработки.

На основе анализа научно-технической литературы спроектирован раскатник с повышенной жесткостью рабочей части инструмента. Особенностью конструкции накатника является то, что инструмент для накатывания внутренней резьбы, включающий хвостовик и соосный хвостовику корпус с эксцентрично размещенными в нем с возможностью вращения вокруг собственной оси рабочими роликами, снабжен опорным роликом, установленным в корпусе соосно последнему с возможностью взаимодействия с рабочими роликами и вращения вокруг собственной оси. Таким образом это увеличит технологические возможности и все преимущества данного метода формообразования.

Ключевые слова: раскатник, планетарная обработка, выглаживание, поверхностное пластическое деформирование, финишная обработка отверстий.

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE ROUND BROACHES TEETH GRINDING OPERATIONS

V.A. Kosarev¹, E.V.Hodakova¹, D.P.Litvinchuk¹¹Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, Russian Federation

Abstract

The processing of parts by cold pressure treatment by pressure on CNC multi-purpose machines has a number of significant advantages, in comparison with cutting machining and is promising in the field of metalworking.

Based on the analysis of scientific and technical literature, a drawing board with increased rigidity of the working part of the tool was designed. A peculiarity of the striker design is that the tool for rolling the internal thread, including the shank and the coaxial shank, the body with eccentrically placed therein rotatable about its own axis by working rollers, is provided with a support roll mounted in the housing coaxially with the latter, with the possibility of interacting with the working rolls and rotating Around its own axis. Thus, this will increase the technological capabilities and all the advantages of this method of shaping.

Keywords: internal roll burnisher, planetary processing, smoothing, surface plastic deformation, finishing holes.

Известно, что обработка методом поверхностного пластического деформирования (ППД) позволяет получать не только геометрические параметры внутренних цилиндрических поверхностей на уровне традиционных методов обработки (расточивание, внутреннее шлифование и т.д.), но и так же получать упрочняющий слой с улучшенными физико-механическими свойствами (износостойкость, усталостная прочность, стойкость к коррозионным воздействиям и т.д.). Этот фактор позволяет увеличить эксплуатационную надёжность получаемых

деталей, что немаловажно в условиях современного машиностроения. В производстве для обработки методом ППД отверстий используется как универсальное, так и специальное оборудование с применением сложного инструмента или приспособлений, что делает такой вид обработки трудоемким не обладающим технологической гибкостью.

В условиях развития автоматизации машиностроения как базовой отрасли, а также, как показывает международная практика, металлообработка все в большей степени

базируется на применении высокоскоростных технологий на оборудовании с ЧПУ.

Планетарное формообразование поверхностей в отверстиях деталей является одним из таких способов, который наиболее эффективен по сравнению с традиционным, благодаря высоким скоростям резания и малым подачам, появляется возможность полной обработки за один переход при значительном уменьшении силовой нагрузки на инструмент. Данное обстоятельство определило направление исследовательской работы.

В предлагаемой работе рассматривается способ ППД при обработке внутренних цилиндрических поверхностей планетарным формообразованием с ударной нагрузкой на инструмент.

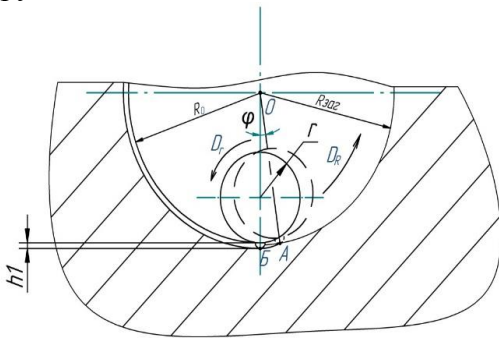


Рис. 1. Схема кинематики планетарной обработки отверстий в деталях

Кинематика планетарной обработки отверстий в деталях осуществляется вращением инструмента вокруг своей оси D_r , вращением инструмента вокруг оси отверстия D_R и осевым перемещением D_s (рис.1).

Фактическая глубина внедрения ролика в деталь определяется параметром $h1$.

С целью расширения технологических возможностей применения ППД планетарным формообразованием внутренних поверхностей в условиях автоматизированного производства на многоцелевых станках с ЧПУ была проведена научная работа по исследованию данного процесса.

Для проведения исследований была спроектирована и изготовлена экспериментальная конструкция инструмента (раскатник), на которую получен патент (RU № 156042), где рабочим элементом был накатной ролик из твердосплавного материала ВК6. Экспериментальные исследования про-

водились на базе технологического полигона МГТУ «СТАНКИН».

Для исследования процесса ППД планетарным способом использовалась обрабатываемая детали с начальной шероховатостью $Ra=1,8$ мкм. Раскатник на станок устанавливался в цанговый патрон инструментального блока, где обработка проводилась при различных режимах с последовательным увеличением станочной подачи и глубин внедрения накатного ролика в деталь с постоянной скоростью накатки 180 м/мин. Критерием определения качества обработки ППД выбрана шероховатость получаемой поверхности.

Учитывая сборную конструкцию раскатника, консольность инструментального блока, а также способ крепления и ударную нагрузку на инструмент в процессе экспериментальных исследований после обработки учитывалась станочная подача на деталь и фактическое внедрения накатного ролика на глубину подачи.

Исследования зависимостей качества обработанной поверхности Ra от изменения параметров режимов обработки, которые в значительной степени влияют на производительность процесса, показали, что при увеличении минутной подачи в 3 раза шероховатость обрабатываемой поверхности ухудшается на 30% (рис. 2).

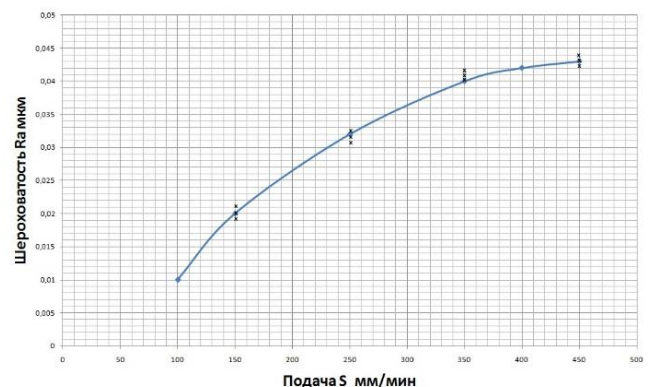


Рис.2. График зависимости подачи от качества поверхности

Данное ухудшение шероховатости характеризуется появлением волнистости на поверхности, которая помимо подачи зависит от диаметра ролика. Данная зависимость дает возможность определять соотношение

оптимальных параметров режимов обработки и геометрических параметров конструкции инструмента.

В результате исследований выявлено, что применение предлагаемого способа обработки отверстий и инструмента даёт возможность повысить шероховатость обрабатываемой поверхности детали от первоначальной $Ra=1,8$ до $Ra=0,02$ мкм, что соответствует шероховатости после шлифования.

При этом эффективность данного способа обработки отверстия зависит от оптимального подбора фактической подачи h_1 , которая в значительной степени зависит от физикомеханических свойств обрабатываемого материала.

Список литературы

1. Смирнов А.В. Теоретические исследования зависимости геометрических параметров области контакта инструмента и заготовки от способа установки инструмента при обработке выглаживанием/В.А.Кузнецов, Д.А.Сазонов, А.В.Смирнов и др.//Известия Московского Государственного университета МАМИ- 2012. -Т.2.-№2.
2. Косарев В.А. Формирование моделей проектирования инструментов с планетарным движением для обработки внутренних поверхностей на основе запатентованных решений. /Гречишников В.А./, // Научный рецензируемый журнал Вестник МГТУ «Станкин» №1, Москва, 2012 г. С.8-11.
3. Гречишников В. А., Яшков В. А., Исаев А. В., Пивкин П. М., Романов В. Б. Модернизация сборного абразивного круга с радиально подвижными абразивными сегментами для внутреннего шлифования полых деталей роботов//Вестник МГТУ Станкин. - 2015. - №4(35) с. 46 – 51.
4. Инструментальная техника, технология изготовления и САПР РИ: учеб. пособие / В.А. Гречишников, Ю.Е. Петухов, В.А. Косарев, П.В. Домнин, А.В. Исаев, В.Б. Романов, П.М. Пивкин, Л.Л. Артюхин, Н.В. Колесов, Б.Е. Седов, А.В. Тарасов, В.Н. Щербаков, О.Г. Живодров, П.А. Аксютин; под общ. ред. В.А. Гречишникова. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 351с.: ил.
5. В.А. Гречишников, А.В. Исаев, В.Б. Романов. Метод формирования профиля образующей исходной инструментальной поверхности сборных фасонных фрез с режущими пластинами, расположенными вдоль винтовой линии // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2015. - №1(32). – С. 8-12.
6. Формообразование и контроль режущих инструментов: учеб. пособие / В.А. Гречишников,

- П.В. Домнин, А.В. Исаев, Ю.Е. Петухов, В.Б. Романов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 151с.:ил.
7. Выглаживающий инструмент для повышения качества цилиндрических поверхностей / Косарев В.А., Литвинчук Д.П., Бойчук Е.В.// «Юность и знания - гарантия успеха» Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор: Разумов М.С. 2014. С. 178-180.
 8. V. A. Grechishnikov, P. V. Domnin, V. A. Kosarev, Yu. E. Petukhov, V. B. Romanov, B. E. Sedov. Shaping by means of complex cutting tools // Russian Engineering Research July 2014, Volume 34, Issue 7, pp 461-465.
 9. Николай И.С., Титулин Б. А. Пластирование деталей машин. -Л.: Машиностроение.Ленингр. отделение,1987. - 224с.:ил.
 10. Гречишников В. А., Петухов Ю. Е., Пивкин П. М., Исаев А. В., Романов В. Б., Домнин П. В. Точение деталей сложного профиля с обеспечением заданного микрорельефа поверхности // СТИН. - 2015. - №8. - С.13-15.
 11. Т. А. Сактаганский, М. С. Селезнев, И. Г. Булава, Б. А. Искра, В. А. Бурнштейн, В. Д. Красильников, Г. Е. Фридман и Е. И. Носенко. Устройство для обкатки внутренних поверхностей / Оpubл. в Б. И., 1973.
 12. Е. И. Пятосин, В. В. Волчуга и Е. И. Глазунов. Раскатка для обработки отверстий / Оpubл. в Б. И., 1982.
 13. Ярославцев В. М. Расчет глубины пластически деформированного слоя при обкатке роликом с первоначальным контактом по линии. Изв. вузов. - М.: Машиностроение, 1976.
 14. Гречишников В.А., Косарев В.А. Инновационные конструкции металлообрабатывающего инструмента для высокотехнологичных машиностроительных производств // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 12. С. 38-44.
 15. Гречишников В.А., Домнин П.В., Косарев В.А., Петухов Ю.Е., Романов В.Б., Седов Б.Е. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента // СТИН. 2013. № 12. С. 6-11.

References

1. Smirnov A.V. Teoreticheskie issledovaniia zavisimosti geometricheskikh parametrov oblasti kontakta instrumenta i zagotovki ot sposoba ustanovki instrumenta pri obrabotke vyglazhivaniem/V.A.Kuznetsov, D.A.Sazonov, A.V.Smirnov i dr.//Izvestiia Moskovskogo Gosudarstvennogo universiteta MAMI-2012. -T.2.-№2.
2. Kosarev V.A. Formirovanie modelei proektirovaniia instrumentov s planetarnym dvizheniem dlia obrabotki vnutrennikh poverkhnostei na osnove

- zapatentovannykh reshenii. /Grechishnikov V.A./, // Nauchnyi retsenziruemyi zhurnal Vestnik MGTU «Stankin» №1, Moskva, 2012 g. S.8-11.
3. Grechishnikov V. A., Iashkov V. A., Isaev A. V., Pivkin P. M., Romanov V. B. Modernizatsiia sbornogo abrazivnogo kruga s radial'no podvizhnymi abrazivnymi segmentami dlia vnutrennego shli-fovaniia polykh detalei robotov//Vestnik MGTU Stankin. - 2015. - №4(35) s. 46 – 51.
 4. Instrumental'naia tekhnika, tekhnologiya izgotovleniia i SAPR RI: ucheb. posobie / V.A. Grechishnikov, Iu.E. Petukhov, V.A. Kosarev, P.V. Domnin, A.V. Isaev, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, L.L. Artiukhin, N.V. Kolesov, B.E. Sedov, A.V. Tarasov, V.N. Shcherbakov, O.G. Zhivodrov, P.A. Aksiutin; pod obshch. red. V.A. Grechishnikova. – M.: FGBOU VO «MGTU «STANKIN», 2015. – 351s.: il.
 5. V.A. Grechishnikov, A.V. Isaev, V.B. Romanov. Metod formirovaniia profil'noi obrazuiushchei iskhodnoi instrumental'noi poverkhnosti sbornykh fazonnykh frez s rezhushchimi platinami, raspolzhenymi vdol' vintovoi linii // Vestnik MGTU «STANKIN». – 2015. - №1(32). – S. 8-12.
 6. Formoobrazovanie i kontrol' rezhushchikh instrumentov: ucheb. posobie / V.A. Grechishnikov, P.V. Domnin, A.V. Isaev, Iu.E. Petukhov, V.B. Romanov. – M.: FGBOU VO «MGTU «STANKIN», 2015. – 151s. il.
 7. Vyglazhivaiushchii instrument dlia povyshe-niia kachestva tsilindricheskikh poverkhnostei / Kosarev V.A., Litvinchuk D.P., Boichuk E.V.// «Iunost' i znaniia - garantiia uspekha» Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Otvetstvennyi redaktor: Razumov M.S.. 2014. S. 178-180.
 8. V. A. Grechishnikov, P. V. Domnin, V. A. Kosarev, Yu. E. Petukhov, V. B. Romanov, B. E. Sedov. Shaping by means of complex cutting tools // Russian Engineering Research July 2014, Volume 34, Issue 7, pp 461-465.
 9. Nikolai I.S., Titunin B. A. Plastirovanie detalei mashin.- L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987.-224s.: il.
 10. Grechishnikov V. A., Petukhov Iu. E., Pivkin P. M., Isaev A. V., Romanov V. B., Domnin P. V. Tochenie detalei slozhnogo profil'ia s obespecheniem zadanno-go mikrorel'efa poverkhnosti // STIN. - 2015. - №8. - S.13-15
 11. T. A. Saktaganskii, M. S. Seleznev, I. G. Bulava, B. A. Iskra, V. A. Burnshtein, V. D. Kra-sil'nikov, G. E. Fridman i E. I. Nosenko. Ustroistvo dlia obkatki vnutrennikh poverkhnostei / Opubl. v B. I., 1973.
 12. E. I. Piatosin, V. V. Volchuga i E. I. Glazu-nov. Raskatka dlia obrabotki otverstii / Opubl. v B. I., 1982.
 13. Iaroslavtsev V. M. Raschet glubiny plasticheski deformirovannogo sloia pri obkatke rolikom s pervonachal'nym kontaktom po linii. Izv. vuzov. - M.: Mashinostroenie, 1976.
 14. Grechishnikov V.A., Kosarev V.A. Innovatsionnye konstruksii metalloobrabatyvaiushchego instrumenta dlia vysokotekhnologichnykh mashinostroitel'nykh proizvodstv // Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem. 2011. № 12. S. 38-44.
 15. Grechishnikov V.A., Domnin P.V., Kosarev V.A., Petukhov Iu.E., Romanov V.B., Sedov B.E. Sovremennye metody resheniia zadach formoobrazovaniia slozhnogo rezhushchego instrumenta // STIN. 2013. № 12. S. 6-11.

УДК 621.92

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТРЕЗНЫХ КРУГОВ ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ

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

Аннотация

Применение отрезных кругов с боковыми режущими поверхностями позволяет полностью или существенно снизить вероятность образования прижогов и других дефектов, повысить производительность процесса резки и стойкость режущего инструмента. Поэтому производственное применение таких кругов для обработки различных материалов представляет значительный интерес для всех металлообрабатывающих предприятий, производящих резку труб. На основе изложенных итогов производственной апробации основных научных и практических результатов предлагается методика расчета абразивного инструмента, позволяющая повысить эффективность процесса абразивной резки, как одного из самых высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающий высокий уровень точности и качества разрезаемой трубы.

