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

№ 1(21)
2021

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 2021» (6 – 10 сентября 2021 года)*

Севастополь 2021

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – РОЩУПКИН С.И.

Научный редактор

к.т.н., проф. ХАРЧЕНКО А.О.

Отв. секретарь

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Редакционная коллегия

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

СОДЕРЖАНИЕ

Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевская Т.В. Альтернативные методы подавления колебаний упругой системы	4
Чуракова А.А., Каюмова Э.М. Исследование процесса коррозии в сплаве Ti49.0Ni51.0 с эффектом памяти формы в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях	11
Братан С.М., Часовитина А.С., Новоселов Ю.К. Исследование влияния пластических деформаций на вероятность удаления материала при чистовом шлифовании титановых сплавов	17
Скакун В.В. Повышение качества обработанной поверхности при растачивании отверстий путем применения экологически безопасных СОТС.....	22
Стреляная Ю.О., Тараховский А.Ю., Мухина О.В., Сопин П.К. Построение модели гидростатического подшипника с учетом профиля кармана опоры.....	28
Фарниев А.С., Новиков П.А. Исследование точности внутренних резьб, сформированных при помощи технологии FDM.....	33

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

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

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

Chief Editor	
D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.	
Associate Editor in Chief	
Ph.D., Associate Prof – ROSHCHUPKIN S.I.	
Scientific Editor	
Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.	
Executive Secretary	
D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.	
Editorial team	
ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHOV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc.Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Mozolevskaya T.V. Alternative methods of the elastic system oscillation suppression	4
Churakova A.A., Kayumova E.M. Research of corrosion process in Ti49.0Ni51.0 alloy with a shape memory effect in coarse-grained and ultrafine-grained states	11
Bratan S.M., Chasovitina A.S., Novoselov Yu.K. Investigation of the effect of plastic deformations on the probability of material removal during the final grinding of titanium alloys	17
Skakun V.V. Improving the quality of the treated surface during drilling holes by using environmentally safe cutting emulsion.....	22
Strelyanaya Yu.O., Tarakhovskiy A.Yu., Mukhina O.V., Sopin P.K. Construction of model of the hydrostatic bearing taking into account a profile of a pocket of a support.....	28
Farniev A.S., Novikov P.A. Research of the accuracy of internal threads formed by FDM technology	33

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

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

УДК 519.3:05.011.56:621.865.8

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ

А.И. Бохонский¹, Н.И. Варминская², Т.В. Мозолева²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация² ФГКОУ ВПО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

На примере линейной упругой системы (с одной степенью свободы) иллюстрируется использование методов пассивного и активного (управляемого) подавления свободных колебаний, вызванных начальными условиями. Рассмотрен случай совпадения результатов динамического поведения объекта при заданных начальных условиях и использовании релейного управления (принцип максимума), сухого трения, резонансного управления, линейно-вязкого сопротивления.

Ключевые слова: упругая система, гашение колебаний, релейное управление, сухое трение, резонансное управление, линейно-вязкое сопротивление.

ALTERNATIVE METHODS OF THE ELASTIC SYSTEM OSCILLATION SUPPRESSION

A.I. Bokhonsky¹, N.I. Varminskaya², T.V. Mozolevskaya²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Using a linear elastic system (with one degree of freedom) as an example, the use of methods of passive and active (controlled) suppression of free oscillations caused by initial conditions is illustrated. The case of coincidence of the results of the dynamic behavior of an object under given initial conditions and the use of relay control (maximum principle), dry friction, resonance control, linear-viscous resistance is considered.

Keywords: elastic system, oscillation damping, relay control, dry friction, resonance control, linear-viscous resistance.

Введение

В технике причин возникновения колебаний упругих систем достаточно много. Теория колебаний линейных и нелинейных систем развита и отражена в ряде классических трудов [1 – 5].

В современном производстве при повышении производительности оборудования (например, быстром перемещении упругих систем) возникают колебания, отрицательно влияющие на качество технологического процесса.

Пассивному и активному (управляемому) гашению колебаний упругих систем по-

священы работы [6 – 12], в которых эффективно используются методы теории оптимального управления для моделирования управляемого процесса подавления колебаний [8].

В работах [12 – 28] приведены результаты синтеза управлений переносным движением упругих систем с приложениями к исполнительным органам манипуляторов конечной жесткости.

В [15 – 16] описан алгоритм реверсионного конструирования управлений переносным движением объектов, предполагающий в конечном счете восстановление функционала-критерия оптимальности. Совершен-

ствование алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (от функции к уравнению Эйлера и функционалу-критерию) отражено в [15], где дана формулировка реверсионного принципа оптимальности (РПО). Восстанавливаемый в соответствии с правилами реверсионного конструирования функционал-критерий имеет минимум, что подтверждается как классическими достаточными условиями экстремума, так и построением графического образа функционала.

