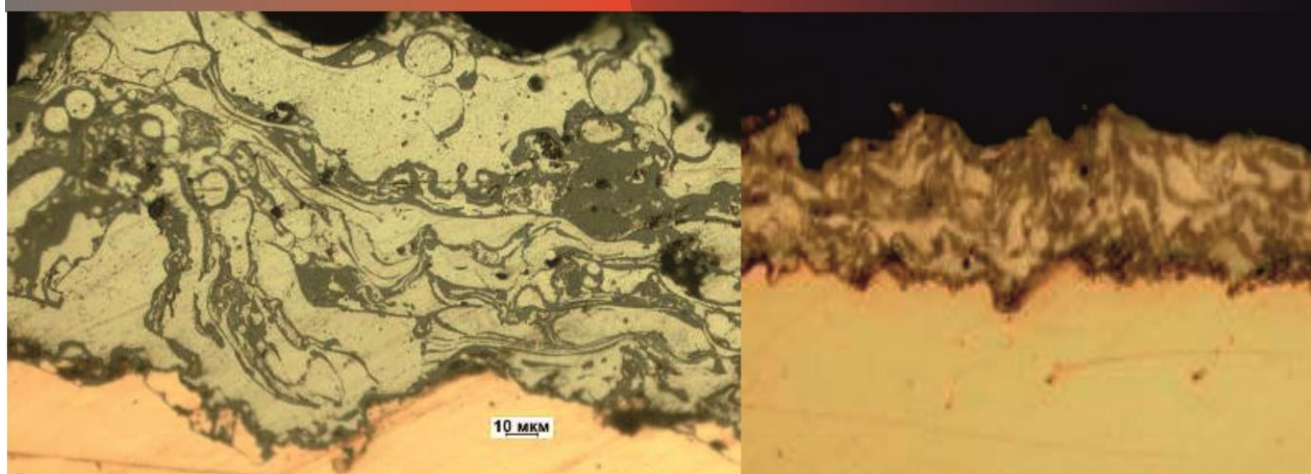




СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

№3(3)
2016



Вестник Современных Технологий

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

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

№ 3(3)
2016

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении» (12 – 18 сентября 2016 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 16-08-20625)*

Севастополь 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – ГОЛОВИН В.И.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

БАКУЛИНА А.Н.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н., проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ВЕТРОГОН А.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., проф. (г. Белгород)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (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. Санкт-Петербург)
ФИЛИПОВИЧ О.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ХАРЧЕНКО А.О.	к. т. н., проф. (г. Севастополь)

Братан С.М., Рощупкин С.И., Мерзлов А.В. Стохастический подход к моделированию процесса стружкообразования при суперфинишировании	4
Васильев Е.В., Попов А.Ю., Васильева М.В., Назаров П.В. Реновация многогранных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов	10
Вожжов А.А., Худаймуратов М.А. Анализ относительных вынужденных колебаний инструмента и детали при фасонном точении	16
Дуюн Т.А., Гринек А.В. Математическое моделирование процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нейросетевых и нечетких моделей.	28
Козлов А.А., Смоленцев В.П., Козлов А.М. Нанесение выпуклых знаков на металлические поверхности с упругим диэлектрическим покрытием	34
Колесов А.Г., Братан С.М., Рощупкин С.И. Прогнозирование параметров качества обработанных поверхностей при врезном шлифовании	39
Левченко Е.А., Покинтелица Н.И. Теплофизическая модель процесса абразивной разрезки труб отрезными кругами	46
Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Саразов А.В., Орлов С. В. Управление упругими деформациями нежестких подшипниковых колец при закреплении и механической обработке	53
Ревенко Д.В. Определение напряжений сдвига в срезаемом слое при шлифовании высоколегированных сталей	63
Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Прежилов А.Н. Перспективы развития гидроструйных технологий в машиностроении	68
Шрон Б. Л., Ягьяев Э.Э. Оценка влияния поперечной волнистости вала на надежность работы контактирующих поверхностей соединения «ВАЛ-МАНЖЕТА»	76
Яглицкая А.С. Методика размерного анализа в процессах прототипирования	81

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

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

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2016

CONTENTS

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)

Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Merzlov A.V. The stochastic approach for modeling of chip formation process in superfinishing.....	4
Vasilyev E.V., Popov A.U., Vasilyeva M.V., Nazarov P.V. Renovation of multi-faceted carbide inserts for modular cutting tools	10
Vozhzhov A.A., Khudaimuratov M.A. Analysis of relative forced vibrations tool and details structural shapes when turning.....	16
Dujun T.A., Grinek A.V. Mathematical modeling of machining as control system instrument of technological parameters based on the fuzzy logic and neural networks	28
Kozlov A.A., Smolentsev V.P., Kozlov A.M. Drawing convex signs on metal surfaces with elastic dielectric coating	34
Kolesov A.G., Bratan S.M., Roshchupkin S.I. Prediction parameters of quality in the treated surfaces plunge grinding	39
Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I. To determining longitudinal and transverse traction coefficient tyres roadway under examination autotechnical accident	46
Nosenko V. A., Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., Orlov S.V. The control elastic deformations of non-rigid bearing rings when fixing and machining	53
Revenko D.V. Determination shear stress in a cut-off layer for high-alloy steels grinding	63
Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Prezhbilov A.N. Development prospects hydro technologies in mechanical engineering.....	68
Shron B.L., Yagyaev E.E. Assessment of the impact of the shaft's transverse waviness on the operational reliability of the contacting surfaces in the «SHAFT-CUFF» connection	76
Jaglitskaya A.S. Methods dimension of analysis in the process of prototyping	81

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

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

С.М. Братан¹, С.И. Рошчупкин¹, А.В. Мерзлов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Для осуществления оптимального управления современными технологическими процессами необходимо иметь возможность их адекватно моделировать, в особенности, данная задача актуальна для процессов, имеющих сложную стохастическую природу, к числу которых относится суперфиниширование. В данной статье выполнено стохастическое описание процесса съема материала при контактировании абразивного инструмента и заготовки в процессе суперфиниширования. Учтено, что при суперфинишировании съем материала в существенной степени осуществляется в пределах слоя, в котором распределена шероховатость. При моделировании шероховатая поверхность детали была представлена нормальной марковской функцией. Получены выражения, являющиеся основой для определения стохастических представлений основных технологических показателей процесса суперфиниширования.

Ключевые слова: суперфиниширование, абразивный инструмент, зерно, математическая модель, стружкообразование, стохастический подход.

THE STOCHASTIC APPROACH FOR MODELING OF CHIP FORMATION PROCESS IN SUPERFINISHING

S.M. Bratan¹, S.I. Roshchupkin¹, A.V. Merzlov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

For the optimal control of the modern technological processes it is necessary to be able to model them appropriately, in particular this problem is important for the processes, which have complex stochastic nature, such as superfinishing. In this article a stochastic description of the material removal process by contacting abrasive tool with the workpiece in the process of superfinishing was accomplished. It was taken into a consideration that in superfinishing the removal of material is carried out substantially within the layer where the roughness is distributed. In the modeling the rough surface of the workpiece was represented by the normal function of Markov. The expressions, which are the basis for determining the basic concepts of stochastic process parameters in superfinishing were obtained.

Keywords: superfinishing, abrasive tool, grain, mathematical model, chip formation, stochastic approach.

Введение

При суперфинишировании съем материала в существенной степени осуществляется в пределах слоя, в котором распределена шероховатость. При моделировании процессов стружкообразования необходимо учитывать специфику происходящих явлений [1, 2], для оценки процессов съема материала в зоне контакта инструмента и заготовки. В этом случае необходимо уточнение модели взаимодействия абразивных зерен с поверхностным слоем заготовки.

Результаты и обсуждение

В связи с этим поставлена задача построения математической модели для оценки параметров съема материала при суперфинишировании, что и является целью данной работы.

Для достижения поставленной цели шероховатая поверхность детали представлена нормальной марковской функцией (марковским процессом). В соответствие с теорией выбросов [3,4] построены оценки нестационарных параметров процесса.

нарной условной плотности распределения вероятностей прохождения трассы зерна в шероховатом слое детали, которое и определяет основные стохастические параметры стружек.

Для построения математической модели, позволяющей оценивать происходящие явления необходимо математическое описание формы детали.

Наиболее простым является представление формы круглой детали в полярной системе координат с центром, расположенным в центре детали и углом φ , отсчитываемом от некоторой фиксированной точки, разложением в ряд Фурье

$$R(\varphi) = R_0 + \sum R_i \cdot \cos(\omega_i \varphi + \mu_i). \quad (1)$$

Представление формы детали в виде (1) справедливо вследствие периодического характера ее формы как функции φ . Конкретные значения соответствующих коэффициентов R_i , $i \in \{0..n\}$ могут быть определены в результате измерений соответствующих отстояний образующей детали от ее центра.

Для установившегося режима суперфиниширования можно считать, что деталь вращается с постоянной угловой скоростью ω и угол φ может быть определен как

$$\varphi = \omega \cdot t + \mu_0 \quad (2)$$

Для высокочастотной составляющей уравнения (1) – компонентам с большими значениями i определение соответствующей фазы μ_i , в силу ограниченной точности фиксации начальной точки, производится со значительной погрешностью, имеющей случайный характер.

Целесообразно использовать представление энергетических спектров (спектров мощности) процессов $S(\omega)$, которые могут быть построены на основе уравнений Винера - Хинчина [3],

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K(\varphi) \cos(\omega \varphi) d\varphi, \\ K(\varphi) = \int_0^{\infty} S(\omega) \sin(\omega \varphi) d\omega \quad (3)$$

однозначно связывающие корреляционные (взаимокорреляционные) функции $K(\varphi)$ и энергетические спектры $S(\omega)$.

Определение конкретного вида корреляционной функции $K(\varphi)$ для решения уравнения (3) может быть произведено по круглограмме детали.

Предпочтительным является представление зависимостей (1) в форме (3) как случайного процесса изменения радиуса как функции угла поворота, а, с учетом (2), и как функции времени. Эту зависимость можно моделировать одномерным марковским процессом, считая, что условная плотность вероятности $f(\varphi_i, R_i; \varphi_j, R_j)$, $\varphi_i < \varphi_j$ кроме общих условий, которым удовлетворяет всякая плотность вероятностей.

$$f(\varphi_i, R_i; \varphi_j, R_j) > 0, \quad f(\varphi_i, R_i; \varphi_j, \pm\infty) = 0,$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\varphi_i, R_i; \varphi_j, R_j) dR_j = 1$$

удовлетворяет и соотношениям Чепмена-Колмогорова

$$f(\varphi_i, R_i; \varphi_j, R_j) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\varphi_i, R_i; \varphi_k, z) f(\varphi_k, z; \varphi_j, R_j) dz$$

для любого $\varphi_i \leq \varphi_k \leq \varphi_j$, отражающего факт «гладкости» – непрерывности изменения $R(\varphi)$ – отсутствие разрывов функции и дифференциальным уравнениям в частных производных Фоккера-Планка-Колмогорова

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi_j} + \frac{\partial}{\partial R_j} [a(\varphi_j, R_j) \cdot f] - \\ - \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial R_j^2} [b(\varphi_j, R_j) \cdot f] = 0 \quad (4)$$

Функции $a(\varphi_i, R_i)$ и $b(\varphi_j, R_j)$ характеризуют изменчивость математического ожидания и дисперсии радиуса, соответственно. Для компактности записи опущены соответствующие аргументы плотности вероятности.

В предположении стационарности случайной функции, характеризующей радиус

детали за период контакта, параметры уравнения (4) $a(\varphi_i, R_i)$ и $b(\varphi_j, R_j)$ не зависят от времени, причем $a(\varphi_i, R_i)$ является линейной функцией радиуса детали, а b – постоянной величиной. В указанном случае решением системы (4) является плотность нормального закона распределения реализации случайного стохастического процесса, а реализация $R(t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению вида

$$\frac{dR(\varphi)}{d\varphi} + \alpha \cdot R(\varphi) = \beta \cdot \xi(\varphi), \quad (5)$$

где $\xi(\varphi)$ и $\beta = \sigma_R / \sigma$ – нормальный белый шум единичной интенсивности и интенсивность входного воздействия.

Решением стохастического уравнения (5) при начальном условии $R(0) = R_0$ является

$$R(\varphi) = R_0 \exp(-\alpha\varphi) + \beta \exp(-\alpha\varphi) \int_0^\varphi \exp[\alpha\xi(x)] dx \quad (6)$$

В соответствие (3), соотношению (5) следует спектральная плотность вида и корреляционная функция вида

$$S_R(\omega) = \frac{\alpha \cdot \sigma_R^2}{\pi(\omega^2 + \alpha^2)}, \quad (7)$$

$$K_R(\varphi) = \sigma_R^2 \cdot \exp(-\alpha \cdot |\varphi|) \quad (8)$$

Справедливо и обратное [5]. Нормальные стационарные процессы с корреляционными функциями вида (7) или спектральными плотностями (8) являются марковскими. К таким процессам или к n – мерным марковским процессам с более сложным описанием следует отнести основные классы нормальных случайных процессов при суперфинишировании, которые могут быть представлены энергетическими спектрами с дробно-рациональным представлением, рассмотренные в [4].

Вероятность того, что ордината марковского процесса $R(\varphi)$ при прохождении режущей кромкой пути φ ни разу не выйдет за

границы интервала (R_1, R_2) определится зависимостью

$$W(\varphi) = \int_{R_1}^{R_2} w(\varphi, y) dy, \quad (9)$$

где $w(\varphi, R)$ удовлетворяет второму уравнению системы (4)

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial R}(aw) - \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial R^2}(bw) = 0, \quad (10)$$

с граничными и начальными условиями, $w(\varphi, R_1) = w(\varphi, R_2) = 0$ при $R \geq 0$,

$w(\varphi, R)|_{\varphi=0} = \delta(R-x)$, если задано начальное значение ординаты x процесса,

$w(\varphi, R)|_{\varphi=0} = w_0(R)$, если задана плотность вероятности ординаты процесса при $\varphi = 0 + 0$ (11)

Для вычисления коэффициентов $a(\varphi, R)$ и $b(\varphi, R)$ могут быть использовано соотношение (5) с учетом требований (4), приближенного разложения

$\exp(-\alpha \cdot \Delta\varphi) \approx 1 - \alpha \cdot \Delta\varphi$ для $\alpha \cdot \Delta\varphi \ll 1$ и учета стробирующих свойств дельта функции

$$\begin{aligned} a(\varphi, R) &= \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\varphi} \langle R(\varphi + \Delta\varphi) - R(\varphi) | R(\varphi) \rangle = \\ &= \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\varphi} [\exp(\alpha \cdot \Delta\varphi) - 1] = -\alpha R = a(R), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} b(\varphi, R) &= \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\varphi} \langle [R(\varphi + \Delta\varphi) - R(\varphi)] | R(\varphi) \rangle = \\ &= \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\varphi} \{ R^2 [\exp(\alpha \cdot \Delta\varphi) - 1]^2 + \beta^2 \exp[-2\alpha(\varphi + \Delta\varphi)] \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \exp[\alpha(x+y)] \langle \xi(x)\xi(y) \rangle dx dy \} = \\ &= \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\varphi} \beta^2 \exp[-2\alpha(\varphi + \Delta\varphi)] \frac{\Xi_0}{2} \times \\ &\times \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \exp[\alpha(x+y)] \delta(y-x) dx dy = \\ &= \beta^2 \frac{\Xi_0}{2} = const, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\langle \Psi(q) \rangle$ – математическое ожидание соответствующего аргумента (функции), а параметры α , β , Ξ соответствуют (5).

С учетом (12), (13) обратное уравнение Колмогорова (4) приобретает вид

$$\frac{\partial}{\partial t} w(\varphi, R) = \alpha \frac{\partial}{\partial R} (Rw) + \frac{\beta^2 \Xi_0}{4} \frac{\partial^2}{\partial R^2} w, \quad (14)$$

которое может быть решено методом Гаусса представлением функции $w(R, \varphi)$ в виде

$$w(\varphi, R) = \Lambda(R) \cdot \Omega(\varphi). \quad (15)$$

Деление левой и правой частей (14) на (15) приводит после соответствующих преобразований к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial \varphi} &= -\gamma^2, \\ \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial R^2} [b(R)\Lambda(R)] - \frac{\partial}{\partial R} [a(R)\Lambda(R)] + \\ &+ \gamma^2 \Lambda(R) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

решением первого из которых является

$$\Omega(\varphi) = \exp(-\gamma^2 \varphi). \quad (17)$$

Второе уравнение системы (16) может быть определено известными методами решения обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами и для рассматриваемого случайного процесса

$$w(\varphi, R) = w_{st}(R) \{ \Omega_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \Lambda_n(R) \Omega_n \exp[-\gamma_n^2 (\varphi - \varphi_0)] \}, \quad (18)$$

где Ω_i – постоянные коэффициенты, $\Lambda_i(R)$ – ортонормированные собственные функции второго уравнения системы (16), соответствующие собственным значениям γ^2 , т.е.

$$\int \frac{\Lambda_i(R) \cdot \Lambda_j(R)}{w_{st}(R)} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}$$

При заданной начальной плотности вероятности $w(R, \varphi) = w_0(R)$, коэффициенты Ω_n определяются как

$$\Omega_n = \int \frac{w_0(R) \Lambda(R)}{w_{st}(R)} dR,$$

а в случае заданной начальной ординаты процесса $w_0(R) = \delta(R - R_0)$ и

$$w(\varphi, R) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Lambda_n(R_0) \Lambda_n(R)}{w_{st}(R)} \exp[-\gamma_n^2 (\varphi - \varphi_0)],$$

$$\Lambda_0(R) = w_{st}(R), \quad \gamma_0 = 0.$$

Для рассматриваемого случая одномерного нормального Марковского процесса при начальном условии $R(0) = R_0$ решение может быть представлено в форме:

$$w(\varphi, R_{|R_0, 0}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2[1 - \exp(-2\alpha\varphi)]}} \times \exp\left\{ -\frac{[R - R_0 \exp(-\alpha\varphi)]^2}{2\sigma^2[1 - \exp(-2\alpha\varphi)]} \right\}, \quad (19)$$

которая представляет собой нестационарную условную плотность вероятности. Из (19) непосредственно определяются нестационарное математическое ожидание и нестационарная дисперсия процесса:

$$\begin{aligned} M(\varphi) &= R_0 \exp(-\alpha\varphi) \\ D(\varphi) &= \sigma^2 [1 - \exp(-2\alpha\varphi)] \end{aligned} \quad (20)$$

В предположении больших величин

$$\varphi \gg \frac{1}{\alpha}, \quad (21)$$

что справедливо для случая суперфиниширования, может быть получена и непосредственно использована установившаяся плотность условной вероятности, а ее параметры могут быть непосредственно оценены по соотношениям (19), (20), т.е.

$$w_{st}(R) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta^2}{4\alpha} \Xi_0. \quad (22)$$

Соотношение (19) и его стационарное представление (22) с учетом известной функции плотности вероятности распределения режущих кромок инструмента по глубине рабочего слоя[2]:

$$f(R) = C_f R^{\chi-1} \quad (23)$$

где C_f – коэффициент, вычисляемый из условия равенства единице площади, ограниченной кривой распределения:

$$C_f = \frac{\chi}{H_R^\chi},$$

где H_R – величина слоя рабочей поверхности инструмента по глубине, в пределах которой подсчитывается число активных зерен), позволяет получить зависимость для плотности вероятности съема материала при суперфинишировании в виде:

$$w(\varphi, R) = w(\varphi, R_{|R_0,0}) \cdot f(R) \quad (24)$$

или для стационарного случая

$$w_{st}(R) = \frac{\chi}{H_R^\chi \sigma \sqrt{2\pi}} R^{\chi-1} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \quad (25)$$

Выводы

Выражения (24), (25) представляют собой стохастическое описание процесса съема материала при контактировании абразивного инструмента и заготовки и являются основой для определения стохастических представлений основных технологических показателей процесса суперфиниширования.

Список литературы

1. Семко, М.Ф. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко и др. // Киев: Техника, 1978, -192 с.
2. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: монография / Ю.К. Новоселов // Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. -304 с
3. Прохоров, Ю.В. Теория вероятностей / Ю.В. Прохоров, Ю.А. Розанов М // Наука, 1973, -496 с.
4. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг и др. // М: Наука, 1975, -344 с.
5. Гихман, И.И. Введение в теорию случайных процессов / И.И. Гихман, А.В. Скороход М // Наука, 1977, -586 с.
6. Новоселов, Ю.К. Аналитическая оценка параметров шероховатости шлифованных поверхностей / Ю.К. Новоселов, В.Б. Богуцкий, С.М. Братан // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. - Вып. 83. - с.208-222.
7. J. Borkowski, P. Borkowski, The influence of elementary effects on grinding wheel wear, Archives of civil and mechanical engineering, Vol.II, No. 1–2, 2002, pp. 21–34.
8. N. de Souza, R. E. Catai, P. R. de Aguiar, M. H. Salgado, E. C. Bianchi, Analysis of Diametrical

Wear of Grinding Wheel and Roundness Errors in the Machining of Steel VC 131, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXVI, No. 2, April/June 2004, pp. 209–212

9. Novoselov, Y. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky, Y. Gutsalenko // Fiabilitate si Durabilitate - fiability & Durability Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu, Supplement no 1, 2013. - С. 5–15.
10. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process/ International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 2003, pp. 1579–1593
11. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process/ International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 2003, pp. 1579–1593
12. Brian W. Rowe, Xun Chen, Modeling surface roughness improvement in grinding, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 213 (1), 1999, pp. 93–96.
13. Sanchit Kumar Kharea, Sanjay Agarwal, Predictive Modeling of Surface Roughness in Grinding, Procedia CIRP Vol. 31, 2015, pp. 375–380.
14. Warren R. DeVries, Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag New York, Inc. 1992, – 269p
15. Hassan Abdel-Gawad El-Hofy, Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes, Publisher: CRC Press, 2006, – 562p.

References

1. Semko, M.F. Osnovy almaznogo shlifovaniia / M.F. Semko, A.I. Grabchenko i dr. // Kiev: Tekhnika, 1978, -192 s.
2. Novoselov, Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke: monografiia / Iu.K. Novoselov // Sevastopol': Iz-vo SevNTU, 2012. -304 s
3. Prokhorov, Iu.V. Teoriia veroiatnostei / Iu.V. Prokhorov, Iu.A. Rozanov M // Nauka, 1973, -496 s.
4. Khusu, A.P. Sherokhovatost' poverkhnostei / A.P. Khusu, Iu.R. Vitenberg i dr. // M: Nauka, 1975, -344 s.
5. Gikhman, I.I. Vvedenie v teoriuu sluchainykh protsessov / I.I. Gikhman, A.V. Skorokhod M // Nauka, 1977, -586 s.
6. Novoselov, Iu.K. Analiticheskaia otsenka parametrov sherokhovatosti shlifovannykh poverkhnostei / Iu.K. Novoselov, V.B. Bogutskii, S.M. Bratan // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: mezhhdunar. nauch.-tekhn. sb. - Khar'kov: NTU «KhPI», 2013. - Vyp. 83. - s.208-222.

-
7. J. Borkowski, P. Borkowski, The influence of elementary effects on grinding wheel wear, Archives of civil and mechanical engineering, Vol.II, No. 1–2, 2002, pp. 21–34.
 8. N. de Souza, R. E. Catai, P. R. de Aguiar, M. H. Salgado, E. C. Bianchi, Analysis of Diametrical Wear of Grinding Wheel and Roundness Errors in the Ma-chining of Steel VC 131, Journal of the Brazilian Soci-ety of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXVI, No. 2, AprilJune 2004, pp. 209–212
 9. Novoselov, Y. Calculation of surface rough-ness parameters for external cylindrical grinding / Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky, Y. Gutsalenko // Fiabilitate si Durabilitate - fiability & Durability Editura «Academica Brancusi», Targu Jiu, Supplement no 1, 2013.- C. 5–15.
 10. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process/ International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 2003, pp. 1579–1593
 11. Zhen Bing Hou, Ranga Komanduri, On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process/ International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 2003, pp. 1579–1593
 12. Brian W. Rowe, Xun Chen, Modeling surface roughness improvement in grinding, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 213 (1), 1999, pp. 93–96.
 13. Sanchit Kumar Kharea, Sanjay Agarwal, Pre-dictive Modeling of Surface Roughness in Grinding, Procedia CIRP Vol. 31, 2015, pp. 375–380.
 14. Warren R. DeVries, Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag New York, Inc. 1992, – 269p
 15. Hassan Abdel-Gawad El-Hofy, Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes, Publisher: CRC Press, 2006, – 562p.
-

УДК 621.91.02

РЕНОВАЦИЯ МНОГОГРАННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН СБОРНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Е.В. Васильев¹, А.Ю. Попов¹, М.В. Васильева¹, П.В. Назаров¹¹ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация

Аннотация

Разрабатывается технология алмазного шлифования режущей части многогранных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Осуществлен анализ износа режущей кромки при вершине многогранных твердосплавных пластин. Анализируются формы передней поверхности переточенных многогранных твердосплавных пластин с точки зрения технологичности, стойкости и условий стружколомания и стружкоотвода. Рассматриваются схемы формообразования задней поверхности переточенных многогранных твердосплавных пластин. Получены положительные результаты по повышению периода стойкости переточенного инструмента с притуплением лезвия отрицательной фаской от 0,01 до 0,1 мм. Проведены промышленные испытания восстановленного инструмента, которые показали идентичную стойкость относительно нового инструмента.

Ключевые слова: твердосплавная пластина, режущая кромка, лезвие, формообразование, период стойкости, износ, перетачивание, реновация, точность, базирование.

RENOVATION OF MULTI-FACETED CARBIDE INSERTS FOR MODULAR CUTTING TOOLS

E.V. Vasilyev¹, A.U. Popov¹, M.V. Vasilyeva¹, P.V. Nazarov¹¹Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Abstract

Developed technology diamond grinding cutting part of the multi-faceted carbide inserts for modular cutting tools. The analysis of the wear of the cutting edge at the vertex of the polyhedral solid dopravnich plates. Examines forms the front surface of the re-drilled faceted carbide insert in terms of manufacturability, durability and conditions struzhkolomy and stregghetta. Consider structures forming the rear surface of the re-drilled multi-faceted carbide plates. Positive results were obtained on increasing the lifespan of a resharpened tool with a blunt blade negative chamfer from 0.01 to 0...1 mm. carried out industrial tests of the restored instrument, which showed identical resistance relatively new tool.

Keywords: Carbide insert, cutting edge, blade, shaping, life, wear, perekachivanie, renovation, accuracy, basing.

Введение

Перетачивание многогранных твердосплавных пластин (МП) – это сложная научно – техническая задача, решение которой, возможно, в большинстве случаев, на основе комплексного исследования влияния геометрии режущей части инструмента на стойкость и другие эксплуатационные свойства, обоснованного и эффективного использования способов повышения стойкости и обеспечения минимальных затрат при перетачивании и дальнейшей подготовки МП к эксплуатации.

Перетачивание МП всегда связано с уменьшением размеров и изменением их геометрии. Уменьшение размеров по высоте приводит к снижению надежности МП, то есть повышению вероятности поломки, что не допустимо в массовом производстве. Уменьшение размеров МП по диаметру вписанной окружности и высоте может привести к снижению надежности крепления и необходимости дорабатывать корпуса инструментов, в которых производится их закрепление переточенных твердосплавных пластин.

Анализ износа многогранных твердосплавных пластин показал, что наибольший износ практически всегда происходит по

вершине. Характеризовать износ целесообразно по величинам износа передней и задней граней. Причем, эти величины взаимосвязаны, так, что в качестве критерия можно взять отношение величины износа по задней поверхности к величине износа по передней поверхности. Это соотношение зависит от величины заднего угла инструмента и диаметра обрабатываемой детали [1].

$$K = a / h \quad (1)$$

где a – величина износа по передней грани, h – величина износа по задней грани.

Результаты и обсуждение

В данной работе рассматриваются два вида износа – это выкрашивание по задней поверхности и выкрашивание режущей кромки (рис. 1). Перед восстановлением, изношенные сменные твердосплавные пластины, подвергаются дефектовке, с целью определения возможности реновации, т.к при перетачивании снимается изношенный слой либо с передней либо с задней поверхностей твердосплавной пластины, который не должен влиять на базирование пластины в гнезде резца. В зависимости от величины износа определяется величина снимаемого припуска [2] и схема шлифования.

Затачивание МП по передней поверхности не меняет размеры их контура, в данном случае происходит изменение только высоты вершины, условий стружкоотвода и стружколомания. При обработке прерывистой поверхности либо фрезеровании отсутствие стружколомающих элементов на передней поверхности МП не оказывает значительного влияния на процесс обработки.



а)



б)

Рис. 1. Изношенная твердосплавная пластина VNGM160408-MF1, CP500: а) с выкрашиванием по задней поверхности; б) с выкрашиванием режущей кромки

Перетачивание твердосплавной пластины VNGM160408-MF1, CP500 возможно по различным схемам шлифования с разнообразной геометрией. Наиболее эффективная схема шлифования передней поверхности с точки зрения производительности и точности шлифования является схема представленная на рис. 2 реализуемой по патентам [3 - 5].

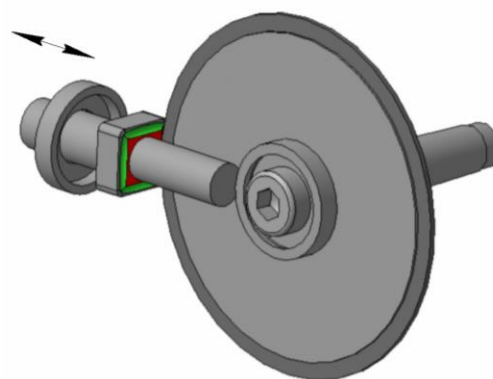


Рис. 2. Схема шлифования передней поверхности МП

На рис. 3 - 5 представлены переточенные твердосплавные пластины различной конфигурации, в которых изменялись передние углы, величина шлифованной части.



Рис. 3. Затачивание передней поверхности твердосплавной пластины с сохранением переднего угла

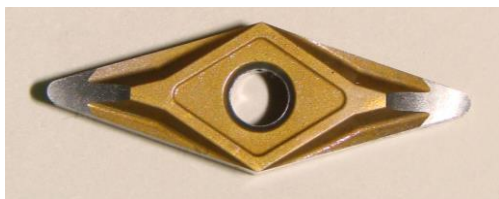


Рис. 4. Затачивание передней поверхности твердосплавной пластины с образованием нулевого переднего угла

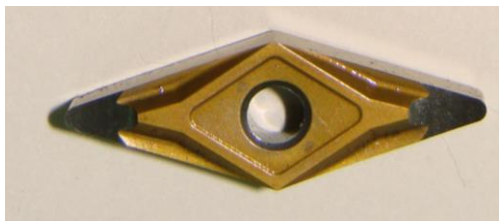


Рис. 5. Затачивание передней поверхности твердосплавной пластины с сохранением переднего угла и образованием отрицательной фаски

Предложенный способ затачивания передней поверхности МП достаточно технологичен. Геометрия, предложенная на рис.3 предпочтительнее для чистового точения, на рис.4 для обработки прерывистых поверхностей. Испытание МП с притуплением лезвия отрицательной фаской 0,01-0,1мм показали повышение периода стойкости на 20% от МП без притупления лезвия.

Перетачивание МП по задней поверхности изменяет конфигурацию и размеры ее контура. Изменение геометрии, т.е. углов в плане, изменяет условия резания. Изменение радиуса при вершине изменяет радиус на галтелях детали и в случае круговой интерполяции дает погрешность размеров детали. Изменение размеров контура твердосплавной пластины приводит к изменению условий её закрепления в корпусе инструмента. Формы переточенных твердосплавных пластин могут быть разнообразными за счет различных комбинаций и конфигураций передней и задней поверхностей. В работе [1] рассмотрены наиболее технологичные при переточке и эффективные в эксплуатации формы передней и задней поверхностей. Для сохранения радиуса при вершине МП необходимо использовать схему затачивания дополнительных углов в плане ϕ и ϕ_1 с сохранением исходного радиуса $r = r_1$ [1] (рис.6).

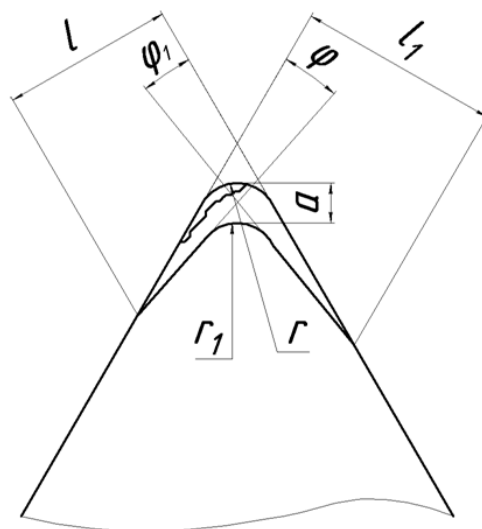


Рис. 6. Затачивание дополнительных углов в плане ϕ и ϕ_1 с сохранением исходного радиуса $r = r_1$.

Шлифование задней поверхности с формообразованием вершины МП возможно двумя способами: методом копирования и методом обката. Метод копирования (рис. 7) позволяет осуществлять процесс шлифования с высокой производительностью.

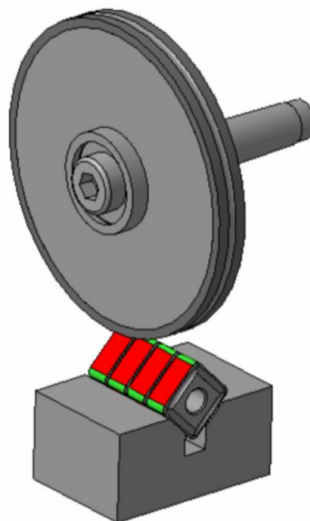


Рис. 7. Схема шлифования вершины МП методом копирования

Точность размеров зависит от точности изготовления профиля в рабочем слое алмазного круга. К недостаткам данного способа можно отнести непостоянство размеров, зависящих от интенсивности износа алмазного слоя и необходимостью его частой правки.

Метод обката возможно осуществить двумя способами.

Один из способов осуществляется на шлифовально-заточном станке с ЧПУ в специальном приспособлении [5] (рис.8).

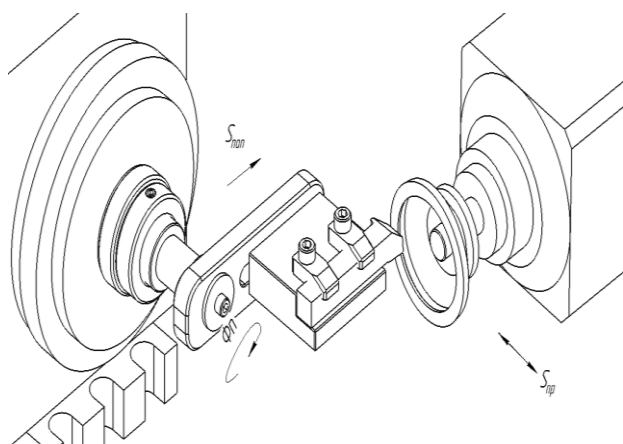


Рис. 8. Схема шлифования вершины МП методом обката в специальном приспособлении для наружного шлифования с базированием по боковым опорным поверхностям

Приспособление для наружного шлифования состоит из оправки, на которой зафиксирована кулиса с подвижным блоком, и расположенной на нем резцовой державкой, на которой закреплена обрабатываемая МП.

Основные движения формообразования являются: синхронное вращательное и поступательное движение оправки с кулисой, подвижным блоком и вращательное движение шлифовального круга. Для обеспечения равномерного износа рабочей поверхности шлифовального круга ему задается возвратно-поступательное движение.

Следующий способ (рис.9) отличается от предыдущего креплением МП.

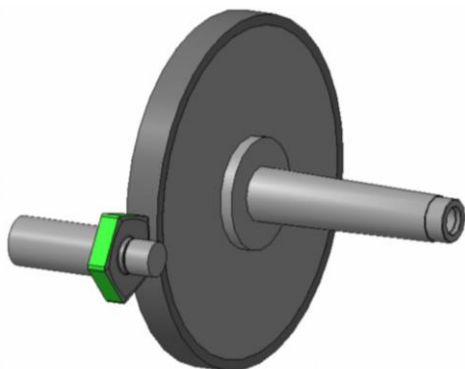


Рис. 9. Схема шлифования вершины МП методом обката в специальном приспособлении для наружного шлифования с базированием по центральному отверстию

Если в предыдущем способе МП закрепляется в резцедержателе, при этом базовыми поверхностями являются боковые опорные поверхности, то при данном способе базовым является центральное отверстие.

Испытания, приведенных выше схем шлифования задней поверхности с формообразованием вершины МП показал, что наиболее эффективный, с точки зрения производительности и точности обработки, является схема шлифования вершины МП (рис.10) методом обката в специальном приспособлении для наружного шлифования с базированием по центральному отверстию.



Рис. 10 Затачивание задней поверхности твердосплавной пластины с сохранением элементов ее передней поверхности и образованием отрицательной фаски

Выводы

Производственные испытания переточенных МП показали, что в случае необходимости сохранения стружколомательных элементов на передней поверхности, наиболее эффективный вариант перетачивания данного типа твердосплавных пластин по задней поверхности.