Ключевые слова: отрезной круг, абразивная резка, прижоги, прочность закрепления зерна, качество резки.

METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF LATERAL SURFACES CUTTING CIRCLES

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

Abstract

The use of cutting wheels with side cutting surfaces allows to completely or substantially reduce the likelihood of the formation of burns and other defects, improve the productivity of the cutting process and the resistance of the cutting tool. Therefore, the production use of such circles for the processing of various materials is of considerable interest to all metalworking enterprises that cut pipes. Based on the above results of industrial approbation of the main scientific and practical results, a technique is proposed for calculating the abrasive tool, which makes it possible to increase the efficiency of the abrasive cutting process as one of the most high-performance processing methods, ensuring a high level of accuracy and quality of the cut pipe.

Keywords: Cutting wheel, abrasive cutting, burns, strength of grain fastening, cutting quality.

В общем случае структура инструмента характеризуется значительным числом параметров и характеристик. Обычно, в зависимости от поставленных целей, используют ограниченный их набор [1-15].

Для отбора таких характеристик воспользуемся следующим подходом. Основное назначение любого абразивного инструмента – обеспечить удаление припуска с детали за требуемое время, т.е. обеспечить необходимую производительность резания при одновременном достижении заданного качества обработанных поверхностей. Так как процесс резки осуществляется зернами, расположенными на боковой поверхности круга, то интенсивность съема металла будет

зависеть от числа этих зерен n_z , проходящих зону резания в единицу времени.

Для того, чтобы зерно могло срезать стружку, нагрузка на него от силы резания $P_{рез}$ должна быть меньше, т.е. необходимо, чтобы выполнялось условие $P_{рез} < R_z$, где R_z – прочность удержания зерна на рабочей поверхности инструмента [16-21].

Отсюда следует вывод – чем выше прочность зерна и прочность его закрепления, тем потенциально больший объем обрабатываемого материала может срезать зерно, тем выше достижимая производительность процесса.

Таким образом, для того, чтобы определить интенсивность съема обрабатываемого материала, необходимо знать следующие параметры поверхностного слоя абразивного инструмента:

а) размер, форму и материал зерна, определяющие прочность последнего (разрушающую нагрузку);

б) геометрические параметры вершин режущих зерен, определяющие форму поперечного сечения среза и геометрию зоны стружкообразования;

в) прочность удержания зерна на рабочей поверхности инструмента;

г) число зерен в рабочем слое, зависящее от концентрации зерен и закона распределения их в структуре инструмента.

Очевидно, что характеристики инструмента, определяющие производительность резки, будут отвечать и за качественные показатели обработанной поверхности. Так, предельная величина съема зерном и степень его износа будут определять термо-силовую напряженность процесса, а значит, и дефектность поверхностного слоя, а микрогеометрию обработанной поверхности – микрорельеф рабочей поверхности инструмента, параметры которого будут зависеть от числа, геометрических параметров и характера распределения зерен в рабочем слое.

Таким образом, определен перечень характеристик структуры инструмента, через посредство которых можно установить взаимосвязь между выходными показателями процесса резки и параметрами структуры абразивного инструмента.

Исходя из вышеизложенного, при проектировании отрезного круга необходимо учитывать ряд особенностей и принципов:

1. определение формы абразивных зерен;
2. определение размеров абразивных зерен с учетом зернистости (принимается равным математическому ожиданию $M[t_p]$);
3. определение числа зерен в инструменте (определение величины припуска; величины отношения ξ , в зависимости от скорости резания V_k и радиуса закругления вершин зерен ρ_3 , коэффициента

стружкообразования K_c , зависящий от отношения ξ ;

4. определение закона распределения абразивных зерен в матрице круга;
5. определение кривой плотности вероятности распределения расстояний вершин зерен в объеме инструмента;
6. определение прочности связки абразивных зерен в объеме инструмента с учетом износа режущего инструмента.

Для процессов резки с обеспечением высокой размерной стойкости инструмента оптимальное решение может достигаться как на границе, так и внутри области, определяемой системой.

Рассмотрим пример расчета параметров характеристики инструмента.

Пример. Рассчитать параметры торцевой поверхности инструмента при абразивной резке труб диаметром $d_3 = 0,0603$ м; материал трубы – сталь 08кп; кругами 600×6×32 14А 80Н Т1 БУ с заданными условиями $V_k = 80$ м/с; $S_y = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с; время резки $\tau = 6$ с; коэффициент стружкообразования $K_c = 0,2$; радиус закругления для зернистости 80 – $\rho_3 = 7,3 \cdot 10^{-5}$ м, этап окончания резки трубы – $F_{БК} = 5,4 \cdot 10^{-4}$ м².

1) Рассчитать максимальное число выступающих зерен на торцах круга, чтобы обеспечить резку детали без прижога.

Необходимое число зерен на торцах отрезных кругов определяем по формуле:

$$n_3 \leq \frac{3,53 \cdot \Delta h \cdot S_y}{d_3 \cdot \rho_3^2 \cdot (\xi)^{3/2} \cdot K_c \cdot V_k}, \quad (1)$$

По [10] находим толщину удаляемого слоя: $\Delta h = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м.

Радиальную подачу S_y находим по формуле:

$$S_y = \frac{d_3}{\tau} = \frac{0,0603}{6} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Радиус закругления ρ_3 для зернистости 80 по данным работы [4] $\rho_3 = 7,3 \cdot 10^{-5}$ м.

Отношение ξ при скорости резки 80 м/с, исходя из графика работы [8], равно 0,13.

Коэффициент стружкообразования K_c , учитывая отношение ξ согласно работы [3], равен 0,2.

Тогда

$$n_3 \leq \frac{3,53 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,0603 \cdot (7,3 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (0,13)^{3/2} \cdot 0,2 \cdot 80} = 2 \cdot 10^4 \text{ (1/м}^2\text{)}.$$

2) Рассчитать износ зерен торцовых поверхностей круга по алгоритму [13]. Для нашего случая $h_3 = 6$ мкм.

3) Рассчитать величину выступания зерен из связки $H_{связки}$. Для нашего случая при $S_y = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с и рассчитанному максимальному числу выступающих зерен на торцах круга $n_3 = 2 \cdot 10^4$ 1/м² по [14] выбираем глубину резания $t = 10,4$ мкм. Так как максимальная глубина микрорезания $t_\phi = 2t$. Тогда имеем $t_\phi = 2 \cdot 10,4 = 20,8$ мкм. Исходя из условия $H_{связки} > h_3 + t_\phi$ рассчитаем $H_{связки} > 6 + 20,8 > 26,8$ мкм. Величина выступания зерен из связки должна быть $H_{связки} > 26,8$ мкм.

4) Рассчитать прочность закрепления зерен в связке круга R_3 . С одной стороны, зерна не должны выпадать из связки и разрушаться, т.е. $R_3 > P_{рез}$, но с другой стороны, для обеспечения заданного качества поверхностного слоя размер площадок износа абразивных зерен не должен превышать величины, при которой температура поверхностного слоя становится равной предельно допустимой. Для этого достаточно подобрать инструмент с прочностью абразивного зерна и прочностью его закрепления в круге R_3 , обеспечивающего разрушение или вырывание зерна из связки при его износе, т.е. должно соблюдаться условие $R_3 < \sqrt{P_z'^2 + P_y'^2}$, где предельно допустимые силы резания рассчитываем по формулам:

$$(P_z^\phi) = P_z' \cdot n_3 \cdot F_\kappa \cdot K_3, \quad (2)$$

$$(P_y^\phi) = P_y' \cdot n_3 \cdot F_\kappa \cdot K_3, \quad (3)$$

где P_z' — величина тангенциальной силы резания на единичном зерне (Н); n_3 — число зерен на торцах отрезных кругов (1/м²); K_3 — коэффициент затупления рабочей поверхности инструмента, F_κ — площадь контакта боковой поверхности круга с заготовкой (м²).

Величину тангенциальной силы резания на единичном зерне P_z' , имеющей площадки затупления определяем по формуле [15-18]:

$$P_z' = \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot \cos \gamma}{\sin \beta \sin(\beta + \gamma) [\text{ctg}(\beta + \gamma) - f]} + \rho_3 (1 - \cos \beta) d_u \sigma_T + \frac{\pi d_u^2}{4} \cdot \sigma_T f + \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot f_s \cdot \cos(\beta + \gamma) [\text{tg}(\beta + \gamma) + f] \cos \gamma}{\sin \beta \sin^2(\beta + \gamma) [\text{ctg}(\beta + \gamma) - f_s] [\text{ctg}(\beta + \gamma) - f]}, \quad (4)$$

где a_3 — средняя глубина резания на единицу ширины режущей кромки зерна; γ — передний угол резания; β — угол сдвига; d_u — усредненная по ширине длина площадки затупления в направлении вектора скорости резания; τ_s — среднее касательное напряжение в плоскости сдвига; f — коэффициент внешнего трения; f_s — коэффициент внутреннего трения; ρ_3 — средний радиус закругления вершины зерна; σ_T — предел текучести материала детали.

Величину радиальной силы резания на единичном зерне P_y' определяем по формуле:

$$P_y' = \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot \sin \gamma}{\sin \beta \sin(\beta + \gamma) [\text{ctg}(\beta + \gamma) - f]} + \rho_3 (1 - \cos \beta) d_u \sigma_T \times \text{ctg} \frac{\beta}{2} + \frac{\pi d_u^2}{4} \cdot \sigma_T + \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot f_s \cdot \cos(\beta + \gamma) [\text{tg}(\beta + \gamma) + f] \sin \gamma}{\sin \beta \sin^2(\beta + \gamma) [\text{ctg}(\beta + \gamma) - f_s] [\text{ctg}(\beta + \gamma) - f]} \quad (5)$$

Отсюда для заданных условий резки имеем:

$$P_z' = \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot \cos(50)}{-\sin(20) \cdot \sin(30) \cdot [\text{ctg}(-30) - 0,15]} + 0,073 \cdot (1 - \cos(20)) \cdot 0,05 \cdot 317 + \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 317 \cdot 0,15 + \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot 0,15 \cdot \cos(30) \cdot [\text{tg}(-30) + 0,15] \cdot \cos(50)}{\sin(20) \cdot 0,25 \cdot [\text{ctg}(-30) - 0,15] \cdot [\text{ctg}(-30) - 0,15]} = 1,18 \text{ Н.}$$

$$P'_y = \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot \sin(-50)}{-\sin(20) \cdot \sin(30) \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15]} + \\ + 0,073 \cdot (1 - \cos(20)) \cdot 0,05 \cdot 317 \cdot \operatorname{ctg} \frac{20}{2} + \\ + \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 317 \cdot 0,15 + \\ + \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot 0,15 \cdot \cos(30) \cdot [\operatorname{tg}(-30) + 0,15] \cdot \sin(-50)}{\sin(20) \cdot 0,25 \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15] \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15]} = 0,45 \text{ Н.}$$

По данным С.Н. Корчака [5] интенсивность напряжений $\sigma_{i\varepsilon}$ при средней температуре разрезаемой поверхности ($\approx 500^\circ\text{C}$) и скорости деформации при абразивной обработке $\varepsilon = 10^6 \dots 10^7 \text{ C}^{-1}$ для разных конструкционных, жаростойких и других легированных сталей в 2...4 раза выше уровня временного сопротивления разрыву σ_ε этих сталей при комнатной температуре, приводимого в справочной литературе. Отсюда

$$\sigma_{i\varepsilon} = 3,0 \sigma_\varepsilon. \quad (6)$$

С другой стороны [5], интенсивность нормальных напряжений в 1,5...2 раза выше касательных напряжений (τ_s), преодолеваемых при сдвиге элементов стружки, т.е.

$$\sigma_i = 1,75 \tau_s. \quad (7)$$

С учетом (7) можно определить

$$\tau_s = \frac{3,0}{1,75} \sigma_\varepsilon = 1,7 \sigma_\varepsilon. \quad (8)$$

Для конструкционной стали 08 кп $\sigma_\varepsilon = 314 - 412 \text{ МПа}$. Принимаем $\sigma_\varepsilon = 412 \text{ МПа}$.

Отсюда

$$\tau_s = 1,7 \cdot 412 = 700 \text{ МПа.}$$

Сравнительный анализ справочных данных о временном сопротивлении разрыву (σ_ε) и пределу текучести (σ_T) по конструкционным сталям показал, что

$$\sigma_T \approx 0,77 \sigma_\varepsilon. \quad (9)$$

Отсюда

$$\sigma_T \approx 0,77 \cdot 412 = 317 \text{ МПа.}$$

Значение переднего угла резания на зерне можно принять [3] равным $\gamma = -50^\circ$. Средний угол сдвига при абразивной обработке [2] примем равным $\beta_{cp} = 20^\circ$. Радиус закругления на площадке износа [65] $\rho_3 = 0,073 \text{ мм}$. Т.Н. Лоладзе [6] и Н.И. Богомол

[1] отмечают, что при трении алмаза по стали без смазки $f = 0,15 \dots 0,2$. Таким образом, примем средние значения коэффициента трения $f = f_s = 0,15$. Среднюю глубину резания по данным [9] принимаем $a_3 = 0,015 \text{ мм}$. Усредненную по ширине площадку износа по данным [9] принимаем $d_u = 0,05 \text{ мм}$.

На основании приведенных выше расчетов определим прочность закрепления зерен в связке круга R_3 .

$$R_3 > \sqrt{P_y'^2 + P_z'^2} = \sqrt{0,45^2 + 1,18^2} > 1,26 \text{ Н.}$$

5) Рассчитать температуру в зоне контакта инструмента и детали.

Общая плотность теплового потока, образующегося в зоне резки определяем по формуле:

$$q_{\text{общ}} = \frac{P_z \cdot V_k}{F_k}, \quad (10)$$

где P_z – тангенциальная составляющая общей силы резания, Н; V_k – скорость отрезного круга, м/с; F_k – площадь контакта круга с деталью, м^2 .

В нашем случае $q_{\text{общ}} = 11,851 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}$.

Рассчитаем температуру в зоне контакта инструмента и детали по формуле:

$$\Theta(x - h/2) = \frac{q}{2C\gamma\sqrt{\pi a\tau}} \exp\left[-\frac{(x - h/2)^2}{4a\tau}\right], \quad (11)$$

где C – удельная теплоемкость разрезаемого металла, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $h/2$ – начальный размер половины паза резки, м; x – расстояние от средней линии паза до рассматриваемого сечения, м; τ – время резки, с; γ – плотность материала разрезаемой детали, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Отсюда имеем:

$$\Theta(x) = \frac{11,851 \cdot 10^6}{2 \cdot 482 \cdot 7814 \sqrt{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 6}} \exp\left[-\frac{(0,01 - 0,003)^2}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 6}\right] = 165^\circ\text{C}$$

где $C = 482 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $h/2$ – начальный размер половины паза резки, м, так как ширина паза = $0,006 \text{ м}$; $h/2 = 0,003 \text{ м}$; x – расстояние от средней линии паза до рассматриваемого сечения, мм; $x = 0,01 \text{ м}$; τ –

время резки, с; γ – плотность материала разрезаемой трубы, кг/м³, $\gamma = 7814$ кг/м³.

Для рассматриваемого случая в соответствии с выполненным расчетом предлагаемая характеристика инструмента определяется из условия: износ периферии круга $h_3 = 0$.

Рекомендации по выбору параметров процесса резки

Кроме аналитического расчета торцовых поверхностей круга с помощью разработанной и экспериментально проверенной методики исследования отрезных кругов можно выбрать оптимальный диаметр и конструкцию круга.

Исходя из диаметра трубы для резки можно определить минимальный диаметр отрезного круга по следующей эмпирической формуле:

$$D_k = 7,5d_3, \quad (12)$$

где d_3 – диаметр трубы, мм.

По табл. 1 в зависимости от диаметра круга выбирается номер зернистости [4].