При оптимальном переносном поступательном либо вращательном движении упругого объекта с достижением абсолютного, либо относительного покоя в конечный момент времени могут иметь место интенсивные колебания во время относительного движения. Снизить уровень колебаний возможно в этом случае, используя ПИД-регулятор либо соответственно увеличивая время переносного движения.

Как отмечает Р.В. Гамкрелидзе в статье [13], посвященной открытию принципа максимума Понтрягина (ПМП), поводом послужила задача D.W. Bushaw (1952 г.) синтеза управления по быстродействию для гармонического осциллятора. ПМП применим, например, при поиске релейного управления для подавления колебаний упругого осциллятора, обусловленных начальными условиями. В настоящее время задачи управления колебаниями или подавления колебаний продолжают оставаться актуальными.

Уравнение движения осциллятора

Уравнение динамики гармонического осциллятора (D.W. Bushaw, 1952 г.)

$$\ddot{x} + x = u, \quad |u| = 1 \quad (1)$$

сыграло исторически важную роль в открытии принципа максимума П.С. Понтрягина [13].

При сложном движении (переносном и относительном) уравнение (1) описывает динамику относительного движения (рис. 1).

$$\ddot{x}_r + k^2 x_r = -U_e, \quad (2)$$

где $k = \sqrt{c/m}$; c – коэффициент жесткости;

m – сосредоточенная масса; $U_e = \ddot{S}_e$, где S_e – перемещение в переносном движении осциллятора. Далее будет принято $k = 1 \text{ с}^{-1}$.

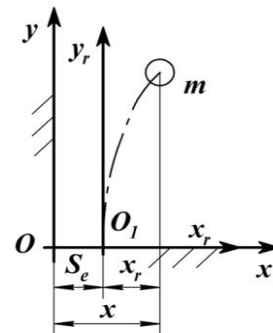


Рис. 1. Сложное движение упругой системы (S_e – переносное, x_r – относительное движение)

В [2] обращается также внимание на составление уравнения движения кинематическим способом:

$$\ddot{x} = (\ddot{S}_e - x) \quad (3)$$

или $\ddot{x} + x = \ddot{S}_e$.

Интересен факт, что колебания тождественны при $-\ddot{S}_e = S_e$ или $\ddot{S}_e + S_e = 0$, т.е., например, $S_e = \sin t$, $\ddot{S}_e = -\sin t$.

Цель исследования – анализ результатов использования альтернативных методов подавления колебаний упругой системы.

На примере упругого осциллятора сравниваются особенности динамического поведения при подавлении колебаний с использованием релейного управления, сухого трения, линейно-вязкого сопротивления, резонансного управления, а также ПИД-регулятора в обратной связи.

Релейное управление

Уравнение управляемого движения приведено выше (1). При $J = \int_0^T dt = \min$ и начальных условиях $x(0) = x_0$, $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$, как известно, находится такое $u(t)$, которое за минимальное время приводит осциллятор в состояние покоя ($x(T) = 0$, $\dot{x}(T) = 0$).

При использовании принципа максимума уравнение (1) преобразуется к форме Коши:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = -x_1 + u(t). \quad (4)$$

В этом случае гамильтониан

$$H = \psi_0 \cdot 1 + \psi_1 \cdot x_2 - \psi_2 \cdot x_1 + \varphi_2 \cdot u(t),$$

максимум которого достигается при $u(t) = 1 \cdot \text{sign} \psi_2(t)$.

Из канонических уравнений

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \psi_2, \quad \frac{d\psi_2}{dt} = -\psi_1 \quad (5)$$

следует $\frac{d^2\psi_2}{dt^2} = -\frac{d\psi_1}{dt}$ или

$$\frac{d^2\psi_2}{dt^2} + \psi_2 = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (6)

$$\psi_2 = A \sin(t + \alpha)$$

и поэтому управление

$$u(t) = 1 \cdot \text{sign} \sin(t + \alpha).$$

Теперь поведение управляемого объекта описывается уравнением

$$\ddot{x} + x = -1 \cdot \text{sign} \sin(t + \alpha).$$

Примечание.

В [13] отмечено, что «...простые соображения двойственности» позволили получить сопряженные уравнения (5). Однако, на наш взгляд, не исключаются следующие преобразования.

Пусть

$$x(t)\psi(t) = \varepsilon(t),$$

тогда $\frac{dx(t)}{dt} \psi(t) + x(t) \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ или

$$f(x, u, t) \psi(t) + x(t) \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (7)$$

Теперь производная по x от (7) принимает вид:

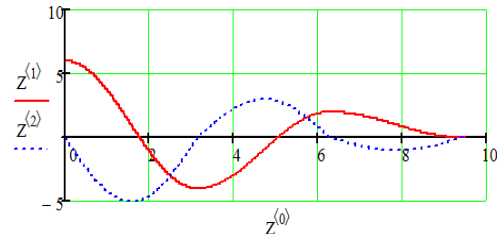
$$\frac{df}{dx} \psi(t) + \frac{d\psi(t)}{dt} = 0$$

или $\frac{d\psi(t)}{dt} = -\psi(t) \frac{df(x, u, t)}{dx}$.