Стойкость данных переточенных МП на черновой операции точения наружного диаметра диска из жаропрочного сплава составляет: для переточенных по задней поверхности 100% и переточенных по передней поверхности с сохранением переднего угла 90% от стойкости исходных в состоянии поставки.

Себестоимость восстановления режущей части МП не превышает 20% от стоимости новых, что значительно сократит расходы на инструментальное обеспечение предприятия.

Список литературы

1. Васильев Е.В. Определение рациональной геометрии режущей части переточенных твердосплавных пластин, предназначенных для чернового точения / Васильев Е.В., Попов А.Ю. // СТИН. –2014. – №2. С. 16-21.
2. Васильев Е.В. Реновация твердосплавных концевых фрез на шлифовально-заточных станках с ЧПУ / Васильев Е.В., Попов А.Ю. // СТИН. – 2013.
3. Васильев Е.В. Алмазное шлифование твердосплавных пластин / Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. // СТИН. –2012. – №5. С. 7-10.
4. Васильев Е.В., Балмасова. Е.А. Способ шлифования плоских поверхностей // Пат. 2359804 РФ, МПК В24В 7/00. - № 2007119523/02; Заявлено 25.05.07; Оpubл. 27.06.09. Бюл. № 18.
5. Васильев Е.В., Попов А.Ю. Шлифовальный станок // Пат. 50903 РФ, МПК В24В27/04. - № 2005127172/22; Заявлено 29.08.05; Оpubл. 27.01.06. Бюл. № 24.
6. Васильев Е.В., Попов А.Ю. Приспособление для наружного шлифования // Пат. 62553 РФ, МПК В24В 27/04. - № 2006130631/22; Заявлено 24.08.06; Оpubл. 27.04.07. Бюл. № 12.
7. Васильев Е.В., Попов А.Ю. Приспособление для наружного шлифования // Пат. 148856 РФ, МПК В24В 27/00. - № 2014124473/02; Заявлено 16.06.2014; Оpubл. 20.12.2014. Бюл. № 35.
8. Васильев Е.В. Повышение производительности алмазного шлифования твердосплавных изделий и ресурса кругов выбором оптимальных схем и режимов шлифования и характеристики круга: автореф. дис. канд. техн. Наук. – Омск, 2005 – 20 с.
9. Янюшкин А.С. Перспективный метод обработки твердого сплава на плоскошлифовальном станке / А.С. Янюшкин, и др. // Системы. Методы. Технологии. – Братск, 2009. – С. 71-74.
10. Янюшкин А.С. Контактные процессы на поверхности шлифовальных кругов при затачивании режущих инструментов / А.С. Янюшкин // Труды братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – Братск, 2004. – С. 99-115.
11. Лобанов Д.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, П.В. Ахипов // Вектор Тольяттинского государственного университета. – Тольятти, 2015. – С. 85-91.
12. Янюшкин А.С. Проблемы затачивания инструментов, оснащенных материалами пониженной прочности и повышенной твердости / А.С. Янюшкин, М.А. Мельников, С.В. Ковалевский // Механика XXI Веку. – Братск, 2009. – С. 109-111.
13. Гречишников В.А. Анализ разрушения и износа смп из твердых сплавов при нарезании резьбы / В.А. Гречишников, Е.В. Фомин // СТИН. –2005. – №2. С. 3-5.
14. Палей М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. - М.: Машиностроение, 1988. – 288с.
15. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. Для техн. Вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448с.
16. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей / А.С. Янюшкин и др. // Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

References

1. Vasil'ev E.V. Opredelenie ratsional'noi geometrii rezhushchei chasti peretochennykh tverdosplavnykh plastin, prednaznachennykh dlia chernovogo tocheniia / Vasil'ev E.V., Popov A.Iu. // STIN. – 2014. – №2. S. 16-21.
2. Vasil'ev E.V. Renovatsiia tverdosplavnykh kontsevykh frez na shlifoval'no-zatochnykh stankakh s ChPU / Vasil'ev E.V., Popov A.Iu. // STIN. –2013.
3. Vasil'ev E.V. Almaznoe shlifovanie tverdosplavnykh plastin / Vasil'ev E.V., Popov A.Iu., Rechenko D.S. // STIN. –2012. – №5. S. 7-10.
4. Vasil'ev E.V., Balmasova. E.A. Sposob shlifovaniia ploskikh poverkhnostei // Pat. 2359804 RF, MPK B24V 7/00. - № 2007119523/02; Zaiavleno 25.05.07; Opubl. 27.06.09. Biul. № 18.
5. Vasil'ev E.V., Popov A.Iu. Shlifoval'nyi stanok // Pat. 50903 RF, MPK B24V27/04. - № 2005127172/22; Zaiavleno 29.08.05; Opubl. 27.01.06. Biul. № 24.
6. Vasil'ev E.V., Popov A.Iu. Prispособlenie dlia naruzhnogo shlifovaniia // Pat. 62553 RF, MPK B24V 27/04. - № 2006130631/22; Zaiavleno 24.08.06; Opubl. 27.04.07. Biul. № 12.
7. Vasil'ev E.V., Popov A.Iu. Prispособlenie dlia naruzhnogo shlifovaniia // Pat. 148856 RF, MPK B24V 27/00. - № 2014124473/02; Zaiavleno 16.06.2014; Opubl. 20.12.2014. Biul. № 35.
8. Vasil'ev E.V. Povyshenie proizvoditel'nosti almaznogo shlifovaniia tverdosplavnykh izdelii i resursa krugov vyborom optimal'nykh skhem i rezhimov shlifovaniia i kharakteristiki kruga: avtoref. dis. kand. tekhn. Nauk. – Omsk, 2005 – 20 s.
9. Ianiushkin A.S. Perspektivnyi metod obrabotki tverdogo splava na ploskoshlifoval'nom stanke / A.S. Ianiushkin, i dr. // Sistemy. Metody. Tekhnologii. – Bratsk, 2009. – S. 71-74.
10. Ianiushkin A.S. Kontaktnye protsessy na poverkhnosti shlifoval'nykh krugov pri zatachivanii rezhushchikh instrumentov / A.S. Ianiushkin // Trudy bratskogo gosudarstvennogo universiteta.

-
- Seriia: Estestvennye i inzhenernye nauki. – Bratsk, 2004. – S. 99-115.
11. Lobanov D.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie tverdospлавnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii / D.V. Lobanov, A.S. Ianiushkin, P.V. Akhipov // Vektor Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta. – Tol'iatti, 2015. – S. 85-91.
12. Ianiushkin A.S. Problemy zatachivaniia instrumentov, osnashchennykh materialami ponizhennoi prochnosti i povyshennoi tverdosti / A.S. Ianiushkin, M.A. Mel'nikov, S.V. Kovalevskii // Mekhaniki KhKhI Veku. – Bratsk, 2009. – S. 109-111.
13. Grechishnikov V.A. Analiz razrusheniia i iznosa smp iz tverdyykh splavov pri narezanii rez'by / V.A. Grechishnikov, E.V. Fomin // STIN. –2005. – №2. S. 3-5.
14. Palei M.M. Tekhnologiiia shlifovaniia i zatochki rezhushchego instrumenta / M.M. Palei, L.G. Dibner, M.D. Flid. - M.: Mashinostroenie, 1988. – 288s.
15. Vasin S.A. Rezanie materialov: Termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosviazei pri rezanii: Ucheb. Dlia tekhn. Vuzov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. – 448s.
16. Ianiushkin A.S. Kombinirovannaia elektroalmaznaia obrabotka instrumental'nykh stalei / A.S. Ianiushkin i dr. // Bratsk: GOU VPO «BrGU», 2009. – 228 s.
-

УДК 621.941

АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ ПРИ ФАСОННОМ ТОЧЕНИИ

А.А. Вожжов¹, М.А. Худаймуратов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В данной работе в общем случае рассмотрен алгоритм расчета амплитуд колебаний от различных источников возбуждения приведенные к вершине резца, предлагается гипотеза о физической природе первопричины возникновения и механизма поддержания автоколебаний при скольжении, качении и резании. Модель обрабатываемого или контактирующего материала представляет собой дискретную среду, состоящую из отдельных взаимодействующих между собой атомов. Применяя полученные зависимости во всем диапазоне переменных условий обработки, можно управлять уровнем колебаний путем изменения, режимов резания и геометрии инструмента. Кроме того, зная расчетное значение амплитуды колебаний, можно прогнозировать шероховатость обработанной поверхности, а также погрешности формы деталей.

Ключевые слова: фасонное точение, устойчивость процесса, вынужденные колебания, автоколебания, анализ.

ANALYSIS OF RELATIVE FORCED VIBRATIONS TOOL AND DETAILS STRUCTURAL SHAPES WHEN TURNING

A.A. Vozhzhov¹, M.A. Khudaimuratov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

In this study, generally considered algorithms calculations oscillation amplitudes from different excitation sources listed to the top of the tool, it offered a hypothesis about the physical nature of the root causes and maintaining self-oscillation mechanism when sliding, rolling and cutting. Model processed and contacting material is a discrete environment, consisting of the individual interacting atoms. Applying obtained depending in the whole range of variables processing conditions can be controlled by changing the level of vibrations, cutting conditions and tool geometry. Furthermore, knowing the value of the calculated amplitude of the oscillations can be predicted surface finish and form accuracy of parts.

Keywords: turning mold, process stability, forced vibrations, self-oscillation analysis.

Введение

Процесс резания металлов при любых условиях обработки сопровождается наличием колебаний. Влиянию колебаний системы на технологические характеристики процесса обработки посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [2, 5, 7, 13, 15].

Анализ колебаний системы СИД, устойчивости процесса резания при точении с наложением колебаний, с использованием различных моделей представлен в работах [3, 8, 12, 14].

Чаще всего наблюдаются два вида колебаний: вынужденные и автоколебания.

Возбудителя вынужденных колебаний можно определить путем последовательного отключения отдельных элементов привода или путем изменения чисел оборотов рассматриваемых элементов. Вынужденные колебания резонансного типа при изменении скорости вращения исчезают или значительно уменьшаются.

Признаком автоколебаний при резании является почти постоянная частота колебаний при изменении скорости и несовпадение наблюдаемой частоты ни с одной из частот внешних источников вынужденных колебаний. Колеблющийся при автоколебаниях

элемент системы является самоисточником собственных колебаний.

Результаты и обсуждение

Целью данной работы является: на основе динамической модели процесса, создание алгоритма определения зависимости амплитуд относительных вынужденных колебаний инструмента и детали от жесткости, определение влияния параметров колебаний на точность и качество на операции фасонного точения канавок коллектора.

Всякое изменение относительного положения инструмента и детали вызывает изменение усилий, действующих на режущую часть инструмента. Зная силы и характеристики упругой системы можно составить уравнения движения и рассчитать перемещения инструмента.

1. Вынужденные относительные колебания инструмента и детали

В общем случае результирующая амплитуда относительных колебаний, приведенная к вершине резца будет составлять [2]:

$$\bar{A}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^K K_i^A \cdot \bar{A}_i.$$

Результирующие максимальные скорость, ускорение и возбуждающая вынужденные колебания сила, также приведенные к вершине резца определяются аналогично:

$$\bar{V}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^K K_i^V \cdot \bar{V}_i;$$

$$\bar{a}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^K K_i^a \cdot \bar{a}_i;$$

$$\bar{P}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^K K_i^P \cdot \bar{P}_i,$$

где K_i^A , K_i^V , K_i^a , K_i^P – коэффициенты передачи амплитуды, скорости, ускорения и возбуждающей силы i -го источника возбуждения.

В случае постоянства частоты колебаний источника возбуждения указанные коэффициенты передачи принимаются равными для каждого i -го источника

$$K_i^A = K_i^V = K_i^a = K_i^P = K_i.$$

Коэффициент передачи находится как правило экспериментальным путем.

Максимальные амплитуда, скорость, ускорение и возбуждающая сила при вынужденных гармонических колебаниях связаны между собой следующими соотношениями

$$V = f \cdot A;$$

$$a = f^2 \cdot A;$$

$$P = m \cdot f^2 \cdot A,$$

где m и f – соответственно масса и собственная частота колеблющегося элемента системы.

К внешним источникам колебаний при фасонном точении относятся следующие: неравномерность глубины резания, твердости и податливости, дисбаланс вращающихся деталей, погрешности пар качения и скольжения, неравномерность натяжения ремней привода, пульсации противодействующего усилия в случае использования устройств динамической компенсации и вихри магнитного поля электродвигателей.

Ниже рассмотрены расчеты амплитуды колебаний от различных источников их возбуждения.

В случае неравномерности глубины резания и твердости амплитуда колебаний определяется по формуле

$$A(\Delta t, \Delta HB) = \frac{D_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} \right) - \frac{\Delta P_z \cdot W_{u32}}{\sin \alpha},$$

где D_0 – диаметр обрабатываемой поверхности; ΔP_z – приращение касательной составляющей усилия резания под действием переменной глубины резания или твердости; W_{u32} – изгибная податливость детали.

$$\alpha = \arctg \left(\frac{D_0 \cdot \sin \varphi + 2 \cdot \Delta P_z \cdot W_{u32}}{D_0 \cdot \cos \varphi + 2 \cdot \Delta P_z \cdot W_{u32}} \right),$$

где ΔP_z – приращение радиальной составляющей усилия резания под действием переменной глубины резания или твердости.

$$\varphi = \frac{\Delta P_z \cdot D_0 \cdot W_{кр}}{2},$$

где $W_{кр}$ – крутильная податливость системы "шпиндель – заготовка".

Коэффициент передачи для рассмотренного случая:

$$K(\Delta t, \Delta HB) = 1.$$

В случае неравномерной податливости детали амплитуда колебаний будет

$$A(\Delta W) = 2\pi \cdot \Delta W \cdot P_y.$$

Коэффициент передачи, как и в предыдущем случае, $K_{\Delta W} = 1$.

Как известно, мерой неуравновешенности вращающихся частей служит произведение

$$\Delta = m_r \cdot r_r,$$

где m_r и r_r – соответственно масса и радиус установки уравнивающего груза.

Для сравнительной оценки вращающихся деталей различной массы введем понятие удельной неуровненности

$$q = \frac{\Delta}{m_g} = \frac{m_r \cdot r_r}{m_g},$$

где m_g – масса вращающегося элемента.

Дифференциальное уравнение, описывающее собственные (колебания шпиндельного узла (или вала двигателя) в радиальном направлении имеет вид

$$m_{ун} \cdot \frac{d^2 x}{d\tau^2} + C \cdot x = 0,$$

где $m_{ун}$ – масса шпиндельного узла; C – жесткость шпиндельного узла.

Собственная круговая частота системы

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m_{ун}}}.$$

Угловая частота

$$\omega = 2\pi \cdot n.$$

где n – частота вращения шпинделя.

Отсюда центробежная сила

$$F = m_g \cdot q \cdot \omega^2.$$

Дифференциальное уравнение движения, описывающее вынужденные колебания шпиндельного узла (двигателя) под действием дисбаланса

$$m_{ун} \cdot \frac{d^2 x}{d\tau^2} + C \cdot x = m_g \cdot q \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot \tau).$$

Отсюда амплитуда колебаний в результате дисбаланса вращающегося элемента составит

$$A_{duc} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)} \cdot \frac{m_g}{m_{ун}} \cdot q.$$

Основные гармоники спектра вибраций, вызванные огранкой тел качения и волнистостью дорожек качения подшипников, определяются по формулам:

$$f_1 = \frac{D_y}{D_{ун}} \cdot \left(1 - \frac{D_{ун}^2}{D_y^2}\right) \cdot Z \cdot n \cdot K_1;$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 \pm \frac{D_{ун}^2}{D_y^2}\right) \cdot n \cdot K_2,$$

где n – частота вращения шпинделя; $D_{ун}$ – диаметр тел качения; D_y – диаметр расположения центров тел качения; Z – число тел качения; K_1 – число граней на теле качения; K_2 – число волн по окружности дорожки качения внутренней (+) или наружной (–) обоймы.

Амплитуду колебаний от погрешностей пар качения и колец подшипника можно определить по формуле

$$A_n = K_{\Delta} \cdot \sqrt{\Delta_{кн}^2 + \Delta_{кв}^2 + \Delta_{ун}^2},$$

где $\Delta_{кн}$, $\Delta_{кв}$, $\Delta_{ун}$ – соответственно отклонения от круглости наружного и внутреннего кольца и шариков подшипника.

Коэффициент динамического усиления вибрации

$$K_{\Delta} = \frac{1}{1 + \frac{m_g}{m_{ун}} - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2},$$

где f – частота вибрации.

Собственная частота вала

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\sum W \cdot m_g}},$$

где $\sum W$ – суммарная податливость вала и подшипников.

Крутильные колебания от неравномерности натяжения ремней привода можно определить по формуле [9]

$$\varphi = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{R_1 \cdot T \cdot (e^{\mu \cdot \varphi_1} - 1)}{M_{кр}} \right),$$

где μ – коэффициент трения ремня со шкивом; T – исходное натяжение нити ремня; $M_{кр}$ – крутящий момент на ведущем шкиве; R_1 – радиус ведущего шкива.

$$\varphi_1 \approx \pi - \frac{2\pi \cdot (R_2 - R_1)}{3L}, \quad (1)$$

где R_2 – радиус ведомого шкива; L – расстояние между осями шкивов.

В соответствии с работой [3] частота колебаний от воздействия пульсаций противодействующего усилия в случае использования устройств динамической компенсации соответствует параметрам прикладываемых импульсов со стороны задающего устройства, различают форму колебаний, амплитуду, частоту прямого и обратного действия.

Величина амплитуды колебаний электродвигателя от воздействия вихрей магнитного поля определяется согласно работе [11] по формуле

$$A = R \cdot \frac{25 \cdot m_p \cdot f_M^2}{(25 \cdot C - m_{ст} \cdot f_M^2) \cdot (25 \cdot C - m_p \cdot f_M^2) - 625 \cdot C},$$

где R – результирующая силовая волна, определяемая специальными электротехническими расчетами; f_M – частота магнитных возмущений; m_p – масса ротора электродвигателя; $m_{ст}$ – масса статора электродвигателя; C – жесткость ротора.

Все приведенные выше расчеты амплитуд вынужденных колебаний корректны и верны при колебаниях одномассовых систем. В случае фасонного точения деталей пониженной жесткости как правило нежест-

ким бывает и расточной инструмент, что приводит к относительным колебаниям в двухмассовой системе, т.е. к относительным колебаниям инструмента и детали. Для решения этой задачи была разработана расчетная динамическая модель, (рис. 1).

В соответствии с расчетной динамической моделью запишем систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_d \cdot \ddot{y}_d + H_d \cdot \dot{y}_d + C_d \cdot y_d + \\ + C_0 \cdot (y_d + y_n) = P \cdot \sin(f_d \cdot \tau) \\ m_n \cdot \ddot{y}_n + H_n \cdot \dot{y}_n + C_n \cdot y_n + \\ + C_0 \cdot (y_d + y_n) = P \cdot \sin(f_n \cdot \tau) \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы (2) ищем в виде

$$\begin{cases} y_d = A_d \cdot \left(\frac{\sin(f_d \cdot \tau) +}{+ e^{-K_d \cdot \tau} \cdot \cos(f_d \cdot \tau)} \right) \\ y_n = A_n \cdot \left(\frac{\sin(f_n \cdot \tau) +}{+ e^{-K_n \cdot \tau} \cdot \cos(f_n \cdot \tau)} \right) \end{cases} \quad (3)$$

В соответствии с принципом суперпозиции решение (3) представим в виде 2-х частных решений, эквивалентных решению (3):

$$\begin{cases} y_1 = A_1 \cdot \sin(f_1 \cdot \tau) + B_1 \cdot \cos(f_1 \cdot \tau) \\ y_2 = A_2 \cdot \sin(f_2 \cdot \tau) + B_2 \cdot \cos(f_2 \cdot \tau) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_{11} = A_{11} \cdot e^{-K_d \cdot \tau} \cdot \cos f_{11} \cdot \tau \\ y_{21} = A_{21} \cdot e^{-K_d \cdot \tau} \cdot \cos f_{21} \cdot \tau \end{cases} \quad (4)$$

Дважды дифференцируем y_1 и y_2 системы (4)

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = A_1 \cdot f_1 \cdot \cos(f_1 \cdot \tau) - \\ - B_1 \cdot f_1 \cdot \sin(f_1 \cdot \tau) \\ \ddot{y}_1 = -A_1 \cdot f_1^2 \cdot \sin(f_1 \cdot \tau) - \\ - B_1 \cdot f_1^2 \cdot \cos(f_1 \cdot \tau) \\ \dot{y}_2 = A_2 \cdot f_2 \cdot \cos(f_2 \cdot \tau) - \\ - B_2 \cdot f_2 \cdot \sin(f_2 \cdot \tau) \\ \ddot{y}_2 = -A_2 \cdot f_2^2 \cdot \sin(f_2 \cdot \tau) - \\ - B_2 \cdot f_2^2 \cdot \cos(f_2 \cdot \tau) \end{cases} \quad (5)$$

После подстановки решений (5) в уравнения (1) получим

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[A_1 \cdot (C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2) + \right. \\ & \left. + A_2 \cdot C_0 - B_1 \cdot H_1 \cdot f_1 - P \right] \cdot \sin(f_1 \cdot \tau) + \\ & \left[A_1 \cdot H_1 \cdot f_1 + \right. \\ & \left. + B_1 \cdot (C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2) + \right. \\ & \left. + B_2 \cdot C_0 \right] \cdot \cos(f_1 \cdot \tau) = 0 \\ & \left[A_1 \cdot C_0 + A_2 \cdot (C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2) - \right. \\ & \left. - B_2 \cdot H_2 \cdot f_2 - P \right] \cdot \sin(f_2 \cdot \tau) + \\ & \left[A_2 \cdot H_2 \cdot f_2 + B_1 \cdot C_0 + \right. \\ & \left. + B_2 \cdot (C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2) \right] \cdot \cos(f_2 \cdot \tau) = 0 \end{aligned} \right. .$$

Каждое из выражений, стоящих в квадратных скобках, должно быть равно нулю для тождественного удовлетворения обоих уравнений. Это дает четыре алгебраических уравнения для определения A_1 , A_2 , B_1 и B_2 :

$$\left\{ \begin{aligned} & A_1 \cdot (C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2) + \\ & + A_2 \cdot C_0 - B_1 \cdot H_1 \cdot f_1 = P \\ & A_1 \cdot H_1 \cdot f_1 + B_1 \cdot (C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2) + \\ & + B_2 \cdot C_0 = 0 \\ & A_1 \cdot C_0 + A_2 \cdot (C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2) - \\ & - B_2 \cdot H_2 \cdot f_2 = P \\ & A_2 \cdot H_2 \cdot f_2 + B_1 \cdot C_0 + \\ & + B_2 \cdot (C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2) = 0 \end{aligned} \right. .(6)$$

Динамическая модель двухмассовой системы к расчету вынужденных относительных колебаний инструмента и детали представлена на рис. 1.

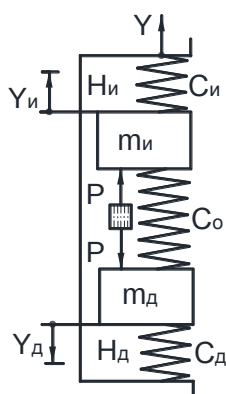


Рис. 1. Динамическая модель двухмассовой системы

Решение системы уравнений (6) имеет вид:

$$A_1 = \frac{\Delta_{A_1}}{D}; A_2 = \frac{\Delta_{A_2}}{D}; B_1 = \frac{\Delta_{B_1}}{D}; B_2 = \frac{\Delta_{B_2}}{D},$$

где D – определитель, составленный из коэффициентов системы (6).

$$D = \begin{bmatrix} C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & C_0 & -H_1 \cdot f_1 & 0 \\ H_1 \cdot f_1 & 0 & C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & C_0 \\ C_0 & C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & 0 & -H_2 \cdot f_2 \\ 0 & H_2 \cdot f_2 & C_0 & C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 \end{bmatrix} .(7)$$

где Δ_{A_1} , Δ_{A_2} , Δ_{B_1} , Δ_{B_2} – определители, которые получаются из (7) путем замены соответствующего столбца правыми частями системы (6). Совокупность значений A_1 , A_2 , B_1 и B_2 определяют форму вынужденных колебаний.

$$\Delta_{A_1} = \begin{bmatrix} P & C_0 & -H_1 \cdot f_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & C_0 \\ P & C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2 & 0 & -H_2 \cdot f_2 \\ 0 & H_2 \cdot f_2 & C_0 & C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_{A_2} = \begin{bmatrix} C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & P & -H_1 \cdot f_1 & 0 \\ H_1 \cdot f_1 & 0 & C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & C_0 \\ C_0 & P & 0 & -H_2 \cdot f_2 \\ 0 & 0 & C_0 & C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_{B_1} = \begin{bmatrix} C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & C_0 & -H_1 \cdot f_1 & P \\ H_1 \cdot f_1 & 0 & C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2 & 0 \\ C_0 & C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2 & 0 & P \\ 0 & H_2 \cdot f_2 & C_0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_{B_2} = \begin{bmatrix} C_1 + C_0 - & & & \\ -m_1 \cdot f_1^2 & C_0 & -H_1 \cdot f_1 & P \\ H_1 \cdot f_1 & 0 & C_1 + C_0 - & 0 \\ & & -m_1 \cdot f_1^2 & \\ C_0 & C_2 + C_0 - & 0 & P \\ & -m_2 \cdot f_2^2 & & \\ 0 & H_2 \cdot f_2 & C_0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вычисляем определители:

$$D = (D_{C_1}^2 - D_{H_1}^2) \cdot (D_{H_2}^2 - D_{C_2}^2),$$

где

$$D_{C_1} = C_1 + C_0 - m_1 \cdot f_1^2;$$

$$D_{C_2} = C_2 + C_0 - m_2 \cdot f_2^2;$$

$$D_{H_1} = H_1 \cdot f_1;$$

$$D_{H_2} = H_2 \cdot f_2,$$

откуда

$$D = \left(C_0^2 - H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \right) \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - C_0^2 \right).$$

Аналогично находим:

$$\Delta_{A_1} = P \cdot C_0 \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - H_1 \cdot \right. \\ \left. \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m_1 \cdot m_2}} \right);$$

$$\Delta_{A_2} = P \cdot C_0 \cdot \left(H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} - H_1 \cdot \right. \\ \left. \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m_1 \cdot m_2}} \right);$$

$$\Delta_{B_1} = -P \cdot H_1 \cdot H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{m_1}};$$

$$\Delta_{B_2} = P \cdot H_2 \cdot H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \cdot \sqrt{\frac{C_2}{m_2}}.$$

Определяем коэффициенты дифференциальных уравнений

$$A_1 = \frac{\Delta_{A_1}}{D} = \frac{P \cdot C_0 \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - H_1 \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m_1 \cdot m_2}} \right)}{\left(C_0^2 - H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \right) \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - C_0^2 \right)};$$

$$A_2 = \frac{\Delta_{A_2}}{D} = \frac{P \cdot C_0 \cdot \left(H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} - H_1 \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m_1 \cdot m_2}} \right)}{\left(C_0^2 - H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \right) \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - C_0^2 \right)};$$

$$B_1 = \frac{\Delta_{B_1}}{D} = - \frac{P \cdot H_1 \cdot H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{m_1}}}{\left(C_0^2 - H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \right) \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - C_0^2 \right)};$$

$$B_2 = \frac{\Delta_{B_2}}{D} = \frac{P \cdot H_2 \cdot H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \cdot \sqrt{\frac{C_2}{m_2}}}{\left(C_0^2 - H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \right) \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - C_0^2 \right)}.$$

Определяем амплитуды колебаний:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \\ = \frac{P \cdot C_0}{\left(C_0^2 - H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} \right) \cdot \left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - C_0^2 \right)} \times \\ \times \sqrt{\left(H_2^2 \cdot \frac{C_2}{m_2} - H_1 \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m_1 \cdot m_2}} \right)^2 + \\ + \left(H_1^2 \cdot \frac{C_1}{m_1} - H_1 \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{m_1 \cdot m_2}} \right)^2}$$

Максимальная амплитуда относительных вынужденных колебаний

$$A_{max} = A + B.$$

В этих уравнениях $m_1 = m_d$; $m_2 = m_H$; $C_1 = C_d$; $C_2 = C_H$; $H_1 = H_d$; $H_2 = H_H$.

Для определения коэффициента связи Co воспользуемся частным решением (4).

Из этих уравнений вытекают следующие известные соотношения:

$$K_D = \frac{H_D}{2m_D};$$

$$K_H = \frac{H_H}{2m_H};$$

$$H_D^2 = \frac{4\lambda_D^2 \cdot C_D \cdot m_D}{4\pi^2 - \lambda_D^2};$$

$$H_H^2 = \frac{4\lambda_H^2 \cdot C_H \cdot m_H}{4\pi^2 - \lambda_H^2}.$$

где λ_D , λ_H – соответственно декременты затухания детали и инструмента в отдельности; λ_{DH} – декремент затухания детали в системе с инструментом; λ_{HD} – декремент затухания инструмента в системе с деталью.

Все декременты находятся экспериментальным путем. Тогда

$$C_0 = \frac{C_{0D} + C_{0H}}{2};$$

$$\begin{cases} C_{0D} = \frac{C_D \cdot \lambda_D^2 \cdot (4\pi^2 + \lambda_{DH}^2)}{2 \cdot \lambda_{DH}^2 \cdot (4\pi^2 - \lambda_D^2)} - \frac{C_D}{2}; \\ C_{0H} = \frac{C_H \cdot \lambda_H^2 \cdot (4\pi^2 + \lambda_{HD}^2)}{2 \cdot \lambda_{HD}^2 \cdot (4\pi^2 - \lambda_H^2)} - \frac{C_H}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

Окончательно коэффициент связи

$$C_0 = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{C_D \cdot \lambda_D^2 \cdot (4\pi^2 + \lambda_{DH}^2)}{\lambda_{DH}^2 \cdot (4\pi^2 - \lambda_D^2)} + \frac{C_H \cdot \lambda_H^2 \cdot (4\pi^2 + \lambda_{HD}^2)}{\lambda_{HD}^2 \cdot (4\pi^2 - \lambda_H^2)} - (C_D + C_H) \right).$$

Из работы [6] известно, что характеристическое или частотное уравнение системы (8) имеет вид

$$\Delta f = \begin{vmatrix} C_D + C_0 - m_D \cdot f^2 & -C_0 \\ -C_D & C_H + C_0 - m_H \cdot f^2 \end{vmatrix} = 0,$$

где f – частота относительных колебаний системы.

Раскрыв определитель и поделив его на множитель $m_D \cdot m_H$, получим

$$f^4 - \left(\frac{C_D + C_0}{m_D} + \frac{C_H + C_0}{m_H} \right) \cdot f^2 + \frac{C_D \cdot C_H + C_D \cdot C_0 + C_H \cdot C_0}{m_D \cdot m_H} = 0.$$

Решая это квадратное уравнение относительно f^2 после преобразований получим

$$f^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{C_D + C_0}{m_D} + \frac{C_H + C_0}{m_H} \right) + \sqrt{\left(\frac{C_D + C_0}{m_D} - \frac{C_H + C_0}{m_H} \right)^2 + \frac{4C_D \cdot C_H}{m_D \cdot m_H}} = 0.$$

Из полученных формул видно, что частота относительных колебаний инструмента и детали представляет собой сложную зависимость. С увеличением жесткости частота колебаний растет, а с увеличением массы – уменьшается. Амплитуда относительных колебаний как с увеличением жесткости, так и с увеличением массы уменьшается.

2. Относительные автоколебания инструмента и детали

В данной работе предлагается гипотеза о физической природе первопричины возникновения и механизма поддержания автоколебаний при скольжении, качении и резании.

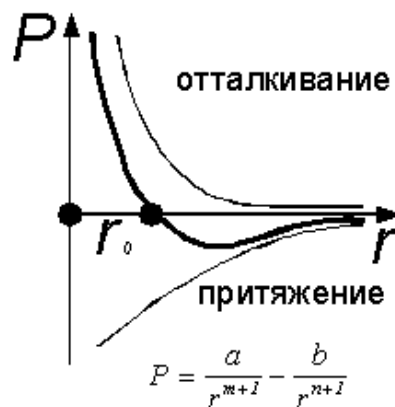


Рис. 2. Силовое взаимодействие между атомами металла при их удалении и сближении

Модель обрабатываемого или контактирующего материала представляет собой дискретную среду, состоящую из отдельных взаимодействующих между собой атомов.

Характер взаимодействия между атомами состоит в том, что существует некоторое критическое расстояние между атомами, когда сила взаимодействия между ними равна нулю. Удаление атомов приводит сначала к росту сил притягивания, а затем, после прохождения некоторого пика, к асимптотическому убыванию этих сил. Зато сближение атомов на то же расстояние приводит к резкому, на несколько порядков большему росту сил отталкивания. Таким образом, закон силового взаимодействия атомов в зависимости от их взаимного расположения носит, как показано на рис. 2 резко выраженный асимметричный характер [1, 4, 10].

Учитывая описанный выше характер взаимодействия атомов, механизм возникновения и поддержания колебаний состоит в том, что при относительном принудительном движении (скольжении, качении или резании) взаимно прижатых какими-то любого происхождения внешними силами (упругости, гравитации, инерции, трения, давления среды и другими) твердых тел образуются ограниченные поверхности контакта с определенным углом атаки в направлении относительного движения.

Под этими площадками контакта в некоторых ограниченных объемах возникают кратковременные местные сближения атомов на расстояния меньше критического, являющиеся причиной резкого возрастания (всплеска) сил отталкивания, в результате чего тела взаимно удаляются друг от друга.

Взаимоудаление тел ведет к взаимному удалению ранее сблизившихся атомов на расстояния больше критического, что приводит к резкому падению (при некоторых условиях до нуля) сил отталкивания.

В отсутствие или при незначительности сил отталкивания проявляется действие внешних сил, в результате чего происходит сближение тел. Оно приводит к повторному сближению атомов и описанный выше процесс удаления и сближения контактирующих тел многократно повторяется при от-

сутствии независимой внешней периодической силы, что свидетельствует об автоколебательности процесса, как показано на рис. 3.

Автоколебания будут продолжаться до тех пор, пока не нарушится действие внешних сил, контакт тел или их относительное принудительное движение.

В связи с изложенной гипотезой, характеристики колебательного процесса должны зависеть от физических характеристик отдельных атомов, механических и геометрических характеристик контактирующих тел в целом, от величины и характера действия внешних сил, свойств внешней среды, особенностей контакта тел, а также параметров относительного принудительного движения этих тел.

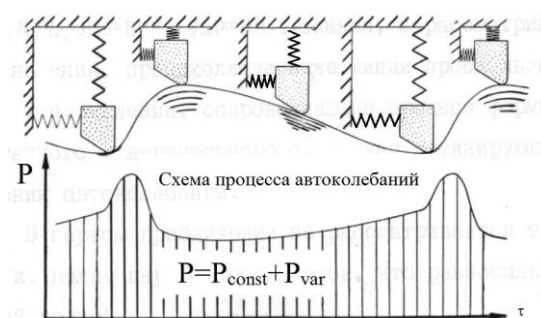


Рис. 3. Схема механизма возникновения и поддержания автоколебаний

Для построения в первом приближении математической модели колебательного процесса при резании сделаны следующие допущения.

Инструмент рассматривается как абсолютно твердое тело, так как его твердость в реальном случае на 1 – 2 порядка выше твердости обрабатываемого материала.

Участок дуги округления режущего лезвия, стягивающей сравнительно малый угол и выполняющий роль угла атаки, под который проскальзывают атомы обрабатываемого материала, рассматривается в виде прямой линии.

Частота автоколебаний в первом приближении принята равной частоте собственных колебаний системы, что многократно, в подавляющем большинстве случаев, экспериментально доказано и основывается на явлении "захватывания" и синхронизации ко-

лебаний более мощной доминирующей системой.

При построении расчетной схемы использованы лишь два соседних поверхностных слоя атомов, в которых только и возможны взаимодействия отталкивания, в то время как между первым, третьим и последующими слоями существуют только взаимодействия притяжения.

Не рассматриваются, как несущественные для природы возникновения автоколебаний явления, происходящие при резании выше линии проскальзывания атомов обрабатываемого материала под округление режущего лезвия, т.е. явления, сопровождающие процесс стружкообразования, а рассматриваются только явления, происходящие ниже линии проскальзывания атомов, т.е. явления, сопровождающие процесс формирования обработанного поверхностного слоя, как доминирующие при возникновении автоколебаний.

В первом приближении не рассматривается также распространение волны перемещений атомов, что равносильно случаю "стоячей волны".

В соответствии с изложенной выше гипотезой и принятыми допущениями на рис. 4 представлена упрощенная плоская расчетная схема исследуемого процесса с одной степенью свободы.