Величина подачи существенно влияет на коэффициент шлифования и качество поверхности труб при резке. На основании многочисленных эмпирических данных составлена специальная таблица для выбора радиальной подачи, в зависимости от диаметра абразивного круга, установленной мощности привода главного движения, размеров и марок металла, разрезаемых труб (табл. 2).

Ниже приводится решение поставленных вопросов, а также результаты экспериментальных испытаний и практические рекомендации по дальнейшему использованию данного способа.

Таблица 1. Зернистости отрезных кругов в зависимости от их диаметров

Диаметры отрезных кругов, мм	300	400	600
Рекомендуемые номера зернистости	50	50	63

Следует также отметить, что отрезные круги выпускаются для работы со скоростью резания 80 м/с без охлаждения на бакелито-

вой связке с калибровочными металлическими втулками посадочного отверстия. Кроме того, отрезные круги могут быть пригодны также и для резки горячего металла с температурой до 1000°С. Диаметры зажимных фланцев должны быть равны 1/3 диаметра круга.

Таблица 2. Рекомендуемые величины радиальных подач в зависимости от диаметра круга, мощности привода, размеров и марок металла, разрезаемых труб

Диаметры разрезаемых труб d_3 , мм	Рекомендуемые величины радиальных подач S_y , мм/с		
	Установленная мощность привода главного движения, N, кВт		
	1,2	1,6	2,0
	Диаметры отрезных кругов D_k , мм		
	300	400	600
	Трубы стальные водогазопроводные, ГОСТ 3262 – 75, EN 10219, DIN 2440/2441		
	Трубы стальные электросварные прямшовные ГОСТ 10704 – 91, ГОСТ 10705–80, EN 10219, DIN 2440/2441		
	марки стали: 1пс, 1сп, 2пс, 2сп, 08кп, сталь 10; $\sigma_g = (320 \div 440)$ МПа		
	марки стали: S235JRH, S275JRH, S355JRH, St.33, St.37		
	26,9	11,8	13,2
	33,7	9,6	11,5
	42,4	8,3	9,8
	марки стали: 3сп, 3 пс, сталь 20, сталь 35; $\sigma_g = (490 \div 520)$ МПа		
	26,9	9,7	11,3
	33,7	7,4	19,3
	42,4	6,2	7,6
			10,7

Приведенные данные могут быть использованы, как при составлении технологического процесса, так и при проектировании абразивно-отрезных станков для резки труб.

Список литературы

1. Богомолов Н.И. Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна. / Н.И. Богомолов Труды ВНИИАШ. – М.–Л.: Машиностроение, № 7, 1968. – С. 74 –87.
2. Бокучава Г.В. О влиянии скорости шлифования на стойкость абразивного инструмента / Г.В. Бокучава // Абразивы и алмазы. – 1964. – № 1. – С.47–53.

3. Богомолов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла. автореф. дис. на соиск. науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Н.И. Богомолов. – Киев, 1967, – 46 с.
4. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Геометрические параметры режущих элементов абразивных зерен шлифовального круга. / А.М. Вульф, А.В. Мурдасов // Науч. техн. реф. сб. «Абразивы», – М.: НИИМАШ, – 1968, вып. 1.
5. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С.Н. Корчак // – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
6. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
7. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.03.01 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Е.П. Калинин. – Рыбинск, 2006. – 414 с.
8. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
10. Левченко Е.А. Экспериментальные исследования радиального износа отрезного круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – Вип. 139. – С. 148 – 153.
11. Левченко Е.А. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса абразивной резки труб / Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – Вип. 140. – С. 52 – 57.
12. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами / Е.А. Левченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 40. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2013. – С. 70 – 75.
13. Левченко Е.А. Расчет боковой режущей поверхности отрезного круга с учетом износа абразивных зерен / Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – Вип. 151. – С. 74 – 80.
14. Левченко Е.А. Пути повышения эффективности процесса абразивной резки труб с учетом износа вершин зерен отрезного круга / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – Вип. 152. – С. 145– 151.
15. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами / Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Вып. № 3. – С. 46 – 51.
16. Новоселов Ю.К. Выбор и обоснование применения способов резки труб / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – Вип. 24. – С.214 – 217.
17. Братан С.М. Определение вероятности изнашивания вершины зерна отрезного круга в процессе резки труб / С.М. Братан, Е.А. Левченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 6 (59) частина 1. – С. 40–43.
18. Левченко Е.А. Кинематический анализ условий процесса абразивной резки труб / Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. – 2010. – Вип. 26. – С.324–330.
19. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 114 – 117.
20. Новоселов Ю.К. Аналитический расчет элементов конструкции боковых поверхностей отрезных кругов / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С.27–31.
21. Левченко Е.А. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2011. – Вип. 118. – С. 57 – 61.

References

1. Bogomolov N.I. Issledovanie deformatsii metalla pri abrazivnykh protsessakh pod deistviem edinichnogo zerna. / N.I. Bogomolov Trudy VNIIMASH. – M.–L.: Mashinostroyeniye, № 7, 1968. – S. 74 – 87.
2. Bokuchava G.V. O vliyanii skorosti shlifovaniia na stoikost' abrazivnogo instrumenta / G.V. Bokuchava // Abrazivy i almazy. – 1964. – № 1. – S.47–53.

3. Bogomolov N.I. Osnovnye protsessy pri vzaimodeistvii abraziiv i metalla. avtoref. dis. na soisk. nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniia» / N.I. Bogomolov. – Kiev, 1967, – 46 s.
4. Vul'f A.M., Murdasov A.B. Geometricheskie parametry rezhushchikh elementov abrazivnykh zeren shlifoval'nogo kruga. / A.M. Vul'f, A.V. Murdasov // Nauch. tekhn. ref. sb. «Abrazivy», – M.: NIIMASH, – 1968, vyp. 1.
5. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniia stal'nykh detalei. / S.N. Korchak // – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s.
6. Loladze T.N. Iznos almazov i almaznykh krugov / T.N. Loladze, G.V. Bokuchava. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 112 s.
7. Kalinin E. P. Teoriia i praktika upravleniia proizvoditel'nost'iu abrazivnoi obrabotki s uchetom zatupleniia instrumenta: dis. na soska-nie nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Tekhnologiya i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki» / E.P. Kalinin. – Rybinsk, 2006. – 414 s.
8. Filimonov L.N. Vysokoskorostnoe shlifovanie / L.N. Filimonov. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 248 s.
9. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 s.
10. Levchenko E.A. Eksperimental'nye issledovaniia radial'nogo iznosa otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 139. – C. 148 – 153.
11. Levchenko E.A. Eksperimental'nye issledovaniia energosilovykh parametrov protsessa abrazivnoi razrezki trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 140. – C. 52 – 57.
12. Levchenko E.A. Teplofizicheskaia model' protsesa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami / E.A. Levchenko // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vy-pusk 40. Tekhnicheskie nauki. – Simferopol': NITs KIPU, 2013. – S. 70 – 75.
13. Levchenko E.A. Raschet bokovoi rezhushchei poverkhnosti otreznogo kruga s uchetom iznosa abrazivnykh zeren / E.A. Levchenko, N. I. Pokintelitsa, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 151. – C. 74 – 80.
14. Levchenko E.A. Puti povysheniia effektivnosti protsessa abrazivnoi razrezki trub s uchetom iznosa vershin zeren otreznogo kruga / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 152. – C. 145– 151.
15. Levchenko E.A. Teplofizicheskaia model' protsesa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami / E.A. Levchenko, N. I. Pokintelitsa // Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. tr. Sevastopol'skii gosudarstvennyi universitet. – Sevastopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2016. – Vyp. № 3. – C. 46 – 51.
16. Novoselov Iu.K. Vybory i obosnovanie primeneniia sposobov razrezki trub / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnykh sistem. Zbirnik naukovykh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2009. – Vip. 24. – S.214 – 217.
17. Bratan S.M. Opredelenie veroiatnosti iznashivaniia vershin zerna otreznogo kruga v protsesse razrezki trub / S.M. Bratan, E.A. Levchenko // Visnik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu imeni Mikhaila Ostrogradskogo. – Kremenchuk: KDPU, 2009. – Vip. 6 (59) chastina 1. – S. 40–43.
18. Levchenko E.A. Kinematicheskii analiz uslovii protsessa abrazivnoi razrezki trub / E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnykh sistem. Zbirnik naukovykh prats'. – Kramators'k. – 2010. – Vip. 26. – S.324–330.
19. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie osobennostei raboty bokovykh poverkhnostei otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. – Vip. 107. – C. 114 – 117.
20. Novoselov Iu.K. Analiticheskii raschet elementov konstruktivnykh bokovykh poverkhnostei otreznovykh krugov / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnykh sistem. Zbirnik naukovykh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2011. – Vip. 28. – S.27–31.
21. Levchenko E.A. Analiz zakonornosti udalenii metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – C. 57 – 61.

УДК 621.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

С.Л. Леонов¹, А.М. Иконников¹, В.С. Силивакин¹¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Барнаул, Российская федерация

Аннотация

Авторы излагают методику расчета съема металла при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей заготовок из ферромагнитных и немагнитных материалов индуктором на постоянных магнитах. Показана геометрическая модель взаимодействия абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью при магнитно-абразивной обработке. Произведено теоретическое исследование съема металла. Получены математические зависимости для определения съема металла и максимальной глубины внедрения частицы. Выявлено влияние силы давления абразивного зерна на глубину его внедрения в обрабатываемую поверхность. В итоге расчеты показали влияние технологических параметров (время обработки, рабочий зазор, зернистость порошка) на съем материала при магнитно-абразивной обработке.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, единичное взаимодействие, съем металла.

MATHEMATICAL MODELING OF THE METAL SCHEME PROCESS FOR MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT

S.L. Leonov¹, A.M. Ikonnikov¹, V.S. Silivakin¹¹Altai State Technical University. I.I. Polzunova, Barnaul, Russian Federation

Abstract

The authors set out a method for calculating metal removal during magnetic abrasive machining of flat surfaces of billets from ferromagnetic and nonmagnetic materials by an inducer on permanent magnets. A geometric model of the interaction of an abrasive particle with a machined surface is shown for magnetic abrasive machining. A theoretical study of metal removal was made. Mathematical dependencies for determination of metal removal and maximum penetration depth of a particle are obtained. The influence of the force of the abrasive grain pressure on the depth of its introduction into the surface to be treated is revealed. As a result, the calculations showed the influence of technological parameters (processing time, working gap, grain size of the powder) on the material removal when magnetically abrasive processing.

Keywords: Magnetic-abrasive treatment, single interaction, metal removal.

Возрастающие требования к качеству выпускаемых изделий вызывают потребность в совершенствовании существующих и создании новых технологий отделочной обработки абразивом на гибкой связке (обработка свободным абразивом уплотненным инерционными силами, струйно-ударная, виброабразивная обработка и целый ряд других видов). Наиболее производительным способом обработки абразивом на гибкой связке является магнитно-абразивная обработка (МАО). Съем металла при этом производится режущим инструментом, сформированным магнитным полем из магнитно-

абразивного порошка. Режущий инструмент отличается повышенной эластичностью [1 - 4].

С помощью МАО можно не только обеспечивать низкую шероховатость и полировать разные по форме поверхности деталей, но и механизировать такие операции, как округление острых кромок и снятие заусенцев, удаление окалины и тонких оксидных пленок. На деталях при этом происходит упрочнение и увеличение твердости обрабатываемых поверхностей [1, 3, 5].

При исследовании основных закономерностей формирования обрабатываемых поверхностей абразивами одним из важнейших

является вопрос теоретического моделирования процесса взаимодействия частиц абразива с поверхностью заготовки.

Моделирование процесса удаления материала с поверхности заготовки необходимо начинать с описания явлений микрорезания отдельными зернами.

Абразивные зерна имеют сложный микрорельеф. В связи с тем, что при магнитно-абразивной обработки скорости резания находятся в диапазоне 0,15-2,5 м/с, при обработке преобладает процесс геометрического копирования микропрофиля зерна в поверхностном слое заготовки [6-7]. Поэтому рабочую часть зерна можно приближенно заменить шаровой поверхностью с радиусом округления r (рис. 1).

Рассмотрим зерно радиуса r , которое внедряется на глубину h в обрабатываемый материал и в процессе работы снимает стружку длиной L_a .

Площадь сегмента АВ:

$$S = \frac{r^2}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha)$$

Половина длины хорды АВ:

$$b = \sqrt{r^2 - (r-h)^2} = \sqrt{h(2r-h)}$$

Тогда:

$$\sin \alpha = \frac{b}{r} = \frac{1}{r} \sqrt{h(2r-h)}$$

$$\cos \alpha = \frac{r-h}{r}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{r} \sqrt{h(2r-h)}\right).$$

Отсюда

$$S = \frac{r^2}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha) = r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h) \sqrt{h(2r-h)}.$$

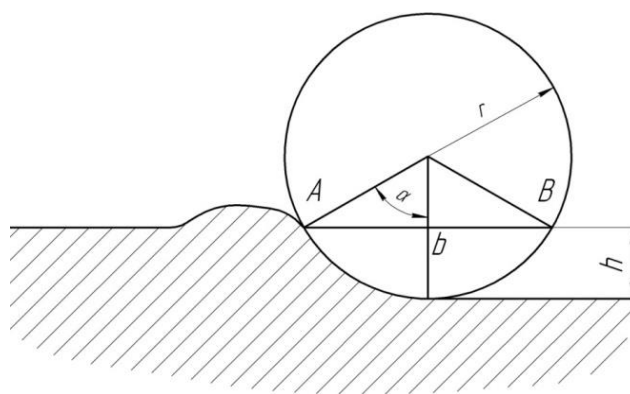


Рис 1. Схема съема материала единичным зерном

Объем удаляемого материала равен произведению площади сечения стружки S на ее длину. В связи с тем, что в часть металла не срезается, а пластически деформируется, в произведении участвует эмпирический коэффициент стружкообразования:

$$V_a = k_c S * L_a = k_c \left[r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h) \sqrt{h(2r-h)} \right] L_a, \quad (1)$$

где k_c – коэффициент стружкообразования, равный отношению фактической площади снимаемого металла с учетом упруго-пластических деформаций обрабатываемого материала S_Φ площади сегмента S – (рис. 2).

Коэффициент стружкообразования определяется в первую очередь свойствами обрабатываемого материала и, кроме того, зависит от скорости резания [8 – 10]. При обработке закаленной стали он может достигать значения 0,95. Для пластических материалов типа алюминия значение k_c может быть 0,25 и ниже.

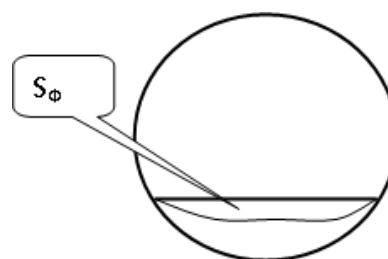


Рис 2. Фактическая площадь срезаемого материала для расчета коэффициента стружкообразования

Глубина вдавливания зерна в металл:

$$h = r - \sqrt{r^2 - b^2}, \quad (2)$$

где b – радиус отпечатка – (рис. 1).

В соответствии с ГОСТ 9012-59

$$b = \sqrt{Q(2 - Q)},$$

$$Q = \frac{0.102 F_n}{\pi(HB)}. \quad (3)$$

где F_n – нормальная сила (н), HB – твердость по Бринеллю [11-13].

На (рис. 3) приведены графики зависимостей h и b при увеличении силы, действующей на зерно. Из этого рисунка видно, что при небольших глубинах внедрения зависимость $h(F_n)$ близка к линейной.

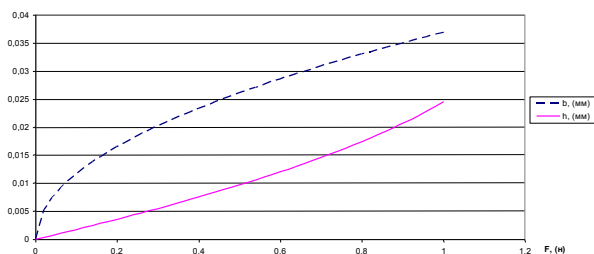


Рис. 3. Геометрические параметры при внедрении абразивного зерна в металл в зависимости от нормальной силы ($HB = 350$; $r = 0.04$ мм)

Длина стружки L_a в мм определяется частотой вращения индуктора n (об/мин), временем полирования t_{Π} (с) и шириной зоны контакта индуктора с заготовкой. Считая, что магниты расположены по образующей индуктора, а ширина зоны контакта равна ширине полюса магнита B (рис. 4), суммарная длина стружки для одного зерна определяется выражением:

$$L_a = \frac{nB}{60} t_{\Pi}, \quad (4)$$

где n – частота его вращения (об/мин).