Для проверки решения методом ПМП использован также метод припасовывания: на каждом участке с $u(t) = \text{const}$ в его конце находились такие $x_i(t_i)$ и $\dot{x}_i(t_i)$, которые являлись начальными условиями для движения на следующем участке, и решение начиналось при $t = 0$. Графики перемещения и скорости изображены на рис. 2а.

$$\ddot{x} + x = 1 \cdot \text{sign}(\sin(t + \alpha))$$

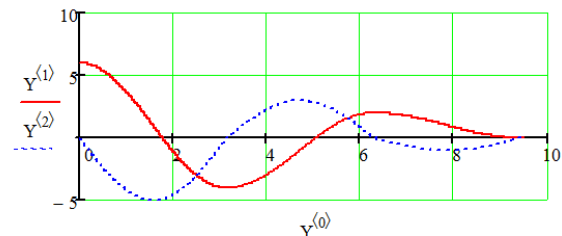
$$x := \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix} D(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -x_0 - \text{sign}(\sin(t - \pi)) \end{pmatrix} Z := \text{rkfixed}(x, 0, 9.5, 20000, D)$$



а) использование релейного управления

$$\ddot{x} + x = 1 \cdot \text{sign}(\dot{x})$$

$$x := \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix} D(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -x_0 - \text{sign}(x_1) \end{pmatrix} Y := \text{rkfixed}(x, 0, 9.5, 212000, D)$$

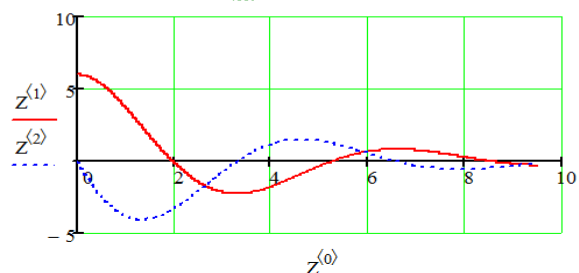


б) использование сухого трения

$$\ddot{x} + x = -2n \dot{x},$$

$$x := \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix} D(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -x_0 - 2 \cdot n \cdot (x_1) \end{pmatrix}$$

$$n := 0.3 \quad Z := \text{rkfixed}(x, 0, 9.5, 212000, D)$$



в) использование линейно-вязкого сопротивления

Рис. 2. Варианты подавления колебаний

Использование сухого трения

В случае сухого трения задача подавления колебаний, обусловленных прежними начальными условиями, сводится к интегрированию нелинейного дифференциального уравнения

$$\ddot{x} + x = -1 \cdot \text{sign} \sin(\dot{x}).$$

Подключение к упругой системе сухого трения приводит к интенсивному демпфированию свободных колебаний с достижением состояния покоя.

Система с сухим трением обладает некоторыми важными особенностями, характерными для физически нелинейной системы. Движение может быть как безостановочным (импульс воздействия превышает импульс сопротивления), так и с остановками.

Например, в [16] при численном интегрировании уравнения показано, что если на определенном шаге интегрирования конечноразностного алгебраического уравнения корень единственный, то система движется без остановок, а если два корня, то она находится в состоянии покоя. Если движение обусловлено только ненулевыми начальными условиями, то они могут обеспечивать безостановочное движение. Графики перемещения и скорости при использовании сухого трения изображены на рис. 2б, а схема управления – на рис. 3.

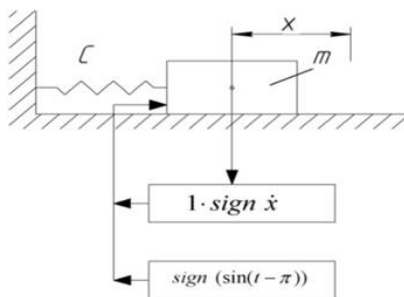


Рис. 3. Схема использования релейного управления и сухого трения

Использование линейно-вязкого сопротивления

Движение описывается уравнением

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x = 0, \quad (8)$$

где принято $n = 0,95 \text{ с}^{-1}$, $k = 1 \text{ с}^{-1}$, начальные условия $x(0) = 6$, $\dot{x}(0) = 0$.

Принято такое значение параметра n , при котором практически подавляются свободные колебания за время $t = T = 3\pi \text{ с}$.

Решение уравнения (8)

$$x(t) = e^{-nt} \left(C_1 \sin \sqrt{k^2 - n^2} t + C_2 \cos \sqrt{k^2 - n^2} t \right),$$

где $C_1 = \frac{n \cdot x_0}{\sqrt{1 - n^2}}$, $C_2 = x_0$.

Здесь для указанных численных исходных данных при $t = T$ моментные соотношения: $x(T) = -0,0003 \text{ м}$; $\dot{x}(T) = -0,0005 \text{ м/с}$.

По своему динамическому поведению уже при $n = 0,5$ и $T = 3\pi \text{ с}$ система практически достигает состояния покоя (рис. 2в).