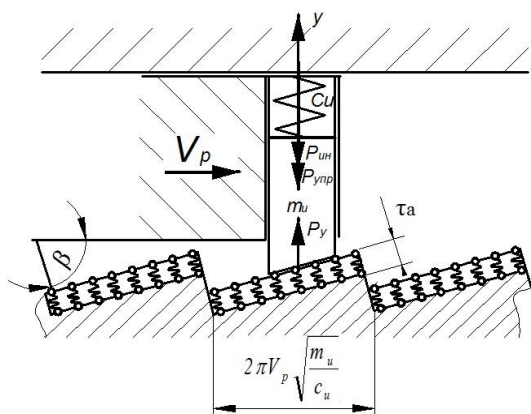


Рис. 4. Расчетная схема процесса автоколебаний

Уравнение системы сил в направлении y , нормальном к обрабатываемой поверхности, имеет вид

$$P_{ин} + P_{упр} = P_y,$$

где $P_{ин}$ – сила инерции; $P_{упр}$ – сила упругости; P_y – переменная составляющая силы резания в направлении y от взаимодействия двух соседних поверхностных слоев атомов обрабатываемого материала.

Соответствующее дифференциальное уравнение движения представляет собой

$$m_u \cdot \ddot{y}(\tau) + C_u \cdot y(\tau) = f(\tau, y), \quad (9)$$

где m_u – масса колеблющегося инструмента; C_u – жесткость инструмента; τ – текущее время.

Функция, определяющая значение переменной составляющей силы резания находится из выражения

$$f(\tau, y) = P_y = P_a \cdot N \cdot \sin \beta + P_{const}.$$

Сила взаимодействия между двумя атомами выражается формулой [5]

$$P_a = \frac{a}{r^{m+1}(\tau, y)} - \frac{b}{r^{n+1}(\tau, y)}, \quad (10)$$

где a, b, m, n – физические атомные константы конкретного обрабатываемого материала, которые находятся в специальной литературе; $r^{n+1}(\tau, y)$ – текущее результирующее расстояние между двумя поверхностными слоями атомов, которое определяется составляющие, входящими в правую часть уравнения (11).

Ввиду того, что в формуле (10) второе слагаемое правой части определяет собой действие сил притяжения, не являющееся характерным для возникновения автоколебаний, и имеет величину на несколько порядков меньше первого слагаемого, то его можно опустить. Тогда

$$P_a \approx \frac{a}{r^{m+1}(\tau, y)},$$

$$f(\tau, y) = r_a - r_v + r_y, \quad (11)$$

где r_a – исходное расстояние между двумя слоями атомов; r_v – величина сближения слоев атомов в результате перемещения инструмента в направлении скорости резания

за счет угла атаки, образованного округлением режущего лезвия; r_y – величина изменения расстояния между слоями атомов, зависящая от вертикальных перемещений инструмента в результате колебаний.

Исходное расстояние между атомами

$$r_a = r_0 - \Delta r_T + \Delta r_w.$$

Критическое расстояние между атомами зависит от рода материала и находится по формуле:

$$r_0 = \sqrt[m-n]{\frac{a}{b}}.$$

Температурное приращение r_a :

$$\Delta r_T = K_T \cdot r_0,$$

где K_T – коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала; Δr_w – приведенное к одному слою приращение межатомного расстояния вследствие дефектов кристаллической решетки – вакансий.

$$\Delta r_w = r_0 \cdot e^{\frac{U_0}{K \cdot T}},$$

где e – постоянная Эйлера; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Энергия атома

$$U_0 = \frac{a}{m \cdot \sqrt[m-n]{\frac{a^m}{b^m}}}.$$

Величина сближения слоев атомов в результате перемещения инструмента в направлении скорости резания

$$r_v = S_v \cdot \cos \beta.$$

Текущее перемещение инструмента в направлении скорости резания

$$S_v = V_p \cdot \tau.$$

Однако, для того, чтобы выполнялось положение гипотезы о периодичности возникновения ограниченных поверхностей контакта, расположенных под некоторым углом атаки к направлению движения, на математической модели это должно быть представлено в виде прерывистой поверхно-

сти, как показано на рис. 4, описываемой выражением типа кусочной функции

$$r_v = 2 \cdot \cos \beta \cdot \left(\frac{\sin(V_p \cdot \tau)}{1} - \frac{\sin(2 \cdot V_p \cdot \tau)}{2} + \frac{\sin(3 \cdot V_p \cdot \tau)}{3} - \dots \right).$$

В первом приближении в тригонометрическом ряду этого выражения оставляем только первый член

$$r_v \approx 2 \cdot \cos \beta \cdot \sin(V_p \cdot \tau).$$

Текущее расстояние между слоями атомов, зависящее от вертикальных перемещений инструмента в результате колебаний будет

$$r_y = y(\tau) \cdot \sin \beta,$$

где $y(\tau)$ – искомая функция вертикального перемещения инструмента по времени в результате колебаний.

Угол β – это приведенный результирующий угол перемещения атомов под округлением режущего лезвия по отношению направлению скорости перемещения инструмента (скорости резания).

Если предположить округление лезвия идеальным, а взаимодействие между ним и атомами направленным по нормали к профилю округления, то из условия неотрывности, проскальзывающий атом под действием округления будет двигаться по линии, которая в любой момент времени пересекает округление лезвия резца только под прямым углом, как показано на рис. 5.

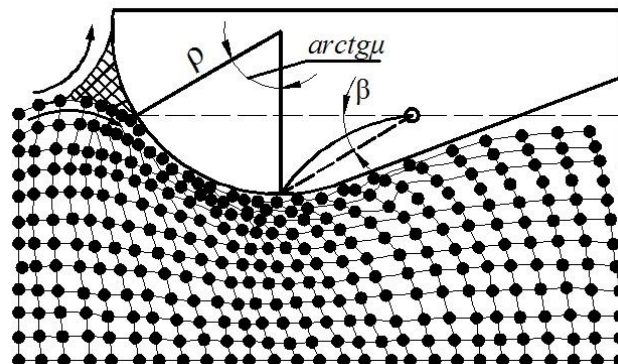


Рис. 5 – Схема перемещения атомов под округлением режущего лезвия в процессе автоколебаний

В соответствии с этим угол β определяется как угол между радиус-вектором перемещения инструмента и радиус-вектором конечного перемещения каждого из атомов граничного слоя и находится по формуле

$$\beta = \arctg \frac{\rho - y_\beta}{x_\beta},$$

где ρ – радиус округления режущего лезвия резца. Тогда

$$\beta = \arctg \frac{1 - \sin(\arctg(\mu))}{\cos(\arctg(\mu)) + \ln \lg \frac{\arctg(\mu)}{2}},$$

где μ – коэффициент трения по задней поверхности резца.

Число пар взаимодействующих атомов можно приближенно определить по формуле

$$N = \frac{l_\rho \cdot l_R}{r_a^2}.$$

Длина активной части дуги радиуса округления резца ρ , под который происходит проскальзывание атомов

$$l_\rho = \frac{\rho}{2} \cdot (\pi - 2\arctg(\mu)).$$

Аналогичная длина дуги для радиуса

$$l_\rho = \frac{\rho}{2} \cdot (\pi - 2\arctg(\mu)),$$

где R – радиус закругления резца; t – глубина резания; S – оборотная подача.

Таким образом, на основании всех вышеприведенных выкладок, можно записать функцию $f(\tau, y)$, стоящую в правой части дифференциального уравнения (9) в следующем виде

$$f(\tau, y) = \frac{a \cdot N \cdot \sin \beta}{\left(r_a - 2 \cos \beta \cdot \sin(V_p \cdot \tau) + y(\tau) \cdot \sin \beta \right)^{m+1}}.$$

Отсюда дифференциальное уравнение движения (9) примет вид

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + \frac{C_H}{m_H} \cdot y(\tau) = \frac{a \cdot N \cdot \sin \beta}{\left(r_a - 2 \cos \beta \cdot \sin(V_p \cdot \tau) + y(\tau) \cdot \sin \beta \right)^{m+1}}.$$

Приближенное решение полученного нелинейного уравнения ищем в виде

$$y(\tau) = C_1 \cdot \sin \tau + C_2 \cdot \cos \tau,$$

где C_1 и C_2 – искомые коэффициенты.

При $\tau = \tau_0 = 0$, $y = y_0 = 0$, $\sin \tau_0 = 0$, $\cos \tau_0 = 1$, $C_2 = 0$ окончательное решение имеет вид

$$C_1 = \sqrt{\frac{a_N}{\left| 1 - \frac{C_H}{m_H} \right| \cdot (m+1) \cdot \left(r_a - 2 \cos \beta \cdot \sin \left(\frac{V_p \cdot \pi}{2} \right) \right)^{m+1} \cdot \sin^{m+1} \beta}},$$

откуда $y(\tau) = C_1 \cdot \sin \tau$. Амплитуду колебаний A_K находим при $\tau = \frac{\pi}{2}$, т.е. $A_K = C_1$.

Выводы

Описанная в работе гипотеза ни в одном аспекте не противоречит остальным, но в отличие от них подтверждается во всем диапазоне переменных условий обработки. Применяя данную теорию, можно управлять уровнем колебаний путем изменения условий обработки, режимов резания и геометрии инструмента. Кроме того, зная расчетное значение амплитуды колебаний, можно прогнозировать шероховатость обработанной поверхности, а также погрешности формы деталей.

Список литературы

1. Бушманов Б.П., Хромов Ю.А. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1971. - 224 с.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.
3. Дьяченко П.Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки. - М. - Л.: Изд-во АН СССР, 1949. - 126 с.
4. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - Л.: Высш. шк., 1965. - 288 с.
5. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания. - М.: Машиностроение, 1968. - 130 с.

6. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. - М.: Машиностроение, 1976. - 144 с.
7. Кудинов В.А. Динамика станков. - М.: Машиностроение, 1967. - 359 с.
8. Лазарев Г.С. Автоколебания при резании металлов. - М.: Высш. шк., 1971. - 244 с.
9. Светлицкий В.А. Передачи с гибкой связью. Теория и расчет. - М.: Машиностроение, 1967. - 156 с.
10. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела: Пер. с англ. - М.: Мир, 1969. - 558 с.
11. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. - Л.: Энергия, 1974. - 200 с.
12. Эрлих Л.Б. Внутренний резонанс одна из причин, способствующих появлению вибраций при обработке на станках // Станки и инструмент. - 1949. - № 1. - с. 19-21.
13. Асташев В.К., Корендясев Г.К. Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании. М. Проблемы машиностроения и надежности машин №3, 2012.
14. Хомяков В.С. Расчет зон устойчивости динамической системы станка при токарной обработке: Вестник МГТУ «Станкин» №4, 2008, стр.32-39.
15. Гребень В.Г., Гаврилов В.А. Устойчивость технологической системы при точении нежестких валов. Развитие оборонно-промышленного комплекса на современном этапе: Сб. матер. II Междунар. технол. конгр. / Под ред. В.В. Евстифеева. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. Ч. 3. с. 126-130.
3. Dyachenko P.E. Dependence of surface microgeometry of machining conditions. - M. - L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1949. - 126 p.
4. Epifanov G.I. Solid State Physics. - IL: H. sch., 1965. - 288 p.
5. Kolev K.S. Precision machining and cutting conditions. - M.: Engineering, 1968. - 130 p.
6. Kolev K.S., Gorchakov L.M. Precision machining and cutting conditions. - M.: Engineering, 1976. - 144 p.
7. Kudinov B.A. Machine dynamics. - M.: Engineering, 1967. - 359 p.
8. Lazarev G.S. Self-oscillations in metal cutting. - M.: H. sch., 1971. - 244 p.
9. Svetlitsky V.A. Transfer with a flexible coupling. Theory and calculation. - M.: Engineering, 1967. - 156 p.
10. Worth Ch., Thomson P. Solid State Physics: Trans. from English. - M.: Mir, 1969. - 558 p.
11. Shubov I.G. Min Noise vibration electric cars. - L.: Energy, 1974. - 200 p.
12. Erlich L.B. Internal resonance is one of the reasons contributing to the emergence of vibrations during machining // Machines and tools. - 1949. - № 1. - p. 19-21.
13. Astatheev V.K., Korendyasev G.K. Thermo-mechanical model of the emergence of self-oscillations in cutting. M. Problems of mechanical engineering and reliability №3, 2012 machines.
14. Homyakov V.S. Calculation of stability zones of the machine dynamic system for turning: Bulletin MGTU "STANKIN" № 4, 2008 p.32-39.
15. Greben V.G., Gavrilov V.A. Stability of technological system at turning non-rigid shaft. The development of the military-industrial complex at the present stage: Coll. Mater. II International. tehnol. congress. / Ed. V.V. Evstifeeva. Omsk: Publishing House of the Omsk State Technical University, 2003. Part 3, p. 126-130.

References

УДК 621.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАК СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ И НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ*

Т.А. Дуюн¹, А.В. Гринек¹

¹ФГАОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация

Аннотация

Представлен подход к описанию процесса резания на основе использования результатов численного моделирования, их аппроксимации нейросетевой моделью и использования нечетких моделей при реализации систем управления механической обработкой. Численное моделирование процесса резания применяется для получения информации о тепловых, силовых, упруго-пластических характеристиках процесса. Нейросетевая модель описывает связь показателей качества обрабатываемого изделия с параметрами процесса резания. Построение управляющих устройств на базе нечеткой логики позволяет учесть сложность взаимосвязей параметров процесса стружкообразования и технологических режимов. Предложенный подход позволяет управлять процессом резания, в том числе адаптивно, обеспечивая заданные показатели качества изделия.

Ключевые слова: численное моделирование, нейронная сеть, нечеткой логики, система управления.

MATHEMATICAL MODELING OF MACHINING AS CONTROL SYSTEM INSTRUMENT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS BASED ON THE FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORKS*

Т.А. Dujun¹, A.V. Grinek¹

¹Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

Abstract

In this manuscript we consider various methods and strategies to control the technological regimes of mechanical tooling based in fuzzy-logic neural networks. Numerical modeling forms the basis of the data about the cutting process. Data approximation of numerical model within neural network paradigm allows for multiparametric optimization. We develop approaches to the application of neural network models and fuzzy regulators in control systems development. The proposed approach allows can be implemented in control systems, including adaptive systems.

Keywords: numerical simulation, neural network, control system, fuzzy logic, cutting.

Вектор показателей качества обрабатываемого изделия (микрорельеф поверхности, состояние поверхностного слоя, макроуклоны) формируется в процессе механической обработки под воздействием ряда факторов: упруго-пластических процессов в зоне резания, тепловых потоков, напряженно-деформированного состояния детали и инструмента, вибраций технологической системы и др. При этом в процессе резания протекают сложные взаимосвязи между исходными технологическими режимами и

условиями, параметрами процесса резания (сила и температура резания, скорость деформации и др.) и выходными получаемыми параметрами качества изделия.

Традиционно для исследования процессов резания наиболее широкое применение получили экспериментальные методы [1-4]. Однако, они имеют ряд ограничений в связи с высокой трудоемкостью выполнения и низкой универсальностью получаемых результатов. В настоящее время с бурным развитием вычислительной техники и приклад-

ных специализированных программных пакетов все большее распространение получают численные методы, имитационное моделирования резания[5-15].

Численное моделирование процесса резания при качественно построенной модели и корректных исходных данных позволяет получить с достаточно высокой точностью важные характеристики процесса: составляющие силы резания, температуру резания, скорость и величину деформации, величину усадки стружки, в том числе в условиях переходных нестационарных быстропротекающих процессов: резание с ударом, неравномерный припуск, высокоскоростное резание (рис.1 – 4).

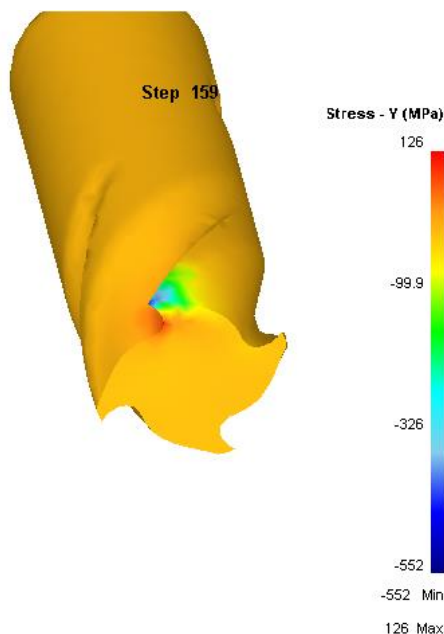


Рис. 1. Тепловое поле в режущей кромке фрезы

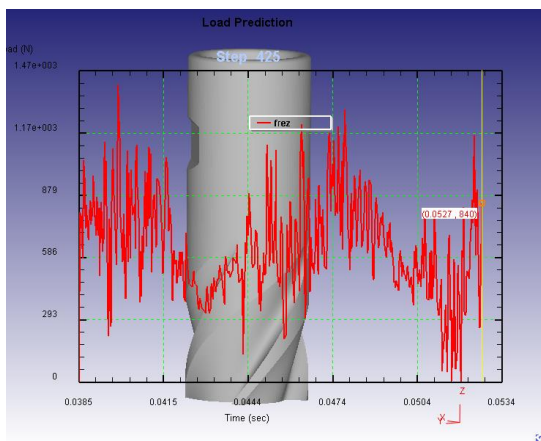


Рис. 2. Изменение составляющей силы резания при фрезеровании

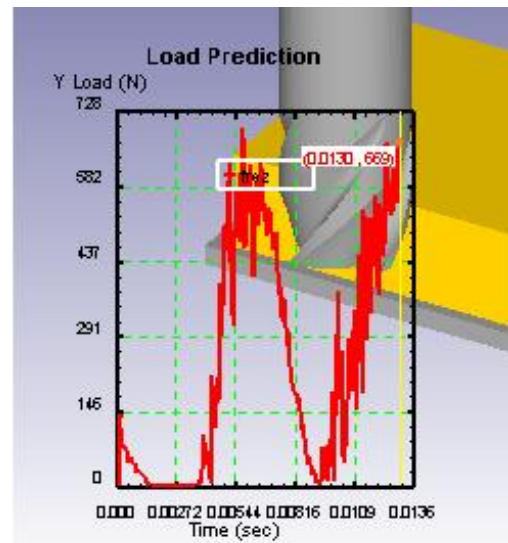


Рис. 3. Изменение сил резания при врезании инструмента

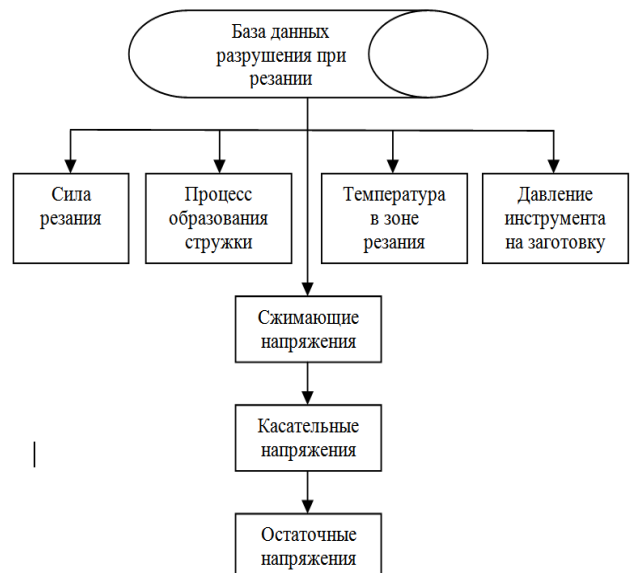


Рис. 4. Результаты моделирования процесса резания

Указанные параметры оказывают непосредственное влияние на формирование параметров качества изделия, а выявление их взаимосвязей с технологическими режимами позволяет управлять процессом резания с целью получения заданных свойств изделия [10, 13].

С точки зрения построения систем управления процесс механической обработки имеет ряд сложностей для практической реализации. Процесс резания является стохастическим, нелинейным и зачастую с существенным недостатком информации о внутренних связях. Геометрия режущей ча-

стив процессе резания непрерывно меняется. Износ инструмента сложным образом связан с силовыми и температурными характеристиками процесса резания. Изменяются физико-механические свойства материала, как правило, случайным образом. Сколы режущей кромки, сваривание с материалом заготовки, поломки инструмента также подтверждают случайный нелинейный закон процесса резания [11].

Нечеткая логика управления, применяемая для класса неформализованных задач, может быть с успехом использована и для процесса резания. Наличие базы нечетких правил позволяет избежать вычислительного функционального процесса, имеющего ограничения по вычислительной способности ЭВМ и ПЭВМ, времени расчета в реальном времени [15].

При решении неформализованной задачи могут быть достигнуты следующие результаты:

1. Интерпретация данных измерения параметров механической обработки.
2. Прогнозирование параметров процесса резания.
3. Проектирование на базе нечеткой модели следящих систем и систем автоматического управления механической обработкой, в том числе адаптивных.
4. Проектирование технологических процессов обработки с определенными оптимальными режимами резания.

При наличии описанных связей векторов входных и выходных параметров механической обработки в виде относительно «быстрой» нейронечеткой модели становится возможным управлять вектором выходных параметров качества по нескольким критериям и фактически влиять на «неуловимые» процессы в зоне съема стружки. На основании динамической численной модели процесса резания, комплексно в трехмерной постановке описывающей процесс стружкообразования (рис.5), осуществляется настройка и подбор параметров нейронной сети (рис. 6). Выходные параметры нейронной сети могут выбираться из задач оптимизации или управления.

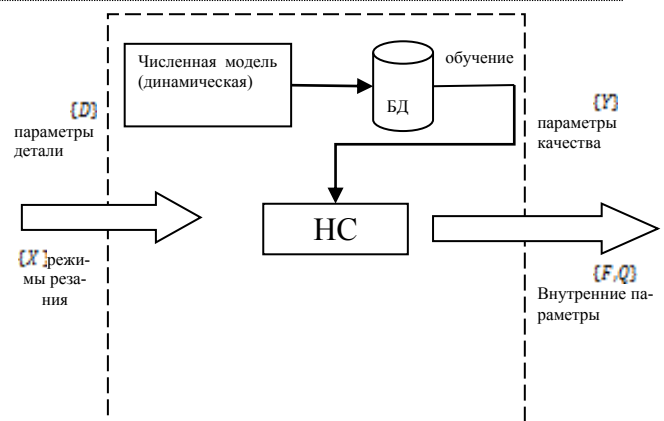


Рис.5. Аппроксимация результатов численной модели нейронной сетью

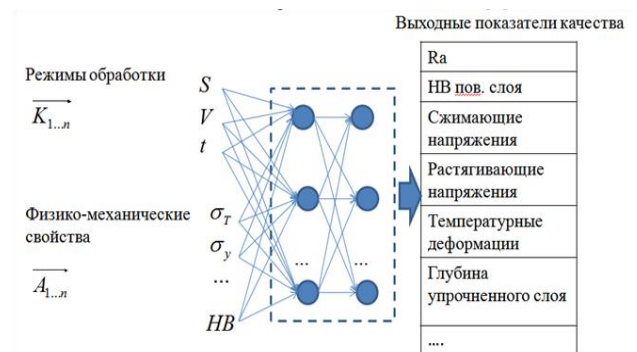


Рис. 6. Нейросетевая модель для аппроксимации данных численного моделирования

При построении системы управления процессом резания, как динамическим процессом, необходим синтез алгоритмов управления и оценка текущего состояния системы. На рис. 7 приведена общая схема управления процессом резания. Нечеткий регулятор, управляющий технологическими режимами на основе аппроксимирующей нейронной сети управляет рабочими органами станка, отслеживая отклонение измеренных сил резания и температуры от заданных (рис. 8).

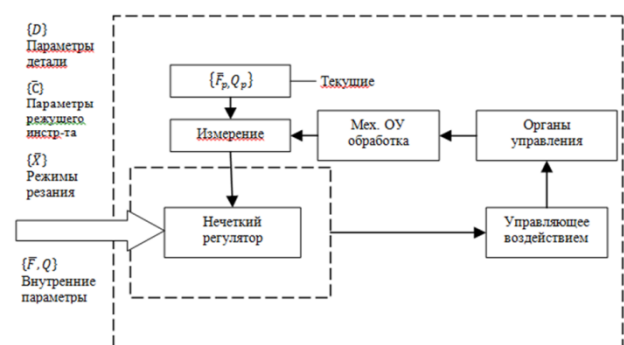


Рис.7. Управление процессом резания

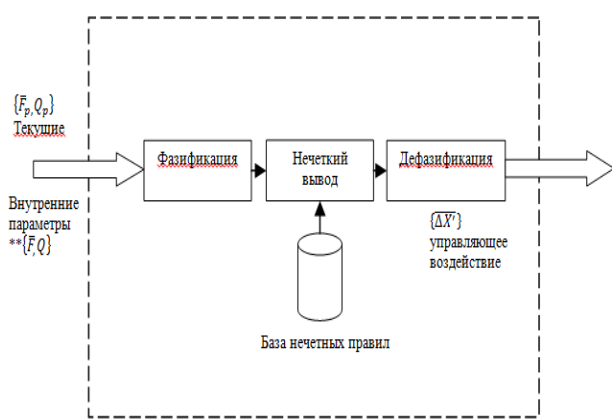


Рис. 7. Нечеткий регулятор

На основании разработанных моделей и зависимостей предложен алгоритм управления тепловыми параметрами процесса резания.

Результатом управления тепловыми параметрами процесса резания является повышение размерной точности обрабатываемой детали, уменьшение погрешностей формы, обеспечение заданных характеристик поверхностного слоя обработанной поверхности.

Корректирующие целеуказания подаются на микроконтроллер, который формирует установку на подсистему СПИД (электропривод станка и суппорта), что приводит к смене режима в желаемом направлении изменения температуры, а, следовательно, теплового поля и напряженно-деформированного состояния обрабатываемого изделия (рис. 9). Система управления тепловыми параметрами процесса резания предусматривает корректировку скорости резания и величины снимаемого припуска (путем определения количества проходов инструмента).

Условиями, определяющими величину критической температуры резания $t_{кр}$, являются максимальная допустимая величина температурной деформации заготовки и температура начала разупрочнения обрабатываемого материала.

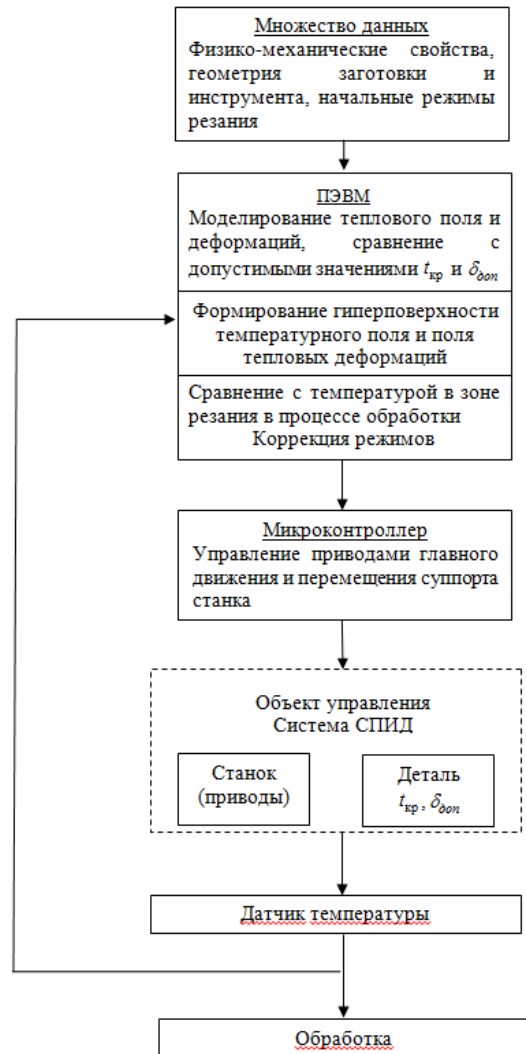


Рис.8. Функциональная схема системы управления режимами резания по температурному критерию

В процессе обработки происходит коррекция скорости вращения заготовки и глубины резания по температуре заготовки в зоне резания. Скорость резания и количество проходов, за который снимается основной припуск, являются управляющим воздействием в структуре управления технологическим процессом.

Корректировка скорости резания и количества проходов производится после сравнения температурных деформаций заготовки с допустимым значением и сравнения температуры на поверхности заготовки с критической температурой начала разупрочнения материала заготовки

В результате использования предложенного подхода могут быть разработаны математические модели механической обработки

конструкционных материалов, интегрально учитывающие взаимосвязанные физические процессы, протекающие при резании: силовые, тепловые, деформационные и вибрационные. На основании выявленных наследственно-технологических связей и аналитических моделей могут быть определены оптимизационные модели и алгоритмы для проектирования технологических процессов, разработаны теоретические основы функционирования и конструктивного-элементного исполнения программно-аппаратного комплекса, реализующего активный контроль и оптимальное управление технологическими режимами на основе автоматизированной системы управления.

Список литературы

1. Дуюн Т.А. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббита / Т.А.Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – №2. – С. 112-117.
2. Эмпирические модели шероховатости поверхности при фрезеровании баббита [Текст] / О.Б. Бешевли, Т.А.Дуюн // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №7. – С.122-127.
3. Wins K. Optimization of Surface Milling of Hardened AISI4340 Steel with Minimal Fluid Application Using a High Velocity Narrow Pulsing Jet of Cutting Fluid / K. Wins, A. Varadarajan, B. Ramamoorthy // Engineering. – 2010. Vol. 2, №10. P. 793-801.
4. Ni H. Sub-micrometer structures generated during dry machining of / H. Ni, A. T. Alpas // Science and Engineering: A. – 2003. - Vol.361. №(1-2). – P. 338-349.
5. Duyun T.A. Controlling Of Thermal Parameters For Mechanical Treatment On The Basis Of Numerical Modeling Of Their Thermal Relationship / T.A. Duyun, A.V. Grinek, V.G. Rubanov, I.V. Kalatozishvili. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 5. Vol. 10. – P. 12371-12382.
6. Бешевли О.Б. Оптимизация технологических параметров при фрезеровании баббита в условиях ремонтной обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников / О.Б. Бешевли, Т.А.Дуюн // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №8. – С.142-147.
7. Рубанов В.Г. Моделирование экстремальных систем управления в среде Matlab и Simulink, как средство анализа динамики / В.Г. Рубанов, Д.А. Бушуев. // Научные ведомости БелГУ. Серия:

История. Политология. Экономика. Информатика. - 2012, №19 (138), вып. 24/1, С. 169-175

8. Рубанов В.Г. Адаптивные системы принятия нечетко-логических решений (монография) / В.Г. Рубанов, В.С. Титов, М.В. Бобырь. – Белгород, Изд-во БГТУ, 2014. – 237 с.
9. Кариков Е.Б. Анализ динамики сложного объекта управления с помощью нейронных сетей / Е.Б. Кариков, В.Г. Рубанов, В.К. Классен // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. №5, С. 174-181.
10. Duyun T.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs / T.A. Duyun, A.V. Grinek, L.A. Rybak // WorldAppliedSciencesJournal. – 2014. – 30 (8). – P. 958-963.
11. Дуюн Т.А. Управление тепловыми параметрами процесса механической обработки с использованием численного моделирования их тепловых зависимостей / Т.А. Дуюн, А.В. Гринек, Д.В. Сахаров // Промышленные контроллеры АСУ. – 2015. – №10. – С. 43-50.
12. Duyun T.A. The Optimum Cutting Speed and Acceptable Parameters for Tool Vibration When Turning an Inhomogeneous Material / T.A. Duyun, A.V. Grinek, R.V. Manzhos // AdvancesbyEnvironment Biology. – 2014. – 8(13). – P. 112-116.
13. Duyun T.A. Modelling of Thermal Field of Electromotor's Collector in Service / T.A. Duyun, A.V. Grinek, R.V. Manzhos //AdvancesbyEnvironment Biology. – 2014. – 8(13). – P. 183-190.
14. Рыбин И.А. Способ исследования движения мобильного робота на стационарной установке удаленного доступа / И.А. Рыбин, В.Г. Рубанов, Т.А.Дуюн // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – №11. – С.14-23.
15. Андриевская Н.В. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления / Н.В. Андриевская, А.С. Резников, А.А. Черанев // Фундаментальные исследования. – 2014. – №11-7. – С. 1445-1449.

References

1. Duiun T.A. Vliianie tekhnologicheskikh parametrov na temperaturnyi rezhim i poluchaemoe kachestvo po-verkhnosti pri frezerovanii babbita / T.A.Duiun, O.B. Beshevli // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2015. – №2. – S. 112-117.
2. Empiricheskie modeli sherokhovatosti poverkhnosti pri frezerovanii babbita [Tekst] / O.B. Beshevli, T.A.Duiun // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2016. – №7. – S.122-127.
3. Wins K. Optimization of Surface Milling of Hardened AISI4340 Steel with Minimal Fluid Application Using a High Velocity Narrow Pulsing Jet of Cutting Fluid / K. Wins, A. Varadarajan, B. Ramamoorthy // Engineering. – 2010. Vol. 2, №10. P. 793-801.

4. Ni H. Sub-micrometer structures generated during dry machining of / H. Ni, A. T. Alpas // Science and Engineering: A. – 2003. – Vol.361. №(1-2). – P. 338-349.
5. Duyun T.A. Controlling Of Thermal Parameters For Mechanical Treatment On The Basis Of Numerical Modeling Of Their Thermal Relationship / T.A. Duyun, A.V. Grinek, V.G. Rubanov, I.V. Kalatozishvili. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 5. Vol. 10. – R. 12371-12382.
6. Beshevli O.B. Optimizatsiia tekhnologicheskikh parametrov pri frezerovanii babbita v usloviakh remontnoi obrabotki opornoj poverkhnosti skol'zheniia krupnogabaritnykh podshipnikov / O.B. Beshevli, T.A.Duiun // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2016. – №8. – S.142-147.
7. Rubanov V.G. Modelirovanie ekstremal'nykh sistem upravleniia v srede Matlab i Simulink, kak sredstvo analiza dinamiki / V.G. Rubanov, D.A. Bushuev. // Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Istoriia. Politologiya. Ekonomika. Informatika. – 2012, №19 (138), vyp. 24/1, S. 169-175
8. Rubanov V.G. Adaptivnye sistemy priniatiia nechetko-logicheskikh reshenii (monografiia) / V.G. Rubanov, V.S. Titov, M.V. Bobyr'. – Belgorod, Izd-vo BGTU, 2014. – 237 s.
9. Karikov E.B. Analiz dinamiki slozhnogo ob'ekta upravleniia s pomoshch'iu neironnykh set'ei / E.B. Karikov, V.G. Rubanov, V.K. Klassen // Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2013. №5, S. 174-181.
10. Duyun T.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs / T.A. Duyun, A.V. Grinek, L.A. Rybak // WorldApplied-SciencesJournal. – 2014. – 30 (8). – R. 958–963.
11. Duiun T.A. Upravlenie teplovymi parametrami protsessa mekhanicheskoi obrabotki s ispol'zovaniem chislennogo modelirovaniia ikh teplovykh zavisimosti / T.A. Duiun, A.V. Grinek, D.V. Sakharov // Pro-myshlennye kontrolyery ASU. – 2015. – №10. – S. 43-50.
12. Duyun T.A. The Optimum Cutting Speed and Acceptable Parameters for Tool Vibration When Turning an Inhomogeneous Material / T.A. Duyun, A.V. Grinek, R.V. Manzhos // AdvancesbyEnvironment Biology. – 2014. – 8(13). – P. 112-116.
13. Duyun T.A. Modelling of Thermal Field of Electromotor's Collector in Service / T.A. Duyun, A.V. Grinek, R.V. Manzhos //AdvancesbyEnvironment Biology. – 2014. – 8(13). – P. 183-190.
14. Rybin I.A. Sposob issledovaniia dvizheniia mobil'nogo robota na statsionarnoi ustanovke udalennogo dostupa / I.A. Rybin, V.G. Rubanov, T.A.Duiun // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagno-stika. – 2014. – №11. – S.14-23.
15. Andrievskaia N.V. Osobennosti primeneniia nei-rochetkikh modelei dlia zadach sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniia / N.V. Andrievskaia, A.S. Reznikov, A.A. Cheranov // Fundamental'nye issledovaniia. – 2014. – №11-7. – S. 1445-1449.

УДК 621.9.047

НАНЕСЕНИЕ ВЫПУКЛЫХ ЗНАКОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ С УПРУГИМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

А.А. Козлов¹, В.П. Смоленцев², А.М. Козлов¹¹ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Российская Федерация²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Для идентификации изделий в многономенклатурном производстве необходимо их маркирование. Применяемые в настоящее время способы используют специальные инструменты, на рабочей поверхности которых нанесен контур маркируемого знака. Это требует дополнительных расходов.

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 технологические режимы.

Ключевые слова: маркирование, эластичное диэлектрическое покрытие, растровый электрод-инструмент.

DRAWING CONVEX SIGNS ON METAL SURFACES WITH ELASTIC DIELECTRIC COATING

A.A.Kozlov¹, V.P. Smolentsev², A.M. Kozlov¹¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Abstract

To identify the products they need to manufacture multinomenclature labeling. In-replaceable current methods use special tools on the working surface which caused the sign to be marked path. This requires additional costs.

Electrochemical method labeling disturbs the workpiece surface and can lead to formation of a stress concentrator. In the presence of previously removed its surface to be marked on the protective dielectric coating, and after marking - is reduced.

It is proposed to carry out the marking of surfaces with an elastic dielectric-coated electrode-raster tool using rheological fluid without disturbing the integrity of the coating. The scheme of application of labels and technological regimes.