Для определения количества зерен, участвующих в резании, обозначим диаметр магнитно-абразивных частиц 3_a , а площадь полюсов магнитопроводов – $F_{\Pi} = B \cdot H \cdot n_M$, где n_M – количество магнитопроводов. Тогда количество работающих магнитно-абразивных частиц определяется по формуле:

$$N_M = \frac{4BHn_M}{\pi \cdot 3_a^2}.$$

Считая, что к одной магнитной частице прикреплено n_a режущих абразивных частиц, получим общее количество режущих зерен:

$$N_M = \frac{4BH}{\pi \cdot 3_a^2} n_a n_M. \quad (5)$$

Общий объем снимаемого материала

$$V_M = N_M \cdot V_a.$$

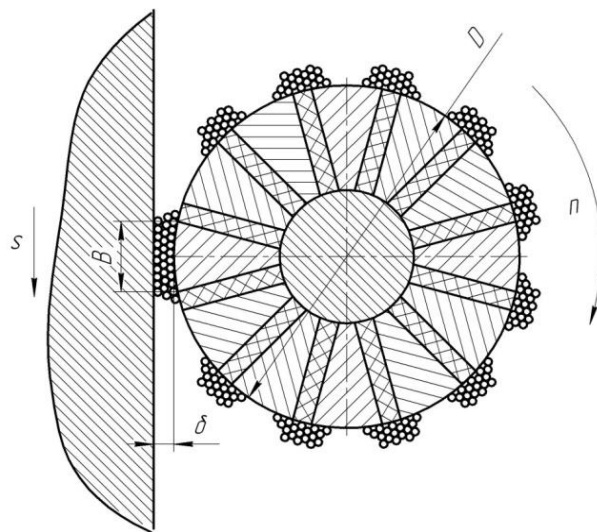


Рис. 4. Схема обработки заготовки

Для определения n_a рассчитаем количество шаровидных частиц радиуса r_a , прикрепленных к шару радиуса R_M (рис. 5). Для этого рассмотрим сечения шара с шагом $2r_M$.

Их радиусы $r_i = \sqrt{R_M^2 - (ir_a)^2}$, $i=1,2,\dots$

Для центрального сечения шара количество частиц, прикрепленных по его окружности равно

$$n_{a0} = \left[\frac{2\pi(R_M + r_a)}{2r_a} \right] = [\pi(R_M / r_a + 1)],$$

где квадратными скобками обозначено вычисление целой части от числа.

Для остальных сечений

$$n_{ai} = [\pi(r_i / r_a + 1)].$$

Общее количество зерен

$$n_a = [\pi(r_M / r_a + 1)] + 2 \left\{ \sum_{i=1}^{[R_M / r_a]} [\pi(r_i / r_a + 1)] + 1 \right\}.$$

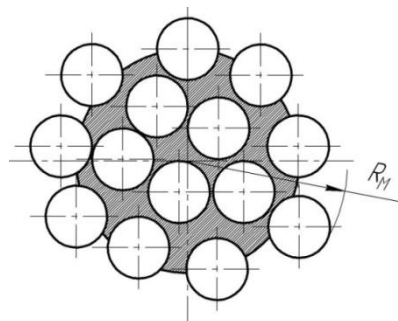


Рис. 5. Магнитно-абразивная частица порошка TiC+Fe

Например, при магнитной частице радиуса $R_M = 0,1$ мм и абразивной частице радиуса $r_a = 0,04$ мм кроме центрального сечения получается еще по 2 слоя с каждой стороны: $n_a = 10 + 2 \times (10 + 7 + 1) = 46$ зерен.

Однако не все эти зерна участвуют в резании, более половины находятся с обратной от заготовки стороны магнитной частицы и могут вступать в процесс резания только при перемешивании порошка [14 - 16]. Для учета этого явления введем коэффициент $k_a < 0,5$. Тогда выражение для расчета количества режущих зерен пример вид:

$$n_a = k_a \left([\pi(r_M / r_a + 1)] + 2 \left\{ \sum_{i=1}^{[R_M / r_a]} [\pi(r_i / r_a + 1)] + 1 \right\} \right). \quad (6)$$

Для учета динамических явлений при обработке введем дополнительный коэффициент k_D . Он позволяет учесть деформацию в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Связано это с тем, что при обработке протяженных плоских поверхностей силы резания вызывают значительную деформацию магнитно-абразивного порошка. При этом сьем металла снижается. При зоне контакта, меньшей размера магнитопровода B , эти силы снижаются, уменьшая и величину деформации – (рис. 6).

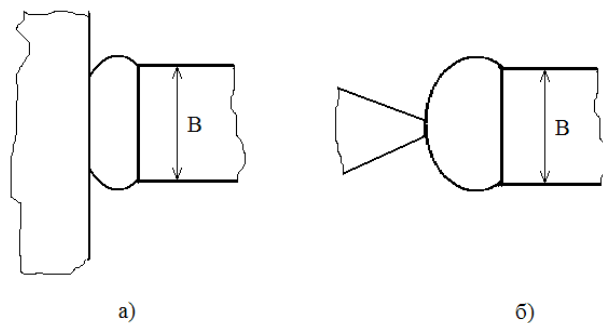


Рис. 6. Обработка плоской поверхности (а) и поверхности небольшой протяженности - выступа шероховатости (б)

Коэффициент k_D всегда меньше 1, приближаясь к ней при обработке поверхностей, существенно меньших ширины полюса B . Для его определения предлагается эмпирическая зависимость:

$$k_D = \begin{cases} e^{-Cb}, & b \leq B \\ e^{-CB}, & b > B \end{cases}. \quad (7)$$

Если ширина выступа шероховатости b не превышает ширины магнитного полюса ($b \leq B$), то поправочный коэффициент определяется экспоненциальной зависимостью $k_D = e^{-Cb}$. При $b = 0$ $k_D = 1$, а с увеличением b значение коэффициента снижается. При больших значениях b ($b > B$) значение коэффициента стабилизируется на уровне

$$k_D = e^{-CB}.$$

На (рис. 7) показан пример графика зависимости (7) при $B = 0,8$ мм и $C = 4$ 1/мм:

На графике хорошо виден переход при $b = 0,8$. Кривизна характеристики определяется значением коэффициента C , который зависит от конкретных условий выполнения операции.

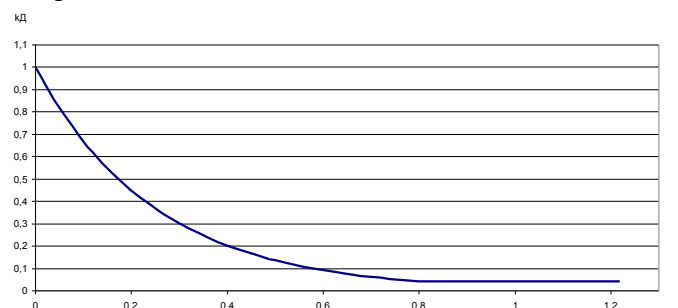


Рис. 7. Пример графика зависимости (7)

С течением времени режущие свойства зерен снижаются в связи с их затуплением и разрушением. В связи с этим предлагается ввести в формулу еще один эмпирический коэффициент $k_H(\tau)$. Для учета процесса затупления используется эмпирическая зависимость

$$k_H = e^{-C_H \tau}, \quad (8)$$

где C_H учитывает изменение режущих свойств порошка во времени; τ – суммарное время работы порошка (с). Если, например, за время $\tau = 120$ с режущие свойства порошка снижаются на 20%, то $k_H = 0,8 = e^{-120C_H}$. Отсюда $C_H = 0,00186$.

Тогда

$$V_M = \frac{B^2 H n k_c k_D k_H t_{II} n_a n_M}{15 \pi D_M^2} \quad (9)$$

$$\left[r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h) \sqrt{h(2r-h)} \right].$$

Эта зависимость совместно с формулами (6)-(8) позволяет прогнозировать средний объем снимаемого материала за период времени t_{II} . Кроме того, с ее помощью можно определить, как изменяется шероховатость поверхности заготовки в процессе ее обработки. Для этого необходимо сначала задать исходный профиль заготовки.

При моделировании процесса магнитно-абразивной обработки оценивалось влияние зернистости магнитно-абразивного порошка на съем материала. зернистость порошка варьировалась от 100мкм до 350мкм. Постоянные исходные данные для моделирования: частота вращения индуктора $n=200$ об/мин, твердость обрабатываемого материала $Hv=250$, диаметр индуктора $D=200$ мм, количество полюсов 10 шт, ширина магнитопроводов $B=10$ мм, высота магнитопроводов $H=40$ мм, время полирования $t_n=80$ с.

Полученная в ходе моделирования процесса магнитно-абразивной обработки зависимость приведена на (рис. 8). Расчеты проводились для величины зазора от $\delta = 0,8$ мм до $\delta = 1,2$ мм при различных значениях зернистости абразивного порошка $3a$. В первые

20 с обработки происходит интенсивный съем металла. При дальнейшем увеличении времени обработки до 80 с интенсивность съема металла снижается. Увеличение зернистости порошка с 40/100 мкм до 250/315 мкм повышает производительность процесса. Изменение рабочего зазора с 0,8 мм до 1,2 мм снижает производительность процесса.

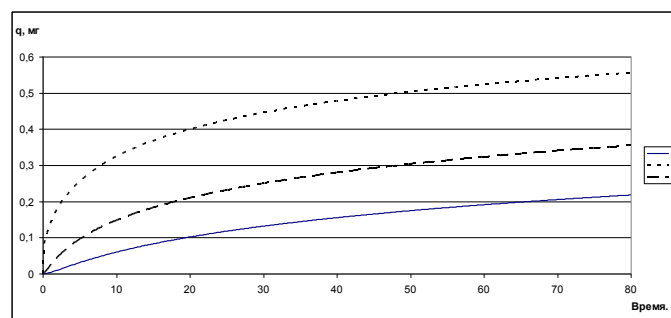


Рис. 8. Влияние времени обработки на съем металла: 1 - $\delta = 1,0$ мм, $3a = 40/100$ мкм.; 2 - $\delta = 0,8$ мм., $3a = 250/315$ мкм.; 3 - $\delta = 1,2$ мм., $3a = 250/315$ мкм

Список литературы

1. Гончаров, В.Д. Прогрессивные технологические методы финишной обработки учеб. / В.Д. Гончаров. - М.: Станки, 1993 – 105с
2. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон, - Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1986 - 176с.
3. Иконников, А.М. Расчет съема металла при магнитно-абразивной обработке / А.М. Иконников, Ю.В. Федоров //Ползуновский альманах. 2012 - № 1. С. 215.
4. Григорьев, С.Н. Обработка резанием в автоматизированном производстве: учеб. / С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов. - М.: Машиностроение, 2009. - 372с.
5. Tatarkin, E. Modeling of the Magnetic Abrasive Machining Process of Flat Surface Workpieces on Numerically Controlled Machine Tools / E. Tatarkin, A. Ikonnikov, T. Schrayner, R. Grebenkov // Applied Mechanics and Materials, Pfaffikon, Switzerland. - 2015. - Vol. 788. - P. 69-74.
6. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная обработка изделий и режущих инструментов. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. - 176 с.
7. Шулев Г. С. Физико-технические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками. Автореф. дис. ...канд. техн. наук. — Мн., 1965.
8. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. - Минск: БНТУ, 2006. - 217 с.: ил.

9. Леонов, С.Л. Автоматическое регулирование рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке пространственного сложных поверхностей / С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении», Новосибирск, 2014 - С. 162-166.
10. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. — Мн: Наука и техника, 1981. — 328 с.
11. Иконников, А.М. Конструирование оснастки для магнитно-абразивного полирования путем имитационного моделирования / А.М. Иконников, В.С. Силивакин, Р.В. Гребеньков // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы», Рубцовск, 2013 - С. 80-82.
12. Татаркин, Е.Ю. Проектирование технологической и инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки / Е.Ю. Татаркин, А.М. Иконников, В.С. Силивакин, Р.В. Гребеньков, Т.А. Шрайнер // Материалы VI международной научнотехнической конференции 23–26 сентября 2014 г. «Инновации в машиностроении — основа технического развития России», Часть 2, Барнаул, 2014. — С. 187–190.
13. Проектирование металлорежущего инструмента: учеб. / Е.Н. Трембач, Г.А. Мелетьев, А.Г. Схиртладзе [и др.]. — Йошкар — Ола: Мар. ГТУ, 2008. — 432с.
14. Приходько, С.П. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки деталей машин на ЭВМ / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. — Барнаул, 1987. — С. 115–119.
15. Коновалов, Е.Г., Сакулевич, Ф. Ю. Основы электро-ферромагнитной обработки. — Мн: Наука и техника, 1974. — 272 с.
16. Baron, Y. Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring / Y. Baron, S. Ko, J. Park // Key Engineering Materials. — 2005. — P. 291–296.
4. Grigor'ev, S.N. Obrabotka rezaniem v avtomatizirovannom proizvodstve: ucheb. / S.N. Grigo-r'ev, A.R. Maslov. — М.: Mashinostroenie, 2009. — 372s.
5. Tatarkin, E. Modeling of the Magnetic Abrasive Machining Process of Flat Surface Workpieces on Numerically Controlled Machine Tools / E. Tatar-kin, A. Ikonnikov, T. Schrayner, R. Grebenkov // Applied Mechanics and Materials, Pfaffikon, Swit-zerland. - 2015. - Vol. 788. - P. 69-74.
6. Baron, Iu.M. Magnitno-abrazivnaia obrabotka izdelii i rezhushchikh instrumentov. — L.: Mashi-nostroenie. Leningr. otделение, 1986. — 176 s.
7. Shulev G. S. Fiziko-tehnicheskie osnovy obra-botki detalei v magnitnom pole ferromagnit-nymi poroshkami. Avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk. — Mn., 1965.
8. Khomich, N.S. Magnitno-abrazivnaia obrabotka izdelii: monografiia / N. S. Khomich. - Minsk: BNTU, 2006. - 217 s.: il.
9. Leonov, S.L. Avtomaticheskoe regulirovanie ra-bochego zavora pri magnitno-abrazivnoi obra-botke prostranstvennogo slozhnykh poverkhno-stei / S.L. Leonov, A.M. Ikonnikov, R.V. Gre-ben'kov // Mate-rialy 1-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy v mashi-nostroenii», Novosibirsk, 2014 - S. 162-166.
10. Sakulevich, F.Iu. Osnovy magnitno-abrazivnoi obrabotki. — Mn: Nauka i tekhnika, 1981. — 328 s.
11. Ikonnikov, A.M. Konstruirovaniie osnastki dlia magnitno-abrazivnogo polirovaniia putem imi-tatsionnogo modelirovaniia / A.M. Ikonnikov, V.S. Silivakin, R.V. Greben'kov // Materialy III Vserossi-iskoi nauchno-tehnicheskoi konfe-rentsii «Sov-remennaia tekhnika i tekhnologii: problemy, sosto-ianie i perspektivy», Rubtsovsk, 2013 - S. 80-82.
12. Tatarkin, E.Iu. Proektirovanie tekhnologiche-skoi i in-strumental'noi osnastki dlia opera-tsii magnitno-abrazivnoi obrabotki / E.Iu. Ta-tarkin, A.M. Ikonnikov, V.S. Silivakin, R.V. Greben'kov, T.A. Shrainer // Ma-terialy VI mezhdunarodnoi nauchnotehnicheskoi konfe-rens-tsii 23–26 sentiabria 2014 g. «Innovatsii v mashi-nostroenii — osnova tekhnicheskogo razvitiia Rossii», Chast' 2, Barnaul, 2014. — S. 187–190.
13. Proektirovanie metallorazhushchego instrumen-ta: ucheb. / E.N. Trembach, G.A. Melet'ev, A.G. Skhirtladze [i dr.]. — Ioshkar — Ola: Mar. GTU, 2008. — 432s.
14. Prikhod'ko, S.P. Modelirovanie protsessa mag-nitno-abrazivnoi obrabotki detalei mashin na EVM / S. P. Prikhod'ko // Otdelochno-chistovye metody obrabotki i instrumenty v tekhnologii mashi-nostroeniia. — Barnaul, 1987. — S. 115–119.
15. Konovalov, E.G., Sakulevich, F. Iu. Osnovy elektro-ferromagnitnoi obrabotki. — Mn: Nauka i tekhnika, 1974. — 272 s.
16. Baron, Y. Characterization of the Magnetic Abra-sive Finishing Method and Its Application to Debur-ring / Y. Baron, S. Ko, J. Park // Key Engineering Materials. — 2005. — P. 291–296.