Резонансное подавление колебаний

Резонансное воздействие может, как известно, не только раскачивать упругую систему, но и подавлять ее колебания. Эффект подавления колебаний иллюстрируется с использованием предыдущего примера упругой системы.

Запишем:

$$\ddot{x} + x = A \sin(t) + B \cos(t). \quad (9)$$

При интегрировании уравнения (9) произвольные постоянные найдены с использованием начальных условий $x(0) = 6$, $\dot{x}(0) = 0$, а константы A и B найдены при известном общем времени движения $T = 3\pi \text{ с}$ из моментных соотношений:

$$x(T) = 0, \quad \dot{x}(T) = 0. \quad (10)$$

Корнями системы (10) являются: $A = 4/\pi$; $B = 0$. Перемещение и скорость:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{2}{\pi} \sin t + 6 \cos t - \frac{2t}{\pi} \cos t, \\ \dot{x}(t) &= -6 \sin t + \frac{2t}{\pi} \sin t. \end{aligned} \quad (11)$$

Графики функций (11) весьма близки к приведенным ранее примерам.

Использование ПИД-регулятора в комбинированной системе управления

Для случая комбинированного управления (конструируемого переносного – программного и управления колебаниями в относительном движении – с отрицательной обратной связью) с учетом детерминированных и случайных помех структурная схема объекта изображена на рис. 4.

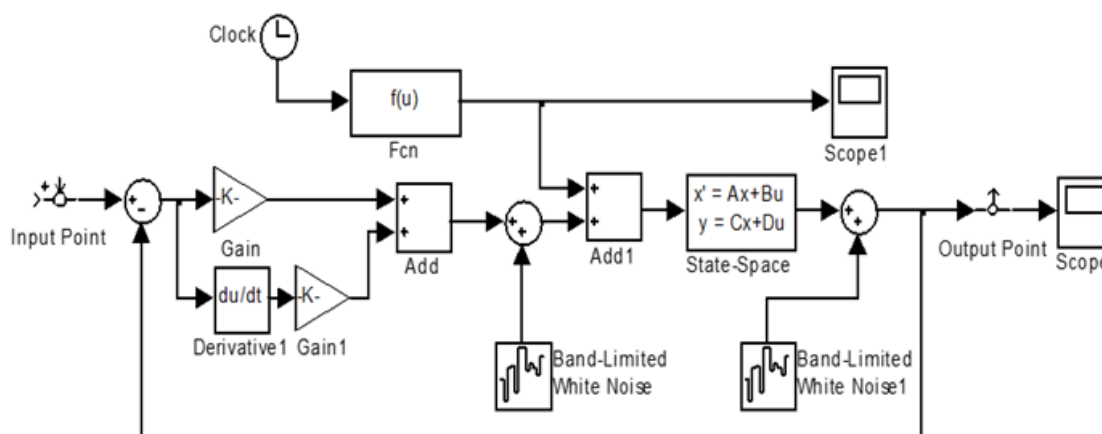


Рис. 4. Схема реализации комбинированного управления

Коэффициенты усиления в обратной связи находятся с использованием теории аналитического конструирования регулятора при квадратичном критерии оптимальности [6]. Как и ранее [14], время движения находится из моментных соотношений (трансцендентных уравнений) с учетом изменения частоты собственных колебаний в связи с наличием ПИД-регулятора.

Заключение

Альтернативные методы активного (управляемого) подавления колебаний могут не только приводить к одинаковому конечному состоянию покоя (при заданном времени и начальных условиях), но и к тождественному динамическому поведению во временном интервале движения.

Алгоритм ПМП успешно реализуется в системе с обратной связью и является универсальным по сравнению с другими практическими методами активного демпфирования колебаний (например, при использовании сухого трения или резонансного управления).

В общем алгоритме комбинированного управления (переносным и относительным движением упругой системы) управление относительным движением обеспечивает устранение колебаний, вызванных не только оптимальным переносным движением, но и различными источниками возмущений.

Список литературы

1. Бидерман В.П. Прикладная теория механических колебаний / В.П. Бидерман. – М.: Высш. шк., 1972. – 416 с.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 560 с.
4. Василенко Н.В. Теория колебаний / Н.В. Василенко. – К.: Вища шк., 1992. – 430 с.
5. Светлицкий В.А. Сборник задач по теории колебаний / В.А. Светлицкий, И.В. Стаценко. – М.: Высш. шк., 1973. – 456 с.
6. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
7. Троицкий А.И. Оптимальные процессы колебаний механических систем / А.И. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
8. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
9. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
10. Красовский Н.Н. Теория оптимального управления / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
11. Теория автоматического регулирования. Ч II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248 с.
12. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем /

И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 416 с.

13. Гамкрелидзе Р.В. История открытия принципа максимума Понтрягина / Р.В. Гамкрелидзе // Труды Математического Института им. В.А. Стеклова РАН. – 2019. – Том 304. – С. 7 – 14.

14. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.

15. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.

16. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.

17. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

18. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.