Key words: labeling, flexible dielectric coating, the electrode raster tool.

Введение

В современном производстве, где изготовление деталей ведется партиями, маркирование используется весьма широко и, зачастую, входит в технологический процесс как его составная часть. Маркирование, как правило, производится в конце технологического процесса и знаки наносятся на уже готовую продукцию.

Маркировка готовых изделий и отдельных комплектующих позволяет вести учет

продукции на любом этапе производства, на складе, при транспортировке, реализации, возврате изделий. Современная маркировка благодаря штрих-кодам и другим способам кодировки может содержать достаточно большие массивы информации - о самом изделии, предприятии-изготовителе, логотипы, даты производства и т.д.

Главным недостатком большинства методов является необходимость в инструменте, имеющем на рабочей поверхности профиль контура знаков (шрифты, шаблоны, режущие инструменты, перемещаемые по

программе и др.), изготовление которых в условиях серийного производства требует дополнительного времени. Снять такую проблему позволили разработанные в последнее время методы [1-3] растрового маркирования, при которых контур знаков формируют из фрагментов, синтез которых создают по командам с печатающих механизмов [4]. Такие технологические приемы позволяют маркировать не только отдельные детали, но и собранные узлы в процессе эксплуатации, создавать крупные информационные массивы на металлических изделиях.

Для деталей, имеющих эластичные покрытия из резины, клеев, лаков, полиуретана и других материалов, доступ к их металлической основе ограничен и для нанесения долговременной информации до настоящего времени требовалось удалять покрытие в месте маркирования [5, 6]. Кроме этого, при маркировании могут вноситься напряжения в поверхностный слой основы. Как правило, такие операции выполняются на ненагруженных участках деталей, которые, однако, могут оказаться недоступными без разборки узлов.

Результаты и обсуждение

В настоящее время в промышленности достаточно широко применяется метод электрохимического маркирования [7], однако существенным его недостатком является нарушение поверхностного слоя детали, что может явиться концентратором напряжений и снизить прочность детали, например, имеющих ажурную конструкцию [8].

В последнее время исследователи все большее внимание уделяют применению для решения различных задач реологической жидкости [9, 10].

Была выдвинута гипотеза, что для эластичных материалов при больших давлениях струи можно обеспечить временное раскрытие покрытия для прохождения жидкости к зоне обработки. При этом под действием упругих сил покрытия отверстие закрывается, а попавшая жидкость в герметичном пространстве не нарушает качества поверхности под покрытием. Контур знака на внутренней

поверхности покрытия можно получить, используя реологические жидкости с металлическим наполнителем, которые под действием локального электрического поля формируют информационный массив.

На рис. 1 приведен фрагмент электрода-инструмента с двумя элементами растрового контура, получаемого под слоем эластичного покрытия, на примере знака шрифта №5.

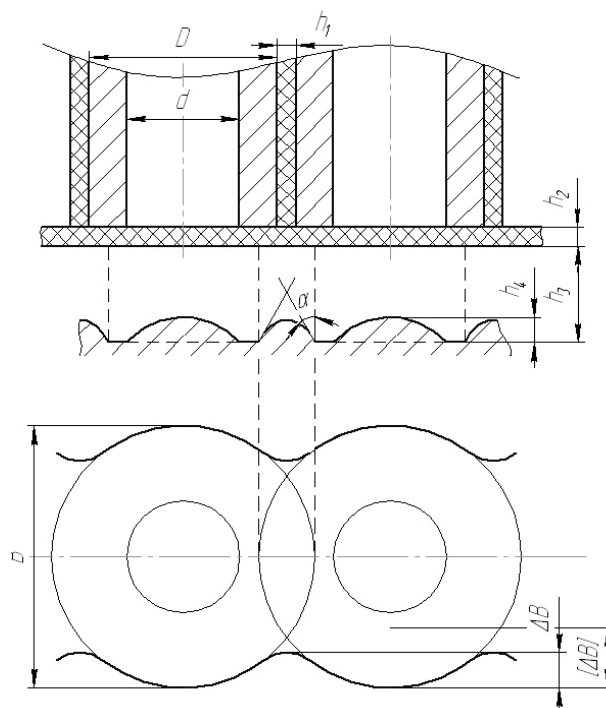


Рис. 1. Контур штриха, полученный на стальной детали под слоем покрытия лаком (шрифт №5)

Для элементов (рис. 1,верху) использованы стандартные латунные трубки с наружным диаметром $D = 0,5$ мм, что совпадает со стандартной шириной линии обвода для знаков шрифта №5 (0,1 высоты знака). Трубки снаружи изолированы покрытием с толщиной $h_1 = 0,05$ мм, внутреннее отверстие $d = 0,3$ мм. Поверхность детали покрыта эластичным лаком с большим относительным удлинением и высокой адгезией к металлам. Толщина покрытия $h_2 = 0,05$ мм. Режимы нанесения информации: напряжение на электродах 12 В, ток пульсирующий с частотой 50 Гц, время обработки 2,5 секунды, давление рабочей среды $20,0 \pm 1,0$ МПа, объем подаваемой жидкости 0,5 мл. Состав

рабочей среды – 15 % водный раствор нитрата натрия. «Глубина» знака $h_3 = 0,03$ мм. Донная часть знака имеет неровности с h_4 до 0,01 мм в форме выступов под диэлектрическим покрытием элементов и под отверстиями в трубках. За счет рассеивания электрического поля границы выступов имеют уклоны $\alpha = 3,5^\circ$, что позволяет получить сплошной контур знаков за счет накопления над одной частью контрастных продуктов обработки после серии импульсов тока. При достаточно тонком слое покрытия трубок расстояние между соседними элементами перекрывается электрическим полем и формируется сплошной контур знака (рис. 1, внизу). Полученная ширина штриха ($B = 0,55$ мм) при допуске на ширину ($[\Delta B] = 0,1$ мм) и установленной погрешности $\Delta B = 0,8$ мм отвечает стандартам на шрифты. За счет уклона боковых поверхностей углублений границы знаков изменяются в пределах $2\Delta B$, но наличие на поверхности углубления темного осадка (продуктов обработки) позволяет создать контрастные информационные массивы, отвечающие требованиям читаемости.

Толщина осадка, определяющая количество наносимой информации, зависит от параметра h_3 , угла « α », свойств и размеров (h_2) эластичного покрытия, а также режимов маркирования и времени выполнения операции. Наиболее качественные знаки формируются на поверхности, имеющей максимальную «маслоемкость» микропрофиля с развитым микрорельефом [12].

Испытание предложенной технологии нанесения знаков на металлическую поверхность с упругим диэлектрическим покрытием проводилось на обрезиненной детали (рис. 2).

Без повреждения покрытия наносилась информация в виде слова «ВОРОНЕЖ». Толщина резины $0,5 \pm 0,1$ мм, номер шрифта 7.



Рис. 2. Вид поверхности детали с нанесенными информационными знаками (покрытие удалено)

По ГОСТ толщина линий шрифта составляет 0,7 мм, тогда наружный диаметр сопла 3 составляет $0,6 \pm 0,1$ мм. Давление в инжекторе $22 \pm 1,0$ МПа. Для стали 30ХГСА, из которой изготовлена деталь, в соответствии с рекомендациями [7, 11, 13], состав электролита: 10 % водный раствор хлористого натрия при температуре 293 К. Униполярный импульсный ток от источника имеет среднее напряжение 6 В. Форма тока – гребенчатый импульс. Длительность импульса составила 2 с. Время ввода информации о маркировании в растровое управляемое программирующее устройство составило 11 секунд. После подключения сопел по контуру информационных знаков был подан ток величиной 1,8 А, который через 2,5 секунды снизился до нуля. Осмотр при увеличении под микроскопом поверхности резинового покрытия в месте маркирования не выявил дефектов покрытия. После удаления покрытия обнаружена контрастная информация со знаками, соответствующими ГОСТ. Общее время маркирования составило порядка 55 секунд. Если использовать способ, предложенный в источнике [14], то нанесение аналогичной информации с последующим восстановлением поврежденного при маркировании покрытия составляет 8,5 минуты.

Реологическая жидкость может формировать знаки с толщиной в несколько десятых долей миллиметра, но имеются детали (например, обрезиненные), где слой резины измеряется десятками миллиметров и более. Тогда потребуется весьма высокое давление жидкой рабочей среды (рис. 4) и целесообразно

разнее использовать для этого металлические иглы специальной конструкции, не вызывающие разрыва эластичного покрытия. Для этой цели имеется вариант [15] групповой заточки игл электроабразивным методом, не нарушающим режущую кромку и не вызывающим образования заусенцев. Получение режущей части каплевидной формы дает возможность выполнять проколы в эластичных материалах без разрезания кромок с последующим полным перекрытием отверстия за счет упругих свойств покрытий.

Выводы

Таким образом, доказана возможность маркирования металлических поверхностей с упругим диэлектрическим покрытием с использованием реологической жидкости без нарушения целостности покрытия и получением выпуклых знаков при повышении производительности процесса.

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. №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. Нанесение информации на металлические детали с покрытиями с использованием реологической жидкости / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. Т. 9. №6.1. - С. 59-63.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Смоленцев В.П. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. - Москва: Машиностроение, 1983. – 72 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Смоленцев Г.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев // Воронеж: ВГТУ. 2000. – 103 с.
12. 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. – 136 с.
13. 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.
14. Смоленцев В.П. и др. Способ маркирования деталей из токопроводящих материалов / А.с. СССР № 973271. 1982. Бюл. №42
15. Некрасов А.Н. и др. Способ заточки пустотелых колющих медицинских инструментов / Патент России №2237569. 2004. Бюл. №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 diehlektricheskim pokrytiem i sposob s ego primeneniem / Patent Rossii №2542216. 2015. Byul. №5.
3. Kozlov A.A. Nanesenie informatsii na metallicheskie detali s pokrytiyami s ispol'zovaniem reo-

- logicheskoy zhidkosti / A.A. Kozlov, V.P. Smolentsev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. T. 9. №6.1. – S. 59-63
4. 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. – S. 38-42.
 5. 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). – S. 93-99.
 6. Kozlov A.M. Nanesenie nadpisej na metalli-cheskie poverkhnosti s vyazkim ehlektroizolyatsionnym pokrytiem / A.M. Kozlov, A.N. Osekov // Vesti vysshikh uchebnykh zavedenij CHernozem'ya – 2011, №2 (24). – S. 96-100.
 7. Smolentsev V.P. EHlektrokhimicheskoe markirovanie detalej / V.P. Smolentsev, G.P. Smolentsev, Z.B. Sadykov. – Moskva: Mashinostroenie, 1983. – 72 s.
 8. Osekov A.N. Obosnovanie predel'noj vysoty i glubiny znakov pri nanesenii informatsii na me-tally s dielektricheskim pokrytiem / A.N. Osekov, I.T. Koptev, A.S. Belyakin // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011, T7, №8. – S. 86-91.
 9. 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
 10. Smolentsev V.P. Mekhanizm upravleniya protsesom bazirovaniya individual'nykh zagotovok v reologi-cheskoy zhidkosti / V.P. Smolentsev, A.A. Boldyrev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2012. №2/3 (292). – S. 56-60.
 11. Smolentsev G.P. Teoriya ehlektrokhimicheskoy obrabotki v nestatsionarnom rezhime / G.P. Smolentsev, I.T. Koptev, V.P. Smolentsev // Voronezh: VGTU. 2000. – 103 s.
 12. 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. – 136 s.
 13. 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.
 14. Smolentsev V.P. i dr. Sposob markirovaniya detalej iz tokoprovodyashchikh materialov / A.s. SSSR № 973271. 1982. Byul. izobr. №42
 15. Nekrasov A.N. i dr. Sposob zatочки pustotel'nykh kolyushchikh meditsinskikh instrumentov / Patent Rossii №2237569. 2004. Byul. izobr. №28.

УДК 621.923:621.90.17

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

А.Г. Колесов¹, С.М. Братан¹, С.И. Рошупкин¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Разработана математическая модель врезного шлифования прецизионных поверхностей упругих пластин, позволяющая рассчитывать вероятность удаления и съем материала, параметры шероховатости поверхности и глубину дефектного слоя. Впервые получены стохастические зависимости, позволяющие прогнозировать величину слоя, в котором распределена шероховатость поверхности и глубину дефектного слоя. Выполнена экспериментальная проверка полученной модели и представлены ее результаты. Приведен пример численного расчета среднего арифметического отклонения профиля при врезном шлифовании прецизионных поверхностей упругих пластин.

Ключевые слова: шероховатость, среднее арифметическое отклонение профиля, врезное шлифование, профилограмма, вероятность удаления, нормальный закон распределения, параметры качества

PREDICTION PARAMETERS OF QUALITY IN THE TREATED SURFACES PLUNGE GRINDING

A.G. Kolesov¹, S.M. Bratan¹, S.I. Roshupkin¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

A mathematical model of precision plunge grinding surfaces of elastic plates, which allows to calculate the probability of removal and material removal, surface roughness and the depth of the defect layer. For the first time obtained stochastic dependence to predict the value of the layer in which the surface roughness is distributed and the depth of the defect layer. The experimental verification of the model and its results are presented. An example of a numerical calculation of the arithmetic average roughness when plunge grinding precision surfaces of elastic plates.

Keywords: roughness, arithmetic average roughness, plunge grinding, profilogram probability removal, normal distribution, quality parameters

Введение

Переход к рыночным отношениям в экономике выдвинул на передний план проблемы связанные с выпуском конкурентоспособной продукции в машиностроении и приборостроении [1]. «Потребителям необходима продукция, характеристики которой удовлетворяли бы их запросы и ожидания» (ИСО/ПСК 2 9000: 2000). Высокий уровень требований к современным машинам и приборам обусловил ряд проблем, связанных с созданием высокопроизводительных технологических процессов, обеспечивающих изготовление деталей с заданными параметрами качества [2]. Параметры качества опре-

деляют функциональную пригодность деталей и их эксплуатационные характеристики. Окончательно такие параметры формируются на финишных операциях, к числу которых относится процесс шлифования [10]. При изготовлении широкого класса деталей машин и приборов, нужно с одной стороны выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя, с другой стороны повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка [14]. Ставится задача не только повысить точность изготовления деталей в целом, но и обеспечить стабильность их параметров. Ис-

следования в области создания технологических процессов формообразования рабочих поверхностей прецизионных деталей, позволят повысить качество обработки деталей, а значит, и эксплуатационные свойства всего изделия [3].

В настоящее время актуальной и не полностью решенной является задача обработки прецизионных поверхностей упругих пластин, работающих при циклических знакопеременных нагрузках. Формирование точностных и качественных параметров поверхностей пластин осуществляется на операциях тонкого растачивания, фрезерования и шлифования с последующей доводкой перемычек [7].

Шлифование с последующей доводкой с поверхностно-активными веществами в значительной степени позволяет обеспечить требуемые технологические параметры обрабатываемых поверхностей, однако получение этих параметров носит нестабильный характер, а сами процессы формообразования является трудно управляемым. Для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются исходя из опыта технолога или рекомендаций, приведенных в справочной литературе [8]. При прогнозировании состояния ТС используются эмпирические модели протекания технологического процесса (ТП), полученные методами многофакторного планирования эксперимента [11]. Погрешность таких моделей в ряде случаев достигает 100-300%, что не позволяет их использовать для расчета режимов резания при шлифовании и доводке прецизионных поверхностей упругих пла-

стин. Вместе с тем, процессы шлифования и доводки имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности этих методов, вследствие отсутствия адекватного математического описания процесса

Обеспечение качества и эффективности операций шлифования и доводки возможно только на основе разработки стохастических моделей, учитывающих вероятностную природу этих процессов. Необходимо комплексное решение этих вопросов, совокупность которых представляют собой нерешенную до настоящего времени задачу.

На основании вышеизложенного целью данной статьи является разработка стохастической модели процесса врезного шлифования, позволяющей прогнозировать поведение технологической системы (ТС) при любых алгоритмах изменения технологических режимов и осуществлять оценку ее выходных параметров.

Результаты и обсуждение

Для построения математической модели процесса врезного шлифования, позволяющей прогнозировать поведение технологической системы (ТС), и оценивать среднее арифметическое отклонение профиля и глубину дефектного слоя рассмотрим схему взаимодействия абразивного инструмента с заготовкой в зоне контакта на микроуровне (рис.1).

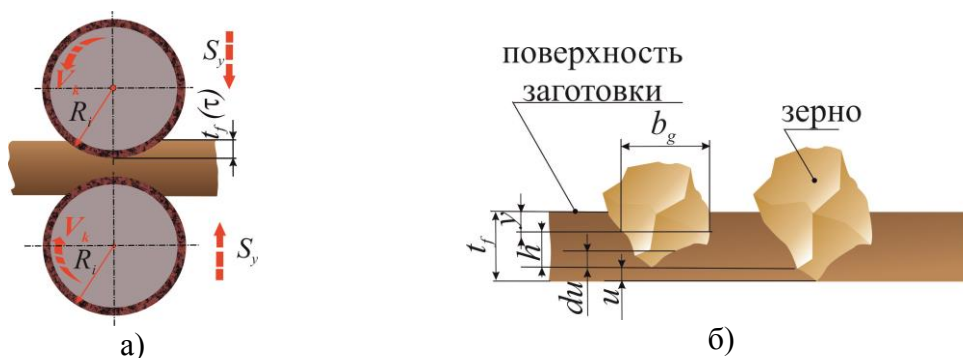


Рис. 1 – а) Схема процесса врезного шлифования прецизионных поверхностей упругих пластин; б) Схема взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью на микроуровне

Вероятность удаления материала с учетом наличия исходной шероховатости определяется по зависимости:

$$P(M) = 1 - e^{-a(y) - a(y, \tau)}, \quad (1)$$

где $a(y)$ – показатель определяющий вероятность удаления материала на уровне y до входа поверхности в зону контакта заготовки с кругом.

Показатель, определяющий изменение вероятности удаления материала на уровне y в зоне контакта в момент времени τ :

$$a(y, \tau) = K_c b_g \lambda,$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, учитывающий, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски; b_g – ширина профиля вершины зерна на рассматриваемом уровне; λ – число зерен, прошедшее через сечение.

При моделировании профиля зерна в простейшем случае параболоидом вращения ширина профиля вершины b_g на уровне h определится:

$$b_g = 2\sqrt{2\rho_g h},$$

где ρ_g – радиус округления при вершине зерна.

Ширина контура вершины, соответствующая данному уровню, при моделировании степенной зависимостью вычисляется по уравнению:

$$b_g = C_b h^m = C_b [t_f - y - u]^m,$$

где коэффициент C_b и показатель степени m определяют экспериментально.

За время $\Delta\tau$ сечение поворачивается на угол $\Delta\varphi$ и через него проходит участок с длиной дуги $V_k \Delta\tau$. Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля b_g будут иметь зерна, вершины которых расположены в слое круга $1 \Delta u V_k \Delta\tau$. Число таких вершин вычисляется по плотности их распределения по глубине инструмента $f(u)$.

Число зерен, прошедших через сечение y за время $\Delta\tau$:

$$\Delta\lambda = V_k n_g f(u) \Delta u \Delta\tau,$$

где n_g – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента;

V_k – окружная скорость инструмента;

$f(u)$ – распределение рабочих зерен инструмента по координате, которое может быть аппроксимировано различными зависимостями, например степенными[7]:

$$f(u) = \frac{(\chi + m - 0.5)}{H_u^{\chi + m - 0.5}} u^{\chi - 1},$$

где χ , m – параметры параболоида вращения; H_u – величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которой подсчитывается число абразивных зерен.

Изменение параметра $a(y, \tau)$ определяется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен:

$$\Delta a(y, \tau) = K_c n_g b_g f(u) \Delta u \Delta\tau,$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, учитывающий, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски.

Получим интегральное уравнение для расчета параметра $a(y, t)$ в зоне контакта:

$$a(y, \tau) = V_k K_c n_g \int_{t_0}^{t_f - y} \int_0^{b_g} f(u) du d\tau,$$

После интегрирования по u и τ :

$$a(t) = \frac{0,78\pi K_c \sqrt{2\rho_g} V_k n_g S_y^2 (t - t_0)^3}{2H_u^{1,5}}, \quad (2)$$

где S_y – величина радиальной подачи; t_0 и t – начальное и текущее время соответственно.

Подставляя (2) в (1), получим выражение, позволяющее рассчитывать вероятность удаления материала при врезном шлифовании:

$$P(M) = 1 - \exp[-a(y, 0) - \frac{0,78\pi K_c \sqrt{2\rho_g} V_k n_g S_y^2 (t - t_0)^3}{2H_u^{1,5}}].$$

Вероятность удаления и вероятность не-удаления материала отражают динамику формирования поверхности. По изменению положения уровней равной вероятности можно судить о пространственных отклонениях обрабатываемой поверхности и об изменении величины слоя, в котором распределена шероховатость.

При прохождении поверхности зоны контакта детали с кругом уровни будут смещаться к центру детали. При этом величина съема детали численно равна смещению уровня с вероятностью удаления $P(M) = \beta_M$ и вычисляется по формуле:

$$P(\bar{M}) = 1 - \exp(-\Theta_M(t - t_0)) / S_y = 1 - P(M) \quad (3)$$

здесь $\Theta_M = \frac{0,78\pi K_c \sqrt{2\rho_g V_k n_g S_y^2}}{2H_n^{1,5}}$.

Для наиболее выступающих зерен

$$\beta_M = 0,9973, t_f = u.$$

Так как процесс протекает при непрерывном контактировании, зависимость (3) может быть переписана:

$$\ln 0,0027 = -\frac{\Theta_M t_f^k}{S_y} \quad (4)$$

На основании равенства (4) получено уравнение:

$$H = \left[-\frac{\ln 0,0027 S_y}{\Theta_M} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (5)$$

Для установившегося процесса шлифования при частном значении коэффициента $k=3$ [1] зависимость (5) может быть переписана

$$H = \left[-\frac{47,3 \cdot S_y H_u^{1,5}}{\pi K_C n_g V_k \sqrt{2\rho_g}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

На основании формулы (6) получена зависимость, позволяющая рассчитывать съем материала при врезном шлифовании

$$\Delta r = t_f - \left[\frac{47,3 \cdot S_y H_u^{1,5}}{\pi K_C n_g V_k \sqrt{2\rho_g}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Полагая, что профиль шлифованной поверхности может быть стационарным случайным процессом с нормальным распределением ординат, получим выражение для оценки значений высотных параметров шероховатости.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a может быть вычислено (см. рис. 2) по площади выступов F_1 и площади впадин F_2 , измеренных от средней линии профиля.

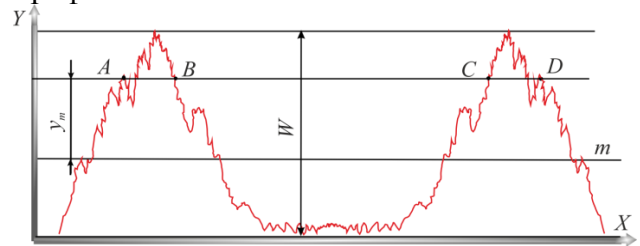


Рис. 2. Профилограмма к вычислению функции распределения ординат профиля обработанной поверхности

Так как

$$dF_1 = t_p dy_m \text{ и } dF_2 = (1 - t_p) dy_m,$$

То

$$R_a = \int_0^{\infty} t_p dy_m + \int_{-\infty}^0 (1 - t_p) dy_m, \quad (8)$$

где l – длина базового участка, мм; y_m – расстояние от точек профиля до его средней линии.

Вычисление R_a по зависимости (8) возможно при использовании численных методов интегрирования.

Зависимость для вычисления R_a упрощается, если считать, что процесс врезного шлифования при обработке одной поверхности является стационарным, при этом справедлив нормальный закон распределения случайных величин.

Тогда математическое ожидание среднего арифметического отклонения профиля пропорционально среднему квадратическому отклонению σ_{y_m} случайных ординат y_m точек профиля можно рассчитать по выражению [2].

$$M(R_a) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} K(0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_{y_m} \quad (9)$$

где $K(0)$ – значение корреляционной функции при интервале $x_2 - x_1 = 0$ равно дисперсии случайной величины y_m .

Для определения среднеквадратического отклонения σ_{ym} вычислим функцию $F_{Y_m}(Y_m)$ и плотность вероятностей $f_{Y_m}(Y_m)$ расстояний Y_m от средней линии до точек профиля шлифованной поверхности.

$$F_{ym}(y_m) = P(y < y_m) = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{l - \sum b_{mi}}{l} = P(M)$$

$$f(y_m) = \frac{3\Theta_M}{S_y} (W_m + y_m)^2 \times \left\{ \exp \left[-\frac{\Theta_M (W_m + y_m)^3}{S_y} \right] \right\} \quad (10)$$

где W_m – расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля

Для нормального процесса при $Y_m = 0$,

$$P(M) = 0,5$$

$$f(y_m) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}}$$

На основании этого вторая часть уравнения (10), выделенная фигурными скобками, равна 0,5, а среднее арифметическое отклонение профиля, учитывая уравнение (9), определяется, как:

$$R_a = \frac{2S_y}{\pi\Theta_M 3W_m^2}$$

Таким образом, при определении R_a необходимо предварительно найти величину W_m . В общем случае она определяется как решение уравнения

$$\Theta_M \sum_{i=0}^n (W_m - \sum_{i=1}^i \Delta Q_i)^{2,5} = \ln 2 \quad (11)$$

Решение уравнения (11) возможно только на основе применения численных методов. Это значительно осложняет вычисление параметров шероховатости поверхности.

Заметим, что формула (9) имеет простой аналитический вид и только вычисление W_m требует применения численных методов.

В работе [2] рекомендовано выражение при ориентировочных расчетах среднего арифметического отклонения профиля:

$$W_m = \frac{H}{2}$$

Тогда выражение для расчета R_a примет вид

$$R_a = \frac{S_y^{\frac{1}{3}}}{6\pi\Theta_M \left(\frac{47,3H_u^{1,5}}{\pi K_C n_g V_k \sqrt{2\rho_g}} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (12)$$

Уравнение (12) отражает физическую природу процесса образования поверхностей и соответствует основным принципам теории размерности.

Комплексным параметром, объединяющим высотные и шаговые параметры шероховатости, является средняя опорная длина профиля. По определению этот параметр совпадает с вероятностью неудаления металла. При $t_f = \text{const}$ формула примет вид:

$$t_{pj} = \exp \left[-\frac{AK_C n_g V_k \sqrt{2\rho_g} S_y^2 t^3}{8H_u^{1,5}} \right]$$

Для получения стохастической модели глубины дефектного слоя рассмотрим зависимость [13]

$$h_j = \alpha(q - q_o) \left(\frac{2h_q}{V_k} \right)^{\varpi} \quad (13)$$

здесь q – бездефектный уровень плотности теплового потока; h_q – полуширина теплового источника; ϖ – коэффициент, определяемый характером тепловыделения, $\varpi = 0,8...0,9$; α – коэффициент, зависящий от теплофизических свойств инструмента и заготовки;

Полуширина теплового источника равна половине высоты зоны контакта:

$$h_q = 0,5\sqrt{t_f D_k} \quad (14)$$

Согласно формуле (7) фактическая глубина резания выражается

$$t_f = \Delta r + \left[\frac{47,3 \cdot S_y H_u^{1,5}}{\pi K_c n_g V_k \sqrt{2\rho_g}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

После подстановки (15) в (14), получим выражение для расчета полуширины теплового источника

$$h_q = 0,5 \sqrt{\Delta r + \left[\frac{47,3 \cdot S_y H_u^{1,5}}{\pi K_c n_g V_k \sqrt{2\rho_g}} \right]^{\frac{1}{3}} D_k} \quad (16)$$

Окончательно подставив (16) в (13) получим модель позволяющую рассчитывать глубину дефектного слоя

$$h_d = \frac{\alpha(q - q_0)}{V_k^{\sigma}} \times \left(\left[-\frac{0,78 \ln \beta_0 S_y H_u^{1,5}}{2\pi K_c n_g V_k \sqrt{2\rho_g}} \right]^{\frac{1}{3}} + \Delta r \right) D_k^{\frac{\sigma}{2}} \quad (17)$$

Формула (17) позволяет прогнозировать изменение глубины дефектного слоя в процессе шлифования.

Выполнилась экспериментальная проверка полученной модели, результаты представлены на рис. 3.

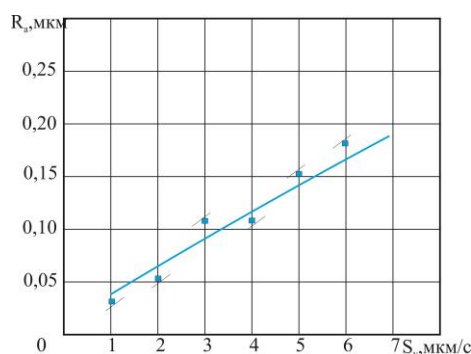


Рис. 3. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от величины радиальной подачи

Выводы

Разработана стохастическая модель процесса врезного шлифования, учитывающая вероятностную природу процесса. Модель позволяет рассчитывать вероятность удаления, съема материала, параметры шероховатости поверхности и глубину дефектного

слоя. На основании этого могут быть построены оптимальные циклы врезного шлифования по скорости съема материала. Проведенная экспериментальная проверка подтвердила адекватность разработанной модели.

Список литературы

1. Абразивно-алмазная обработка и доводочные процессы: справочник; под ред. Масловского А.А. – М.: Машиностроение, 1986. – 196 с.
2. Братан С.М. Оценка параметров качества поверхности при доводке свободным абразивом / С.М. Братан, Д.А. Каинов, С.Е. Сазонов // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вип. 5 (139). – С. 9–15.
3. Братан С.М. Моделирование микрорельефа при шлифовании деталей с износостойкими покрытиями / С.М. Братан // Вестник СевГТУ: серия Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 1998. – Вип. 15. – С. 47–51.
4. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов: изд-во Саратовск. ун-та, 1975. – 127 с.: ил.
5. Кашук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.: ил.
6. Козлов А.М. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом / А.М. Козлов, В.В. Ефремов // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2004. – №1. – С. 59–64.
7. Колесов А.Г., Сазонов С.Е., Братан С.М. Исследования влияния режимов процесса доводки на параметры качества маятников акселерометров // Вестник СевНТУ: сб. науч. тр., Севастополь 2014. Вип. 151. С. 65–73
8. Новиков Ф.В. Условия формирования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке / Ф.В. Новиков, В.П. Ткаченко // Резание и инструмент в технологических системах: межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вип 60. – С. 171–176.
9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
10. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
11. Федосеев О.Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами / О.Б. Федосеев // Известия высш. учебн. заведений: Машиностроение. – 1977. – №5. – С. 104–106.
12. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход / А.П. Хусу, Ю.Р.

Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

13. Якимов А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов [и др.]. – Киев: Техника, 1983. – 182 с.
14. Jackson M.J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
15. Novoselov, Yu. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering, vol. 150 (2016), pp 809-814. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.116.

References

1. Абразивно-алмазная обработка и доводочные процессы: справочник; под ред. Масловского А.А. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 196 с.
2. Bratan S.M. Otsenka parametrov kachestva poverkhnosti pri dovodke svobodnym abrazivom / S.M. Bratan, D.A. Kainov, S.E. Sazonov // Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu: seriia Mashinobuduvannia i mashinostnavstvo. – Donets'k: DonNTU, 2008. – Vip. 5 (139). – S. 9–15.
3. Bratan S.M. Modelirovanie mikrorel'efa pri shlifovanii detalei s iznosostoikimi pokrytiiami / S.M. Bratan // Vestnik SevGTU: seriia Mekhanika, energetika, ekologiia: sb. nauch. tr. – Sevastopol', 1998. – Vyp.15. – S. 47-51.
4. Evseev D. G. Formirovanie svoistv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoi obrabotke / D. G. Evseev. – Saratov: izd-vo Saratovsk. un-ta, 1975. – 127 s.: il.
5. Kashchuk V.A. Spravochnik shlifovshchika / V.A. Kashchuk, A.B. Vereshchagin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 480 s.: il.
6. Kozlov A.M. Formirovanie mikrorel'efa pri obrabotke abrazivnym instrumentom / A.M. Kozlov,

V.V. Efremov // Izvestiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2004. – №1. – S. 59–64.

7. Kolesov A.G., Sazonov S.E., Bratan S.M. Issledovaniia vliianiia rezhimov protsessa dovodki na parametry kachestva mahtnikov akselerometrov// Vestnik SevNTU: sb. nauch. tr., Sevastopol' 2014. Vyp. 151. S. 65-73
8. Novikov F.V. Usloviia formirovaniia sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoi obrabotke / F.V. Novikov, V.P. Tkachenko // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: mezhd. nauchn.-tekhn. sbornik. – Khar'kov: KhGPU, 2001. – Vyp 60. – S. 171–176.
9. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 s.
10. Ostrovskii V.I. Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniia / V.I. Ostrovskii. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1981. – 144 s.
11. Fedoseev O.B. Shlifovanie sinteticheskimi sverkhtverdymi materialami / O.B. Fedoseev // Izvestiia vyssh. uchebn. zavedenii: Mashinostroenie. – 1977. – №5. – S. 104–106.
12. Khusu A.P. Sherokhovatost' poverkhnostei. Teoretiko-veroiatnostnyi podkhod / A.P. Khusu, Iu.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov. – M.: Nauka, 1975. – 344 s.
13. Iakimov A.V. Upravlenie protsessom shlifovaniia / A.V. Iakimov [i dr.]. – Kiev: Tekhnika, 1983. – 182 s.
14. Jackson M.J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
15. Novoselov, Yu. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering, vol. 150 (2016), pp 809-814. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.116.

УДК 621.914.02

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКИ ТРУБ ОТРЕЗНЫМИ КРУГАМИ

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

Аннотация

Получены аналитические выражения, определяющие зависимости контактной температуры от технологических условий абразивной резки. При этом учтено влияние самой температуры на теплофизические характеристики и интенсивность напряжений в разрезаемом сечении реза заготовки; учтено трение связки круга о разрезаемую поверхность трубы. С учетом влияния температуры на теплофизические характеристики материала заготовки установлены и проанализированы аналитические выражения, определяющие температуру при движении сплошного и дискретного источников тепла. Установлено, что положение зерен в пространстве определяется приближенно с заданной точностью; минимальные расстояния между соседними зернами принимаются равными между собой; температурные деформации зоны контакта, неровностей поверхности, режущих кромок пренебрежимо малы.

Ключевые слова: температура, поверхностный слой, связка круга, теплофизические характеристики, сплошной и дискретный источники тепла.

TO DETERMINING LONGITUDINAL AND TRANSVERSE TRACTION COEFFICIENT TYRES ROADWAY UNDER EXAMINATION AUTOTECHNICAL ACCIDENT

Е.А. Levchenko¹, N.I. Pokintelitsa¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The analytical expressions for the temperature dependence of the contact from the technological and logical conditions of the abrasive cutting. This is considered the most influence of temperature on the thermal hatics and the intensity of the stresses in the cut section of the cut blanks; taken into account the friction circle bundles of the cut surface of the pipe. Taking into account the effect of temperature on the thermal characteristics of the material workpiece mounted and analyzed by analytical expressions for the temperature at the movement of the continuous and discrete heat sources. It is found that the position of the grains in the space is determined approximately with a predetermined accuracy; the minimum distance between adjacent grains are made equal to each other; thermal deformation of the contact zone, the surface roughness, cutting edges are negligible.

Keywords: temperature, surface layer, round ligament, thermal characteristics, continuous and discrete heat sources.

Введение

Абразивная резка трубных заготовок отрезными кругами сопровождается большим выделением теплоты, которая оказывает существенное влияние как на производительность процесса, так и на качество реза. Особенно важное значение это имеет при резке заготовок из труднообрабатываемых материалов, для которых этот способ обработки в ряде случаев является единственно возможным.

Как показал ряд исследований [1-15], контактная температура при резке труб может достигать 400...800 С. Высокая температура разогревает металл в зоне резания и может изменять в значительной степени условия и режимы резки. Особенно важным является то, что с достижением определенной для каждой марки стали температуры её пределы прочности и упругости начинают резко снижаться, что позволяет повысить производительность резки за счет увеличения скорости подачи трубных заготовок. Однако из-за отсутствия научно-

обоснованного метода проектирования технологии абразивной резки, особенно по выбору оптимальных режимов резки, широкое внедрение этого способа пока сдерживается.

Нагрев при абразивной резке протекает неравномерно. Наибольшее количество теплоты выделяется в месте контакта и распространяется путем теплопроводности в массу абразивного круга и трубы. Кроме того, наблюдаются потери теплоты путем конвекции и лучеиспускания. Общая картина явлений, усложняется еще и тем, что величины коэффициентов температуропроводности, теплопроводности, конвекции и лучеиспускания изменяются в зависимости от температуры [3-6].

Трение абразивного круга и заготовки в процессе резания на большой скорости приводит к образованию высокой температуры в зоне резания. Максимальная температура концентрируется впереди режущего инструмента при внедрении его врезаемый материал [8-10]. Изменяя частоту вращения отрезного круга можно регулировать интенсивность нагрева зоны резания.