References

1. Goncharov, V.D. Progressivnye tekhnologicheskie metody finishnoi obrabotki ucheb. / V.D. Gon-charov. - М.: Stanki, 1993 — 105s
2. Baron, Iu.M. Magnitno-abrazivnaia i magnitnaia obrabotka izdelii i rezhushchikh instrumentov / Iu.M. Baron, - L.: Mashinostroenie. Leningr. Otdelenie, 1986 - 176s.
3. Ikonnikov, A.M. Raschet s"ema metalla pri mag-nitno-abrazivnoi obrabotke / A.M. Ikonnikov, Iu.V. Fedorov //Polzunovskii al'manakh. 2012 - № 1. S. 215.
4. Prikhod'ko, S.P. Modelirovanie protsessa mag-nitno-abrazivnoi obrabotki detalei mashin na EVM / S. P. Prikhod'ko // Otdelochno-chistovye metody obrabotki i instrumenty v tekhnologii mashi-nostroeniia. — Barnaul, 1987. — S. 115–119.
15. Konovalov, E.G., Sakulevich, F. Iu. Osnovy elektro-ferromagnitnoi obrabotki. — Mn: Nauka i tekhnika, 1974. — 272 s.
16. Baron, Y. Characterization of the Magnetic Abra-sive Finishing Method and Its Application to Debur-ring / Y. Baron, S. Ko, J. Park // Key Engineering Materials. — 2005. — P. 291–296.

УДК 621.771.23.09

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИ АРМИРОВАННОГО ПРОКАТА В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.Б. Максимов¹, А.В. Гадеев¹, И.С. Ерохина¹¹ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Российская федерация

Аннотация

В работе рассмотрены основные виды термически армированного листового проката. Установлены некоторые закономерности разрушения неоднородных материалов. Показано, что упрочненные области, наклонённые под углом 45° к первоначальному направлению движения трещины наиболее эффективно приводят к торможению и остановки магистральных трещин за счет изменения траектории движения и ветвления. Одностороннее ускоренное охлаждение экономно легированных сталей типа 14Г2 позволяет получить на одной стороне листа повышенную твердость, обеспечивающую высокую износостойкость, а другая сторона листа при этом хорошо подвергается обработке резанием. Такое сочетание служебных свойств может быть использовано в машиностроении.

Ключевые слова: термически армированный лист, избирательное охлаждение, углеродистая и низколегированная сталь, твердость, скорость охлаждения, трещина, ветвление трещины.

PROSPECTS FOR THE USE OF A THERMALLY REINFORCED ROLLED IN MECHANICAL ENGINEERING

A.B. Maksimov¹, A.V. Gadeev¹, I.S. Erokhina¹¹Of the "Kerch state Maritime technological University", Kerch, Russian Federation

Abstract

In the article the principal thermally reinforced rolled sheet. Installed some regularities of fracture of heterogeneous materials. It is shown that inclined at an angle of 45 ° hardened region most effectively lead to braking and stopping of the main crack due to the change of the trajectory and branching. Unilateral rapid cooling of the sparingly alloyed steel of type 14G2 allows to obtain on one side of the sheet, the hardness, ensure high wear resistance, and the other side of the sheet when it is well processed by cutting. This combination of service properties can be used in mechanical engineering.

Keywords: thermally reinforced sheet, selective cooling, carbon and low alloy steel, the hardness, the cooling rate, the crack, crack.

Улучшение комплекса механических свойств толстолистового проката из углеродистых и низколегированных сталей является одной из главных задач металловедения.

Одной из значимых характеристик механических свойств стали является трещиностойкость. Повышение трещиностойкости металла при статических и динамических нагрузках осуществляется известными способами: создание барьеров на пути движения трещины условий для ветвления трещины, областей сжатия и других [1-3]. Одним из способов торможения трещины могут быть барьеры в виде более прочной структу-

ры, чем матрица, это реализовано в термически армированном листовом прокате.

Целью настоящей статьи является – проанализировать основные виды термически армированного листа и их служебные свойства.

Для получения термически армированного листа после горячей прокатки или специального нагрева до $A_{c3} + (30 - 50)^\circ C$ проводят избирательное охлаждение по площади листа [4], в результате этого образуются макроучастки различных структур заданной конфигурации.

Исследованию механических свойств и распространению трещины в термически

армированном листе посвящено ряд работ [5-11].

Установлено, что создание на пути движущейся трещины наклонных границ прочностью в (1,5-2,0) раза превышающую прочность матрицы происходит ветвление магистральной трещины на вторичные и в дальнейшем их остановка.

На границе матрицы и упрочненной области возникает переходная область напряжений сжатия. Напряжения сжатия, как известно, способствуют торможению трещины.

Характерно, что магистральная трещина пересекает первую упрочненную область практически без изменения траектории своего движения и при приближении ко второй – происходит ветвление. Вторичные трещины не проходят через упрочненную область, а распространяются вдоль границы и останавливаются.

Наиболее эффективное торможение трещин происходит на наклонных границах, составляющих угол порядка 45° к направлению распространения трещины.

На рис. 1 представлено изменение направления распространения магистральной трещины в модельном материале [8] при прохождении наклонных, упрочненных областей.

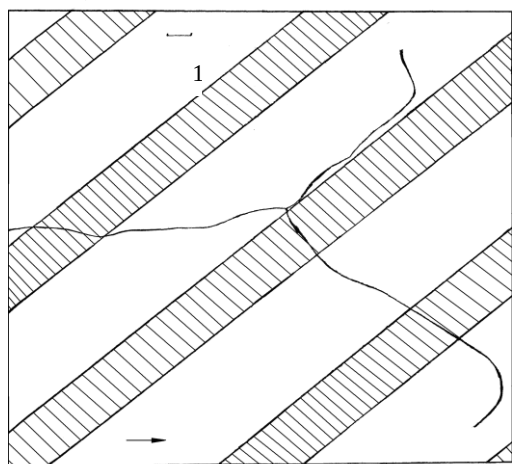


Рис. 1. Траектория распространения трещины в модели из неоднородного материала;
→ – направление длины трубы, ///// – области упрочнения [8], — 1 см

В работе [6] на листовых образцах стали 09Г2 путем избирательного охлаждения по поверхности получили матричную структу-

ру – феррито-перлитную с твердостью (130 – 150) НВ, а упрочненные области – феррито-бейнитную структуру с твердостью (320 – 350) НВ.

Таблица 1. Влияние суммарной площади упрочненных участков на механические свойства стали 09Г2 [2]

Суммарная площадь упрочненных участков, %	Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %
0	480	330	30,0
25	585	400	24,0
50	690	465	18,5
75	800	530	13,0
100	910	600	7,5

В табл. 1 приведены механические свойства стали 09Г2 в зависимости от суммарной площади упрочненных областей.

Значения твердости в интервале (130 – 150) НВ соответствует нормализованному состоянию, твердость (320 -350 НВ) – закалке на верхний бейнит с последующим отпуском при температуре 200°С.

Кроме избирательного охлаждения после нагрева или избирательного нагрева и последующего охлаждения термически армированный материал можно получать с заведомо различной структурой по толщине. Это достигается односторонним ускоренным охлаждением листового проката [12, 13].

В работе [14] образцы из толстолистовой стали 14Г2 после нагрева до (930-950)°С подвергали одностороннему ускоренному охлаждению. В результате этого ускоренно охлажденная сторона имела мелкодисперсную бейнито-перлитную структуру с твердостью (400 – 430) НВ, а противоположная сторона – феррито-перлитную структуру с твердостью (280 – 300) НВ, соответствующая нормализации. Контрольные образцы проходили нормализацию.

Образцы испытывали на продольную устойчивость по схеме внецентренного сжатия. В (табл. 2) представлены результаты испытаний.

Таблица 2. Параметры нагружения образцов при испытании на продольную устойчивость [14]

Вид термической обработки		Максимальное усилие, кН	Критическое напряжение, МПа	Максимальный прогиб, мм	Доля сечения в сжатом состоянии от общего, %
Одностороннее охлаждение	1*	47,2	31,0	35,7	70,5
	2*	31,2	22,3	52,0	52,4
Нормализация		29,0	21,5	20,3	49,5

*1 – сжатие упрочненной части образца,
2 – растяжение упрочненной части образца

Если упрочненные участки подвергаются деформации сжатия при испытании, то несущая способность образца на (30 – 50) % выше, чем при растяжении упрочненных участков.

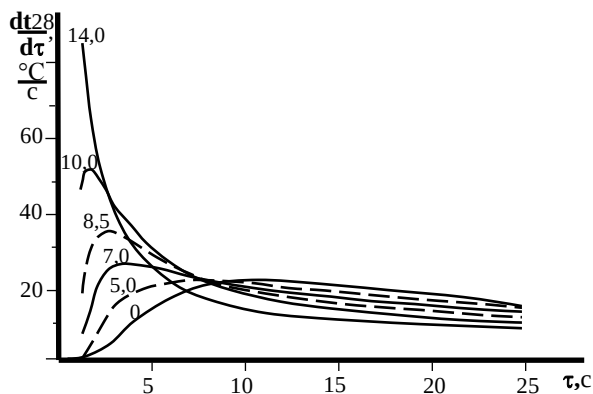


Рис. 2. Распределение скоростей охлаждения по толщине пластины. Числа у кривых – расстояние от неохлаждаемой поверхности в мм [15]

В этом случае критическое напряжение практически такое же, как у нормализованных образцов.

В угольном машиностроении для изготовления отдельных узлов угольных комбайнов, механизированной крепи и транспортирующих устройств используется листовая сталь марок СтЗсп, 10ХСНД. Усложнение химического состава приводит к удорожанию изделий и ухудшает технологич-

ность, главным образом свариваемость, не повышая при этом износостойкость. Для повышения местной износостойкости деталей применяются наплавки, обеспечивающие твердость до (40 – 50) HRC.

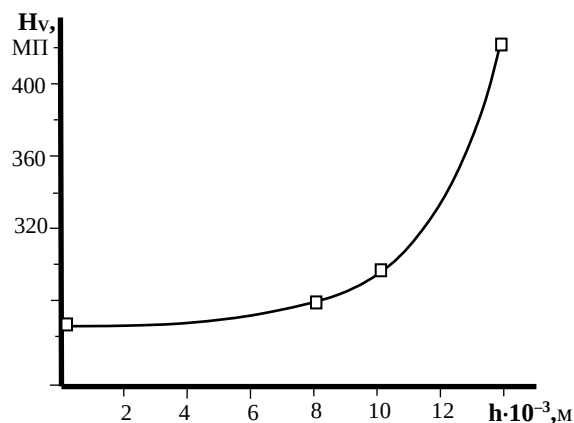


Рис. 3. Распределение твердости по толщине охлаждаемой пластины [15]

В работе [15] в результате одностороннего ускоренного охлаждения образцов из стали 14Г2 твердость по толщине изменяется от (45 – 35)HRC до (26 – 28)HRC. На рис. 2 представлено расчетное распределение скоростей охлаждения по толщине охлаждаемого образца.

В результате такого охлаждения по сечению образца формируется различная микроструктура, твердость которой представлена на рис.3.

На основании экономно легированных сталей типа 14Г2 при одностороннем ускоренном охлаждении можно получить достаточно высокую твердость, а, следовательно, износостойкость в сочетании с хорошей механической обработкой резанием на противоположной стороне.

Заключение

На основании анализа существующих схем термически армированного листа показано, что наклонные границы раздела двух разнопрочных структур способствуют торможению и изменению траектории движения магистральной трещины. Возможно получения листового проката из экономно легированных сталей типа 14Г2 с одной поверхности высокой прочности и износостойкости, а с противоположной – с хорошей механической обработкой резанием.

Список литературы

1. Финкель В.М. Физические основы торможения трещины. М.: Metallurgija. -1977. - 360с.
2. А.С. СССР 397547. Способ торможения растущих усталостных трещин в металлах и сплавах. /Смоленцев В.И., Кудряшов В.Г. Оpubл. 17.09.1973. Бюл. №37.
3. Патент РФ на изобретение №2517076 Способ торможения растущих усталостных трещин в толстолистовом материале. / Кузьмин Ю.А. Оpubл. 27.05.2015. Бюл. №1.
4. А.С. СССР 1452846. Способ упрочнения листового проката / Долженков Ф.Е., Следнев В.П., Подгайский М.С., Максимов А.Б. и др. Оpubл. 23.01.89. Бюл. № 3.
5. Максимов А.Б. Особенности распространения упругих волн в композитных сталях / Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2007. № 2. -С. 39 – 42.
6. Максимов А.Б. Термически армированный толстолистовой прокат из низколегированной стали / Вопросы материаловедения – 2010. – № 3 (63). – С. 40 – 44.
7. Патент Украины на изобретение № 75518. Способ упрочнения листового проката / Максимов А.Б. Оpubл. 17.04.2006. Бюл. № 4.
8. Максимов А.Б. Распространение трещин в трубах из неоднородного материала / Известия вузов. Черная металлургия. 2013, -№ 7. – С. 53 – 56.
9. Максимов А.Б. Ветвление трещин в неоднородном материале / Научные чтения им. чл-кор. РАН Оdinga И.А. 10-12 сентября 2012. Сб. материалов. М.: ИМЕТ РАН. -С.158-160.
10. Максимов А.Б. Разрушение термически армированной стали / Известия вузов. Черная металлургия. 2014. -№ 5 – С. 12 – 14.
11. Максимов А.Б. Периодическая макронеоднородность структуры - путь к новым технологическим возможностям стали /4 Международная конференция с элементами научной школы для молодежи. - 5 октября 2012. Суздаль. -С.344-345.
12. Патент РФ на изобретение № 2608445. Способ термической обработки листового проката для гибки / Максимов А.Б., Гуляев М.В. Оpubл. 18.01.2017. Бюл. № 2.
13. Максимов А.Б. Применение термически армированного листа при производстве труб // 5 Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 26-29 ноября 2013. Москва. ИМЕТ РАН. – С. 247-249.
14. Максимов А.Б. Устойчивость термически армированного проката при продольном изгибе / Научные чтения им. И.А. Оdinga «Механические свойства современных конструкционных материалов. М. ИМЕТ РАН. 2 - 6 сентября. 2014. – С. 184 – 185.
15. Максимов А.Б., Гуляев М.В. Поверхностное упрочнение сталей для изделий шахтного оборудования / Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. -№ 2. – С. 370 – 375.