19. Бохонский А.И. Конструирование оптимального управления движением объекта как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им.И.С.Тургенева, 2016. – № 3(317) 2016 – 4(318) 2016. – С. 70 – 76.

20. Варминская Н.И. Динамика антропоморфного манипулятора с упругими звеньями при использовании оптимальных управлений движением / Н.И. Варминская // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 3(347) 2021. – С. 21 – 29.

21. Бохонский А.И. Принцип и теоремы реверсионного исчисления / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 3(347) 2021. – С. 12 – 20.

22. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – № 9. – С. 24 – 30.

23. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – 120 с.

24. Бохонский А.И. Оценка эффективности управлений перемещением объектов / А.И.

Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2019. – № 1 (5). – С. 84 – 91.

25. Bokhonsky A.I. Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // IOP Conference Series. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Science and Engineering (ICMTMTE 2019). – Том. 709, 4, Issue 3. – P. 044093. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044093.

26. Bokhonsky A. Reducing of energy consumption for the object's motion with designed optimum control / A. Bokhonsky, N. Varminskaya, A. Ryzhkov // MATEC Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020). – V. 329 (2020). – P. 03064. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903064>.

27. Бохонский А.И. Минимальная энергия оптимального управления для достижения цели движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – № 9. – С. 5 – 11.

28. Бохонский А.И. Управление с минимальной энергией переносным движением объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2021. – № 1(13). – С. 76 – 83.

References

1. Biderman V.P. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebanij / V.P. Biderman. – М.: Vyssh. shk., 1972. – 416 p.

2. Panovko Ya.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara / Ya.G. Panovko. – L.: Mashinostroyeniye, 1976. – 320 p.

3. Babakov I.M. Teoriya kolebanij / I.M. Babakov. – М.: Nauka, 1968. – 560 p.

4. Vasilenko N.V. Teoriya kolebanij / N.V. Vasilenko. – К.: Vishcha shk., 1992. – 430 p.

5. Svetlickij V.A. Sbornik zadach po teorii kolebanij / V.A. Svetlickij, I.V. Stacenko. – М.: Vyssh. shk., 1973. – 456 p.

6. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – М.: Mashinostroyeniye, 1985. – 536 p.

7. Troickij A.I. Optimal'nye processy kolebanij mekhanicheskikh sistem / A.I. Troickij. – L.: Mashinostroyeniye, 1976. – 248 p.

8. CHernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – М.: Nauka, 1980. – 384 p.

9. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyayemykh sistem: linejnye modeli / P.D. Krut'ko. – М.: Nauka, 1987. – 304 p.

10. Krasovskij N.N. Teoriya optimal'nogo uprav

leniya / N.N. Krasovskij. – M.: Nauka, 1968. – 476 p.

11. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. V. II. Teoriya nelinejnyh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / Pod red. A.A. Voronova. – M.: Gosizdat, 1955. – 248 p.

12. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemym sistem / I.A. Karnovskij, Yu.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shk., 1982. – 416 p.

13. Gamkrelidze R.V. Istoriya otkrytiya principa maksimuma Pontryagina / R.V. Gamkrelidze // Trudy Matematicheskogo Instituta im. V.A. Steklova RAN. – 2019. – Tom 304. – P. 7 – 14.

14. Bokhonsky A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemym ob'ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevsky; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – 296 p.

15. Bokhonsky A.I. Variacionnoe i reversion-noe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya; Pod obshch. red. A.I. Bokhonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 212 p.

16. Bokhonsky A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bokhonsky. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016. – 174 p.

17. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

18. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.

19. Bokhonsky A.I. Konstruirovanie optimal'nogo upravleniya dvizheniem ob'ekta kak absolyutno tverdyh i deformiruemym tel / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2016. – № 3(317) 2016 – 4(318) 2016. – P. 70 – 76.

20. Varminskaya N.I. Dinamika antropomorfno manipulyatora s uprugimi zven'yami pri ispol'zovanii optimal'nyh upravlenij dvizheniem / N.I. Varminskaya // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. – № 3(347) 2021. – P. 21 – 29.

21. Bokhonsky A.I. Princip i teoremy reversionnogo ischisleniya / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. – № 3(347) 2021. – P. 12 – 20.

22. Bokhonsky A.I. Konstruirovanie upravlyаемого dvizheniya ob'ekta / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya // Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo. – Sankt-Peterburg: NIC MS, 2020. – № 9. – P. 24 – 30.

23. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Konstruirovanie optimal'nyh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob'ektov: monografiya / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – Sankt-Peterburg: NIC MS, 2020. – 120 p.

24. Bokhonsky A.I. Ocenka effektivnosti upravlenij peremeshcheniem ob'ektov / A.I. Bokhonsky N.I. Varminskaya // Avtomatizaciya i izmereniya v mashinopriroboostroenii. – Bryansk: Izd-vo BGTU, 2019. – № 1 (5). – S. 84 – 91.

25. Bokhonsky A.I. Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // IOP Conference Series. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Science and Engineering (ICMTMTE 2019). – Tom. 709, 4, Issue 3. – P. 044093. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044093.