Результаты и обсуждение

Температуру, возникающую в любой точке поверхности отрезного круга и в любой момент времени, после того как круг совершил некоторое количество резов можно определить по формуле:

$$\Theta = \Theta_{\max} \varphi, \quad (1)$$

где Θ – расчетная температура, °C; $\Theta_{\max}$ – максимальная температура для данных условий резки, являющаяся размерной частью уравнения; φ – безразмерная функция, изменяющаяся от 0 до 1 и зависящая от координат рассматриваемой точки и теплофизических свойств изделия, времени наблюдения, длины хода и скорости движения источника тепла.

Максимальная температура определяется по формуле:

$$\Theta_{\max} = \frac{2q\sqrt{b_1}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y}}, \quad (2)$$

где q – интенсивность источника тепла; b_1 – ширина рабочей кромки круга; $c\gamma$ и a – соответственно удельная теплоемкость и температуропроводность материала заготовки; S_y – радиальная подача круга.

Выражение (2) можно использовать для расчета $\Theta_{\max}$ и Θ лишь в том случае, если контакт между кругом и заготовкой является сплошным, а не дискретным, как это имеет место на самом деле.

Действительный контакт абразивного круга с заготовкой представляет собой суммарную площадь отпечатков отдельных зерен (рис.1), расположенных на площади S . Это приводит к необходимости ввести в расчетные температурные выражения поправку на дискретность контакта круга с заготовкой в виде коэффициента μ .

Абразивные зерна беспорядочно располагаются на рабочей поверхности отрезного круга. Однако для расчета коэффициента μ , учитывающего дискретность, принимаем в первом приближении, что зерна расположены в виде упорядоченных рядов, как это показано на рис. 1.

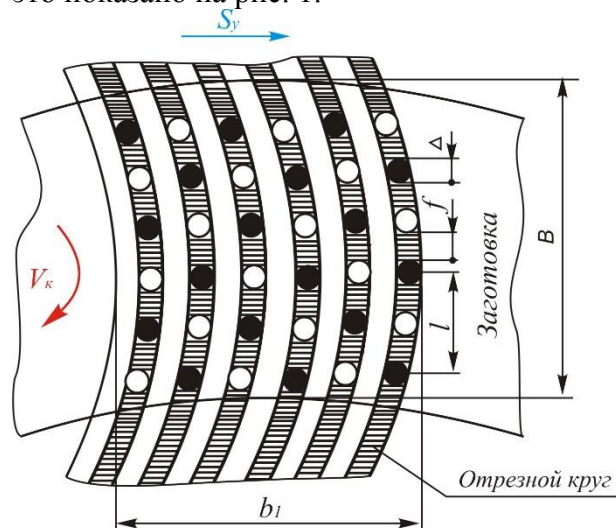


Рис. 1. Схема расположения абразивных зерен на площадке контакта круга с заготовкой

Известно, что зерна даже одного номера зернистости имеют различные форму и размеры. Вместе с тем, Д. Б. Ваксер показал, что рассеивание основных их размеров близко к закону нормального распределения, а это обстоятельство позволяет обос-

нованно определять наиболее вероятные размеры зерен.

Часть зерен на (рис. 1) изображена в виде черных кругов – это активные зерна, а часть – в виде белых – пассивные зерна. Это показывает, что половина общего числа зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, является активными [4]. Поскольку скорость круга V_k достаточно велика (80 м/с) и, кроме того, она значительно превосходит радиальную подачу S_y то полагаем, что активные зерна создают в направлении вектора V_k сплошные концентрические полосы (рис. 1), каждая из которых имеет ширину Δ , равную среднему размеру зерен.

Пусть на 1 см² рабочей поверхности круга расположено n зерен, тогда на контактной площадке будет nBb_1 зерен. Найдем число полос N_1 шириной Δ , расположенных на длине источника тепла (ширине кромки круга) b_1 ,

$$N_1 = \frac{b}{\Delta + f}, \quad (3)$$

где f – промежуток между зернами.

Число участков N_2 , расположенных вдоль толщины стенки заготовки B , определяется так:

$$N_2 = \frac{B}{\Delta + f}. \quad (4)$$

Очевидно, произведение

$$nBb_1 = N_1 N_2 = \frac{Bb_1}{(\Delta + f)^2},$$

откуда

$$\Delta + f = \frac{\sqrt{n}}{n}, \quad (5)$$

и

$$N_1 = b_1 \sqrt{n}. \quad (6)$$

В (табл. 1) приведены взятые из различных литературных источников данные о количестве абразивных зерен n на 1 см² рабочей поверхности отрезного круга, средние значения n (эти значения использова-

лись в наших выкладках), а также величины N_1 и расстояния между активными зернами l , рассчитанные по формуле (7) и по эмпирической формуле Е.Н. Маслова [4].

Из (рис. 1) с учетом (5) получим:

$$l = 2(\Delta + f) = \frac{2\sqrt{n}}{n} = \frac{2}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Сравнение расстояний l , рассчитанных по (7) и по эмпирической зависимости Е. Н. Маслова [8], показывает, что их значения достаточно близки. Это дает основание предполагать, что схема, представленная на рис. 1, удовлетворительно моделирует расположение абразивных зерен на рабочей поверхности абразивного круга.

На рис. 2 показан график изменения температуры в разных точках заготовки при движении сплошного и дискретного источников тепла.

Если источник сплошной, то при его движении происходит монотонное нарастание температуры до того момента, пока он полностью не пройдет над рассматриваемой точкой заготовки. В этот момент температура достигает максимума, а потом начинает падать по экспоненциальному закону.

При движении дискретного источника тепла нарастание температуры носит пилообразный характер (если промежуток f по величине таков, что за время $\tau = \frac{f}{S_y}$ рас-

сматриваемая точка заготовки успеет остыть до исходной температуры, то общего нарастания Θ не будет).

Произведем сравнение максимальных температур $\Theta_{1\max}$ и $\Theta_{2\max}$ возникающих в точке O при движении соответственно сплошного и дискретного источников тепла.

Таблица 1. Расчетные данные

Зернистость круга (ГОСТ 3647-59)	Количество зе- рен n на 1 см2 рабочей боковой поверхности от- резного круга	Среднее значение n	Количество зерен при $b_1 = 1$ см	Расстояние между активными зернами l , мм	
				Расчетные данные по выраже- нию (7)	по формуле Е.Н. Маслова
40	360 ¹	410	20	0,99	1,25
	250 ²				
	740 ³				
	280 ⁴				
	530 ⁵				
	368 ⁶				
	340 ⁷				
30	890 ¹	870	30	0,68	0,87
	630 ²				
	1550 ³				
	530 ⁴				
	990 ⁵				
	910 ⁶				
	600 ⁷				
24	1190 ¹	1560	40	0,51	0,56
	1720 ²				
	1930 ³				
	1100 ⁴				
	2340 ⁵				
	110 ⁷				
1 по данным П.Е. Дьяченко. 2 по данным Н.Н. Волского. 3 по данным Е.Н. Маслова. 4 по данным Л.А. Глейзера. 5 по данным Г.М. Ипполитова. 6 по данным С.А. Попова. 7 по данным С.Г. Редько					

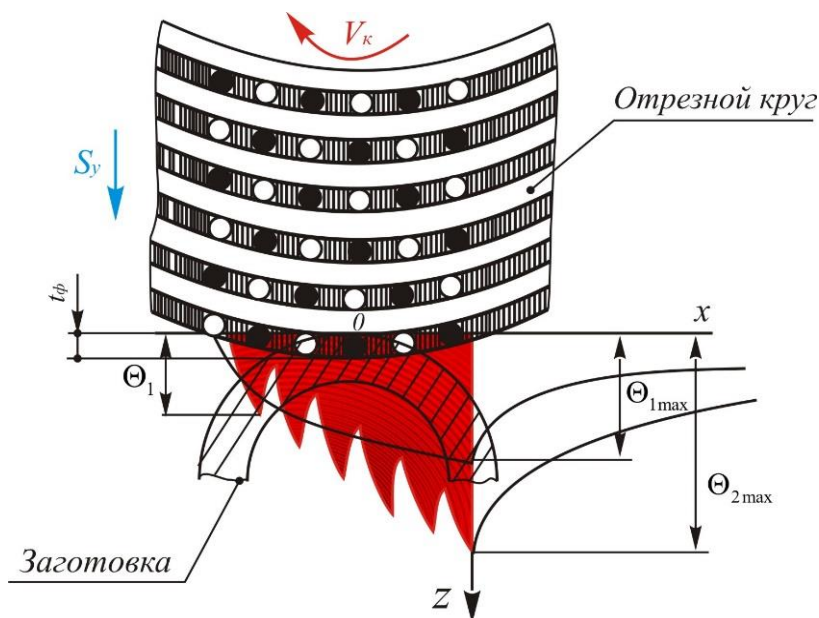


Рис. 2. Температурный график при движении сплошного и дискретного источников тепла

Интенсивность тепловых потоков, поступающих в заготовку в обоих случаях, можно рассчитать по следующим формулам:

$$q_1 = \frac{P_z \cdot V_\kappa \cdot \omega_1}{I \cdot B \cdot b_1}; \quad (8)$$

$$q_2 = \frac{P_z \cdot V_\kappa \cdot \omega_2}{I \cdot B \cdot \Delta N_1}, \quad (9)$$

где P_z – касательная составляющая силы резания; I – тепловой эквивалент работы; ω_1 и ω_2 – доли от общего количества тепла, переходящего в заготовку при движении сплошного и дискретного источников тепла соответственно.

Значения ω_1 и ω_2 рассчитываются следующим образом [2]:

$$\omega_1 = \frac{1}{1 + R \sqrt{\frac{V_\kappa \cdot b}{S_y \cdot B}}};$$

$$\omega_2 = \frac{1}{1 + R \sqrt{\frac{V_\kappa \cdot \Delta}{S_y \cdot B}}},$$

где $R = \frac{k_\omega c_1 \gamma_1 \sqrt{a_1}}{c \gamma \sqrt{a}}$ ($k_\omega = 2$ поправочный коэффициент).

Температуры $\Theta_{1\max}$ и $\Theta_{2\max}$ определяем по (2). Подставив вместо q значения q_1 и q_2 получим:

$$\Theta_{1\max} = \frac{2q_1 \sqrt{b_1}}{c \gamma \sqrt{\pi a S_y}} = \frac{2P_z V_\kappa \sqrt{b_1 \cdot \omega_1}}{c \gamma \sqrt{\pi a S_y I \cdot B \cdot b_1}} = \frac{k \omega_1}{\sqrt{b_1}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Theta_{2\max} &= \frac{2q_2 \sqrt{\Delta}}{c \gamma \sqrt{\pi a S_y}} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt{\xi_i} - \sqrt{\xi_i - 1}) = \\ &= \frac{2P_z V_\kappa \sqrt{\Delta \cdot \omega_2}}{c \gamma \sqrt{\pi a S_y I \cdot B \cdot \Delta N_1}} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt{\xi_i} - \sqrt{\xi_i - 1}) = \\ &= \frac{k \omega_2}{N_1 \sqrt{\Delta}} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt{\xi_i} - \sqrt{\xi_i - 1}). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } k = \frac{2P_z V_\kappa}{c \gamma \sqrt{\pi a S_y I \cdot B}}.$$

В уравнении (11) выражение, стоящее под знаком суммы, учитывает аккумуляцию тепла в заготовке [1], являющегося результатом движения каждого из элементарных источников шириной Δ . При этом ξ является безразмерным критерием, определяемым отношением по формуле:

$$\xi = \frac{S_y t}{b_1},$$

где t – время движения круга на величину t_ϕ (рис. 2).

Так как $S_y t = b_1$, то $\xi = \frac{b_1}{\Delta}$. Пользуясь (8), представим величину b_1 уравнением:

$$b_1 = N_1 (\Delta + f).$$

Тогда, полагая, что $f / \Delta = \delta$, будем иметь:

$$\xi_1 = \frac{N_1 (\Delta + f)}{\Delta} = N_1 (1 + \delta);$$

$$\xi_2 = (N_1 - 1)(1 + \delta);$$

$$\xi_3 = (N_1 - 2)(1 + \delta);$$

$$\xi_i = (N_1 - i + 1)(1 + \delta).$$

Из табл. 1 видно, что $N_1 = 20 \div 40$, это позволяет упростить последнее выражение:

$$\xi_i = (N_1 - i)(1 + \delta) \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в (11), получим:

$$\Theta_{2\max} = \frac{k \omega_2}{N_1 \sqrt{\Delta}} \sum_{i=1}^{N_1} \left| \sqrt{(N_1 - i) \cdot (1 + \delta)} - \sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta) - 1} \right| \quad (13)$$

Определим коэффициент:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\Theta_{2\max}}{\Theta_{1\max}} = \frac{\omega_2}{\omega_1 N_1} \sqrt{\frac{b}{\Delta}} \times \\ &\times \sum_{i=1}^{N_1} \left[\sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta)} - \sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta) - 1} \right]. \end{aligned}$$

Так как $b/\Delta = N_1(1+\delta)$, то окончательное выражение для расчета μ имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{\omega_2 \sqrt{1+\delta}}{\omega_1 \sqrt{N_1}} \times \sum_{i=1}^{N_1} \left[\sqrt{(N_1-i)(1+\delta)} - \sqrt{(N_1-i)(1+\delta)-1} \right]$$

Таким образом, расчетная температурная зависимость, согласно уравнению (1), может быть представлена так:

$$\Theta = \frac{2q\mu\sqrt{b_1}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y}} \varphi. \quad (14)$$

Номограмма для определения коэффициента μ в зависимости от безразмерного комплекса $R = \frac{k_{\omega} c_1 \gamma_1 \sqrt{a}}{c\gamma\sqrt{a}}$ отношения V_k/S_y и зернистости круга показана на рис. 3. Как видно из рис.3, с увеличением R , отношения скорости и радиальной подачи круга и с уменьшением зернистости круга значения μ возрастают.

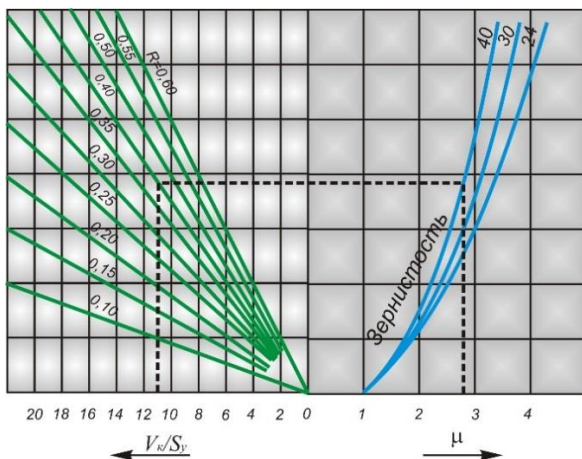


Рис. 3. Номограмма для определения коэффициента, учитывающего дискретность контакта между кругом и трубной заготовкой

Выводы

Процессы формирования температурного поля в зоне контакта инструмента и заготовки достаточно сложны. Каждое зерно, пробегая со скоростью круга дугу контакта, возбуждает в металле высокотемпературные

вспышки, наложение которых друг на друга образует температурный фон, который со временем стабилизируется, образуя постоянную составляющую температурного поля. Для обеспечения заданного качества поверхностного слоя трубных заготовок размер площадок износа абразивных зерен не должен превышать величины, при которой температура поверхностного слоя становится равной предельно допустимой.

Список литературы

1. Грабченко А.И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: учебн. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 364 с.
2. 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.
3. Козлов А.М. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом / А.М. Козлов, В.В. Ефремов // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2004. – №1. – С. 59–64.
4. Левченко Е.А. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной разрезке 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.
5. Новоселов Ю.К. Экспериментальное исследование состояния поверхностного слоя трубных заготовок при абразивной разрезке / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С.392 – 397.
6. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной разрезке 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.
7. 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.

8. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
9. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования / И.П. Никифоров // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2003. – №6. – С. 64–72.
10. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин: учеб. пособие / А.В. Якимов [и др.]. – О.: ОГПУ, 1997. – 272 с.
11. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
12. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов // – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
13. Суров С.П. Тепловые явления при разрезании абразивными кругами (дисками). / С.П. Суров// – Тр. УралВНИИАШ. – Челябинск, 1968. – Вып. 1. – С 164 – 169.
14. Якимов А.В. Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин / А.В. Якимов [и др.]. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 272 с.
15. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.: Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
- transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – С. 57 – 61.
5. Novoselov Iu.K. Eksperimental'noe issledovanie sostoianiia poverkhnostnogo sloia trub-nykh zagotovok pri abrazivnoi razrezke / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2012. – Vip. 30. – S.392 – 397.
6. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie osobennosti raboty bokovykh poverkhnosti 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. – С. 114 – 117.
7. Novoselov Iu.K. Analiticheskii raschet elementov konstruktсии bokovykh poverkhnosti otreznykh krugov / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2011. – Vip. 28. – S.27–31.
8. Maslov E.N. Teoriia shlifovaniia materialov / E.N. Maslov. – М.: Mashinostroenie, 1974. – 320 s.
9. Nikiforov I.P. Stokhasticheskaia model' protsessа shlifovaniia / I.P. Nikiforov // Izve-stiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2003. – №6. – S. 64–72.
10. Osnovy teorii teplovykh iavlenii pri shlifovanii detalei mashin: ucheb. posobie / A.V. Iakimov [i dr.]. – О.: ОГПУ, 1997. – 272 s.
11. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnosti pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol: Izd-vo SenNTU, 2012. – 304 s.
12. Sipailov V.A. Teplovy protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti / V.A. Sipailov // – М.: Mashinostroenie, 1978. – 167 s.
13. Surov S.P. Teplovy iavlenii pri razrezanii abrazi-vnymi krugami (diskami). / S.P. Su-rov// – Tr. UralVNIASH. – Cheliabinsk, 1968. – Vyp. 1. – S 164 – 169.
14. Iakimov A.V. Osnovy teplovykh iavlenii pri shlifovanii detalei mashin / A.V. Iakimov [i dr.]. – Odessa: ОГПУ, 1997. – 272 s.
15. Iakimov A.V. Teplofizika mekhanicheskoi obrabotki / A.V. Iakimov, P.T. Slobodianik, A.V. Usov. – К.: Odessa: Lybid, 1991. – 240 s.

References

1. Grabchenko A.I. 3D modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shli-fovaniia: uchebn. posobie / A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, V.A. Fedorovich. – Khar'kov: NTU "KhPI", 2006. – 364 s.
2. Kalinin E. P. Teoriia i praktika upravleniia proizvoditel'nost'iu abrazivnoi obrabotki s uchetom zatupleniia instrumenta: dis. na so-skание nach. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Tekhnologiia i oborudovanie mekha-nicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki» / E.P. Kalinin. – Rybinsk, 2006. – 414 s.
3. Kozlov A.M. Formirovanie mikrorel'efa pri obrabotke abrazivnym instrumentom / A.M. Kozlov, V.V. Efremov // Izvestiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2004. – №1. – S. 59–64.
4. Levchenko E.A. Analiz zakonomernosti uda-lenii metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta

УДК 621.923

УПРАВЛЕНИЕ УПРУГИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ НЕЖЁСТКИХ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ-ОБРАБОТКЕ

В. А. Носенко¹, В. Н. Тышкевич¹, А. В. Саразов¹, С. В. Орлов¹

¹ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет. Волжский политехнический институт (филиал) ВолГТУ», г. Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация

Аннотация

Представлены алгоритмы и математические модели для определения упругой деформации подшипниковых колец при закреплении и механической обработке. Для определения упругих деформаций при изгибе кольца используется теория стержней малой кривизны. Максимальная упругая деформация кольца при изгибе определяется методом Мора. Статическая неопределимость кольца раскрывается методом сил. Сопоставляются аналитические решения с результатами расчетов МКЭ и экспериментальными исследованиями. Анализ формы поверхности нежестких колец сделан на примере наружных колец конического однорядного роликоподшипника.

Определяются условия обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника, учитывающие осевую деформацию кольца под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания. Представлены алгоритм и методика определения оптимальных условий шлифования торцевой поверхности колец крупногабаритных подшипников, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности (R_a , допуск плоскостности, отсутствие шлифовочных прижогов) при максимальной производительности процесса.

Ключевые слова: кольцо подшипника, упругая деформация, механическая обработка

THE CONTROL ELASTIC DEFORMATIONS OF NON-RIGID BEARING RINGS WHEN FIXING AND MACHINING

V. A. Nosenko¹, V.N. Tyshkevich¹, A.V. Sarazov¹, S.V. Orlov¹

1 Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation

Abstract

Algorithms and mathematical models for determination of elastic deformation of bearings rings when fixing and machining are presented. The theory of small curvature bars is used for determination of elastic deformations at the bending of ring. Maximal elastic deformation of rings at the bending of ring is determined the method of More. The statistical uncertainty is expanded with the method of forces. Analytical decisions are compared with the results of calculations of FEM and experimental researches. The shape of the surfaces of the nonrigid rings was analyzed with the example of the outer rings of a conical single-row roller bearing.

The terms of providing of the required flatness tolerance of end surface are determined for bearing ring, taking into account axial deformation of the ring under the magnetic field effect on the machine table and the radial component of the grinding force. Algorithm and method for determination of optimum terms grinding of end surface is presented for big bearing rings, providing the receipt of the set requirements to quality of the treated surface (R_a , required flatness tolerance, absence of grinder burns) at the maximum cutting efficiency of process.

Keywords: bearing ring, elastic deformations, machining

Введение

При механической обработке нежестких деталей необходимо учитывать упругие деформации, возникающие от усилий за-крепления и резания. Отклонения формы

(отклонения от плоскостности, круглости, цилиндричности) деталей от упругой де-формации во многих случаях значительно превышают погрешности, вызванные бие-нием шпинделей, неточностью установки и другими факторами. Опыт изготовления ко-

лец прецизионных подшипников и колец подшипников малой жёсткости показывает, что современная технология шлифовальной обработки не может разрабатываться без учета жёсткости деталей и упругой деформации в процессе обработки [1-4].

Осевые упругие деформации колец при обработке торцовых поверхностей обусловлены наличием начальных отклонений от плоскостности и изогнутости торцов после термообработки или механической обработки поверхностей колец. Осевые упругие деформации существенно усложняют процесс шлифования, так как под действием магнитного поля стола станка и силы резания кольцо получает упругую деформацию. После шлифования и снятия магнитного поля в результате упругих деформаций определенные отклонения от плоскостности возвращаются. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки и стоимость операции [1]. При закреплении кольца в кулачковых патронах и растачивании внутренней или наружной поверхности под действием усилий зажима и резания появляются радиальные деформации. Поверхность обрабатывается в деформированном состоянии и после снятия усилий зажима поверхность приобретает отклонение от круглости и цилиндричности. Для обеспечения требуемых допусков круглости, цилиндричности необходимы дополнительные операции.

Управление величиной осевой и радиальной упругой деформации позволит

уменьшить время и стоимость операции при гарантированном обеспечении геометрической точности детали.

Результаты и обсуждение

Цели исследований: исследование влияния упругих деформаций на отклонение от формы колец; разработка математических моделей и алгоритмов для определения упругих деформаций под действием усилий зажимных устройств и усилий резания; расчёт упругих деформаций МКЭ; экспериментальные исследования упругих деформаций; определение условий, обеспечивающих получение заданного допуска отклонения от формы с учетом упругой деформации при закреплении и механической обработке; разработка рекомендаций по совершенствованию технологического процесса с управлением величиной упругих деформаций.

Исследование влияния осевых упругих деформаций от усилий зажима и резания на отклонение от плоскостности при плоском шлифовании торцовых поверхностей на станке с круглым магнитным столом проведены для наружных колец крупногабаритного конического однорядного роликоподшипника У-7866А.01, 1077756.01 [5-9].

Геометрические параметры колец и размеры показаны на рис. 1 и в табл. 1.

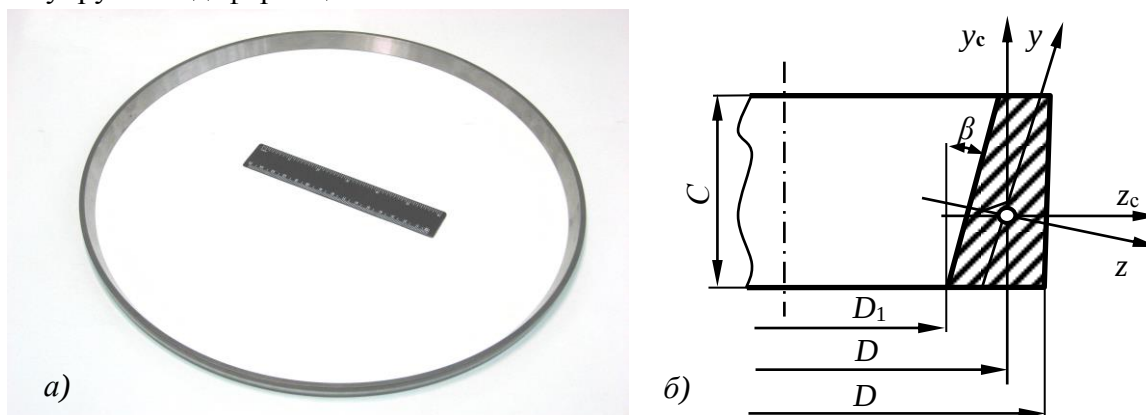


Рис. 1. Исследуемое кольцо (а) и поперечное сечение кольца (б)

Таблица 1. Геометрические параметры исследуемых колец

Кольцо	D , мм	D_1 , мм	C , мм	β , град	r , мм	I_{zc} , мм ⁴	I_z , мм ⁴	I_y , мм ⁴	α_1	α_2
У-7866А.01	375	358	18	15,0	184,2	2939	3001	431	64	0,05
1077756.01	460	401	62	12,7	218,4	432500	439000	63610	22	0,13

В табл. 1: D , D_1 , C – соответственно наружный, внутренний диаметры и ширина кольца; β – угол конусности; $r = D_0/2$ – соответственно радиус и диаметр центральной оси кольца, проходящей через центр тяжести поперечного сечения; I_{zc} , I_{yc} и I_z , I_y – осевые моменты инерции относительно центральных осей z_c , y_c поперечного сечения кольца и главные центральные моменты инерции (рис. 1, б); α_1 , α_2 – коэффициенты для оценки применимости теории стержней малой кривизны.

Анализ формы торцевой поверхности колец перед операцией шлифования проведен на трехкоординатной измерительной машине Millenium.

На рис. 2 приведены результаты исследования одного из колец. Макроотклонения от плоскостности имеет шесть выраженных волн. Обработка данных показала, что при первоначальном трех опорном контакте поверхностей стола и торца кольца среднее значение углов между точками касания с вероятностью 0,95 составляет $120^\circ \pm 16^\circ$.

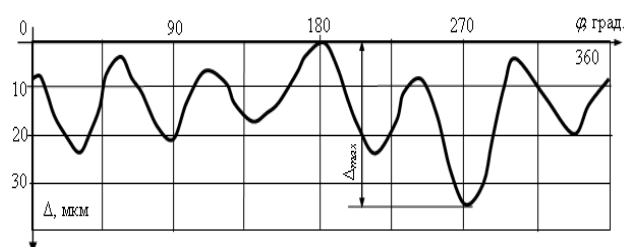


Рис. 2. Форма макроотклонений от плоскостности торцов кольца после закалки (кольцо конического однорядного роликоподшипника 1077756.01)

Исходя из этого, в расчетной схеме (рис. 3, а) принято, что кольцо касается стола в трех точках, расположенных на равных расстояниях по периметру кольца.

Кольцо нагружено сосредоточенной силой P_y (от действия шлифовального круга) и равномерно распределённой нагрузкой $q = q_c + q_m$ (от действия магнитного поля стола станка q_c и массы кольца q_m), перпендикулярными плоскости кольца.

Максимальная осевая деформация при закреплении заготовки кольца магнитным полем стола будет равна:

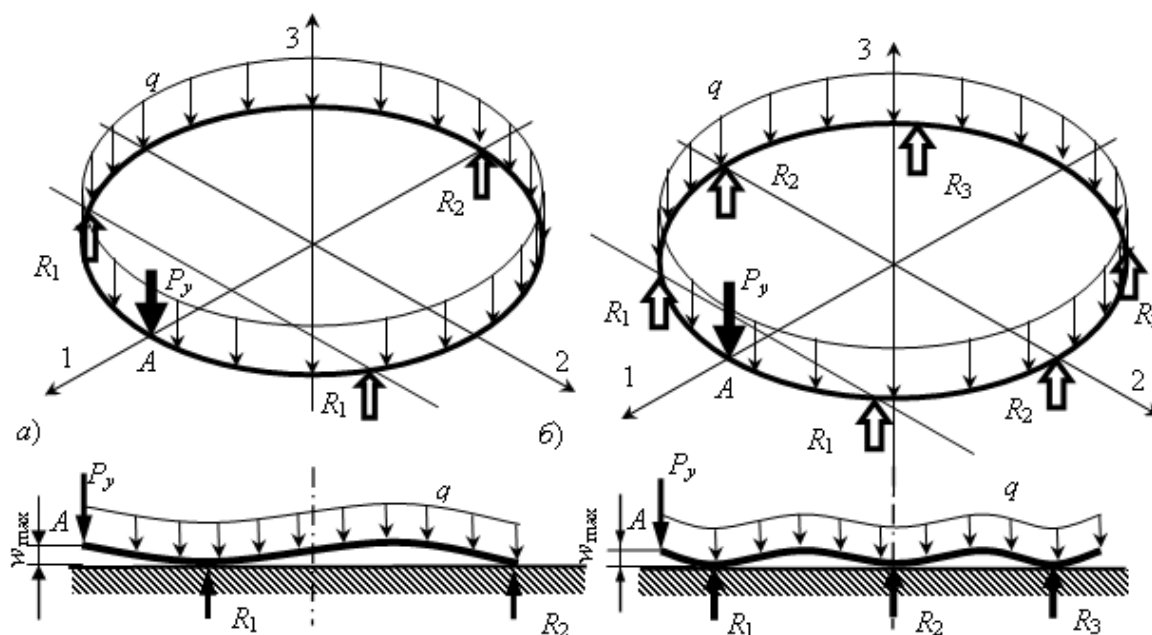


Рис. 3. Расчетные схемы для определения максимальной осевой деформации кольца w_{max} при трёх (а) и шести (б) опорном контакте со столом

$$w_q = w_m + w_{q\max} + w_{qk},$$

где w_m , $w_{q\max}$ – максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе, соответственно под действием массы заготовки и магнитного поля стола; w_{qk} – контактная деформация торцевой поверхности кольца с плоскостью стола.

При шлифовании торца к осевой деформации добавляется максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе $w_{p\max}$ под действием радиальной составляющей силы резания, приложенной в центре пролёта между опорами, и контактная деформация торцевой поверхности кольца с плоскостью стола w_{pk} :

$$w_p = w_{p\max} + w_{pk}.$$

Контактную деформацию гладкой поверхности стола и шероховатой волнистой торцевой поверхности заготовки кольца определяли методом Н. Б. Дёмкина [10]. Проведённая оценка величины контактных деформаций позволяет сделать вывод, что её величина для исследуемых колец при наибольших нагрузках не превышает трёх процентов допуска плоскостности. В связи с этим в дальнейших расчетах влияние контактных деформаций не учитывали. Экспериментальные исследования осевых деформаций колец под действием магнитного поля стола подтверждают это предположение.

Из таблицы следует, что для рассматриваемых колец $\alpha_1 = 2\pi r/C > 10$, $\alpha_2 = 0,5(D - D_1)/r < 0,2$. Выполнение данного условия позволяет использовать для определения максимальных осевых упругих деформаций при изгибе кольца $w_{p\max}$ и $w_{q\max}$ теорию стержней малой кривизны.

Максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе $w_{p\max}$ и $w_{q\max}$ определяется методом Мора. Статическая неопределимость кольца раскрывается методом сил [5-8].

В общем случае главные центральные оси поперечного сечения кольца z и y могут быть наклонены по отношению к плоскости

кольца (рис. 1, б). Для облегчения дальнейших вычислений целесообразно ввести вспомогательные коэффициенты: $\eta_y = I_{yc}/I_{zc}$; $\eta_{zy} = I_{yczc}/I_{zc}$; $\eta_k = EI_y I_z / (GI_{zc} I_k)$;

где I_k – момент инерции сечения при кручении; I_{yc} , I_{zc} , I_y , I_z , I_{yczc} – осевые и центробежные моменты инерции; E , G – модули нормальной упругости и сдвига материала кольца.

При раскрытии статической неопределимости методом сил разрез кольца располагаем в плоскости симметрии, в точке А (рис. 3), что позволяет использовать свойства симметрии и достаточно определить один неизвестный изгибающий момент [5-8].

Окончательные выражения для максимальной осевой деформации кольца при трёх-, четырёх-, пяти- и шестиопорном контакте торцевой поверхности кольца с поверхностью стола:

$$w_{q3} = w_{q\max 3} + w_{m3} = Ar(63\eta_y + 7\eta_k)(q_c + q_m); \quad (1)$$

$$w_{p\max 3} = A(96\eta_y + 16\eta_k)P_y; \quad (2)$$

$$w_{q4} = w_{q\max 4} + w_{m4} = Ar(18\eta_y + 1,1\eta_k)(q_c + q_m); \quad (3)$$

$$w_{p\max 4} = AP_y(46\eta_y + 6\eta_k); \quad (4)$$

$$w_{q5} = w_{q\max 5} + w_{m5} = Ar(7\eta_y + 0,28\eta_k)(q_c + q_m); \quad (5)$$

$$w_{p\max 5} = AP_y(26\eta_y + 3,2\eta_k); \quad (6)$$

$$w_{q6} = w_{q\max 6} + w_{m6} = Ar(3,3\eta_y + 0,1\eta_k)(q_c + q_m); \quad (7)$$

$$w_{p\max 6} = AP_y(16\eta_y + 2\eta_k); \quad (8)$$

$$\text{где} \quad A = \frac{r^3 I_{zc}}{EI_z I_y 10^3}.$$

С учетом изменения количества опор при закреплении кольца магнитным полем стола станка осевая упругая деформация будет равна:

$$w_q = y_i + w_{qi}, \quad (9)$$

где y_i – уровень (мкм), соответствующий i -му количеству опор (y_3 принимаем равным нулю, рис. 4); w_{qi} – осевая деформация при i опорах, $3 \leq i \leq 6$.

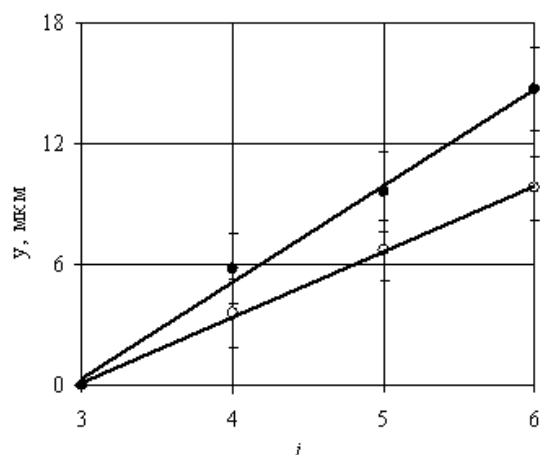


Рис. 4. Распределение вершин макроотклонений по высоте профиля: ○ – кольцо 1077756.01; ● – кольцо Y-7866A.01

Алгоритм вычисления максимальной осевой упругой деформации кольца под действием магнитного поля стола и массы кольца по (9) приведён на рис. 5.

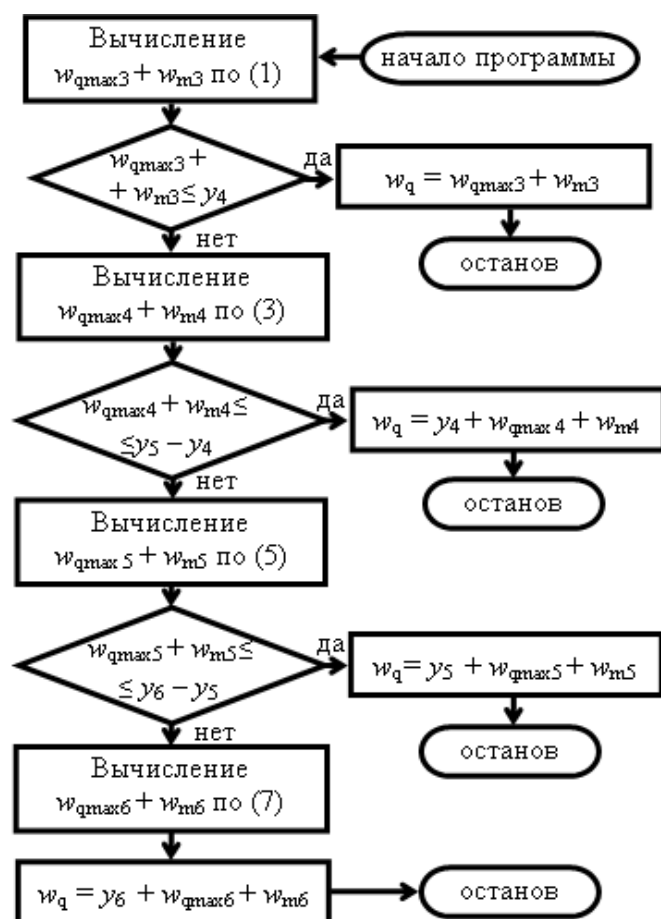


Рис. 5. Алгоритм вычисления максимальной осевой упругой деформации кольца под действием магнитного поля стола станка и массы кольца

Максимальная осевая упругая деформация при закреплении кольца магнитным по-

лем стола станка и действии радиальной составляющей силы резания с учетом изменения количества опорных контактов будет равна:

$$w_{\max} = y_i + w_{qi} + w_{pi}. \quad (10)$$

Для расчета допустимой осевой упругой деформации кольца предложена следующая формула:

$$[\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_m,$$

где $\lambda = 0,75$ – коэффициент запаса точности; Δ – допуск плоскостности торцевой поверхности на операции шлифования; Δ_m – допуск плоскостности при шлифовании жёсткой заготовки, определяемый из справочной литературы.