References

1. Finkel' V.M. Fizicheskie osnovy tormozhenija treshhiny. M.: Metallurgija, 1977 - 360p.
2. A.S. SSSR 397547. Sposob tormozhenija rastushhih ustalostnyh treshhin v metallah i splavah./Smolencev V.I., Kudrjashov V.G. Opubl. 17.09.1973. Bjul. No. 37.
3. Patent RF na izobretenie №2517076 Sposob tormozhenija rastushhih ustalostnyh treshhin v tolstolistovom materiale. / Kuz'min Ju.A. Opubl. 27.05.2015. Bjul.No.1.
4. A.S. SSSR 1452846. Sposob uprochnenija listovogo prokata / Dolzhenkov F.E., Slednev V.P., Podgajskij M.S., Maksimov A.B. i dr. Opubl. 23.01.89. Bjul. No. 3.
5. Maksimov A.B. Osobennosti rasprostraneniya uprugih voln v kompozitnyh staljah / Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. – 2007, No. 2, pp. 39 – 42.
6. Maksimov A.B. Termicheski armirovannyj tolstolistovoj prokat iz nizkolegirovannoj stali / Voprosy materialovedeniya – 2010, No. 3 (63), – pp. 40 – 44.
7. Patent Ukrainy na izobretenie № 75518. Sposob uprochnenija listovogo prokata / Maksimov A.B. Opubl. 17.04.2006. Bjul. No. 4.
8. Maksimov A.B. Rasprostranenie treshhin v trubah iz neodnorodnogo materiala / *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*. 2013, No. 7, – pp. 53 – 56.
9. Maksimov A.B. Vetvlenie treshhin v neodnorodnom material / Nauchnye chtenija im. chl-kor. RAN Odinga I.A. 10-12 sentjabrja 2012. Sb. materialov. M.: IMET RAN, pp.158-160.
10. Maksimov A.B. Razrushenie termicheski armirovannoj stali / *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*. 2014, No. 5, pp. 12 – 14.
11. Maksimov A.B. Periodicheskaja makroneodnorodnost' struktury - put' k novym tehnologicheskim vozmozhnostjam stali /4 Mezhdunarodnaja konferencija s jelementami nauchnoj shkoly dlja molodezhi 5 oktjabrja 2012, Suzdal', pp.344-345.
12. Patent RF na izobretenie № 2608445. Sposob termicheskoj obrabotki listovogo prokata dlja gibki /Maksimov A.B., Guljaev M.V. Opubl. 18.01.2017. Bjul. No. 2.
13. Maksimov A.B. Primenenie termicheski armirovannogo lista pri proizvodstve trub//Mezhdunarodnaja konferencija «Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov». 26-29 nojabrja 2013. Moskva. IMET RAN, pp. 247-249.
14. Maksimov A.B. Ustojchivost' termicheski armirovannogo prokata pri prodol'nom izgibe / Nauchnye chtenija im. I.A. Odinga «Mehaniicheskie svojstva sovremennyh konstrukcionnyh materialov. M. IMET RAN. 2 - 6 sentjabrja. 2014. pp. 184 – 185.
15. Maksimov A.B., Guljaev M.V. Poverhnostnoe uprochnenie stalej dlja izdelij shahtnogo oborudovaniya / *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*. 2015. No. 2, pp. 370 – 375.

УДК 621.833

УРАВНОВЕШИВАНИЕ В ОПОРАХ СТАНКОВ

В.А. Сидоров¹¹ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Украина

Аннотация

В работе приведены результаты одноплоскостной динамической балансировки шлифовального круга и приспособления для механической обработки в опорах станков – шлифовального и с ЧПУ. Полученные значения виброскорости (около 0,2 мм/с) указывают на возможность эффективного снижения дисбаланса с использованием современных анализаторов вибрации по стандартной методике уравнивания. Статическое уравнивание металлорежущего инструмента и приспособлений для механической обработки не позволяет достичь необходимой точности уравнивания. Доказательство данного утверждения заключается в возможности снижения составляющих от дисбаланса до уровня 0,02 мм/с при динамическом уравнивании. В механотронной системе металлорежущих станков наряду с системами вибрационного контроля должны быть предусмотрены системы регулирования вибрации.

Ключевые слова: шлифовальный круг, уравнивание, приспособления, динамическая балансировка, параметры вибрации, спектр колебаний

BALANCING IS IN SUPPORTS OF MACHINE-TOOLS

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

Abstract

Results over are in-process brought one плоскостной dynamic balancing of diamond-impregnated and adaptation for tooling in supports of machine-tools - polishing and with NPM. Got values vibrospeeds (about 0,2 mm/c) specify on possibility of effective decline of disbalance with the use of modern analyzers of vibration on standard methodology of balancing. The static balancing of metal-cutting instrument and adaptations for tooling does not allow to attain necessary exactness of balancing. Proof of this statement consists in possibility of decline of constituents from a disbalance to the level a 0,02 mm/c at the dynamic balancing. In the mekhanotronnoi system of metal-cutting machine tools along with the oscillation checking systems the systems of adjusting of vibration must be envisaged.

Keywords: diamond-impregnated, balancing, adaptations, dynamic balancing, parameters of vibration, spectrum of vibrations

Снижение параметров вибрации металлорежущих станков является одним из основных условий, обеспечивающих качество обработки деталей. В работах [1...3] рассмотрены вопросы методологии измерения параметров вибрации для выбора рациональных режимов работы, исследования упругодемпфирующих свойств станков.

Шлифование деталей алмазными кругами на металлических связках с заданными параметрами возможно при минимизации радиальных биений рабочей поверхности круга. Для этого перед установкой на станок шлифовальный круг уравнивают статически на ножках. По результатам исследований работы [4], что доля погрешности, вно-

симой неуравновешенностью круга и шпиндельного узла при шлифовании, может достигать 70 % общей погрешности обработки. Утверждается, что вибрация неуравновешенного круга проявляется в виде синусоидальных колебаний с частотой вращения шпинделя, а в спектре колебаний при этом присутствует значительный пик на частоте вращения. Увеличение нагрузок из-за дисбаланса приводит к появлению дополнительных гармонических составляющих.

Обеспечение устойчивости процесса шлифования может быть достигнуто за счёт поддержания в необходимых пределах параметров рабочей поверхности шлифовального

круга в результате электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга [5].

В работе [6] В.А. Кудинов указывает, что для шлифовальных станков области устойчивости и неустойчивости, определенные по критерию Найквиста, очень узки, так ширина области «устойчивых» частот 3...5 Гц, по детали соответственно 0,5...1,5 Гц. Это справедливо только в начальный период после правки, когда обеспечивается идеально правильная форма круга.

Известен метод формирования рациональной волнистости продольного профиля алмазных кругов [7], приводящий к снижению амплитуды колебаний системы, что позволяет повысить стабильность процесса шлифования и качество поверхностного слоя обработанных деталей.

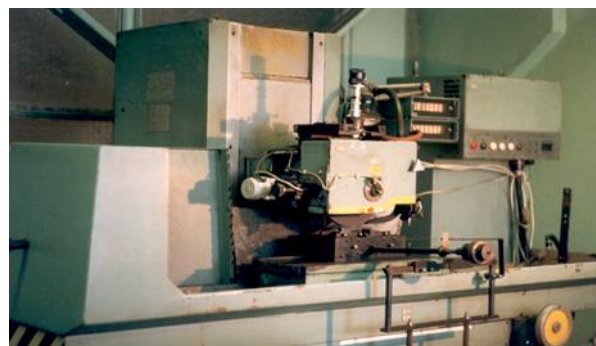
Появление современных анализаторов спектров вибрации, повышение быстродействия и уменьшение габаритов приборов позволяют проводить динамическую балансировку круга на рабочей скорости непосредственно в подшипниковых опорах шпинделя. Возможности современных виброизмерительных приборов показаны в работах [8...13].

Вопросы измерения и анализа параметров вибрации механизмов роторного типа рассмотрены в работах Гольдина А.С. [12], Русова В.А. [10], Ширмана А.Р. [11], Розенберга Г.Ш. [13]. Однако условия работы металлорежущих станков имеют отличия от работы энергетических машин роторного типа, что следует учитывать при измерении параметров вибрации и проведения уравнивания [14, 15]. В частности, следует учитывать большую жёсткость металлорежущего станка и необходимую более высокую точность измерительных приборов и выполняемых операций по уравниванию. Работы в данном направлении практически отсутствуют.

В работе на основе проведенных исследований показаны возможности уравнивания шлифовальных кругов и приспособлений станков ЧПУ в опорах станков. Дополнительно, определён спектральный состав вибрационного сигнала на холостом

ходу при вращении статически и динамически уравновешенного круга.

Исследования были проведены на плоскошлифовальном станке модели 3Д711АФ11, модернизированном для электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке (рис. 1, а), с установкой статически уравновешенного шлифовального круга 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01. Приспособление для механической обработки уравновешено в опорах станка GLS-200М с ЧПУ (рис. 1, б). Для измерений использовали анализатор вибрации модели 795М.



а



б

Рис. 1. Общий вид модернизированного плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11 (а) и станка ЧПУ GLS-200М (б)

Первый этап исследования связан с динамическим уравниванием и электроэрозионной правкой шлифовального алмазного круга. Алмазный шлифовальный круг статически уравновешен на ножах и установлен на станок. Контрольная точка измерения вибрации – подшипник шпинделя, вертикальное направление. Частотный диапазон – 10...1000 Гц. Принято: разрешение

1600 линий в спектре, усреднение – 4-х кратное, экспоненциальное. Методика уравнивания – одноплоскостная, динамическая, реализующая метод амплитуд и фаз.

Первый цикл измерений – без грузов при установке статически уравновешенного шлифовального круга:

- среднеквадратичное значение виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц в результате трёх последовательно проведенных измерений – 0,2212 мм/с, 0,2216 мм/с, 0,2166 мм/с;

- составляющая виброскорости и фаза вибрационного сигнала на оборотной частоте 37 Гц для проведенных измерений – 0,1418 мм/с (157°), 0,1435 мм/с (171°), 0,1384 (169°).

Значение, принятое для расчёта 0,1384 мм/с (169°).

Вибрационный сигнал стабилен – отклонения находятся в пределах 5-ти процентной погрешности виброизмерительного прибора. Значения характерны для шлифовальных станков и имеют чрезвычайно низкое значение относительно стандартов, регламентирующих вибрацию роторных машин. Например, хорошее состояние определено в стандарте 10816-1-97 среднеквадратичным значением виброскорости – 0,71 мм/с.

По результатам проведенных измерений и предварительных расчётов принято решение установить пробный груз массой – 9,2 г, угол установки – 90° относительно метки в сторону противоположную вращению. Для установки пробного и корректирующего грузов использованы штатные кольцевые канавки, имеющие форму «ласточкиного хвоста». Положение груза фиксировалось винтом, вес которого учитывался.

Второй цикл измерений проведен после установки пробного груза:

- среднеквадратичное значение виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц в результате двух последовательно проведенных измерений – 0,1684 мм/с, 0,1679 мм/с;

- составляющая виброскорости и фаза вибрационного сигнала на оборотной частоте

37 Гц для проведенных измерений – 0,0985 мм/с (193°), 0,0977 мм/с (192°).

Значение, принятое для расчёта – 0,0985 мм/с (193°).

В результате расчёта с использованием балансировочной программы прибора получены рекомендации установить корректирующий груз массой – 20,64 г, угол установки – 131°:

Исходя из возможности установки грузов в кольцевой канавке установлены два груза массой – 9,2 г и 8,7 г, угол установки – 120°.

Третий цикл измерений проведен после установки корректирующего груза:

- среднеквадратичное значение виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц в результате двух последовательно проведенных измерений – 0,1129 мм/с, 0,1117 мм/с;

- составляющая виброскорости и фаза вибрационного сигнала на оборотной частоте 37 Гц для проведенных измерений – 0,0259 мм/с (279°), 0,0263 мм/с (279°).

Таким образом, общий уровень вибрации снижен в два раза, а составляющая дисбаланса уменьшилась в 5,1 раза с 0,134 мм/с до 0,0263 мм/с. Изменение спектральной картины вибрационного сигнала виброскорости показано на рис. 2. В основном влияние устранённого дисбаланса сосредоточено на оборотной частоте 37 Гц, несколько снизилась и среднечастотная составляющая на частоте 840 Гц.

Четвёртый цикл измерений проведен после заправки круга:

- среднеквадратичное значение виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц в результате двух последовательно проведенных измерений – 0,084 мм/с, 0,086 мм/с;

- составляющая виброскорости и фаза вибрационного сигнала на оборотной частоте 37 Гц для проведенных измерений – 0,0204 мм/с (225°), 0,0221 мм/с (228°).

Следовательно, после заправки круга параметры вибрации уменьшились на 30%.



Рис. 2. Изменение спектров виброскорости в процессе уравнивания шлифовального круга

Несмотря на то, что вибрационное состояние станка осталось практически на том же уровне, электроэрозионная правка алмазных кругов на металлической связке рекомендуется для получения качественной поверхности обрабатываемой детали.

Второй этап исследования посвящен динамическому уравниванию приспособления для механической обработки (рис. 3) деталей в опорах станка GLS-200M с ЧПУ. Приспособление представляло собой ассиметричную конструкцию, уравнивленную в процессе проектирования и после изготовления статически. Однако, расчётная частота вращения 3000 об/мин достигнута не

была из-за повышенной вибрации на частоте 1000 об/мин.

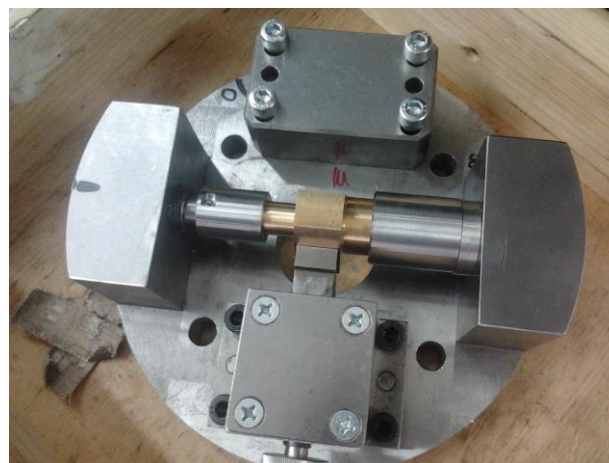


Рис. 3. Приспособление для механической обработки деталей

Уравнивание приспособления, установленного на станке проведено в три этапа. Первоначальная вибрация 1,8 мм/с при частоте вращения 1000 об/мин, была принята в качестве предельно допустимой не оказывающей существенного влияния на измерительную систему станка.

Уравнивание, проведенное на частоте 1000 об/мин, позволило увеличить частоту вращения до 1500 об/мин, а следующее уравнивание предоставило возможность разогнать шпиндель до частоты 2000 об/мин. Для установки пробного и компенсирующих грузов были использованы технологические отверстия приспособления. В результате уравнивания удалось достигнуть значения виброскорости 0,2 мм/с при частоте вращения 2500 об/мин. Проведенные исследования показали необходимость дополнения конструкции приспособления местами для размещения компенсирующих грузов.

Выводы

1. Результаты одноплоскостной динамической балансировки шлифовального круга и приспособления для механической обработки в опорах станков показывают возможность эффективного снижения дисбаланса с использованием современных анализаторов вибрации по стандартной методике уравни-

вешивания и снижения среднеквадратического значения виброскорости (в частотном диапазоне 10...1000 Гц), до уровня 0,2 мм/с, что значительно ниже допустимых значений регламентирующих вибрацию стандартов.

2. Статическое уравнивание металлорежущего инструмента и приспособлений для механической обработки не позволяет достичь необходимой точности уравнивания. Доказательство данного утверждения заключается в возможности снижения составляющих от дисбаланса до уровня 0,02 мм/с при динамическом уравнивании, что соответствует требованиям обеспечения высокого качества обрабатываемой поверхности при частотах вращения свыше 2000 об/мин.

3. В механотронной системе металлорежущих станков наряду с системами вибрационного контроля должны быть предусмотрены системы регулирования вибрации. Например, система автоматической компенсации дисбаланса, что позволит увеличить срок службы инструмента и станка в целом.

Список литературы

1. Аршанский М.М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. / М.М. Аршанский, В.П. Щербаков - М.: Машиностроение, 1988. - 135с.
2. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. / С.С. Кедров - М.: Машиностроение, 1978. - 199с.
3. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. / В.Н. Подураев - М.: Машиностроение, 1970. - 351с.
4. Свирщев В.И. Об одном из путей динамической стабилизации процесса шлифования / В.И. Свирщев, Л.Ю. Ковалев, В.А. Гордеев // Совершенствование процессов в абразивно-алмазной и упрочняющей обработке в машиностроении: Межвуз. сб. научн. трудов. - Пермь, 1988. - С. 121-124.
5. Матюха П.Г. Якість обробленої поверхні та продуктивність шліфування ванадієвих інструментальних сталей: монографія / П.Г. Матюха, Н.В. Азарова, В.П. Цокур, В.В. Габітов. - Донецьк: Вид-во «Ноулідж», 2014. - 164 с.

6. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. - М.: Машиностроение, 1967. - 359 с.
7. Доброскок В.Л. Регулирование вибраций при шлифовании труднообрабатываемых материалов путем формирования рационального продольного профиля рабочей поверхности кругов / В.Л. Доброскок, А.Н. Шпилюка // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. - Вип. 139/2013. - Севастополь, 2013. - С. 76-78.
8. Ключев В.В. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Ключев и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. - М.: Машиностроение, 1989. - 671 с.
9. Голуб Е.С. Диагностирование судовых технических средств: Справочник. / Е.С. Голуб, Е.З. Мадорский, Г.Ш. Розенберг - М.: Транспорт, 1993. - 150 с.
10. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика: Методическое пособие. / В.А. Русов - Пермь, 1996. - 174 с.
11. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. / А. Р. Ширман, А.Б. Соловьев - М., 1996. - 276 с.
12. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин: - 2-е изд. исправл. / А.С. Гольдин - М.: Машиностроение, 2000. - 344 с.
13. Розенберг Г.Ш. Вибродиагностика / Под ред. Г.Ш. Розенберга - СПб: ПЭИПК, 2003. - 284с.
14. Сидоров В.А. Вибродиагностика бесцентровых токарных станков / В.А. Сидоров, А.Л. Нестеров // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов, серия Металлообработка», №2 (134) 2011. - С. 70 - 74.
15. Молчанов А.Д. Практическая виброметрия металлорежущих станков / А.Д. Молчанов, В.А. Сидоров // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. - №1(11) 2014. - Донецьк, 2014. - С. 165-172.

References

1. Arshanskii M.M. Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'iu obrabotki na metallor-zhushchikh stankakh. / M.M. Arshanskii, V.P. Shcherbakov - M.: Mashinostroenie, 1988. - 135s.

2. Kedrov S.S. Kolebaniia metallovezhushchikh stankov. / S.S. Kedrov – M.: Mashinostroenie, 1978. – 199s.
3. Poduraev V.N. Obrabotka rezaniem s vibratsiyami. / V.N. Poduraev – M.: Mashinostroenie, 1970. – 351s.
4. Svirshchev V.I. Ob odnom iz putei dinamicheskoi stabilizatsii protsessa shlifovaniia / V.I. Svirshchev, L.Iu. Kovalev, V.A. Gordeev // Sovershenstvovanie protsessov v abrazivno-almaznoi i uprochniaushchei obrabotke v mashino-stroenii: Mezhevuz. sb. nauchn. trudov. – Perm', 1988. – S. 121-124.
5. Matiukha P.G. Iakist' obroblenoi poverkhni ta produktivnist' shlifuvannia vanadievikh instrumental'nikh stalei: monografiia / P.G. Matiukha, N.V. Azarova, V.P. Tsokur, V.V. Gabitov. – Donetsk: Vid-vo «Noulidzh», 2014. – 164 s.
6. Kudinov V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 359 s.
7. Dobroskok V.L. Regulirovanie vibratsii pri shlifovanii trudnoobrabatyvaemykh materialov putem formirovaniia ratsional'nogo prodol'nogo profil'ia rabochei poverkhnosti krugov / V.L. Dobroskok, A.N. Shpil'ka // Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. Seriia: Mashinopriladobuvannia ta transport.– Vip. 139/2013. – Sevastopol', 2013. – S. 76-78.
8. Kliuev V.V. Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniia: Spravochnik / V.V. Kliuev i dr.; Pod obshch. red. V.V. Kliueva. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 671 s.
9. Golub E.S. Diagnostirovanie sudovykh tekhnicheskikh sredstv: Spravochnik. / E.S. Golub, E.Z. Madorskii, G.Sh. Rozenberg M.: Transport, 1993. – 150 s.
10. Rusov V.A. Spektral'naia vibrodiagno-stika: Metodicheskoe posobie. / V.A. Rusov – Perm', 1996. – 174 s.
11. Shirman A. R. Prakticheskaia vibrodiagno-stika i monitoring sostoianiia mekhanicheskogo oborudovaniia. / A. R. Shirman, A.B. Solov'ev – M., 1996. – 276 s.
12. Gol'din A.S. Vibratsiia rotornykh ma-shin: - 2-e izd. ispravl. / A.S. Gol'din– M.: Mashinostroenie, 2000. – 344 s.
13. Rozenberg G.Sh. Vibrodiagno-stika / Pod red. G.Sh. Rozenberga – SPb: PEIPK, 2003. – 284 s.
14. Sidorov V.A. Vibrodiagno-stika bessten-trovykh tokarnykh stankov / V.A. Sidorov, A.L. Nesterov // Mezhdunarodnyi informatsionno-tekhnicheskii zhurnal «Oborudovanie i instrument dlia professionalov, seriia Metalloobrabotka», №2 (134) 2011. – S. 70 – 74.
15. Molchanov A.D. Prakticheskaia vibrometriia metallovezhushchikh stankov / A.D. Molchanov, V.A. Sidorov // Naukovi pratsi Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu. Seriia: Mashinobuduvannia i mashinoznavstvo. - №1(11) 2014. – Donetsk, 2014. – S. 165-172.

УДК 669.16.22:621.793

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Ю.С. Тарасов¹, А.Г. Радюк¹, С.М. Горбатюк¹¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Российская федерация

Аннотация

Приведены методики расчета тепловых потерь и температуры, адаптированные применительно к воздушным фурмам доменных печей. С помощью линейной программы в excel исследовано влияние газотермического покрытия и теплоизолирующей вставки на тепловое состояние воздушных фурм. Проблемы повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность являются актуальными, но проводится поиск путей повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность с помощью моделирования теплового состояния воздушных фурм доменных печей.

Ключевые слова: шлифование воздушная фурма, доменная печь, рывная часть, дутьевой канал, внутренний стакан, газотермическое покрытие, теплоизолирующая вставка.

SIMULATION OF HEAT LOSSES AND TEMPERATURE OF BLAST FURNACES` TUYERES

Yu.S. Tarasov¹, A.G. Radyuk¹, S.M. Gorbayuk¹¹National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russian Federation

Abstract

The calculation technique of heat losses and temperature, adapted to blast furnaces` tuyeres is described. Using a linear excel program the effect of gas-thermal coating and insulation lining on thermal state of the blast tuyere was studied. Problems of the blast tuyeres` hardening and reducing heat losses through their surface are relevant, but finding ways of the blast tuyeres` hardening and reducing heat losses through their surface by simulation of the thermal state of blast furnaces` tuyeres are carried out.

Keywords: blast tuyere, blast furnace, tuyere nose, air passage, internal nozzle, gas-thermal coating, insulation lining.

Введение

Воздушные фурмы являются одним из важнейших элементов конструкции доменной печи, определяющих эффективность ее работы. Простой печи по этой причине приводят к существенному снижению выплавки чугуна и увеличению расхода кокса. Кроме того, на воздушные фурмы приходится 30% всех тепловых потерь в печи. Поэтому проблемы повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность являются актуальными. При этом в обычных условиях работы доменной печи через рывную часть, наружный и внутренний стаканы фурмы поступает соответственно 18, 36 и 46% [1].

В настоящее время данные проблемы решаются различными путями: нанесением газотермического покрытия на наружную поверхность фурмы [2] и футеровкой огнеупором со стороны дутьевого канала [3], нанесением жаростойкой обмазки на наружную поверхность фурмы [4] и др.

Для дальнейшего поиска путей повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность целесообразно моделирование теплового состояния воздушных фурм доменных печей [5-7].

Для этого воспользуемся методикой расчета тепловых потерь через воздушную фурму [8]. В работе использовали формулы стационарной теплопроводности для плоской и цилиндрической стенки [9,10].

Методика проведения исследований и результаты

Тепловой поток через поверхность фурмы равен:

$$Q = Q_H + Q_P + Q_D = Q_H + Q_{PH} + Q_{PT} + Q_B + Q_{PB} = K_H^* \cdot (t_{\Gamma} - t_B) \cdot H_H + K_{PH}^* (t_{\Gamma} - t_B) \cdot (H_{PH} - h_{PT}) + K_{PT} \cdot (t_{\Gamma} - t_B) \cdot S_{PT} + K_B^* \cdot (t_{\Gamma} - t_B) \cdot H_B + K_{PB}^* \cdot (t_{\Gamma} - t_B) \cdot (H_{PB} - h_{PT}), Вт$$

где Q_H , Q_P , Q_D – тепловой поток через наружный стакан, рьльную (снаружи и торца) часть фурмы и со стороны дутьевого канала, соответственно, Вт; Q_{PH} , Q_{PT} , Q_B , Q_{PB} – тепловой поток через наружную поверхность рьльной части, торцевую поверхность рьльной части, внутренний стакан и рьльную часть со стороны дутьевого канала, соответственно, Вт; K_H^* , K_{PH}^* , K_B^* , K_{PB}^* – условный коэффициент теплопередачи тепла через наружный стакан, наружную поверхность рьльной части, внутренний стакан фурмы и рьльную часть со стороны дутьевого канала, соответственно, Вт/(м·К); K_{PT} – коэффициент теплопередачи тепла через торцевую поверхность рьльной части, Вт/(м²·К); t_{Γ} , t_D – околофурменная температура в горне и температура горячего дутья, соответственно, °С; t_B – температура воды в фурме, 0С; H_H , H_B , H_{PH} , H_{PB} – длина наружного стакана, внутреннего стакана, рьльной части снаружи фурмы и рьльной части со стороны дутьевого канала, соответственно (рис.1), м; h_{PT} – толщина торца рьльной части фурмы (рис.1), м; S_{PT} – площадь торцевой поверхности рьльной части фурмы, м².

$$K_H^* = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_{\Gamma H} \cdot R_H^*} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{Hj}}{R_{Hj+1}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{R_H}{R_H - h_H} + \frac{1}{\alpha_B \cdot (R_H - h_H)}}$$

где $\alpha_{\Gamma H}$ – коэффициент теплоотдачи наружному стакану от газов горна, Вт/(м²·К);

$$R_{Hj}^* = R_j + \sum_{i=1}^m h_i, i$$

$$R_{H1} = R_j^*, i$$

$$R_{Hj} = R_j^* - \sum_{i=1}^{j-1} h_i, i$$

$$R_{Hj+1} = R_j^* - \sum_{i=1}^j h_i, i$$

$$j = 1, \dots, m$$

R_H – средний радиус наружного стакана со стороны печи, м;

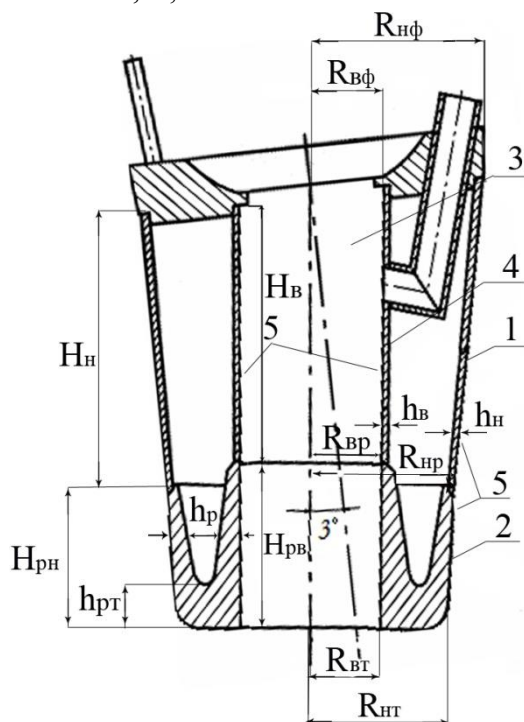


Рис. 1. Продольное сечение воздушной фурмы: 1–наружный стакан, 2–рьльная часть, 3–дутьевой канал, 4–внутренний стакан, 5–покрытие

$$R_H = \frac{R_{HP} + R_{H\phi}}{2}$$

R_{HP} , $R_{H\phi}$ – радиус наружного стакана со стороны печи у рьльной части и фланца, соответственно (рис.1), м; h_H , h_i – толщина наружного стакана и i -го материала покрытия, соответственно (рис.1), м; λ_{Cu} , λ_i – коэффициент теплопроводности меди М1 и i -го материала покрытия, соответственно, Вт/(м·К); m – количество материалов (слоев) покрытия; α_B – коэффициент теплоотдачи от стенки фурмы к воде, Вт/(м²·К).

$$K_{PH}^* = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_{\Gamma P} \cdot R_{PH}^*} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{PHj}}{R_{PHj+1}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{R_{PH}}{R_{PH} - h_P} + \frac{1}{\alpha_B \cdot (R_{PH} - h_P)}}$$

где $\alpha_{\Gamma P}$ – коэффициент теплоотдачи рьльной части от газов горна, Вт/(м²·К);

$$\begin{aligned} R_{PH}^* &= R_{PH} + \sum_{i=1}^m h_i \\ R_{PH1} &= R_{PH}^* - \sum_{i=1}^{j-1} h_i \\ R_{PHj} &= R_{PH}^* - \sum_{i=1}^j h_i \\ R_{PHj+1} &= R_{PH}^* - \sum_{i=1}^{j+1} h_i \\ j &= 1, \dots, m \end{aligned}$$

R_{PH} – средний радиус рыльной части со стороны печи, м;

$$R_{PH} = \frac{R_{HP} + R_{HT}}{2}$$

R_{HT} – радиус рыльной части у торца фурмы (рис.1), м; h_P – средняя толщина рыльной части без учета толщины торца, м.

$$K_{PT} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ГП}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{h_{PT}}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{\alpha_B}}$$

где h_{PT} – толщина торца рыльной части, м.

$$K_B^* = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d \cdot R_B} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{Bj+1}}{R_{Bj}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{R_B + h_B}{R_B} + \frac{1}{\alpha_B \cdot (R_B + h_B)}}$$

где α_d – коэффициент теплоотдачи стенке фурмы от горячего дутья, Вт/(м²·К);

$$\begin{aligned} R_B^* &= R_B - \sum_{i=1}^m h_i \\ R_{B1} &= R_B^* - \sum_{i=1}^{j-1} h_i \\ R_{Bj} &= R_B^* - \sum_{i=1}^j h_i \\ R_{Bj+1} &= R_B^* - \sum_{i=1}^{j+1} h_i \\ j &= 1, \dots, m \\ R_B &= \frac{R_{BP} + R_{BФ}}{2} \end{aligned}$$

R_{BP} , $R_{BФ}$ – радиус внутреннего стакана со стороны дутьевого канала у рыльной части и фланца, соответственно (рис.1), м; h_B – толщина внутреннего стакана (рис.1), м.

$$K_{PB}^* = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ГП} \cdot R_{PB}} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{PBj+1}}{R_{PBj}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{R_{PB} + h_P}{R_{PB}} + \frac{1}{\alpha_B \cdot (R_{PB} + h_P)}}$$

где

$$R_{PB}^* = R_{PB} - \sum_{i=1}^m h_i$$

$$\begin{aligned} R_{PB1} &= R_{PB}^* - \sum_{i=1}^{j-1} h_i \\ R_{PBj} &= R_{PB}^* - \sum_{i=1}^j h_i \\ R_{PBj+1} &= R_{PB}^* - \sum_{i=1}^{j+1} h_i \\ j &= 1, \dots, m \\ R_{PB} &= \frac{R_{BP} + R_{BT}}{2} \end{aligned}$$

R_{BT} – радиус дутьевого канала у торца фурмы (рис.1), м.

$$S_{PT} = \pi \cdot (R_{HT}^2 - R_{BT}^2).$$

Методика расчета температуры на различных поверхностях воздушной фурмы с использованием формул стационарной теплопроводности через цилиндрическую и плоскую многослойную стенку выглядит следующим образом [10]:

– Для наружного стакана имеем:

Температура на поверхности 1-го слоя покрытия со стороны печи равна:

$$t_{Г-1} = t_{Г} - \frac{K_H^* \cdot (t_{Г} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_{ГН} \cdot R_H}$$

Температура на стыке j и $j+1$ слоев покрытия или слоя покрытия и наружного стакана:

$$t_{j,j+1} = t_{Г} - \frac{K_H^* \cdot (t_{Г} - t_B)}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{ГН} \cdot R_H} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{Hj}}{R_{Hj+1}} \right)$$

Температура на поверхности наружного стакана со стороны воды:

$$t_{H-B} = t_B + \frac{K_H^* \cdot (t_{Г} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_B \cdot (R_H - h_H)}$$

– Для рыльной части со стороны печи имеем:

Температура на поверхности 1-го слоя покрытия со стороны печи равна:

$$t_{Г-1} = t_{Г} - \frac{K_{PH}^* \cdot (t_{Г} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_{ГН} \cdot R_{PB}}$$

Температура на стыке j и $j+1$ слоев покрытия или слоя покрытия и рыльной части:

$$t_{j,j+1} = t_{Г} - \frac{K_{PH}^* \cdot (t_{Г} - t_B)}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{ГП} \cdot R_{PH}} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{PHj}}{R_{PHj+1}} \right)$$

Температура на поверхности рыльной части со стороны воды:

$$t_{PH-B} = t_B + \frac{K_{PH}^* \cdot (t_{Г} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_B \cdot (R_{PH} - h_P)}$$

– Для торца рыльной части со стороны печи имеем:

Температура на поверхности 1-го слоя покрытия со стороны печи равна:

$$t_{\Gamma-1} = t_{\Gamma} - \frac{K_{PT} \cdot (t_{\Gamma} - t_B)}{\alpha_{\Gamma P}}$$

Температура на стыке j и $j+1$ слоев покрытия или слоя покрытия и рыльной части:

$$t_{j,j+1} = t_{\Gamma} - K_{PT} \cdot (t_{\Gamma} - t_B) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\Gamma P}} + \sum_{i=1}^j \frac{h_i}{\lambda_i} \right)$$

Температура на поверхности рыльной части со стороны воды:

$$t_{PT-B} = t_B + \frac{K_{PT} \cdot (t_{\Gamma} - t_B)}{\alpha_B}$$

– Для внутреннего стакана имеем:

Температура на поверхности 1-го слоя покрытия со стороны дутьевого канала равна:

$$t_{Д-1} = t_{Д} - \frac{K_B^* \cdot (t_{Д} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_{Д} \cdot R_B^*}$$

Температура на стыке j и $j+1$ слоев покрытия или слоя покрытия и внутреннего стакана:

$$t_{j,j+1} = t_{Д} - \frac{K_B^* \cdot (t_{Д} - t_B)}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{Д} \cdot R_B^*} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{Bj+1}}{R_{Bj}} \right)$$

Температура на поверхности внутреннего стакана со стороны воды:

$$t_{B-B} = t_B + \frac{K_B^* \cdot (t_{Д} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_B \cdot (R_B + h_B)}$$

– Для рыльной части со стороны дутьевого канала имеем:

Температура на поверхности 1-го слоя покрытия со стороны дутьевого канала равна:

$$t_{Д-1} = t_{Д} - \frac{K_{PB}^* \cdot (t_{Д} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_{Д} \cdot R_{PB}^*}$$

Температура на стыке j и $j+1$ слоев покрытия или слоя покрытия и рыльной части:

$$t_{j,j+1} = t_{Д} - \frac{K_{PB}^* \cdot (t_{Д} - t_B)}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{Д} \cdot R_{PB}^*} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_{PBj+1}}{R_{PBj}} \right)$$

Температура на поверхности рыльной части со стороны воды:

$$t_{PB-B} = t_B + \frac{K_{PB}^* \cdot (t_{Д} - t_B)}{2\pi \cdot \alpha_B \cdot (R_{PB} + h_P)}$$

По методикам расчета тепловых потерь через поверхность фурмы и температуры была составлена линейная программа в excel. С помощью этой программы был проведен расчет тепловых потерь через поверхность воздушной фурмы и температуры на деталях фурмы для условий ДП-5 ОАО «НЛМК». Были использованы значения коэффициентов теплоотдачи определенные расчётным путём по экспериментальным данным [11].

Принимаем $t_{\Gamma} = 1600$ °C; $t_{Д} = 1150$ °C; $t_B = 30$ °C; $h_N = 7,0$ мм; $h_P = 16,0$ мм; $h_{PT} = 45,0$ мм; $h_B = 5,0$ мм; $h_I = 1,5$ мм; $\lambda_{Cu} = 415,6562$ Вт/(м·K); $\lambda_1 = 29,8891$ Вт/(м·K); $\alpha_{ГН} = \alpha_{ГР} = 133,745$ Вт/(м²·K); $\alpha_{Д} = 465,2$ Вт/(м²·K); $\alpha_B = 5815$ Вт/(м²·K); $R_{HP} = 154$ мм; $R_{HF} = 185$ мм; $R_{HT} = 140$ мм; $R_{BP} = 72,5$ мм; $R_{BF} = 72,5$ мм; $R_{BT} = 72,5$ мм; $H_N = 305$ мм; $H_{PH} = 145$ мм; $H_{PB} = 167$ мм; $H_B = 283$ мм.

В связи с тем, что всё более широкое применение находит теплоизоляция внутренней поверхности дутьевого канала [12 – 13], было исследовано влияние толщины теплоизоляционной вставки на тепловые потери через поверхность дутьевого канала, а также получено распределение температуры от водоохлаждаемой полости фурмы до дутьевого канала (рис. 2 – 3).

Для сравнения рассчитывали тепловые потери через дутьевой канал с алюминиевым газотермическим покрытием. Из рис. 2 видно, что наличие вставки оказывает более значительное влияние на снижение тепловых потерь через дутьевой канал, чем нанесение алюминиевого покрытия. Создание воздушного зазора между ней и внутренним стаканом приводит к дополнительному снижению тепловых потерь. При этом, чем больше толщина вставки, установленной без зазора в дутьевой канал, тем меньше тепловые потери через дутьевой канал. Если вставка установлена с зазором, то ее толщина практически не влияет на тепловые потери через дутьевой канал.

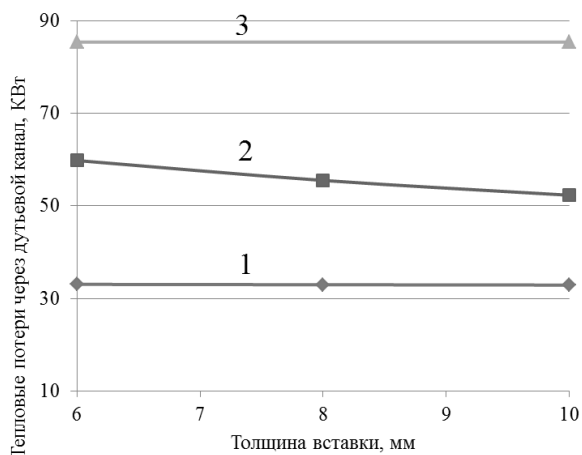


Рис. 2. Зависимость тепловых потерь через дутьевой канал от толщины вставки:

1 – $h_{\text{воз.}} = 0,6$ мм; 2 – $h_{\text{воз.}} = 0$ мм; 3 – $h_{\text{AI}} = 1,5$ мм; $\lambda_{\text{вст.}} = 3$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{воз.}} = 0,0362$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{AI}} = 29,8891$ Вт/(м·К)

Согласно рис. 3, наблюдается резкий градиент температуры в воздушном зазоре между вставкой и внутренним стаканом из-за его низкой теплопроводности, благодаря чему температура вставки выше, а внутреннего стакана ниже, чем при отсутствии зазора между ними. С точки зрения стойкости вставки, большой градиент температур по её толщине при отсутствии зазора может привести к появлению в ней высоких термодинамических напряжений, способствующих её разрушению [14 – 15].

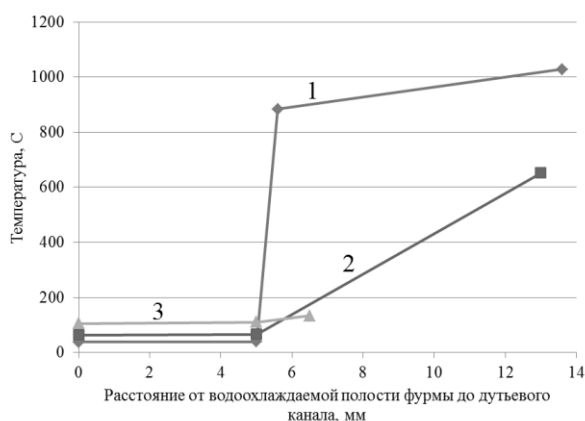


Рис. 3 – Распределение температуры от водоохлаждаемой полости фурмы до дутьевого канала: $h_{\text{в}} = 5$ мм; 1 – $h_{\text{воз.}} = 0,6$ мм, $h_{\text{вст.}} = 8$ мм; 2 – $h_{\text{воз.}} = 0$ мм, $h_{\text{вст.}} = 8$ мм; 3 – $h_{\text{AI}} = 1,5$ мм; $\lambda_{\text{вст.}} = 3$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{воз.}} = 0,0362$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{AI}} = 29,8891$ Вт/(м·К)

Методики расчета тепловых потерь и температуры адаптированы применительно к воздушным фурмам доменных печей. С помощью линейной программы в excel исследовано влияние газотермического покрытия и теплоизолирующей вставки на тепловое состояние воздушных фурм.

Список литературы

1. Об информативности тепловых потерь рабочего пространства доменных печей / А.В. Бородулин, А.П. Васильев, Е.Л. Глушенко и др. // Материалы 2-ой международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М., 2002. – С. 424–426.
2. Пат. № 2215043 РФ. МКИ C21B7/16. Способ подготовки к работе фурмы доменной печи / Григорьев В. Н., Урбанович Г. И., Урбанович Е. Г. и др. – 20011337559/02; заявл. 11.12.01; опубл. 27.10.02 – Бюл. №30.
3. Акимов В. А. Исследование и совершенствование технологии изготовления воздушных фурм доменных печей нанесением алюмосодержащих газопламенных покрытий с последующей термообработкой // автореферат дис. канд. тех.наук / В. А. Акимов. – Москва, 2011. – 23 с.
4. Пат. 128614 РФ, C21B7/16. Воздушная фурма доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Н.Л. Кириллова и др. (РФ). – №2013100964/02; заявлено 11.01.13; опубл. 27.05.13, Бюл. №15.
5. Быковских П.С., Тищенко В.А., Быковских С.В. Математическая модель тепловой работы воздушной фурмы доменной печи // Металл и литье Украины.-2015.- №4(263).-С. 16 -22.
6. Агапитов Е.Б., Болкунова В.А., Шутов К.В. Численное моделирование теплового состояния водоохлаждаемой доменной фурмы при налипании расплава шлака на её поверхность. // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. – 2011. -№4.-С.73-75.
7. Лавров В.В., Спирин Н.А., Рыболовлев В.Ю. Модельное исследование температуры стенки воздушной фурмы доменной печи // Изв. ВУЗов Чёрная металлургия. –2000. –№2. –С.46–49.
8. Пат. № 2235789 РФ. МКИ C21B7/16. Дутьевая фурма доменной печи и способ нанесения защитного покрытия на дутьевую фурму доменной печи / Маншилин А. Г., Складановский Е. Н., Нецветов В. И. и др. – 2002129285/02; заявл.04.11.02; опубл.27.05.04 – Бюл.№15.
9. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
10. С. С. Кутателадзе. Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский – М.: Книга по Требованию, 2012. – 415 с.
11. Расчет коэффициентов теплоотдачи поверхностям воздушной фурмы доменной печи от горна

и горячего дутья / Н.Л. Кириллова, А.Г. Радюк, С.М. Горбатьук и др. // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: материалы XIII международной научно-практической конференции 21–22 декабря 2012 г. в 2 т.: т. I / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». – М.: Изд-во «Спецкнига», 2012. – С.132–135.

12. Кириллова Н.Л., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Снижение тепловых потерь через поверхность воздушных фурм доменных печей // *Металлург.* –2013. –№10. –С.28–31.
13. Kirillova, N.L., Radyuk, A.G., Titlyanov, A.E., Gorbatyuk, S.M. Improving air-tuyere operation in blast furnaces by means of coatings and sealant (2013) *Steel in Translation*, 43 (5), pp. 231-235.
14. Андреев К., Хармут Х.Расчёт формирования трещин в огнеупорах. //Физическая мезомеханика.- 2001. №4 – С.109 -115.
15. Аксельрод Л.М., Заболотский А.В. Математическое моделирование разрушения футеровок металлургического оборудования под действием термоударов.//Сб. н.тр.Современная наука. - 2010.- №2(4).- С.165 – 169.

References

1. A.V. Borodulin, A.P. Vasilev, E.L. Gluschenko and others, The proceedings of the 2nd international research-to-practice conference “Automatic furnace units and energy saving solutions in metallurgy”, About heat losses of furnace cavity,424 (2002).
2. V.N. Grigoriev, G.I. Urbanovich, E.G. Urbanovich and others, Pat. № 2215043 RF. IQR C21B7/16. Preparation setting up method of blast furnaces tuyere / - 20011337559/02; ass. 11.12.01, pub. 27.10.02 – Bul.№30.
3. V.A. Akimov, avtoreferat dis. kand. tekhn.nauk, Issledovanie i sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniia vozdukhnykh furm domennykh pechei naneseniem aliumosoderzhashchikh gazoplamentnykh pokrytii s posleduiushchei termooobrabotkoi, 23 (2011).
4. A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, N.L. Kirillova, and others, Pat. 128614 RF, C21B7/16. Tuyere of blast furnace, №2013100964/02, pub. 27.05.13, Bul.№15.
5. P.S. Bykovskikh, V.A. Tishchenko, S.V. Bykovskikh, Metall i lit'e Ukrainy, Matematicheskaiia model' teplovoi raboty vozdukhnoi furmy domennoi pechi, 4, 16 (2015).
6. E.B. Agapitov, V.A. Bolkunova, K.V. Shutov, Vestnik MGTU im. G.I. Nosova, Chislennoe modelirovanie teplovogo sostoianiia vodookhlazhdaemoi domennoi furmy pri nalipanii rasplava shlaka na ee poverkhnost', 4, 73 (2011).
7. V.V. Lavrov, N.A. Spirin, V.Yu Ribalovlev, Not. Of HEI Ferrous metallurgy, Model study of temperature of blast furnace tuyere's wall, 2, 46 (2000).
8. A.G. Manshilin, E.N. Skladanovsky, V.I. Necvetov and others, Pat. № 2235789 RF. IQR C21B7/16. Blast furnace's tuyere and technique of barrier coating's application on blast furnace tuyere, 2002129285/02, pub.27.05.04 – Bul.№15.
9. V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel Teploperedacha, Energoizdat, 46 (1981).
10. S.S. Kutateladze, V.M. Borischansky, Heat-transfer reference, Gosenergopub, 414 (1959).
11. N.L. Kirillova, A.G. Radyuk, S.M. Gorbatyuk and others, Scein.-inform. publishing center “Institute for Strategic Stud-ies”, Calculation of coefficients of heat-transfer to blast furnace tuyeres surfaces from forge to hot blow, 132 (2012).
12. N.L. Kirillova, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, Metallurgy, Reducing heat losses through surface of blast furnace tuyere, 10, 28 (2013).
13. N.L. Kirillova, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, S.M. Gorbatyuk, Steel in Translation, Improving air-tuyere operation in blast furnaces by means of coatings and sealant, 5, 231 (2013).
14. K. Andreev, Kh. Kharmut, Fizicheskaiia mezomekhanika, Raschet formirovaniia treshchin v ogneuporakh, 4, 109(2001).
15. L.M. Aksel'rod, A.V. Zabolotskii, Matematicheskoe modelirovanie razrusheniia futerovok metallurgicheskogo oborudovaniia pod deistviem termouдарov (Sb. n.tr. Sovremennaiia nauka, 2010.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №6 2017

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

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.