26. Bokhonsky A. Reducing of energy consumption for the object's motion with designed optimum control / A. Bokhonsky, N. Varminskaya, A. Ryzhkov // MATEC Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020). – V. 329 (2020). – P. 03064. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903064>.

27. Bokhonsky A.I. Minimal'naya energiya optimal'nogo upravleniya dlya dostizheniya celi dvizheniya ob'ekta / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // Avtomatizirovanoe proektirovanie v mashinostroenii. – 2020. – № 9. – P. 5 – 11.

28. Bokhonsky A.I. Upravlenie s minimal'noj energiej perenosnym dvizheniem ob'ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priroboostroenii. – Bryansk: Izd-vo BGTU, 2021. – № 1(13). – P. 76 – 83.

УДК 669-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ В СПЛАВЕ $Ti_{49.0}Ni_{51.0}$ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В КРУПНОЗЕРНИСТОМ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИЯХ

А.А. Чуракова^{1,2}, Э.М. Каюмова³¹ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Российская Федерация² Институт физики молекул и кристаллов Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Уфа, Российская Федерация³ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Российская Федерация

Аннотация

В данной статье исследуется коррозионное поведение сплава TiNi в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях. Исследование влияния исходной микроструктуры на коррозионное поведение сплава TiNi проводили гравиметрическим методом в растворе NaCl и H₂SO₄ в течение месяца. Исследования показали, что в результате воздействия агрессивной среды от образца в крупнозернистом состоянии он подвергается большему разрушению, питтинговая коррозия наблюдалась, в то же время в ультрамелкозернистом образце наблюдались только следы продуктов коррозии. Исследования с помощью инвертированного светового микроскопа в темном поле позволили наблюдать продукты коррозии и определить их объемную долю. Оценка скорости коррозии показала, что в крупнозернистом состоянии она в 126 раз превышает скорость коррозии в ультрамелкозернистом состоянии. Рентгенофазовый анализа показал, что в крупнозернистом состоянии после коррозионных испытаний наблюдается значительная доля фазы TiNiH_{1.4}, тогда как в ультрамелкозернистом состоянии все фазы соответствуют только фазам TiNi. Сплав TiNi содержит фазу Ti₂Ni, обогащенную Ti, как в крупнозернистом, так и в ультрамелкозернистом состоянии. Причем в крупнозернистом состоянии ее доля в 2 раза выше.

Ключевые слова: сплавы TiNi, коррозионное поведение, гидрид TiNi, скорость коррозии, питтинговая коррозия

RESEARCH OF CORROSION PROCESS IN $Ti_{49.0}Ni_{51.0}$ ALLOY WITH A SHAPE MEMORY EFFECT IN COARSE-GRAINED AND ULTRAFINE-GRAINED STATES

А.А. Churakova^{1,2}, E.M. Kayumova³¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Aviation Technical University", Ufa, Russian Federation²Institute of Physics of Molecules and Crystals Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technical University", Ufa, Russian Federation

Abstract

This article studies the corrosion behavior of the TiNi alloy in the coarse-grained and ultrafine-grained states. The study of the influence of the initial microstructure on the corrosion behavior of the TiNi alloy was carried out by the gravimetric method in the NaCl and H₂SO₄ solution for a month. Studies was shown that as a result of the action of a corrosive medium from a sample in a coarse-grained state, it undergoes greater destruction, pitting corrosion was observed, at the same time, in an ultrafine-grained sample only traces of corrosion products are observed on the surface of the samples. Investigations with an inverted light microscope in a dark field made it possible to observe corrosion products and determine their volume fraction. Evaluation of the corrosion rate showed that in the coarse-grained state it is 126 times higher than the corrosion rate in the ultrafine-grained state. Analysis of X-ray phase analysis showed that in the coarse-grained state after corrosion tests, a significant proportion of the TiNiH_{1.4} phase is observed, while in the ultrafine-grained state all phases correspond only to the TiNi phases. The TiNi alloy contains an Ti₂Ni phase enriched Ti both in the coarse-grained state and in the ultrafine-grained state. Moreover, in a coarse-grained state, its share is 2 times higher.

Keywords: TiNi alloys, corrosion behavior, TiNi hydride, corrosion rate, pitting corrosion

Сплавы никелида титана (нитинол) в настоящее время широко используются в различных отраслях науки и техники благодаря высоким прочностным характеристикам, коррозионной стойкости и наличию таких свойств, как термическая память формы и сверхэластичность [1-5]. Коррозионная стойкость во многом определяется степенью дефектности материала. Поэтому важно знать особенности коррозионного поведения, влияющие на эксплуатацию материала. Использование сплавов на основе никелида титана в медицине и технике стимулировало обширные исследования электрохимического поведения и коррозионной стойкости этих материалов в различных агрессивных средах.

В виду этого интересно рассмотреть коррозионные и электрохимические свойства сплава нитинола в различных структурных состояниях, в коррозионно-агрессивных средах.