Применимость магнитного поля стола для закрепления заготовки кольца определяется условием:

$$w_q \leq [\Delta]. \quad (11)$$

При $w_q > [\Delta]$ кольцо на столе станка закрепляется с помощью упоров.

Как показывает практика, получение требуемой шероховатости торцевой поверхности кольца подшипника возможно без использования выхаживания/ Выхаживание применяют для обеспечения допуска плоскостности. Основное время обработки возрастает при этом в среднем на 40% [2-3].

При закреплении заготовки кольца магнитным полем стола возможность шлифования без выхаживания определена неравенством:

$$w_q + w_p \leq [\Delta]. \quad (12)$$

При шлифовании заготовки кольца с закреплением упорами возможность шлифования без выхаживания определена неравенством:

$$w_p + w_m \leq [\Delta]. \quad (13)$$

В условиях (11) - (13) используются математические модели упругих осевых деформаций кольца (1) - (8).

Разработан алгоритм (рис. 6) и методика выбора оптимальных условий плоского шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников из стали ШХ15 обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной

поверхности (параметр шероховатости поверхности Ra , допуск плоскостности на операции шлифования Δ , отсутствие шлифовочных прижогов) при максимальной производительности процесса плоского шлифования [11-13].

На первом этапе при выборе оптимальных условий шлифования (см. рис. 6) заготовку кольца рассматривают как абсолютно жёсткую и оптимизацию параметров осуществляют из условия выполнения первых двух требований, т.е. обеспечение бесприжоговой обработки и заданного значения Ra .

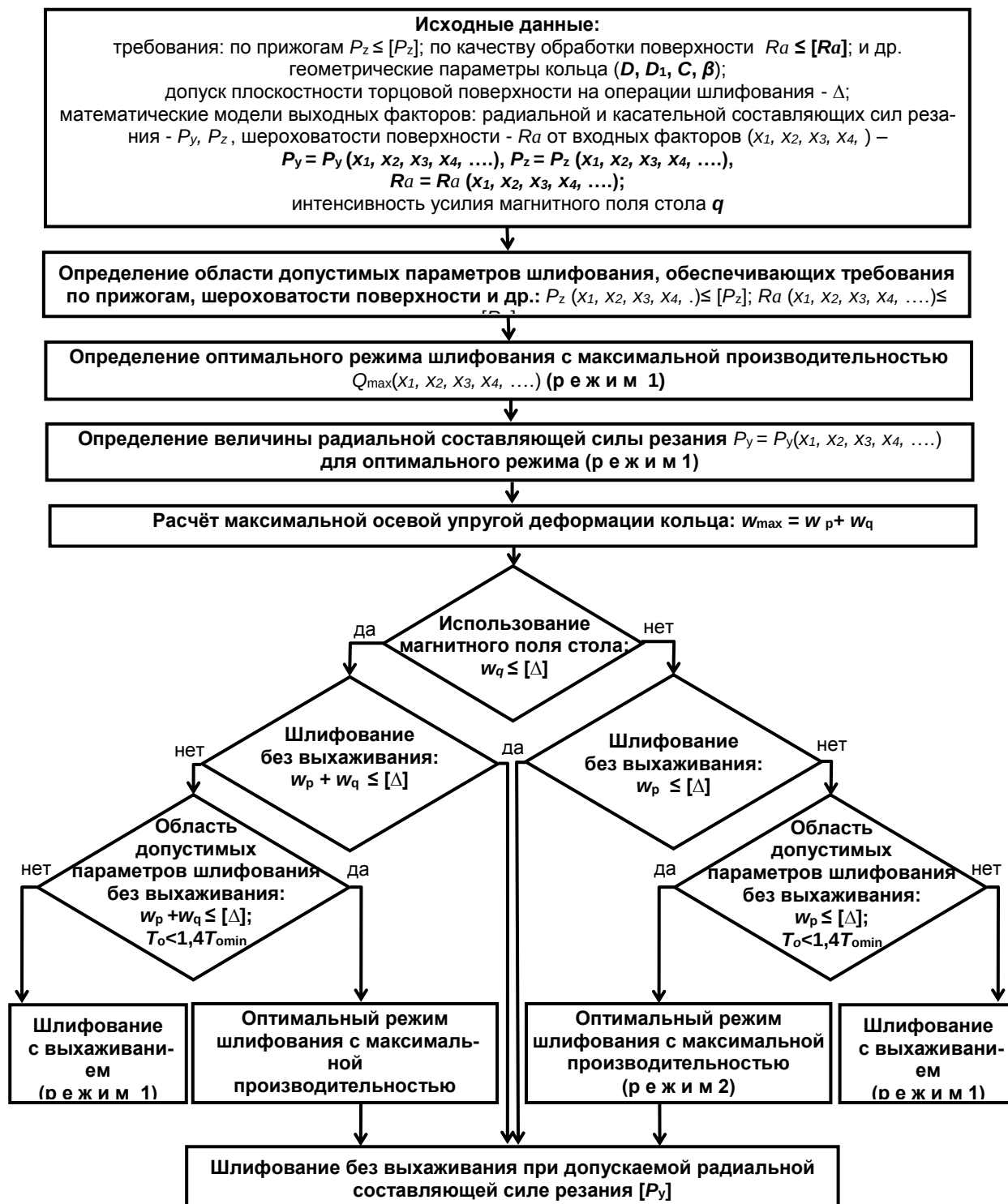


Рис. 6. Алгоритм выбора оптимальных условий шлифования заготовок колец подшипников с начальными отклонениями от плоскостности торцов

Математические модели приведённых к ширине образца составляющих силы резания (p_y , p_z), коэффициента шлифования ($K_{ш}$) и шероховатости обработанной поверхности (параметр Ra) получены методом полного факторного эксперимента типа 2^4 , где 4 - число факторов (табл. 2).

С учётом производственного опыта были выбраны следующие диапазоны варьирования входных факторов:

Таблица 2. Математические модели показателей процесса шлифования стали ШХ15

$p_y(F46)$, Н/мм	$p_y = 19,9 + 5,45x_1 + 3,43x_2 + 0,99x_3 + 3,67x_4 + 1,02 x_1x_2 - 2,40x_1x_3 + 2,6 x_1x_4 + 0,69x_2x_3 - 1,42 x_3x_4 - 1,49x_1x_3x_4$
$p_y(F60)$, Н/мм	$p_y = 31,42 + 0,91x_1 - 3,21x_2 - 1,02x_4 + 1,78x_1x_2 - 3,44x_2x_3 + 0,77x_3x_4 + 1,93x_1x_2x_3x_4 + 2,06x_1x_2x_3 - 3,078 x_1x_2x_4 - 0,73 x_1x_3x_4$
$p_z(F46)$, Н/мм	$p_z = 6,21 + 0,82x_1 + 0,9x_2 + 0,82x_3 + 0,49x_4 - 0,54x_1x_3 + 0,23 x_1x_4$
$p_z(F60)$, Н/мм	$p_z = 9,18 + 1,86x_1 + 0,67x_3 - 0,27x_4 + 0,32x_1x_3 - 0,38x_2x_3 + 0,37x_3x_4 + 0,37x_1x_2x_3x_4 + 0,72x_1x_2x_3 - 0,35 x_1x_2x_4$
$K_{ш}(F46)$	$K_{ш} = 44,77 - 5,06x_2 - 13,51x_3 + 6,15x_1x_3$
$K_{ш}(F60)$	$K_{ш} = 22,75 - 1,97x_1 - 5,83x_2 - 1,68x_3 - 2,61x_1x_2 + 1,71x_1x_3 - 4,77x_2x_3$
$Ra(F46)$, мкм	$Ra = 1,81 - 0,22x_1 + 0,46x_3 - 0,22x_1x_3$
$Ra(F60)$, мкм	$Ra = 1,92 + 0,27x_1 + 0,2x_2 + 0,29x_1x_2 + 0,3x_1x_3 + 0,26x_1x_2x_3$

F - зернистость, меш. (ГОСТ Р 52381) - от F60 до F46; $c_1 (x_1)$ - твёрдость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведённой скорости распространения акустических волн, м/с (ГОСТ Р 52710) - от 4504 м/с (K) до 4930 м/с (L); $t (x_2)$ - глубина шлифования, мм/ход - от 0,01 до 0,02 мм/ход; $v_s(x_3)$ - скорость подачи стола, м/мин - от 10 до 20 м/мин. В скобках дано условное обозначение кодированных значений фактора.

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что в рассмотренном интервале варьирования составляющие силы резания на некоторых режимах шлифования значимо зависят от наработки. В связи с этим в качестве четвертого входного фактора была введена в математические модели наработка, приведённая к ширине обрабатываемой поверхности - $V (x_4)$, мм² с интервалом варьирования от 100 до 400 мм².

Для составляющих силы резания, приведённых к единице ширины обрабатываемой поверхности - p_y и p_z число факторов $k = 4$, для коэффициента шлифования $K_{ш}$ и параметра шероховатости $Ra - k = 3$.

Входные факторы являются параметрами оптимизации процесса шлифования, математические модели выходных факторов используются для ограничения области допустимых значений параметров оптимизации.

Параметр Ra задан в технологическом процессе. В данном случае допустимое значение параметра $[Ra] \leq 2,5$ мкм.

Ограничение по бесприжоговому шлифованию определено в результате анализа значений приведённой касательной составляющей силы резания p_z и наличия прижогов на обработанной поверхности. На основании полученных экспериментальных данных в качестве допустимого значения приведённой касательной составляющей силы резания принята величина $[p_z] \leq 6$ Н/мм.

Конкретные режимы шлифования определяются с учетом твердости круга. Для круга твердости K , находящегося в середине диапазона рекомендуемой твердости, с зернистостью F46, оптимальные режимы шлифования (режим 1, рис. 6):

$$t_{opt} = 0,02 \text{ мм/ход}, v_{s \text{ opt}} = 13 \text{ м/мин.}$$

При шлифовании на оптимальных режимах приведенная производительность $Q_{max} = 260 \text{ мм}^2/\text{мин}$. Приведенная радиальная составляющая силы резания, при оптимальных режимах $p_y = 16 \text{ Н/мм}^2$.

Второй этап оптимизации при шлифовании колец подшипников с начальными отклонениями торцовых поверхностей от плоскостности заключается в необходимости учета осевых упругих деформаций при закреплении заготовки.

Оценка производится по условиям (11) – (13). Если неравенства (12) и (13) не выполняются, заготовки кольца шлифуют с выхаживанием, что приводит к увеличению основного времени шлифования. В таком случае в области ранее определенных допустимых значений параметров процесса целесообразно найти такие условия шлифования,

при которых возможно выполнение следующих условий (см. рис. 6):

$$w_p + w_q \leq [\Delta]; T_0 < 1,4T_{0\min}, \quad (14)$$

где $T_{0\min}$ – основное время шлифования без выхаживания при максимальной производительности обработки, параметры реализации которой были определены ранее. При существовании области параметров процесса, удовлетворяющих (14), выбор оптимальных условий шлифования осуществляется по критерию максимальной производительности. Полученные параметры процесса определяют оптимальные условия режима 2 (рис. 6).

Аналогичный подход реализован при определении оптимальных условий шлифования заготовок колец подшипников, закрепление которых на столе станка осуществляется упорами, без использования магнитного поля, он представлен в алгоритме (рис. 6).

Для исследуемых колец детальный анализ представлен в [9]. Кольцо 1077756.01 рекомендуется шлифовать с закреплением магнитным полем стола без выхаживания. Абразивный инструмент – круг 25AF46K6V при оптимальных режимах шлифования (режим 1) $t_{\text{opt}} = 0,02$ мм/ход; $v_{\text{sopt}} = 13$ м/мин; при максимальной производительности $Q_{\text{max}} = 260$ мм²/мин.

Для кольца У-7866А.01 рекомендуется шлифование с выхаживанием при закреплении упорами.

В рассмотренном алгоритме удельная сила притяжения магнитного поля стола

станка должна быть не более 0,16 МПа. Аналогично реализуется управление величиной осевых упругих деформаций колец при варьировании и максимальной силой притяжения магнитного поля стола.

Расчеты осевых деформаций колец МКЭ совпадают с расчетами, полученными по разработанным математическим моделям.

Исходя из проведенных исследований, разработан способ устранения изогнутости торцов колец шлифованием, при котором шлифование первого торца производится без действия магнитного поля стола с радиальной составляющей силы резания P_y , обеспечивающей осевую деформацию (максимальный прогиб) меньше допуска плоскостности торцов [14].

Исследование влияния радиальных упругих деформаций от усилий зажима на погрешности формы колец при механической обработке в кулачковом патроне проведены для наружного кольца роликоподшипника У-2007122А.01 [15].

Характер деформации кольца в трёх кулачковом патроне при смещении усилий зажима от осевой плоскости (рис. 7), обуславливает появление у кольца после механической обработки погрешностей формы не только в виде некруглости, но и конусности наружной цилиндрической поверхности и изменение угла конусности внутренней поверхности. Величина радиальных деформаций переменна по высоте кольца.

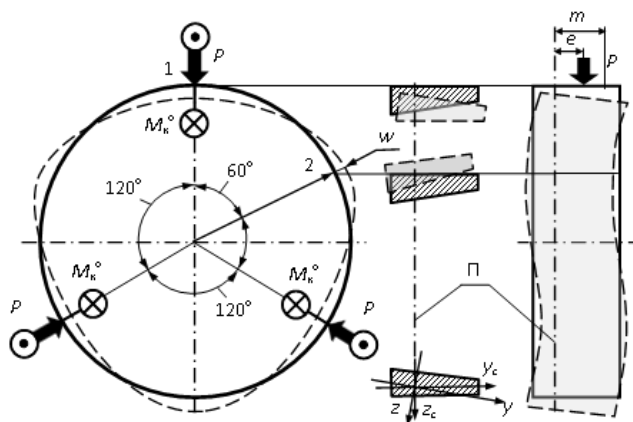


Рис. 7. Схема нагружения и характер деформации кольца при смещении усилия зажима P на величину e относительно плоскости центров тяжести поперечных сечений Π (осевой плоскости)

В расчётной схеме нагружения кольца в этом случае добавится нагрузка крутящими моментами $M_k^0 = Pe$ (см. рис. 7), где P - усилие зажима, e - смещение относительно осевой плоскости кольца.

Радиальные перемещения сечения 1 в любой точке по высоте кольца, задаваемой смещением m от осевой плоскости кольца) вычисляем по формуле [12]:

$$w_1 = \frac{2rI_{zc}}{3EI_z I_y} P \left\{ \begin{aligned} &0,02382r^2 + 0,024mr\eta_{zy} + \\ &+ e \left[0,024r\eta_{zy} + \right. \\ &\left. + m(0,74\eta_y + 0,307\eta_k + 0,7162\eta_{zy}^2) \right] \end{aligned} \right\},$$

для сечения 2 между усилиями зажима:

$$w_2 = \frac{2rI_{zc}}{3EI_z I_y} P \left\{ \begin{aligned} &-0,02382r^2 - 0,02mr\eta_{zy} + \\ &+ e \left[-0,021r\eta_{zy} + \right. \\ &\left. + m \left(0,695\eta_y - 0,171\eta_k + \right. \right. \\ &\left. \left. + 0,7162\eta_{zy}^2 \right) \right] \end{aligned} \right\}.$$

Проведённые экспериментальные исследования радиальных перемещений кольца У-2007122А.01 согласуются с теоретическими расчётами.

Расчеты радиальных деформаций колец МКЭ совпадают с расчетами, полученными по разработанному математическим моделям.

Таким образом, полученные расчётные формулы позволяют определять радиальные перемещения в любой точке по высоте подшипникового кольца произвольной формы поперечного сечения в сечениях, приложения усилий зажима трёх кулачкового патрона и между этими сечениями, с учётом смещения усилий зажима e . Управление величиной этих деформаций позволяет обеспечить требуемый допуск круглости, цилиндричности колец при механической обработке наружных и внутренних поверхностей.

Выводы

- решена актуальная научная задача повышения эффективности механической обработки нежестких подшипниковых колец подшипников путём управления упругими деформациями, возникающими при закреп-

лении заготовок колец и механической обработке под действием силы резания;

- разработаны математические модели упругой деформации заготовки кольца, возникающие при закреплении и механической обработки заготовки;

- определены условия, обеспечивающие получение заданного допуска отклонения формы нежестких колец подшипников с учётом упругой деформации при закреплении и механической обработке;

- разработан алгоритм для определения оптимальных условий механической обработки нежестких колец подшипников, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса.

Список литературы

1. Коротков Б.И. Исследование процессов шлифования внутренних и наружных конусов деталей класса колец: монография / Б.И. Коротков, С.Б. Коротков, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов. - Волгоград: РПК "Политехник", 2007. - 133 с.
2. Солер Я.И. Стратегия плоского шлифования деталей переменной жесткости/ Я.И. Солер, Д.Ю. Казимиров// Металлообработка. - 2006.- № 1.- С. 2-7.
3. Дальский А.М. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1./А.М. Дальский, А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, А.Г. Суслов ред. - Москва: Машиностроение-1, 2001. - 914 с.
4. Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. ред. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2./ А.М. Дальский, А.Г. Суслов, А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков ред. - Москва: Машиностроение-1, 2003. - 944 с.
5. Носенко В.А. Влияние осевых деформаций на отклонение от плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника при шлифовании / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов// Известия вузов. Машиностроение. - 2015. - № 9. - С. 68-74.
6. Носенко В.А. Определение осевых перемещений при шлифовании торцов подшипниковых колец/ В.А., Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, В.Б. Светличная //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2010. - № 2. - С. 70-74.
7. Nosenko V.A. The determination of axial displacements during bearing end face grinding/V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov, V.B. Svetlichnaya //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2010. - Volume 39, Issue 3. - P. 157-160.
8. Копецкий А. А. Влияние упругих деформаций на погрешность формы при закреплении и обработке колец подшипников / А. А. Копецкий, В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич и др. // Фундаменталь-

ные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2012. - № 2/3 (292). - С. 103-107.

9. Носенко В.А. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности/ В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов//Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение.- 2014. - Т. 14, № 4.- С. 67-78.
10. Дёмкин Н. Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология/Н.Б. Дёмкин//Трение и износ.- 1995. № 6.- С. 1003-1024.
11. Носенко В. А. Оптимальные условия шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов, А. В. Саразов//Вестник машиностроения. - 2015.- № 4. - С. 60 -66.
12. Носенко В.А. Обеспечение требуемого качества торцовых поверхностей колец подшипников шлифованием/В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов//Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2015.- № 3. - С. 31-35.
13. Носенко В.А. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок/ В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов, Е.А. Сукочева//Известия высших учебных заведений. Машиностроение.- 2016. - № 6 (675). - С. 73-81.
14. Орлов С. В., Тышкевич В. Н., Коротков Б. И., Носенко В. А. Способ устранения изогнутости торцов деталей класса колец шлифованием//Пат. 2370354 Российская Федерация, МПК7 В 24 В 7/04. Бюл. № 29.
15. Kopetskii A.A. Influence of Shift of Clamping Forces on Elastic Deformations of the Bearing Ring in a Jaw Gripper/ A.A. Kopetskii, V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2014. - Volume 43, No. 1. - P. 55-59.

References

1. Korotkov B.I. Issledovanie protsessov shlifovaniya vnutrennikh i naruzhnykh konusov detaley klassa kolets: monografiya / B.I. Korotkov, S.B. Korotkov, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov. - Volgograd: RPK "Politehnik". - 2007. - 133 p.
2. Soler Ia.I. Strategiiia ploskogo shlifovaniia detalei peremennoi zhestkosti [The strategy of the flat grinding to details of a variable rigidity]/ Ia.I. Soler, D.Iu. Kazimirov//Metalloobrabotka [Metalworking]. - 2006.- no. 1.- P. 2-7.
3. Dal'skiy A.M. Spravochnik tekhnologamashinostroitelia. V 2 t. T. 1 [Reference technologist-mechanical engineer]/ Ed. A.M. Dal'skiy, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheriakov, A.G. Suslov.- Moscow: Mashinostroenie publ.- 2001.- 914 p.
4. Dal'skiy A.M. Spravochnik tekhnologamashinostroitelia. V 2 t. T. 2 [Reference technologist-mechanical engineer]/ Ed. Dal'skiy A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. Moscow, Mashinostroenie publ. -2003. - 944 p.
5. Nosenko V.A. Vliyanie osevykh deformatsiy na otклонение ot ploskostnosti tortsovoy poverkhnosti kol'tsa podshipnika pri shlifovanii / V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov, A.V. Sarazov //

Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. - 2015. - № 9. - P. 68-74.

6. Nosenko V.A. Opredelenie osevykh peremeshcheniy pri shlifovanii tortsov podshipnikovykh kolets/ V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov, V.B. Svetlichnaya//Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. - 2010. - no. 2. - P. 70-74.
7. Nosenko V.A. The determination of axial displacements during bearing end face grinding/V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov, V.B. Svetlichnaya //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2010. - Volume 39, Issue 3. - P. 157-160.
8. Kopetskii A.A. Vliyanie uprugikh deformatsiy na pogreshnost' formy pri zakreplenii i obrabotke kolets podshipnikov [Influence of Elastic Deformations on Error of Form at Fixing and Treatment of Rings of Bearings]/ A.A. Kopetskii, V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. - 2012.- no. 2/3 (292). -P. 103-107.
9. Nosenko V.A. Ploskoe shlifovanie tortsov kolets krupnogabaritnykh podshipnikov s trebuemym kachestvom poverkhnosti [Flat grinding of big bearing races end with the demanded quality of a surface]/ V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, S.V. Orlov, A.V. Sarazov// Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie [Bulletin of the SUSU, Series «Mechanical engineering industry»]. - 2014.- Vol. 14, no. 4. - P. 67-78.
10. Demkin N. B. Teoriya kontakta real'nykh poverkhnostey i tribologiya/N.B. Demkin//Trenie i iznos.- 1995. № 6.- P. 1003-1024.
11. Nosenko V. A. Optimal'nye usloviya shlifovaniya tortsevykh poverkhnostey kolets krupnogabaritnykh podshipnikov / V. A. Nosenko, V. N. Tyshkevich, S. V. Orlov, A. V. Sarazov //Vestnik mashinostroeniya. - 2015.- № 4. - P. 60 -66.
12. Nosenko V. A. Obespechenie trebuemogo kachestva tortsovykh poverkhnostey kolets podshipnikov shlifovaniem [Providing of the required quality of end surfaces of bearing races during grinding]/ V. A. Nosenko, V. N. Tyshkevich, S. V. Orlov//Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in mechanical engineering, instrument making]. - 2015.- no. 3.- P. 31-35.
13. Nosenko V. A. Vybor optimal'nykh uslovij ploskogo shlifovaniya stal'nykh zagotovok [The determination of optimal conditions for flat grinding of steel workpieces]/ V. A. Nosenko, V. N. Tyshkevich, S. V. Orlov, A. V. Sarazov, E. A. Sukocheva// Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [News of higher educational institutions. Mechanical engineering],- 2016.- no. 6.- P. 73-81.
14. Orlov S. V., Tyshkevich V. N., Korotkov B. I., Nosenko V. A. Sposob ustraneniya izognutosti tortsov detaley klassa kolets shlifovaniem// Pat. 2370354 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 V 24 V 7/04. Byul. № 29.
15. Kopetskii A.A. Influence of Shift of Clamping Forces on Elastic Deformations of the Bearing Ring in a Jaw Gripper/ A.A. Kopetskii, V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2014. - Volume 43, No. 1. - P. 55-59.

УДК 621.92

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА В СРЕЗАЕМОМ СЛОЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Д.В. Ревенко¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Выявленные закономерности функционирования подсистем резания и управляющих воздействий позволяют научно обоснованно определять механические режимы шлифования и управляющих воздействий, обеспечивающие заданное качество шлифовальной поверхности на протяжении всего времени обработки.

При финишной обработке ряда материалов применяются комбинированные методы шлифования, при которых съём материала, осуществляется за счет комбинации процессов резания и эрозионного удаления материала. Наиболее слабым звеном такой системы является шлифовальный круг. Для стабилизации процесса необходимо поддерживать поверхность инструмента в требуемом состоянии для чего требуются математические модели, позволяющие автоматизировать процесс финишной обработки и оптимизировать его по требуемому критерию.

Ключевые слова: резание, шлифование, поверхность, финишная обработка, съём материала, шлифовальный круг.

DETERMINATION SHEAR STRESS IN A CUT-OFF LAYER FOR HIGH-ALLOY STEELS GRINDING

D.V. Revenko¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Identified patterns of functioning of cutting subsystems and control actions allow scientifically determine the mechanical grinding modes and control actions to ensure the specified quality of the grinding surface during the entire processing time. When finishing a range of materials combined grinding methods are used, in which the material removal is carried out by a combination of cutting processes and erosive material removal. The weakest link in this system is a grinding wheel. To stabilize the process is necessary to maintain the tool in the desired surface condition which requires mathematical models to automate the finishing process and optimize it according to the required criteria.

Keywords: cutting, grinding, surface finishing, material removal, grinding wheel.

Введение

Одной из основных задач машиностроения является повышение производительности технологических процессов при одновременном улучшении качества выпускаемой продукции. Эта задача особенно актуальна для чистовых и отделочных операций в связи с тем, что именно они окончательно формируют потребительские качества изделия. Это и является основной причиной повышения внимания к таким операциям, при выполнении которых, как показывают статистические данные, большую долю составляет обработка абразивными инструментами.

По имеющимся данным, за последние годы в мировом производстве число операций, выполняемых абразивными инструментами, увеличилось примерно на 20%. При этом трудоемкость чистовых и отделочных операций составила 34 % от общей трудоемкости механической обработки деталей в основном производстве, что вызывает потребность повышения производительности таких операций с одновременным обеспечением заданного качества деталей.

Весьма широкое применение процессы круглого, плоского, и бесцентрового шлифования нашли в двигателестроении. Наиболее существенными требованиями, предъявляемыми к изготовленным деталям, при этом оказываются уменьшение отклоне-

ний от заданных геометрических параметров и других качеств поверхности изделий.

Результаты и обсуждение

Целью данной статьи является определение напряжений сдвига в срезаемом слое при шлифовании высоколегированных сталей.

Нагрузка на единичное абразивное зерно, определяющая условия его работы, зависит от параметров единичного среза и сопротивлении обрабатываемого материала пластическому деформированию.

Известно [1–3], что сопротивление материала пластическому деформированию, определяемое совместным влиянием процессов упрочнения и разупрочнения, является функцией температуры, степени деформации и скорости деформации, т.е.

$$\sigma = f(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (1)$$

где σ – текущее значение напряжения сопротивления деформации, МПа; T – температура деформации; ε – относительный сдвиг; $\dot{\varepsilon}$ – скорость относительного сдвига, с^{-1} .

В зоне стружкообразования сопротивление материала пластической деформации приближенно характеризуется средней величиной напряжения сдвига τ_s по условной плоскости сдвига [3].

Так как величины деформации ε и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в области условной плоскости сдвига при резании значительно превосходят аналогичные показатели деформации при стандартных методах испытаний (например, при резании $\varepsilon = 2+10$, $\dot{\varepsilon} = 10^3 - 10^7 \text{ с}^{-1}$ [1–2], тогда как при стандартных методах испытаний $\varepsilon < 1$, $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), то напряжение сдвига, определенные по стандартным методам испытаний при растяжении, сжатии, кручении, значительно отличаются от напряжений сдвига при резании.

Анализ влияния ε и $\dot{\varepsilon}$ на касательные напряжения τ_s , выполнены в работе [4], показывает:

– при достижении значения деформации сдвига $\varepsilon \approx 1$ возможность упрочнения сталей

и многих других материалов почти исчерпывается, в результате чего значительнее изменение относительной деформации ε в результате изменения режимов резания и формы режущей части мало влияет на величину τ_s ;

– все металлы чувствительны к скорости деформации при температурах рекристаллизации и температурах, близких к температурам плавления, и нечувствительны при температурах значительно меньших температур рекристаллизации:

$$\theta_{\text{раскр}} \approx 0,4 \times Q_{\text{пл}}, \quad (2)$$

где θ – температура плавления;

– при резании сталей, титановых и никелевых сплавов и других тугоплавких материалов деформации столь велики, что материал находится за пределами насыщения упрочнения, в результате чего τ_s мало зависит от условий резания, а в основном, является характеристикой обрабатываемого материала.

Для определения величины τ_s предлагались различные методики:

– расчет τ_s по измеренной твердости стружки [3–4] :

$$\tau_s = \frac{1}{6} HV, \quad (3)$$

где HV – средняя твердость стружки по Виккерсу.

– расчет касательного напряжения τ по эффективному осевому напряжению σ в момент прекращения деформации при сжатии образцов $\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$, для пластичных мате-

риалов, $\tau = \frac{\sigma}{2}$, для чугунов;

– расчет τ и σ по твердости пластически деформированного тела H_n , причем предлагаемые зависимости являются едиными для сжатия, растяжения и кручения в пластической области для всех металлов $\tau = 0,185 H_n$, $\sigma = 0,185 \sqrt{3} H_n = 0,320 H_n$;

– расчет напряжений сдвига по стандартным механическим характеристикам обрабатываемого материала

$$\tau = 0,6\delta_5 = 0,740\sigma_{\epsilon}, \quad (4)$$

где σ_{ϵ} – предел прочности обрабатываемого материала при растяжении; δ_5 – относительное удлинение при растяжении.

Определить τ_s по твердости образующейся стружки при шлифовании не представляется возможным, так как размеры стружки очень малы. По этой причине в ряде работ при расчете сил резания используется условное напряжение резания, которое определялось экспериментально, но силе, действующей на единичное зерно, и площади царапины, оставленной на образце этим зерном. Недостатком методики является различие в условиях работы единичного зерна в процессе экспериментов и при шлифовании, когда при массовом резании ранее работавшие зерна разогревают поверхность детали. По этой причине в работе условное напряжение сдвига определялось при обработке подогретых заготовок.

В работе касательные напряжения на сдвиг τ_s в зоне деформации при шлифовании определялось по формуле

$$\tau_s = \frac{(\sigma)_i}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где $(\sigma)_i$ – значения напряжений, полученные при испытаниях образцов на разрыв подогретых до различных температур, и с учетом скорости деформации графоаналитическим методом. Недостатками методики является большая трудоемкость экспериментов по испытаниям на разрыв образцов, подогретых до различных температур.

В работах определение τ_s при одновременном изменении скорости деформации и температуры выполнено с помощью модификации К. Мак Грегора и И. Фишера, полученной из экспериментально проверенного факта, что напряжение σ является функцией только абсолютной температуры T , т.е.

$$\sigma = f\left[T\left(1 - k \times \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right] \quad (6)$$

Постоянная k может быть выбрана так, что изменение напряжения при температуре

T_0 и скорости $\dot{\epsilon}_0$ будет таким же, как и при скорости $\dot{\epsilon}$ и температуре $T\left(1 - k \times \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$.

При этом $T\left(1 - k \times \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$ является температурой, модифицированной по скорости деформации

$$T_M = T\left(1 - k \times \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (7)$$

Из формулы (7) ясна идея модификации, заключающаяся в том, что, если известна зависимость какой либо характеристики материала (например, σ_{ϵ} , HV) от температуры, то всегда можно найти зависимость этой характеристики от скорости деформации по уравнению (7).

Достоинством определения τ_s с помощью модификации Мак Грегора – Фишера является возможность нахождения напряжений сдвига по данным стандартных испытаний, приведенных в технической литературе.

Определим коэффициент k в уравнении (7) для высоколегированных, быстрорежущих сталей и титановых сплавов, воспользовавшись данными по влиянию скорости деформации и температуры на величину σ , взятыми из работ и приведенными для высоколегированных сталей Х12, Х12МФ, 12Х18Н10Т на рисунке 1 (а, б, в).

Расчет коэффициента k выполним, основываясь на допущении о равенстве напряжений в образцах при скорости деформации $\dot{\epsilon}_0$ и некоторой температуре T_M , а также при скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуре T_0 , отличающейся от T_M . Тогда из уравнения (7)

$$k = \frac{T_a - T_M}{T_a \times \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}} \quad (8)$$

Для нахождения значений T_M , T_0 , $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_0$ на графиках $\sigma = f(T, \dot{\epsilon})$ (рис. 1) из точки пересечения линии, проведенной параллельно оси $\dot{\epsilon}_0$ через абсциссу скорости дефор-

мации, принятой за базу ($\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ или $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$), с кривой $\sigma = f(\dot{\varepsilon})$ с меньшей температурой нагрева образца (T_M), проводим горизонтальную линию (линию равных напряжений) до пересечения с кривой с большей температурой нагрева образца (T_0). Абсцисса последней точки пересечения является значением скорости деформации $\dot{\varepsilon}$. Подставив найденные значения T_M , T_0 , $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\varepsilon}_0$ в уравнение (8), находим величину коэффициента k (табл. 1).

Как видно из приведенных данных, среднее значение коэффициента k для высоколегированных сталей практически одинаково. При этом выбор базовой скорости деформации (сталь X12ФМ) незначительно влияет на значение коэффициента k , что позволяет использовать для его расчета данные испытаний, которые проводились на скорости деформации 10^{-1} с^{-1} , 10^{-2} с^{-1} .

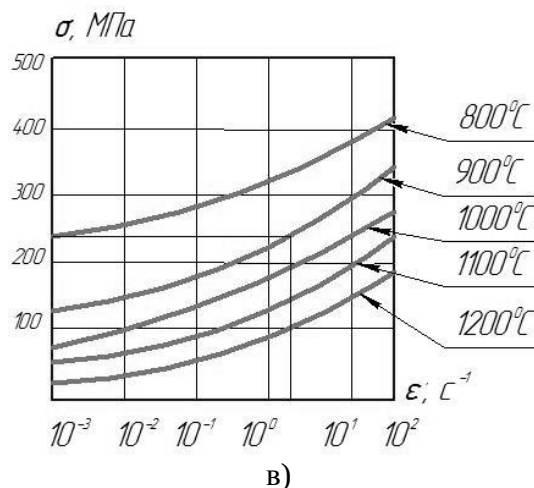
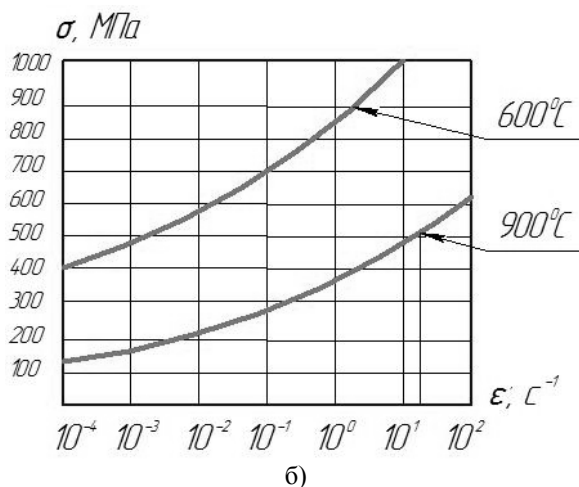
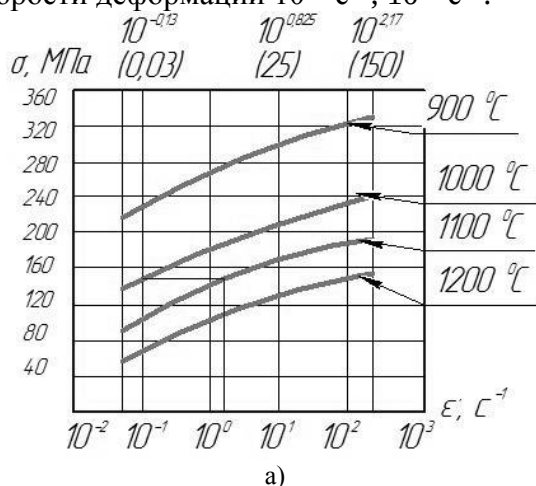


Рис. 1. Определение значений коэффициента k в уравнении Мак Грегора–Фишера для высоколегированных сталей X12 (а), X12ФМ (б) и 12X18H9Т (в) по данным влиянием температурно-скоростных условий испытаний на величину нормальных напряжений

Таблица 1. Значение коэффициентов k в уравнении Мак Грегора–Фишера для высоколегированных сталей

Группа материалов	Марка материала	Температура, °K	Температура, °K
Высоколегированные стали	X12	1273	1373
		1273	1473
		1173	1273
	X12ФМ	873	1173
		873	1173
		873	1173
	12X18H10T	1073	1173
		1173	1273
		1273	1373
		1373	1473
Базовая скорость деформирования	10 ⁻¹	Коэффициент	
		K _i	K
		10 ^{0,2}	0,0263
	10 ⁻³	10 ^{1,7}	0,0218
		10 ²	0,0113
		10 ^{1,25}	0,0261
	10 ⁻⁴	10 ^{0,4}	0,0252
		10 ^{1,9}	0,0284
		10 ^{0,4}	0,0108
	10 ⁻³	10 ^{-0,9}	0,0162
		10 ^{-1,7}	0,0243
		10 ⁻¹	0,0147

Список литературы

1. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2 т. / С.П. Митрофанов. – Л.: Машиностроение, 1983.
2. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения. Руководящий технический материал. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 243 с.
3. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения: в 2 ч./ Под ред. В.Р. Верченко. – М.: Изд-во стандартов, 1974 г.
4. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей ВУЗов/ А.А. Гусев [и др]. – М.: Машиностроение, 1986. – 480с.: ил.
5. Харченко А.О. Станки с ЧПУ и оборудование гибких производственных систем: учебное пособие для студентов вузов / А.О. Харченко – К.: ИД «Профессионал», 2004. – 304с.
6. Гузеев В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ/ В.И. Гузеев, В.А. Бутуев. – М.: Машиностроение, 2005. – 286с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т 2. / Под ред. А.А. Молотова. – Изд.3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 568с.; ил.
8. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. В 2 ч. Ч. 2. Режимы резания/ Под ред. А.В. Фролова. – М.: Экономика, 1990. – 474с.; ил.
9. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник/ В.И.Баранчиков [и др.]; Под общ. ред. В.И. Баранчиков. – М.: Машиностроение, 1990.–400с.; ил.
10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под. ред. А.М. Дальского, А.Г.Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М.: «Машиностроение» – 1, 2003 г. 944 с., ил.
11. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов/ под. ред. В.Э. Пуша. – М.: «Машиностроение», 1985. – 256 с., ил. 621.9
12. Справочник технолога-машиностроителя, в 2-х томах /Под. Ред. А.Г. Касиловой и Р.К. Мещерякова – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985, 496с.
13. Горошкин А.К. Приспособления для металлорежущих станков: Справочник/ А.К. Горошкин. – М.: Машиностроение, 1979. – 720 с.
14. Киркач Н. Ф., Баласанян Р. А. Расчёт и проектирование деталей машин: [Учеб. пособие для техн. вузов]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Х.: Основа, 1991.–276с.
15. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения/ И.М. Колесов. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 590с.: ил.

References

1. Mitrofanov S.P. Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitel'nogo proizvodstva: v 2 t. / S.P. Mitrofanov. – L.: Mashinostroyeniye, 1983.
2. Illiustrirovanniyi opredelitel' detalei obshchemashinostroitel'nogo primeneniia. Rukovodiashchii tekhnicheskii material. – M: Izd-vo standartov, 1977. – 243 s.
3. Tekhnologicheskii klassifikator detalei mashinostroyeniia i priborostroyeniia: v 2 ch./ Pod red. V.R. Verchenko. – M.: Izd-vo standartov, 1974 g.
4. Tekhnologiya mashinostroyeniia (spetsial'naia chast'): uchebnik dlia mashinostroitel'nykh spetsial'nostei VUZov/ A.A. Gusev [i dr]. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 480s.: il.
5. Kharchenko A.O. Stanki s ChPU i oborudovaniye gibkikh proizvodstvennykh sistem: uchebnoye posobie dlia studentov vuzov / A.O. Kharchenko – K.: ID «Professional», 2004. – 304s.
6. Guzeev V.I. Rezhimy rezaniia dlia tokarnykh i sverlil'no-frezerno-rastochnykh stankov s ChPU/ V.I. Guzeev, V.A Butuev. – M: Mashinostroyeniye, 2005. – 286s.
7. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia. V 2 t. T 2. / Pod red. A.A. Molotova. – Izd.3-e, pererab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 568s.; il.
8. Obshchemashinostroitel'nye normativy vremeni i rezhimov rezaniia dlia normirovaniia rabot, vypolniaemykh na universal'nykh i mnogotselyevykh stankakh s chislovym programnym upravleniem. V 2 ch. Ch. 2. Rezhimy rezaniia/ Pod red. A.V. Frolova. – M.: Ekonomika, 1990. – 474s.; il.
9. Progressivnye rezhushchie instrumenty i rezhimy rezaniia metallov: spravochnik/ V.I.Baranchikov [i dr.]; Pod obshch. red. V.I. Baranchikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1990.–400s.; il.
10. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia. V 2-kh t. T.2 / Pod. red. A.M. Dal'skogo, A.G.Suslova, A.G. Kosilovoi, R.K. Meshcheriakova. – 5-e izd., ispravl. – M.: «Mashinostroyeniye» – 1, 2003 g. 944 s., il.
11. Metallorezhushchie stanki: Uchebnik dlia mashinostroitel'nykh vuzov/ pod. red. V.E. Pusha. – M.: «Mashinostroyeniye», 1985. – 256 s., il. 621.9
12. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia, v 2-kh tomakh /Pod. Red. A.G. Kasilovoi i R.K. Meshcheriakova – 4-e izd., pererab. I dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1985, 496s.
13. Goroshkin A.K. Prispособleniia dlia metallorezhushchikh stankov: Spravochnik/ A.K. Goroshkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 720 s.
14. Kirkach N. F., Balasanian R. A. Raschet i proektirovaniye detalei mashin: [Ucheb. posobie dlia tekhn. vuzov]. – 3-e izd., pererab. i dop. – X.: Osнова, 1991.–276s.
15. Kolesov I.M. Osnovy tekhnologii mashinostroyeniia/ I.M. Kolesov. – 3-e izd., ster. – M.: Vyssh. shk., 2001. – 590s.: il.

УДК 62-932.2

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Ю.С. Степанов¹, М.А. Бурнашов², А.Н. Прежбилов³¹ ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орел, Российская Федерация² ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орел, Российская Федерация³ НПО «Научприбор», Орел, Российская Федерация

Аннотация

В статье затрагиваются вопросы развития гидроструйных технологий в машиностроении. Рассматривается текущее положение методов обработки с применением струйных технологий. Гидроструйные методы обработки используются в различных отраслях производства и на разных этапах технологического процесса. В рамках данной статьи выделены три основных направления развития данной технологии: разрезание материалов, поверхностно пластическое деформирование и очистка поверхностей. В рамках последней области, рассмотрен метод гидроструйной очистки как один из инновационных и требующих изучения. Данный метод представляет собой развитие гидроабразивной очистки, однако в качестве абразива использует заранее подготовленные частицы льда. Он лишен недостатков гидроабразивной очистки. И так же является экологически чистым методом.

Ключевые слова: гидроструйные технологии, очистка, гидрорезание, поверхностно пластическая деформация, дробеструйный метод, гидроледяная технология.

DEVELOPMENT PROSPECTS HYDRO TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

Yu.S. Stepanov¹, M.A. Burnashov², A.N. Prezhbilov³¹ Orel State University of I.S. Turgenev, Oryol, Russian Federation² Orel State University of I.S. Turgenev, Oryol, Russian Federation³ Joint-stock company "Nauchpribor", Oryol, Russian Federation

Abstract

The article addresses the issues of development of hydro technologies in mechanical engineering. We consider the current position of the processing methods using inkjet technology. Hydro-processing methods are used in various industries and at various stages of the process. As part of this article highlights three main areas of development of this technology: the cutting of materials, surface plastic deformation and surface cleaning. Within the latter area, considered by water jetting method as one of the innovative and demanding study. This method is the development of water-jet cleaning, but uses an abrasive ice particles prepared beforehand. He is without flaws waterjet cleaning. And the same is an environmentally friendly method.

Keywords: grinding hydro-jet technology, cleaning, waterjet cutting, surface plastic deformation, shot blasting method gidroledyanaya technology.

Введение

Одной из актуальных задач машиностроительного производства является повышение эффективности технологических методов обработки, которое заключается в обеспечении требуемого качества деталей с наименьшей себестоимостью их изготовления.

За последние три десятилетия широко развиваются многие новые методы обработки в производстве. Среди новых и перспективных технологий можно выделить группу струйных методов обработки.

Сущность струйных технологий состоит в обработке за счет кинетической энергии удара струи высокого давления.

К ним относятся: пневмоабразивные, гидроструйные, гидроабразивные, бластинг и другие.

Гидроструйные методы обработки используются в различных отраслях производства и на разных этапах технологического процесса.

Впервые предположение об использовании энергии струи жидкости высокого давления для разрезания конструкционных материалов высказали в 1957 г. советские ученые Л. Ф. Верещагин и А. А. Семерчан [1]. Однако запатентован способ гидрообработки [2] был в США в 1961 г., а первая промышленная установка резки высоконапорной струей воды появилась лишь в 1971 г. [3]. В СССР первая экспериментальная гидроустановка была создана в 1974 г., а первое промышленное использование гидрорезных станков было начато в 1980 г.

В настоящее время достаточно широко в теоретическом плане и всесторонне в экспериментальном исследована гидродобыча торфа, угля, горных пород; комплексно рассмотрены процессы гидроабразивного разрушения горных пород и других прочных материалов и т.д.

Так за последние 35 лет были созданы технологии контурной, экологически чистой резки таких материалов, как алюминий, листовые полимерные материалы (стеклопластики, углепластики и др.), мрамор, гранит, кевлары и сотовые материалы, эластомеры, резина, бронированное стекло, текстиль и т. д.

В качестве рабочей жидкости при обработке материалов гидрорезанием используется в большинстве случаев простая необработанная вода и вода с добавками абразива.

Применение необработанной воды как рабочей жидкости, которая легко доступна, имеет низкую стоимость, не токсична, вполне оправдано для резки низкопрочных материалов. Главный недостаток ее использования состоит в необходимости создания очень высоких давлений истечения струи жидкости для резки прочных материалов, при этом существуют некоторые ограничения по толщине обрабатываемых материалов. При изготовлении гидрорежу-

щего оборудования с высоким давлением истечения рабочей жидкости (до 10000 МПа), когда возможно использовать необработанную воду для резки практически любых видов материалов, весьма усложняется процесс его проектирования и эксплуатации. Так, основная проблема связана с использованием уплотнений из специальных материалов, которые имеют ограниченный срок службы, а также с применением высокопрочных сталей и сплавов для изготовления узлов высокого давления гидрорежущего оборудования. Стоимость такого оборудования достаточно высока при ограниченном сроке службы. Еще одним недостатком применения в гидрорезании необработанной воды является невозможность обеспечения требуемой производительности и качества (точность и ширина реза, качества обработанных поверхностей) резки, при обработке материалов с высокими физико-механическими характеристиками и толщиной. Причиной тому служат невысокие гидродинамические параметры струи, которая имеет большой распыл и низкую стабильность, что сказывается на ее разрушающей способности. Таким образом, описанные выше недостатки ограничивают область применения необработанной воды в качестве рабочей жидкости при гидрорезании.

Результаты и обсуждение

Одним из способов повышения производительности процесса гидрорезания, расширяющим его технологические возможности, является введение в режущую струю жидкости абразивных добавок. Это позволяет вести резку высокопрочных материалов, в том числе сталей, при относительно низких давлениях порядка 250-500 МПа, обеспечивая при этом такую же производительность, что и при резке чистой водой с более высоким давлением истечения. Вместе с тем, гидродинамические параметры струи с абразивом снижаются, т.е. падает ее скорость, увеличивается распыл, уменьшается длина начального участка; все это приводит к увеличению площади контакта струи с обрабатываемым материалом и снижению

удельного давления резания, снижению технологических параметров процесса обработки и увеличению энергоемкости процесса. Важно, что, несмотря на способ ввода абразивных добавок в струю, наблюдается интенсивное изнашивание абразивных головок гидрорежущего оборудования, главным образом сопла, в результате чего изменяется рабочий диаметр струи и возникает необходимость частой замены насадок. Также должна учитываться дополнительная стоимость абразивных добавок и необходимость проектирования специальных режущих головок для ввода абразива в струю[4].

Существующие методы и схемы процесса гидрорезания зависят от многих факторов, в соответствии с которыми их можно разделить на следующие группы:

- по виду выполняемых операций — резка листовых материалов; прорезка пазов, вырезка окон, фигурная обработка по контуру, пробивка отверстий; поверхностная обработка материалов и изделий (очистка и полировка наружных поверхностей, в том числе и в труднодоступных местах изделий сложного профиля, маркировка);

- по типу обрабатываемого материала — для обработки мягких материалов (бумага, картон, ткани, кожа, древесина, резина); для обработки полимерных материалов (винипласт, фторопласт, органическое стекло, гетинакс, текстолит, стеклопластик и т.п.); для обработки фольгированных и металлизированных пластмасс (фольгированные гетинакс и стеклотекстолит, облицованные с одной или с двух сторон, фторопласт и т. п.); для обработки труднообрабатываемых материалов (твердые сплавы, металлы, магнитные материалы и др.);

- по составу рабочей жидкости — обработка струёй воды; обработка абразивно-жидкостной струёй;

- по методу воздействия струи на материал — обработка непрерывной струёй жидкости постоянного давления; обработка с вибрацией; обработка пульсирующей струёй; обработка импульсной струёй;

- по направлению воздействия струи на материал — обработка ударной струёй; об-

работка косой струёй; обработка скользящей струёй.

Важнейшей характеристикой любого процесса обработки материала является его производительность. Производительность процесса, как правило, выражается скоростью подачи материала относительно режущей струи, а также объемом удаленного материала в единицу времени. На рис. 1. показана производительность разрезки материалов при различных методах обработки.

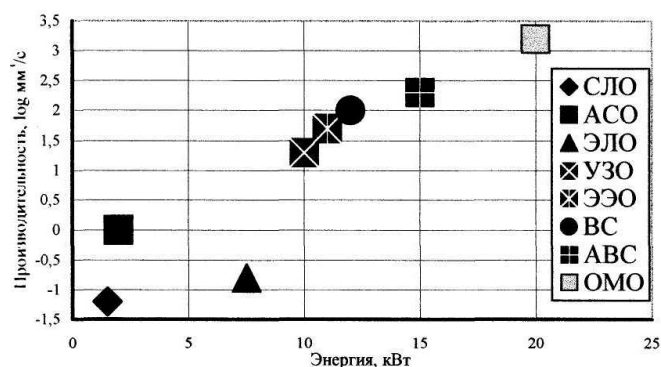


Рис. 1. Производительность различных методов разрезки материалов

где, СЛО - светолучевая обработка, АСО - абразивно-струйная обработка, ЭЛО - электронно-лучевая обработка, УЗО - ультразвуковая обработка, ЭЭО - электроэрозионная обработка, ВС - водоструйная обработка, АВС - абразивно-водоструйная обработка, ОМО - обычная механическая обработка.

Основные факторы, от которых зависит производительность гидрорезания, можно разбить на четыре группы:

- силовые и геометрические свойства режущей струи;
- взаимное расположение струи и обрабатываемого материала;
- физико-механические свойства обрабатываемого материала и его линейные размеры;
- специальная подготовка обрабатываемого материала.

Другой отраслью применения гидроструйных технологий является поверхностно-пластическое деформирование.

Дробеструйное упрочнение вызывается созданием поверхностного наклепа от многочисленных ударов при помощи специаль-

ного аппарата дробинки о поверхность детали. Этот способ повышает износостойчивость до 9 раз и особенно эффективен при обработке, например, зубьев шестерен, шеек коленчатых валов и тому подобных изделий. Оно осуществляется на установках, в которых в качестве движителя дробы используется сжатый воздух или жидкость.

В 1949 г. Саверин М.М. впервые описывает сущность процесса дробеструйного наклепа, его возможности и практическое применение.

Дробеструйное упрочнение широко применяют с целью значительного повышения сроков службы листовых рессор, пружин, шатунов, полуосей, коленчатых валов, картеров, поворотных кулаков, гребных судовых валов, торсионных валов и др. Способ особенно эффективен, когда детали имеют концентраторы напряжений, при этом чувствительность деталей к концентрации напряжений может быть снижена в 1,5 - 2 раза [5].

Совмещенное поверхностное пластическое деформирование (гидравлическое и пневматическое деформирование дробью). Упрочнение поверхностного слоя гидравлическим и пневматическим деформированием производят стальными шариками с эмульсией или трансформаторным маслом на специальных насосных установках.

Удары дробинки воспринимаются поверхностным слоем детали через жидкостную пленку, способствующую более равномерному распределению ударной нагрузки на поверхность, чем при обработке сухими шариками. Одновременно жидкость оказывает охлаждающее действие, снижая температуру поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, которая при упрочнении сухими шариками достигает 600 °С.

На данный момент рынок промышленного оборудования предлагает широкий выбор дробеструйных камер, в зависимости от потребностей: типа производства, типа деталей и их габаритов и т. д. В своем большинстве, камеры оснащены автоматическими многоосевыми соплами, позволяющими добраться дробинкам в самые труднодоступные места. Это упрощает задачу упрочнения

деталей в разы по сравнению с тем же решением вопроса в советские времена.

Изучив патенты, статьи за последние 10 лет, можно сделать вывод, что это без сомнений перспективное направление, так как занимает такие известные корпорации как HITACHI, Mitsubishi, SIEMENS и т. д.

В процессе производства, хранения и эксплуатации изделий машиностроения на поверхностях деталей возникают различные загрязнения (окалина, литейный пригар, шлак, нагар, флюсовые, лаковые и смолистые отложения, остатки краски, накипь, окислы, следы коррозии, сажа, пыль, органические соединения и т.д.). Они затрудняют выполнение операций технологических процессов производства, а также отрицательно влияют на долговечность и работоспособность агрегата или машины в целом. Без надлежащей очистки нельзя должным образом осмотреть детали в процессе их ремонта - выявить повреждения или определить степень износа, установить возможность восстановления деталей или необходимость их замены.

Струйная очистка является самым качественным и эффективным методом [6], [7]. С ее помощью можно достигать низкую шероховатость (порядка Ra 1,25 мкм) для любого профиля поверхности.

Гидроструйная очистка (гидродинамическая очистка, гидроджеттинг, гидросбив) - струйная обработка водой под высоким давлением; метод, при котором достижение необходимого эффекта полностью происходит за счет энергии воды, ударяющейся о поверхность. Абразивы не используются, следовательно, отсутствует и пылевое загрязнение.

Данный метод универсален - его можно использовать для очистки различных типов и степени загрязнения поверхностей деталей и изделий практически независимо от их массы, габаритных размеров и типа производства. Поверхность, обработанная данным методом, получается очень качественной и не требует дополнительного удаления пыли [8]. Гидроструйный способ очистки не повреждает поверхности, а экологическая чистота процесса дает этому способу преиму-

щество по сравнению с близкими по производительности механическим и химическим методами [9]. Производительность гидроструйной очистки выше производительности химических методов очистки [10]. Для подачи жидкости при высоком давлении применяют специальные насосы плунжерного [11], [12], или центробежного типа [13]. Вода лучше проникает в микротрещины поверхности и вымывает загрязнения, вызывающие коррозию [14]. Рабочую жидкость можно использовать по замкнутому циклу [15]. В этом случае отработанная жидкость проходит очистку, обновление состава и снова подается в систему гидроструйной очистки [16]. Установки для очистки могут быть передвижными, что также дает этому способу определенное преимущество. Несмотря на то, что этот метод очистки поверхностей является сравнительно эффективным, на стальных поверхностях гидроструйная обработка водой не позволяет создать требуемый профиль шероховатости для улучшения адгезии наносимых покрытий. Очистка практически не влияет на шероховатость поверхности. Однако для точных поверхностей с низкой шероховатостью, где нежелателен съем основного материала, метод является наиболее привлекательным. При повышении давления до 140 МПа можно добиться упрочнения обрабатываемой стальной поверхности [10].

Области применения гидроструйной очистки:

- подготовка поверхности перед покраской и нанесением других защитных покрытий;
- очистка изделий машиностроения от старых лакокрасочных покрытий;
- очистка от окалины, нагаров;
- удаление окисных плёнок;
- удаление отложений солей, коррозии, накали;
- очистка поверхностей от мазута, нефтяных загрязнений, затвердевших и не затвердевших нефтепродуктов;
- очистка поверхностей от загрязнений маслами и жирами;
- очистка проката и литья;
- подготовка поверхности к сварке, пайке;

- очистка лопаток турбин при ремонте;
 - очистка станков, узлов, деталей от производственных загрязнений;
 - очистка металлоконструкций, элементов трубопроводов, теплообменного оборудования, различных резервуаров и емкостей;
 - очистка колёсных пар железнодорожных вагонов;
 - очистка решеток окрасочных камер.
- Кроме того, гидроструйная очистка может применяться не только в машиностроении в следующих случаях:
- очистка фасадов зданий, железобетонных конструкций;
 - очистка изделий из камня от лакокрасочных и других загрязнений;
 - удаление разметки автодорог.

Применяют также пароводоструйную очистку поверхностей. Ее производят парогидравлической струей температурой 90—100 °С под давлением 0,5—2,0 МПа с помощью специальных установок. Применяется для удаления масляных и грязевых наслоений с крупногабаритных изделий, в том числе в пищевой промышленности.

В экстренном случае, когда вода не справляется с поставленной задачей ввиду очень сильно загрязненной поверхности, проблему можно решить методом гидроабразивной очистки [18]. Гидроабразивная очистка – метод, при котором абразив вводится в поток жидкости, и струя направляется через сопло на обрабатываемую поверхность. Струя представляет собой, главным образом жидкость, находящуюся под давлением, а количество добавленных абразивов, как правило, меньше, чем в случае влажной пневмоабразивной очистки сжатым воздухом. При гидроабразивной обработке в жидкую среду добавляют ингибитор коррозии (1%-ный раствор кальцинированной соды) [19].

Гидроабразивная обработка сопровождается упрочнением поверхностного слоя материала очищаемой поверхности.

Отрицательным фактором является то, что при струйной очистке требуется определенный размер частиц абразива, а дробленые шлаки непригодны для использования в ка-

честве абразива для струйной очистки [8]. Перед использованием в качестве абразива шлаки требуют специальной подготовки, а готовый абразив необходимо транспортировать до места выполнения работ, что увеличивает их стоимость. После гидроабразивной очистки требуется регенерация абразива: его отделение от воды и просушивание [9].

Рабочая жидкость несколько снижает скорость абразивных частиц по сравнению с пескоструйным методом, однако она выполняет следующие важные функции:

- непрерывно очищает обрабатываемую поверхность, удаляя отработавшие абразивные частицы и частички снятого материала;
- исключает образование пыли;
- многократно уменьшает интенсивность разрушения абразивных частиц, что объясняется демпфирующим действием;
- может являться носителем поверхностно-активных веществ, снижая таким образом твердость и сопротивляемость удаляемого загрязнения разрушению;
- предотвращает нагрев в зоне обработки;
- предотвращает прилипание частиц снятого материала к обрабатываемой поверхности [20].

Одним из новых и перспективных методов струйной очистки является водоледяная очистка [21]. Данный метод представляет собой развитие гидроабразивной очистки, однако в качестве абразива использует заранее подготовленные частицы льда. Он лишен недостатков гидроабразивной очистки. И так же является экологически чистым методом.

Частицы льда, обладая свойствами твердых частиц, при разгоне до высоких скоростей позволяют удалять многие загрязнения, не повреждая основания очищаемой поверхности. Использование при очистке водяного льда существенно упрощает регенерацию очищающей среды [22].

Водоледяная очистка имеет ряд преимуществ по отношению к остальным способам очистки:

1. Минимальное вредное воздействие на окружающую среду;

2. Низкая стоимость очищающего материала;
3. Отсутствие необходимости транспортирования и хранения большого количества абразивного материала;
4. Возможность замкнутого, безотходного цикла;
5. Устранение абразивного воздействия на материал;
6. Абразив не забивается в щели деталей узлов;
7. Отсутствие пыли в процессе очистки;
8. Малый износ инструмента.

Выводы

Механизм разрушения материала покрытия под действием водоледяной струи определяется многофазным характером высокоскоростного потока (вода- частицы льда). При этом струя воды, затратив часть своей энергии на разгон частиц льда, способна создать в разрушаемом материале напряжения соизмеримые с его прочностью. В то же время, частицы льда, осуществляют ударное воздействие на материал, образуя в нем микротрещины, являющиеся концентраторами напряжения, что способствует повышению эффективности очистки в целом [23].

Формирование водоледяной струи для очистки поверхности деталей машин происходит следующим образом: высоконапорная струя воды диаметром 0,15 – 0,3 мм смешивается с увлекаемым потоком ледяных частиц по принципу эжекции, в результате чего образовывалась двухфазная структура – водоледяная струя. Для данного процесса оптимальным является использование заранее подготовленных ледяных частиц размерами от 1,5 до 2 мм.

Список литературы

1. Тихомиров Р. А. Высокопроизводительное резание полимерных материалов сверхзвуковыми струями жидкости. - Дис... док. техн. наук. - Владимир, 1989.-470 с.
2. Patent of USA № 2985050.
3. Барабанов М. В., Иванов Г. М., Свешников В. К., Шапиро И. И. Профильная резка материалов вы-

- соконапорной струей воды. "Вестник машиностроения", 1992, № 4, С. 45 - 47.
4. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – 318 с.
 5. Фокин В.Я. Оборудование заводов искусственного жидкого топлива - Москва : Гостоптехиздат, 1955.-400с.
 6. Подготовка поверхности перед окраской: травление, пескоструйная, гидроструйная и дробеструйная обработка поверхности // <http://www.bronopol.ru>
 7. Руководство по защите металлоконструкций от коррозии и ремонту лакокрасочных покрытий металлических пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов. Министерство транспорта Российской Федерации Государственная служба дорожного хозяйства. // Москва 2003. // http://libgost.ru/rukovodstvo/67775-Tekst_Rukovodstvo_Rukovodstvo_po_zashite_metallokonstrukcii_ot_korrozii_i_remontu_lakokrasochnyh_pokrytiiy_metallicheskih_proletnyh_stroeniyy_ekspluatiruemyh_avtodorozhnyh_mostov.html
 8. Игнатенко Т. Защита металлов от коррозии // Уральский рынок металлов. – № 8. – август 2005. – с. 12-16.
 9. Талыпов Ш. М. Совершенствование техники и технологии термоабразивной очистки внутренней поверхности насосно-компрессорных труб от солевых отложений. Диссертация кандидата технических наук. Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2009. – 108с.
 10. Sure waterjet can clean, but can it peen? // The Shotpeener. – Winter 2006 // www.shotpeener.com/library/pdf/2006001.pdf
 11. А. С. Игнатьев Особенности расчета рабочего процесса в системе гидросбива окалины. Сумский государственный университет // Вестник СумДУ. Технические науки. – №1 – 2007. – с.36-38.
 12. Бурнашов М. А. Повышение эффективности разрезания листовых неметаллических материалов водоледяными струями высокого давления. Диссертация доктора технических наук Орловский государственный технический университет: Орел, 2010.
 13. Петер Павлицки, Ральф Рехбайн Современные способы удаления окалины // Металлургическое производство и технология. №1. – 2008. – с.42-55.
 14. Омелянют М. В. Разработка технологии гидродинамической кавитационной очистки труб от отложений при ремонте скважин. Диссертация кандидата технических наук. Кубанский технологический университет: Краснодар, 2004.- 270с.
 15. Shunli Xu Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining with Controlled Nozzle Oscillation: School of Engineering Systems. Queensland University of Technology, 2005. – 205с.
 16. E. Ray Tanner Component ARMS. A Waterjet Coating Removal System for Aircraft & Missile Components and Small Vehicles. – Waterjet Systems, Inc. – 376с. // <http://www.p2pays.org/ref/03/02312.pdf>
 17. Парсаданов В.Г., Механические способы очистки металлических поверхностей <http://www.kolorit-ind.ru/stati/mechanichesk/>.
 18. А. Д. Цой Технология и оборудование авторемонтного производства: Самарский государственный технический университет. – Самара, 2007. – 114 с.
 19. С.И. Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков Способы обработки материалов: Калининградский университет. – Калининград, 2000. – 448 с.
 20. Метод гидроабразивной очистки и обработки материалов // http://www.intec.su/gidrooch_stat.shtml
 21. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Прежбилов А. Н. Теоретическое обоснование развития метода очистки поверхности деталей машин высоконапорной водоледяной струей с заранее подготовленными частицами льда // сборник научных трудов первой международной заочной научно-технической конференции /под ред. В.И. Гузеева и А.А. Дьяконова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – с.468-471.
 22. Прежбилов А.Н. Исследование структуры ледяной частицы для реализации процесса водоледяной очистки поверхности деталей машин (статья). - Фундаментальные проблемы техники и технологии - Орел: ГУ-УНПК, 2012, № 3. Часть 2. – с. 84–90.
 23. Бурнашов М.А., Прежбилов А.Н. Очистка поверхностей деталей автомобилей водоледяной струей с заранее подготовленными частицами (статья). - Мир транспорта и технологических машин – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2015. - № 3(50). с.46-50.

References

1. Tikhomirov R. A. Vysokoproizvoditel'noe rezanie polimernykh materialov sverkhzvukovymi struiami zhidkosti. - Dis... dok. tekhn. nauk. - Vladimir, 1989.-470 s.
2. Patent of USA № 2985050.
3. Barabanov M. V., Ivanov G. M., Sveshnikov V. K., Shapiro I. I. Profil'naia rezka materialov vysokonapornoj struei vody. "Vestnik mashinostroeniia", 1992, № 4, S. 45 - 47.
4. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. Progressivnye tekhnologii gidrostruynogo rezaniia materialov. – Tula: Izd-vo TulGU, 2009. – 318 s.
5. Fokin V.Ia. Oborudovanie zavodov iskusstvennogo zhidkogo topliva - Moskva : Gostoptekhizdat, 1955.-400s.

6. Podgotovka poverkhnosti pered okraskoi: travlenie, peskostruinaia, gidrostruinaia i drobestruiinaia obrabotka poverkhnosti // <http://www.bronepol.ru>
7. Rukovodstvo po zashchite metallokonstruktsii ot korrozii i remontu lakokrasochnykh pokrytii metallicheskiikh proletnykh stroenii ekspluatiruemykh avtodorozhnykh mostov. Ministerstvo transporta Rossiiskoi Federatsii Gosudarstvennaia sluzhba dorozhnogo khoziaistva. // Moskva 2003. // http://libgost.ru/rukovodstvo/67775-Tekst_Rukovodstvo_Rukovodstvo_po_zashite_metallokonstruktsii_ot_korrozii_i_remontu_lakokrasochnykh_pokrytii_metallicheskiikh_proletnykh_stroenii_ekspluatiruemykh_avtodorozhnykh_mostov.html
8. Ignatenko T. Zashchita metallov ot korrozii // Ural'skii rynok metallov. – № 8. – avgust 2005. – s. 12-16.
9. Talypov Sh. M. Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii termoabrazivnoi oчитki vnutrennei poverkhnosti nasosno-kompressornykh trub ot solevykh otlozhenii. Dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk. Ufimskii gosudarstvennyi neftianoi tekhnicheskii universitet, 2009. – 108s.
10. Sure waterjet can clean, but can itpeen? // The Shotpeener. – Winter 2006 // www.shotpeener.com/library/pdf/2006001.pdf
11. S. Ignat'ev Osobennosti rascheta rabochego protsessa v sisteme gidrosbiva okaliny. Sumskii gosudarstvennyi universitet // Vestnik SumDU. Tekhnicheskie nauki. – №1 – 2007. – s.36-38.
12. Burnashov M. A. Povyshenie effektivnosti razrezaniia listovykh nemetallicheskiikh materialov vodoledianymi struiami vysokogo davleniia. Dissertatsiia doktora tekhnicheskikh nauk Orlovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet: Orel, 2010.
13. Peter Pavlitski, Ral'f Rekhbain Sovremennye sposoby udaleniia okaliny // Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologii. – №1. – 2008. – s.42-55.
14. Omel'ianiut M. V. Razrabotka tekhnologii gidradinamicheskoi kavitatsionnoi oчитki trub ot otlozhenii pri remonte skvazhin. Dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk. Kubanskii tekhnologicheskii universitet: Krasnodar, 2004. – 270s.
15. Shunli Xu Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining with Controlled Nozzle Oscillation: School of Engineering Systems. Queensland University of Technology, 2005. – 205s.
16. E. Ray Tanner Component ARMS. A Waterjet Coating Removal System for Aircraft & Missile Components and Small Vehicles. – Waterjet Systems, Inc. – 376c. // <http://www.p2pays.org/ref/03/02312.pdf>
17. Parsadanov V.G., Mekhanicheskie sposoby oчитki metallicheskiikh poverkhnostei <http://www.kolorit-ind.ru/stati/mekhanicheski/>
18. D. Tsoi Tekhnologii i oborudovanie avtoremontnogo proizvodstva: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. – Samara, 2007. – 114 s.
19. S.I. Koriagin, I.V. Pimenov, V.K. Khudiakov Sposoby obrabotki materialov: Kaliningradskii universitet. – Kaliningrad, 2000. – 448 s.
20. Metod gidroabrazivnoi oчитki i obrabotki materialov // http://www.intec.su/gidrooch_stat.shtml
21. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Prezhbilov A. N. Teoreticheskoe obosnovanie razvitiia metoda oчитki poverkhnosti detalei mashin vysokonapornoi vodoledianoi struei s za-ranee podgotovlennymi chastitsami l'da // sbornik nauchnykh trudov pervoi mezhdunarodnoi zaочноi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii /pod red. V.I. Guzeeva i A.A. D'ia-konova. – Cheliabinsk: Izdatel'skii tsentr IuUrGU, 2014. – s.468-471.
22. Prezhbilov A.N. Issledovanie struktury ledianoi chastitsy dlia realizatsii protsessa vodoledianoi oчитki poverkhnosti detalei mashin (stat'ia). - Fundamental'nye problemy tekhniki i tekhnologii - Orel: GU-UNPK, 2012, № 3.Chast' 2. – s. 84–90.
23. Burnashov M.A., Prezhbilov A.N. Oчитka poverkhnostei detalei avtomobilei vodoledianoi struei s zaranee podgotovlennymi chastitsami (stat'ia). - Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin – Orel: Gosuniversitet-UNPK, 2015. - № 3(50). s.46-50.

УДК 621.99.02

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ВОЛНИСТОСТИ ВАЛА НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОЕДИНЕНИЯ «ВАЛ-МАНЖЕТА»

Б.Л. Шрон¹, Э.Э. Ягьяев²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация² ГБОУ ВО «Крымский инженерно-педагогический университет», Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается работа соединения предназначенного для предотвращения протечки масла, из внутренней полости двигателя внутреннего сгорания. Качество, вид и технологические особенности обработки вала влияют на маслосъемность поверхностного слоя соединения «вал-манжета». Погрешности установки в опорах скольжения, а также состояние поверхности и погрешности формы шейки вала в зоне сопряжения с манжетой на практике приводят к утечкам смазки в данной зоне. Для оценки влияния поперечной волнистости на подрыв манжеты, представлена расчетная схема анализа влияния пространственных отклонений вала на работу соединения «вал-манжета».

Получена функция, описывающая контактное взаимодействие вала на манжету. Решение этого уравнения для вынужденных колебаний манжеты позволяет установить, что пока скорость колебания манжеты больше или равна скорости перемещения вала, не происходит отрыв манжеты от вала и соединение надежно. Если скорость перемещения вала больше чем скорость колебания манжеты, происходит отрыв. Это происходит по причине того, что амплитуда вала становится больше амплитуды манжеты, а также частота волн увеличивается, поэтому эластичность, жесткость и демпфирующие свойства манжеты, не успевают повторять контур поверхности вала.

Ключевые слова: вал, манжета, скорость колебания, амплитуда, волнистость, номер гармоники.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE SHAFT'S TRANSVERSE WAVINESS ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF THE CONTACTING SURFACES IN THE «SHAFT-CUFF» CONNECTION

B.L. Shron¹, E.E. Yagyaev²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² Crimean Engineering and Pedagogical University, Russian Federation

Abstract

The article refers to work connection intended to prevent oil leakage from the inner cavity of the internal combustion engine. Quality, type and technological features of the shaft processing affect the oil absorption of the surface layer of the «shaft cuff». Errors in the installation of sliding bearings, as well as the surface condition and the errors of the shaft forms a neck to cuff interface with practice area lead to leakage of grease in the area. To assess the effect of the transverse undulations at undermining cuff design scheme is presented the analysis of the influence of the spatial variations of the shaft to work "shaft-cuff" connection. We obtain a function that describes contact interaction shaft the cuff. The solution of this equation for the forced oscillation of the cuff allows you to set that as long as the speed of oscillation of the cuff is greater than or equal to the speed of movement of the shaft, there is no gap between the sleeve shaft and attached securely. If the speed of the shaft greater than the speed of oscillation of the cuff, the gap occurs. This is due to the fact that the amplitude of the shaft becomes greater amplitude of the cuff, as well as the frequency of the waves increases, so the elasticity, stiffness and damping properties of the cuff, do not have time to follow the contours of the shaft surface.