В работах [6-18] рассмотрены коррозионные и электрохимические свойства титано-никелевых сплавов. Например, в [9] представлены результаты коррозионно-электрохимического поведения сплавов TiNi в кислых растворах (1 н HCl, 1 н H₂SO₄). С целью возможного использования титано-никелевых сплавов в качестве катализаторов, снижающих перенапряжение выделения водорода на титановом катоде, результаты электрохимического и коррозионного поведения титано-никелевых сплавов представлены в работе [19]. В [20-21] было изучено коррозионно-электрохимическое поведение титано-никелевых сплавов в различных кислых хлоридных растворах при повышенных температурах с учетом их возможной рекомендации для использования в установках для опреснения морской воды. В [22] были описаны коррозионные свойства TiNi в крупнозернистом состоянии, и было показано, что этот сплав в средах, аналогичных среде обитания человека, хорошо пассивируется. Также было установлено, что в присутствии биологической среды на сплаве образуется пассивный оксидный слой, на котором в дальнейшем формируются по-

крытия из фосфата кальция и TiO₂. В связи с этим представляет интерес изучение коррозионных свойств сплава в различных структурных состояниях, обусловленных уникальными физическими и механическими свойствами материала в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях.

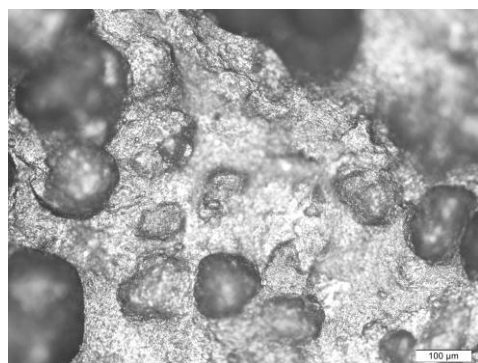
Материалом исследования был выбран стехиометрический сплав Ti_{49,0}Ni_{51,0}. Этот сплав имеет ОЦК решетку, упорядоченную по типу B2, и фазу Ti₂Ni₃, обогащенную никелем. Исследования проводились в двух состояниях: крупнозернистом (КЗ), полученном закалкой в воде, и ультрамелкозернистом (УМЗ), сформированном методом равноканального углового прессования (РКУП) при температуре 450 °С n = 6 по маршруту B_c.

Исследование коррозионного поведения проводилось гравиметрическим методом, образцы выдерживали в водном растворе NaCl и H₂SO₄ в течение месяца. Основные структурные параметры определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для качественного и количественного анализа макроструктуры сплава TiNi использовались металлографический микроскоп OLYMPUS GX51 с программным обеспечением и инвертированный микроскоп AXIO OBSERVER Z1M в режиме темного поля. Исследование поверхности проводилось на сканирующем зондовом микроскопе NT-MDT Integra Prima в Объединенном исследовательском центре «Нанотех» Уфимского государственного авиационного технического университета. Фазовый состав исследовали на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV. В данной работе оценка скорости коррозии в различных структурных состояниях проводилась по формуле:

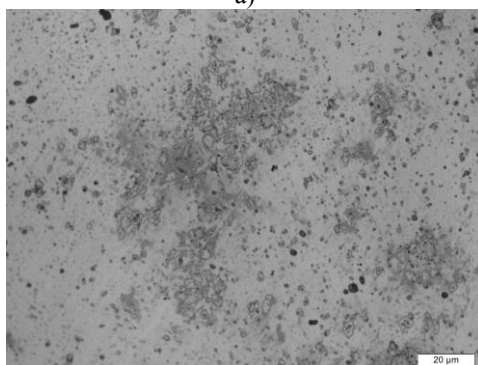
$$V = \frac{m_0 - m}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где m_0 - масса образца до коррозионных испытаний, m - масса образца после коррозионных испытаний, S - площадь образца, t - время коррозионных испытаний

На рис.1 представлена структура образцов сплава TiNi после контакта с агрессивной средой - раствором NaCl и H₂SO₄, полученной с помощью оптического микроскопа. Наблюдается значительная степень коррозии образцов в крупнозернистом состоянии (рис. 1, а).



а)



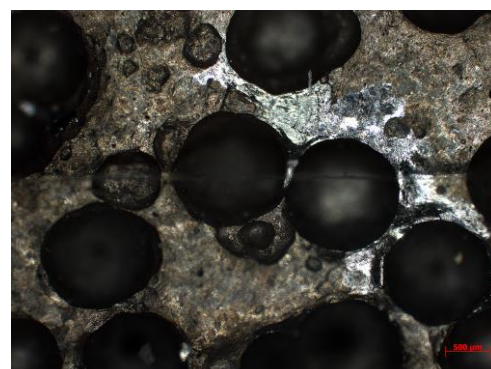
б)

Рис. 1 - Фотографии поверхности образцов сплава Ti_{49,0}Ni_{51,0} после коррозионных испытаний:
(а) крупнозернистое состояние;
(б) ультрамелкозернистое состояние