Keywords: shaft, cuff, adhesion, rate of fluctuation, amplitude, undulation, harmonic number

Введение

Существенное влияние на эксплуатационные свойства двигателей внутреннего сго-

рания оказывает функционирование подсистемы «вал-манжета». Рассматриваемое соединение предназначено для предотвращения протечки жидкости, а именно масла, из

внутренней полости механизма, при этом вал устанавливается в опорах скольжения. Манжетные уплотнения располагаются таким образом, чтобы предотвратить протечки, а также попадание пыли и других объектов со стороны внешней среды. В настоящее время согласно ГОСТ Р53808-2010 [1] известна информация только об общих требованиях, предъявляемых к валу, а отдельных требований к поверхностям вала в зоне сопряжения с манжетой отсутствует. По приведенным данным высота микронеровностей на поверхности стальных деталей, сопряженных с уплотнением, должна быть 0,5-2 мкм, которые образуют своего рода "масляные" карманы", улучшающие условия смазки. В то же время при наличии значительных микронеровностей и дефектов поверхности вала (забоин, вмятин, царапин, повреждений покрытий и др.) быстро разрушается уплотняющий элемент манжеты.

Результаты и обсуждение

Основная часть исследований по обеспечению надежности пары «вал-манжета» [2-10] направлены на совершенствование манжет. Изготовление манжет из новых материалов с усовершенствованными конструкциями не позволяют полностью решить проблему предотвращения протечки масла. Особые требования к валам в зоне контакта не учитываются. В свою очередь качество, вид и технологические особенности обработки вала влияют на маслосъемность поверхностного слоя соединения «вал-манжета». Для выполнения дальнейших исследований работы соединения «вал-манжета», необходимо разработать математическое обеспечение взаимодействия контактирующих поверхностей вала и манжеты. В общем случае на работу соединения «вал-манжета» будут оказывать состояния поверхности шейки вала в зоне контакта и погрешности формы шейки вала в этой же зоне.

Одной из наиболее значительных погрешностей формы, влияющей на подрыв манжеты, является поперечная волнистость.

Целью данной статьи является исследование влияния поперечной волнистости поверхности вала на подрыв кромки манжеты.

На работоспособность соединения значительное влияние оказывают размеры и направления единичных рисков шероховатости поверхности, сформированные при различных методах обработки [11-14]. Однако эти характеристики не нормируются при конструировании изделия. Снижение параметров шероховатости приводит к уменьшению износа манжеты и вала, но приводит к уменьшению маслосъемности поверхности, что в свою очередь в процессе покоя может привести к прилипанию и при запуске возможно повреждение манжеты.

Наличие погрешностей установки в опорах скольжения, а также состояние поверхности и погрешности формы шейки вала в зоне сопряжения с манжетой на практике приводят к утечкам смазки в данной зоне.

Для оценки влияния поперечной волнистости на подрыв манжеты, опишем схему взаимодействия кромки манжеты с поверхностью вала (рис. 1).

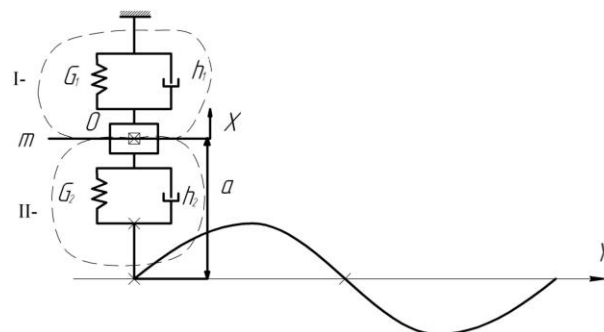


Рис. 1. Схема взаимодействия кромки манжеты с поверхностью вала

На данной схеме точка O представляет собой центр масс манжеты в состоянии покоя на номинальной поверхности. Волнистую поверхность вала в поперечном сечении представим в виде волнистой линии синусоиды, которая перемещаясь по оси Y (горизонтально) вызовет перемещение точки O (центра масс) по оси X . Свойства манжеты расположенные выше центра масс характеризуются жесткостью G_1 с демпфирующими свойствами h_1 , свойства манжеты ниже центра масс описываются свойствами жесткости G_2

и демпфирующие свойством h_2 . Расстояние от точки контакта манжеты с валом до точки центра масс (точка O) равно (a_0) при условии, что $X=0$; $Y=0$ в начальный момент времени $t=0$.

При достижении точки вершины волны расстояние до точки O станет минимальным, а во впадине расстояние до точки O станет максимальным, т.е. начальные условия можно представить следующим образом: $t=0$ $X=0$; $Y=0$; что соответствует номинальному расстоянию a_0 .

Для надежной работы соединения должны обеспечиваться следующие требования:

$$a \geq a_{\min} \quad a \leq a_{\max}$$

значение $a_{\max}$ это расстояние между центром манжеты и точкой контакта с манжетой при которой наблюдается отрыв манжеты от вала то есть начинается разгерметизация.

$a_{\min}$ это расстояние между манжетой и точкой контакта, при котором наблюдается переход от нормального износа к повышенному.

Движение точки центра масс по волнистой поверхности в любой момент времени можно представить в виде уточненной схемы (рис. 2), где расстояние от номинальной поверхности до точки контакта на волнистой поверхности учитывается расстоянием Y .

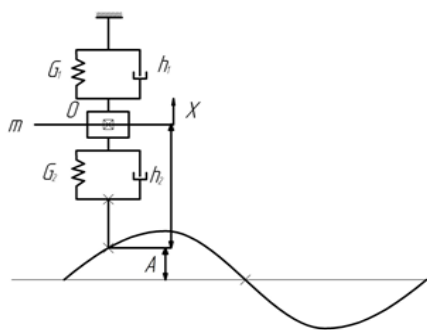


Рис. 2. Расчетная схема анализа влияния пространственных отклонений вала на работу соединения «вал-манжета»

Данная схема может быть описана дифференциальным уравнением, которое имеет следующий вид.

$$m\ddot{x} + \dot{x}(h_1 + h_2) + (G_1 + G_2)x = G \cdot R(\omega t), \quad (1)$$

где $G = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}$ – совместная жесткость

упругих элементов G_1 и G_2 ;

$R(t)$ – периодическая функция, описывающая контактное действие неровностей поверхности вращающегося вала на манжету.

Контур поперечного сечения вала зададим параметрической системой уравнений в декартовой системе координат с началом на оси вала.

$$x = a \cos \varphi + \varepsilon a \cos(n-1)\varphi, \quad (2)$$

$$y = a \sin \varphi - \varepsilon a \sin(n-1)\varphi,$$

где a – радиус идеального вала, φ – полярный угол, отсчитываемый от оси OX против часовой стрелки; $n=1,2,3,\dots$ – номер гармоники (порядок осевой симметрии) контура сечения вала, ε – параметр погрешности вала (волнистость).

При $n=1$ имеет место случай смещения центра вала, что приводит к нарушению соосности вала и манжеты, следовательно, первая гармоника определяет эксцентриситет поверхности. $n=2$ соответствует «эллиптической» волнистости вала, $n=3$ – «треугольной» волнистости, $n=4$ – «квадратной» волнистости, и т.д. Представим графически погрешности установки в зависимости от порядка гармоники на (рис. 3) при $n=1,2,3$.

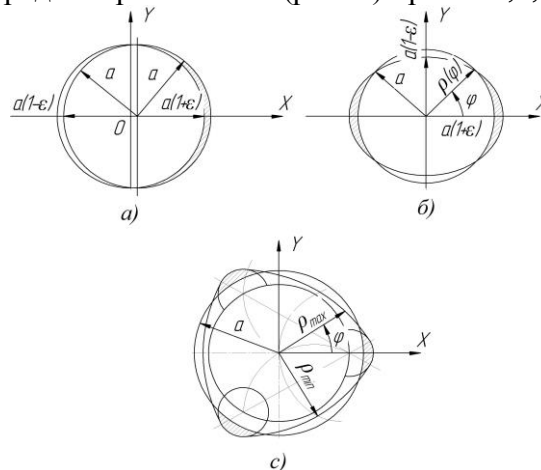


Рис. 3. Графическое представление погрешности установки в зависимости от порядка гармоники при а) $n=1$, б) $n=2$, в) $n=3$

Уравнение контура вала удобно задавать в полярной системе координат с полюсом на оси вала.

$$\rho(\varphi) = a(1 + \varepsilon \cos n\varphi), \quad (3)$$

где $\rho(\varphi)$ – радиус вектор точек контура сечения вала,

Максимальное значение радиус вектора определяется, $\rho_{\max} = a(1 + \varepsilon)$, а минимальное $\rho_{\min} = a(1 - \varepsilon)$.

Для вала вращающегося с угловой частотой ω , полярный угол $\varphi = \omega \cdot t$.

Отсюда функция, описывающая контактное взаимодействие вала на манжету, имеет вид

$$R(t) = \rho(\omega t) - a = \varepsilon a \cos n\omega t. \quad (4)$$

В результате, уравнение (1), примет вид

$$m\ddot{x} + \dot{x}(h_1 + h_2) + (G_1 + G_2)x = \varepsilon G \cdot a \cos n\omega t. \quad (5)$$

Решение этого уравнения для вынужденных колебаний манжеты дается выражением [15]

$$x_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon ga}{\sqrt{(k^2 - n^2\omega^2)^2 + \gamma^2 n^2\omega^2}} \cos(n\omega t + \alpha); \quad (6)$$

где

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\gamma n\omega}{k^2 - n^2\omega^2}\right); \quad g = \frac{G}{m};$$

$$k^2 = \frac{G_1 + G_2}{m}; \quad \gamma = \frac{h_1 + h_2}{m}.$$

При наличии такой погрешности формы, как поперечная волнистость, колебательная система будет соответствовать гармоникам второго и более высокого порядков.

Рассчитав значения x_{ε} можно установить, что уравнение описывает два важных момента:

1 - до тех пор пока скорость колебания манжеты больше или равна скорости перемещения вала, не происходит отрыв манжеты от вала и соединение надежно;

2 - как только скорость перемещения вала больше чем скорость колебания манжеты, происходит отрыв. Это происходит по причине того, что амплитуда вала становится больше амплитуды манжеты, а так же частота волн увеличивается, поэтому эластичность, жесткость и демпфирующие свойства манжеты, не успевают повторять контур поверхности вала.

Выводы

Таким образом, рассмотренные материалы показывают, что для назначения технических требований на пространственные отклонения вала необходимо решить систему неравенств.

Из полученных результатов можно определить по скорости вращения вала максимально допустимое количество волн. При этом необходимо учесть частотные характеристики пространственных отклонений, частоту вращения вала и физикомеханические свойства манжеты.

Список литературы

1. ГОСТ Р 53808-2010 Национальный стандарт Российской Федерации. Двигатели автомобильные. Валы распределительные. Технические требования и методы испытаний. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53808-2010>.
2. Коркин А.А. Анализ надёжности силовых агрегатов КАМАЗ-ЕВРО / А.С. Денисов, В.Н. Басков, А.А. Коркин, А.А. Шохин, О.В. Федоров, О.В. Литвинова // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин. Сб. науч. тр. Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов. 2008. С. 4-8.
3. Уплотнения вращающихся валов / Технический бюллетень R-P-SS-0902 Кременчуг. 2012. – 25 с.
4. Бобровицкий В.И. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт / В.И. Бобровицкий, В.А. Сидоров. — Донецк: Юго-Восток, 2011. — 238 с.
5. Грабовый В. М. Повышение производительности и качества при обработке деталей двигателя на операциях шлифования / В.М. Грабовый А.Н. Пономаренко / — К. : Общество «Знание» Украины, 1993. – 24 с.
6. Новоселов Ю. К. Взаимодействие контактных поверхностей соединений вал-манжета / К.Ю. Новоселов, Н.Р. Голдыбина // Вестник СевНТУ: материалы международной научн. конф. – Севастополь, 2008. – С. 43–45.
7. Линчевский П.А. Повышение износостойкости поверхностей трения формирования частично регулярного микрорельефа./ П.А. Линчевский, Г.В. Новак, Л.Б. Шрон и др.// Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 36. Технические науки. – Симферополь 2012г. – С. 32 – 34
8. Новоселов Ю.К. Влияние величины кольцевого зазора на работо-способность соединения вал-манжета/ Ю.К. Новоселов, Б.Л. Шрон // Прогресивні напрямки розвитку машинобудування, транспорту та екології: матер. міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, Севастополь, 20-23 травня 2012р. – Севастополь, 2013. – С.224 – 225.

9. Новоселов Ю.К. Влияние состояния зоны контакта на работоспособность соединения «вал-манжета»./ Ю.К. Новоселов, Б.Л. Шрон // Ученые записки крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 45. Технические науки. – Симферополь, НИЦ КИПУ, 2014. – С.24-27.
10. Бобровский Н.М. Оптимизация параметров процесса выглаживания в производственных условиях с целью получения поверхности, пригодной для работы в условиях гидродинамического трения // Бобровский Н.М., Мельников П.А. Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 2(16). – С. 65–67.
11. Новоселов Ю.К. Влияние микрорельефа обработанных поверхностей на работоспособность пар трения/ Ю.К. Новоселов, Б.Л. Шрон // Современные инженерные и инженерно-педагогические технологии. Выпуск 3 Симферополь, 2012 С.70-71
12. Новоселов Ю.К. Расчет параметров шероховатости поверхности при круглом наружном шлифовании// Ю.К. Новоселов, В.Б. Богущий, Л.Б. Шрон, Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2012. – №53 (959) 2012. – С.98-119.
13. Бобровский Н.М. Исследование влияния режимов обработки на шероховатость поверхности закаленных валов в условиях массового производства / Н.М. Бобровский, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский, А.В. Ежелев, А.А. Лукьянов // Современные проблемы науки и образования, 2011. URL: www.science-education.ru/99-4791 (дата обращения: 17.09.2013).
14. Шнейдер Ю.Г. Технологии финишной обработки давлением: справочник./ Шнейдер Ю.Г. // – СПб.: Политехника, 1998. – 413 с.
15. Ландау Л. Д. Теоретическая физика, в 10-ти томах. Том I — Механика. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц //— Издание 4-е, исправленное. — М.: Наука, 1988. — 169 с.
6. Novoselov Ju. K. Vzaimodejstvie kontaktnykh poverhnostej soedinenij val-manzheta / K.Ju. Novoselov, N.R. Goldybina // Vestnik SevNTU: materialy mezhdunarodnoj nauchn. konf. – Sevastopol', 2008. – S. 43–45.
7. Linchevskiy P.A. Povyshenie iznosostoykosti poverhnostey treniya formirovaniya chastichno regul'yarnogo mikrorel'efa./ P.A. Linchevskiy, G.V. Novak, L.B. Shron i dr.// Uchyonye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vypusk 36. Tehnicheskie nauki. – Simferopol 2012g. – S. 32 – 34
8. Novoselov Yu.K. Vliyanie velichiny kol-cevogo zazora na raboto-sposobnost soedineniya val-manzheta/ Yu.K. Novoselov, B.L. Shron // Progresivni napryamki rozvitku mashinoprladobuduvannya, transportu ta ekologii: mater. mizhnar. nauk.-tehn. konf. stud., aspirantiv ta molodih vchenih, Sevastopol, 20-23 travnya 2012r. – Sevastopol, 2013. – S.224 – 225.
9. Novoselov Yu.K. Vliyanie sostoyaniya zony kontakta na rabotosposobnost soedineniya «val-manzheta»./ Yu.K. Novoselov, B.L. Shron // Uchenye zapiski krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vypusk 45. Tehnicheskie nauki. – Simferopol, NIC KIPU, 2014. – S.24-27.
10. Bobrovskiy N.M. Optimizaciya parametrov processa vyglazhivaniya v proizvodstvennykh usloviyakh s celyu polucheniya poverhnosti, prigodnoy dlya raboty v usloviyakh gidrodinamicheskogo treniya // Bobrovskiy N.M., Melnikov P.A. Vektor nauki TGU. – 2011. – № 2(16). – С. 65–67.
11. Novoselov Yu.K. Vliyanie mikrorel'efa obrabotannykh poverhnostey na rabotosposobnost par treniya/ Yu.K. Novoselov, B.L. Shron // Sovremennyye inzhenernye i inzhenerno-pedagogicheskie tehnologi. Vypusk 3 Simferopol, 2012 S.70-71
12. Novosyolov Yu.K. Raschet parametrov sherohovatosti poverhnosti pri kruglom naruzhnom shlifovanii// Yu.K. Novosyolov, V.B. Boguckiy, L.B. Shron, Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac. Seriya: Technologii v mashinobuduvanni. – H. : NTU «HPI». – 2012. – №53 (959) 2012. – S.98-119.
13. Bobrovskiy N.M. Issledovanie vliyaniya re-zhimov obrabotki na sherohovatost poverhnosti zakalennykh valov v usloviyakh massovogo proizvodstva / N.M. Bobrovskiy, P.A. Melnikov, I.N. Bobrovskiy, A.V. Ezhelev, A.A. Lukyanov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, 2011. URL: www.science-education.ru/99-4791 (data obrascheniya: 17.09.2013).
14. Shneyder Yu.G. Tehnologiya finishnoy obra-botki davleniem: spravochnik./ Shneyder Yu.G. // – Spb.: Politehnika, 1998. – 413 s.
15. Landau L. D. Teoreticheskaya fizika, v 10-ti tomah. Tom I — Mehanika. / L. D. Landau, E. M. Lifshic //— Izdanie 4-e, ispravlennoe. — M.: Nauka, 1988. — 169 s.

References

1. GOST R 53808-2010 Nacional'nyy standart Rossijskoj Federacii. Dvigateli avtomobil'nye. Valy raspredelitel'nye. Tehnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy. [Jelektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53808-2010>.
2. Korkin A.A. Analiz nadjozhnosti silovykh agregatov KAMAZ-EVRO / A.S. Denisov, V.N. Baskov, A.A. Korkin, A.A. Shohin, O.V. Fedorov, O.V. Litvinova // Sovershenstvovanie tehnologij i organizacii obespecheniya rabotosposobnosti mashin. Sb. nauch. tr. Sarat. gos. tehn. un-t. Saratov. 2008. S. 4-8.
3. Uplotneniya vrashhajushhihsja valov / Tehnicheskij bjulleten' R-P-SS-0902 Kremenchug. 2012. – 25 s.
4. Bobrovickij V.I. Mehanicheskoe oborudovanie: tehniceskoe obsluzhivanie i remont / V.I. Bobrovickij, V.A. Sidorov. — Doneck: Jugo-Vostok, 2011. — 238 s.
5. Grabovij V. M. Povyshenie proizvoditel'no-sti i kachestva pri obrabotke detalej dvigatelja na operacijah shlifovanija / V.M. Grabovij A.N. Pono-

УДК 621.9.65.015

МЕТОДИКА РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА В ПРОЦЕССАХ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

А.С. Яглицкая¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен метод лазерного спекания при изготовлении детали, представлены упрощённая размерная схема выращивания слоя, а также схемы с учётом структурных изменений материала, размерные цепи, выполнен анализ изменения слоя. Целью данной статьи является повышение производительности при быстром прототипировании сложнопрофильных изделий за счет размерного анализа технологических процессов на стадии их проектирования. Размерный анализ процессов прототипирования наиболее актуален, когда к детали предъявляются более высокие требования по точности изготовления и когда после изготовления детали подвергаются механической обработке. Разработанная методика размерного анализа процессов лазерного спекания позволяет технологически рационально применять на этапе подготовки производства изделия средства проектного моделирования (CAD/CAM-системы).

Ключевые слова: размерный анализ, быстрое прототипирование, лазерное спекание, размерная схема, размерная цепь, слой, лазер, источник, деформация.

METHODS DIMENSION OF ANALYSIS IN THE PROCESS OF PROTOTYPING

A.S. Jaglitskaya¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The method of laser sintering in the manufacture of parts, presented a simplified diagram dimensional cultivation layer, as well as schemes taking into account the structural changes of the material, the dimensional chain, the analysis of changes in the layer. The purpose of this article is to increase productivity with rapid prototyping complex-products due to the dimensional analysis of technological processes at the design stage. Dimensional analysis prototyping processes most relevant to the parts when higher demands on precision manufacturing, and after manufacture when parts are machined. The developed technique of dimensional analysis of the laser sintering process allows the technologist to efficiently apply at the stage of pre-production product design simulation tools (CAD / CAM systems).

Keywords: dimensional analysis, rapid prototyping, dimensional diagram dimensional circuit layer, a laser source, deformation.

Введение

Наиболее рациональные условия выполнения технологических процессов создаются на основе опыта и проведения экспериментальных исследований. Интегрированные технологии применяют в единичном и мелкосерийном производстве, для каждой номенклатуры изделий проведение таких исследований невозможно, а общие рекомендации не учитывают все многообразие материалов, конструкций и режимов.

Технологии формирования трехмерных объектов не путем удаления материала (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка) или изменения формы заготовки (ковка, штамповка, прессовка), а путем постепенного наращивания (добавления) или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства интенсивно развиваются. Из них значительного прогресса достигли технологии послойного формирования трехмерных объектов по их компьютерным образам. Эти технологии наиболее известны как технологии быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping) [2-15].

Существуют различные RP-системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов.

Результаты и обсуждение

Целью данной статьи является повышение производительности методов быстрого прототипирования при изготовлении сложнопрофильных изделий за счет внедрения размерного анализа технологических процессов.

По классификации систем операция прототипирования может рассматриваться как дискретная динамическая система.

Модель математической структуры (рис. 1) (законов функционирования) системы принято называть совокупность четырех элементов:

1. пространство состояний $Z(t)$;
2. пространство входных переменных X и $U(t)$;
3. пространство выходящих переменных $Y(t)$;
4. соотношений, связывающих входные и выходные состояния системы.

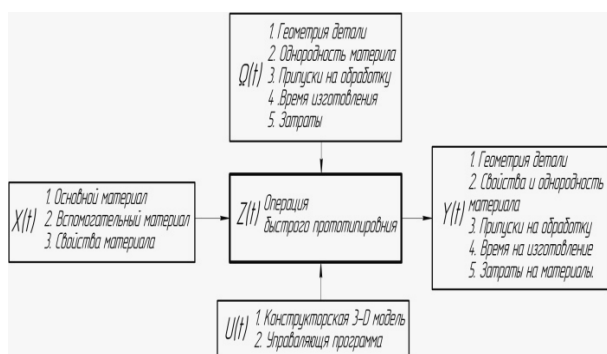


Рис. 1. Модель математической структуры

С точки зрения размерных связей можно выделить две основные группы прототипирования. К первой относятся методы, при применении которых пространственное расположение очередного слоя определяют его координатами относительно базовой поверхности, ко вторым – при применении которых задают толщину нанесённого очередного слоя. Вполне очевидно, что методы размерного анализа для этих групп будут существенно различаться. Для обоснования

последовательности анализа и отработки системы обозначений размеров рассмотрим упрощённую схему, (рис. 2).

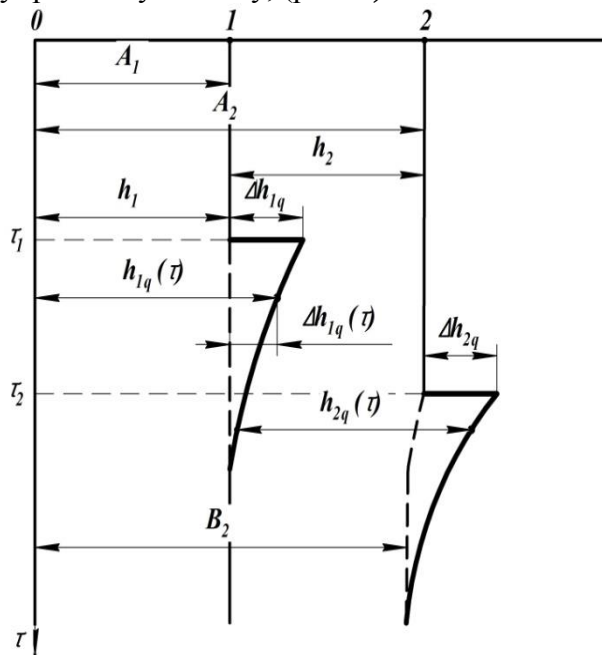


Рис. 2. Упрощённая размерная схема

Для начала будем считать, что «0» оборудования совпадает с базой. На схеме база обозначена вертикальной нулевой линией, 0- τ_1 - τ_2 , где τ – текущее время работы. Программой оборудования задано расположение верхней границы первого слоя, размер A_1 , и определена его исходная толщина h_1 . В момент τ_1 производят спекание первого слоя (рассматривается случай лазерного спекания) выделяется много тепла, в результате которого изменяется размер первого слоя на величину Δh_{1q} . В результате размер первого слоя после окончания спекания $h_{1q} = h_1 + \Delta h_{1q}$. Далее наносят второй слой. За время нанесения и выравнивания второго слоя температура первого слоя уменьшается, в результате чего снижаются его тепловые деформации. На момент окончания нанесения и выравнивания остаточные деформации обозначены $\Delta h_{1q}(\tau)$ и $h_{1q}(\tau) = h_1 + \Delta h_{1q}(\tau)$. Толщина второго слоя при $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ в соответствии с размерной цепью будет равна $h_2(\tau) = A_2 - h_{1q}(\tau)$. В момент времени τ_2 происходит спекание вто-

рого слоя в результате воздействия температуры его размер увеличивается на Δh_{2q} . В текущий момент времени при $\tau \geq \tau_2$ $h_{2q}(\tau) = h_2 + \Delta h_{2q}(\tau) - \Delta h_{1q}(\tau)$, а размер до верхней границы слоя после остывания определяется $B_2 = A_2 - \Delta h_{1q}(\tau_2)$.

Проведём анализ погрешностей прототипирования при изготовлении наиболее простой детали типа цилиндра. Вариант производства такой детали рассматривается на рисунке 3.

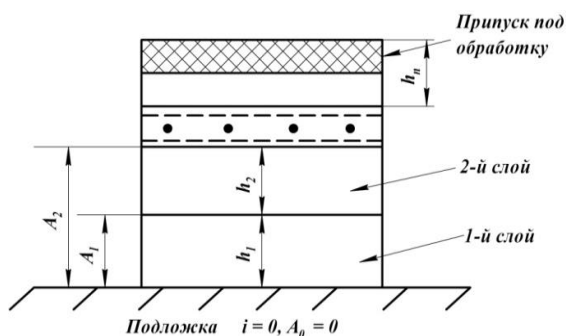


Рис. 3. Заготовка типа цилиндра, изготовленная методом лазерного спекания

Размер от начала координат до верхней границы нанесённого слоя A_1 определяется как сумма трёх величин: размер, предусмотренный программой оборудования A_{1np} , закономерными погрешностями $A_{1з}$ и случайными погрешностями $\Delta A_{1\sigma}$

$$A_1 = A_{1np} + \Delta A_{1з} + \Delta A_{1\sigma}. \quad (1)$$

Закономерные погрешности определяются погрешностями системы отчёта оборудования, точностью изготовления устройства для нанесения слоя, параметрами материала наносимого слоя.

Случайные погрешности возникают вследствие наличия вектора возмущающих воздействий Ω [5]. Можно считать, что они имеют закон нормального распределения и центрированы относительно математического ожидания первых двух согласных. Кроме рассмотренных верхняя граница первого слоя может иметь пространственные отклонения (например, непараллельность, волнистость и другие).

Размер от верхней границы слоя до базы в рассматриваемой размерной цепи будет

являться замыкающим звеном. Он рассчитывается как разность

$$A_{1-\delta} = A_1 - A_{\delta}, \quad (2)$$

где A_{δ} – размер от начала координат до базы.

По (2) так же определяется толщина первого слоя h_1 .

Известно, что допуск замыкающего звена при расчёте размерных цепей по максимуму, минимуму равен сумме допусков составляющих звеньев. На основании этого

$$\delta_{A_{1-\delta}} = \delta_{A_1} + \delta_{\delta}, \quad (3)$$

$$\delta_{A_{1-\delta}} = \Delta_{A_1} + 6\sigma_{A_1} + \Delta_{A\delta} + 6\sigma_{A\delta} \quad (4)$$

Таким образом, отклонения размера верхнего слоя поверхности от базы определяются закономерными и случайными отклонения размера до базы и размера до слоя в системе координат оборудования. Среднеквадратическое отклонение суммы случайных погрешностей в уравнении (4) может быть определено по сумме дисперсий [10].

Уравнения 1-4 дают возможность рассчитать размеры и отклонения (допуски) для 1-ого слоя после его нанесения. Дальнейшее изменение этих размеров наблюдается при проведении процедуры спекания (отверждения). Выполним анализ таких изменений на основе более детальной размерной схемы. В границах времени $\tau = \tau_2$ происходит спекание первого слоя. При этом изменяются координаты его верхней границы вследствие изменения плотности и структуры ΔA_{cm} , температуры ΔA_{1q} , что представлено на рисунке ломаной линией. Таким образом, размер верхней границы слоя относительно базы определяется

$$A'_{1-\delta} = A_{1-\delta} - \Delta A_{cm} + \Delta A_{1q}. \quad (5)$$

Изменение размеров вследствие структурных и температурных деформаций могут быть весьма значительными. Поэтому нанесение следующего слоя выполняют через заданный интервал времени τ . В связи с этим уравнение (5) следует дополнить слагаемым,

определяющим изменение координаты слоя в течении времени $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$

$$A''_{1-\delta} = A_{1-\delta} - \Delta A_{1cm} + \Delta A_{1q} - \Delta A_{1q}(\tau). \quad (6)$$

Каждое из слагаемых уравнения (6) может содержать как закономерные, так и случайные составляющие. Например, закономерные структурные изменения размеров зависят от состава исходного сырья, температуры окружающей среды и ряда других факторов. Аналогично (4) вычисляется и допуск замыкающего звена размерной цепи.

Таким образом, результирующий размер

$A''_{1-\delta}$ по уравнению (6), определяется 12 компонентами, каждый из которых требует оценки и определения. При полном остывании нанесённого слоя в уравнении (6) остаются только два первых слагаемых.

Размерный анализ процесса нанесения второго слоя выполним с момента времени τ_1 , после окончания спекания первого слоя.

Для второго слоя остаются справедливыми уравнения (2), (3), (4). Однако для расчёта толщины наносимого слоя, которая определяет величину структурных и температурных изменений, требуется дополнительное уравнение, которое в соответствии с (рис. 3) определяется

$$h_2 = A_2 - \Delta A_{1cm} + \Delta A_{1q} - \Delta A_{1q}(\tau). \quad (7)$$

Выводы

Разработанная методика размерного анализа процессов лазерного спекания позволяет технологу рационально применять на этапе подготовки производства изделия средства проектного моделирования (CAD/CAM-системы), обеспечивающие уменьшение временных и материальных затрат технологических и конструкторских работ, процессов изготовления технологической оснастки, увеличение качества выпускаемых изделий и конкурентоспособности новой модели изделия.

Список литературы

1. Матвеев В.В. Размерный анализ технологических процессов / В.В. Матвеев, М.М. Тверской, Ф.И. Бойков [и др.] М.: Машиностроение, 1982. 264с., ил. (Б-ка технолога).
2. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: монография / Под редакцией д-ра техн. наук Л.Л. Товажнянского, д-ра техн. наук А.И. Грабченко. Харьков: ОАО "Модель Вселенной", 2005. 224 с.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
4. Зыков С.Н. Применение технологий быстрого прототипирования в дизайнерском проектировании / С.Н. Зыков, К.С. Ившин, Н.Ф. Коротаева [и др.] // Теория динамических систем в приоритетных направлениях науки, технологии и техники: Сборник докладов второй Всероссийской конференции молодых ученых, преподавателей, аспирантов и студентов. Екатеринбург - Ижевск, 2007. С. 170-176.
5. Кузнецов Ю.Н., Новосёлов Ю.К., Луцев И.В. Теория технических систем: учебник / Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. 252 с.
6. Бондаренко С.Г. Размерный анализ конструкций: справочник / С.Г. Бондаренко, О.Н. Чередников, В.П. Губий, [и др.] / Под общ. ред. канд. техн. наук С.Г. Бондаренко. К.: Техника, 1989. 150 с.
7. Материалы с официального сайта проекта RepRap: <http://reprap.org>.
8. Статья К. Афанасьева «3D-принтеры» <http://www.3dnews.ru/peripheral/3d-print/index3.htm>.
9. Материалы с сайта компании Z-Corporation: <http://www.zcorp.com/>.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. Для ВУЗов – 7 – е изд. стер. М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.
11. Масягин В.Б. Совершенствование теории размерного анализа на основе кромочной модели деталей типа тел вращения: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.08. Омск, 2012. 40 с.
12. Ившин, К.С. Разработка методических рекомендаций для проектного моделирования художественного изделия с применением технологии стереолитографии / К.С. Ившин, Н.Ф. Коротаева // Вестник МГХПУ. – 2008.
13. Исупов, В.С. Инкрустация металлом / В.С. Исупов, Н.Ф. Коротаева // Сборник научных трудов аспирантов и преподавателей. – Екатеринбург-Ижевск, 2004.
14. Коротаева, Н.Ф. Новые технологии в моделировании объектов промышленного дизайна / Н.Ф. Коротаева // Информатизация и информационные технологии в устойчивом развитии региона:

Мат-лы Всероссийской научно-практической конференции. – Сыктывкар, 2007. – С. 61-63.

15. Применение технологий быстрого прототипирования в дизайнерском проектировании / С.Н. Зыков, К.С. Ившин, Н.Ф. Коротаева, Д.Н. Брагин // Теория динамических систем в приоритетных направлениях науки, технологии и техники: Сборник докладов второй Всероссийской конференции молодых ученых, преподавателей, аспирантов и студентов. – Екатеринбург-Ижевск, 2007.

References

1. Matveev V.V. Razmernyi analiz tekhnologicheskikh protsessov / V.V. Matveev, M.M. Tverskoi, F.I. Boikov [i dr.] M.: Mashinostroenie, 1982. 264s., il. (B-ka tekhnologa).
2. Integrirovannye tekhnologii uskorenno prototipirovaniia i izgotovleniia: monografiia / Pod redaktsiei d-ra tekhn. nauk L.L. Tovazhnianskogo, d-ra tekhn. nauk A.I. Grabchenko. Khar'kov: OAO "Model' Vselennoi", 2005. 224 s.
3. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki: ucheb. posobie dlia vuzov / Pod red. A.G. Grigor'iantsa. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 664 s.
4. Zykov S.N. Primenenie tekhnologii bystrogo prototipirovaniia v dizainerskom proektirovanii / S.N. Zykov, K.S. Ivshin, N.F. Korotaeva [i dr.] // Teoriia dinamicheskikh sistem v prioritnykh napravleniiakh nauki, tekhnologii i tekhniki: Sbornik dokladov vtoroi Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh, prepodavatelei, aspirantov i studentov. Ekaterinburg - Izhevsk, 2007. S. 170-176.
5. Kuznetsov Iu.N., Novoselov Iu.K., Lutsiv I.V. Teoriia tekhnicheskikh sistem: uchebnik / Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2010. 252 s.
6. Bondarenko S.G. Razmernyi analiz konstruktсии: spravochnik / S.G. Bondarenko, O.N. Cherednikov, V.P. Gubii, [i dr.] / Pod obshch. red. kand. tekhn. nauk S.G. Bondarenko. K.: Tekhnika, 1989. 150 s.
7. Materialy s ofitsial'nogo saitа proekta RepRap: <http://reprap.org>.
8. Stat'ia K. Afanas'eva «3D-printery» <http://www.3dnews.ru/peripheral/3d-print/index3.htm>.
9. Materialy s saitа kompanii Z-Corporation: <http://www.zcorp.com/>.
10. Venttsel' E.S. Teoriia veroiatnostei: Ucheb. dlia VUZov – 7 – e izd. ster. M.: Vyssh. shk., 2001. – 575 s.
11. Masiagin V.B. Sovershenstvovanie teorii razmernogo analiza na osnove kromochnoi modeli detalei tipa tel vrashcheniia: avtoref. dis. d-ra. tekhn. nauk: 05.02.08. Omsk, 2012. 40 s.
12. Ivshin, K.S. Razrabotka metodicheskikh rekomendatsii dlia proektnogo modelirovaniia khudozhestvennogo izdeliia s primeneniem tekhnologii stereolitografii / K.S. Ivshin, N.F. Korotaeva // Vestnik MGKHPU. – 2008.
13. Isupov, V.S. Inkrustatsiia metallom / V.S. Isupov, N.F. Korotaeva // Sbornik nauchnykh trudov aspirantov i prepodavatelei. – Ekaterinburg-Izhevsk, 2004.
14. Korotaeva, N.F. Novye tekhnologii v modelirovanii ob"ektov promyshlennogo dizaina / N.F. Korotaeva // Informatizatsiia i informatsionnye tekhnologii v ustoichivom razvitii regiona: Mat-ly Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. – Syktyvkar, 2007. – S. 61-63.
15. Primenenie tekhnologii bystrogo prototipirovaniia v dizainerskom proektirovanii / S.N. Zykov, K.S. Ivshin, N.F. Korotaeva, D.N. Bragin // Teoriia dinamicheskikh sistem v prioritnykh napravleniiakh nauki, tekhnologii i tekhniki: Sbornik dokladov vtoroi Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh, prepodavatelei, aspirantov i studentov. – Ekaterinburg-Izhevsk, 2007.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск № 3 2016

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

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

Адрес редакции:

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

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

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

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

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.