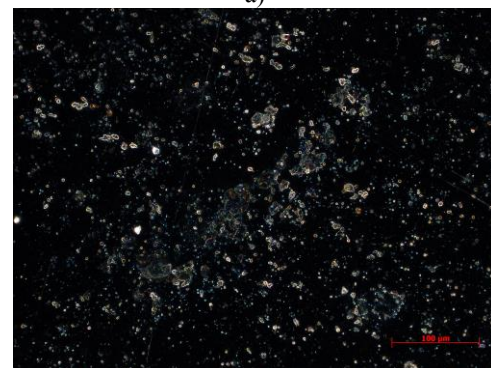
Осмотр образцов на инвертированном микроскопе (рис. 2) позволил более четко определить характер коррозионных повреждений. В случае крупнозернистого состояния наблюдаются глубокие ямки, занимающие более 50% поверхности образца, в то время как в ультрамелкозернистом состоянии наблюдается равномерное распределение продуктов коррозии по поверхности без повреждения образца.

Исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии также позволили оценить средний размер и глубину ямок питтинговой коррозии в крупнозернистом состоянии (рис. 3, а). Средний размер ямок около 400 мкм, глубина в среднем 500 мкм. Кроме того, на рис. 3, б можно наблю-

дать области с продуктами коррозии на поверхности. В ультрамелкозернистом состоянии можно оценить средний размер и объемную долю продуктов коррозии на поверхности образца ($d = 5 \pm 2$ мкм, $V = 60 \pm 5\%$) (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 2 - Структура образцов сплава Ti_{49,0}Ni_{51,0} на инвертированном микроскопе:
(а) крупнозернистое состояние;
(б) ультрамелкозернистое состояние; темное поле

В таблице 1 показаны результаты оценки скорости коррозии образцов сплава в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях, проведенной в соответствии с уравнением (1). Согласно расчетам, скорость коррозии образцов в крупнозернистом состоянии более чем в 120 раз превышает скорость коррозии образцов в ультрамелкозернистом состоянии в растворе NaCl + H₂SO₄

Таблица 1. Данные по скорости коррозии сплава TiNi в различных структурных состояниях

Состояние	Скорость коррозии, г/м ² *ч
КЗ	3.006
УМЗ	0.023

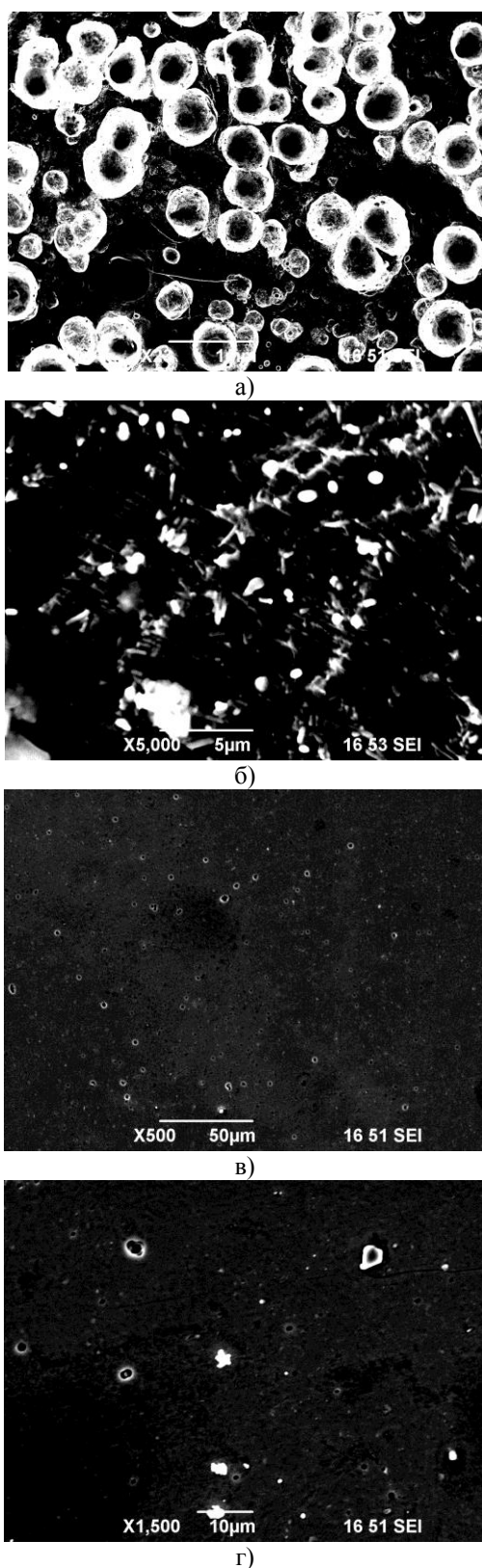


Рис. 3 - Структура поверхности образцов сплава $Ti_{49.0}Ni_{51.0}$ в крупнозернистом (а,б) и ультрамелкозернистом (в,г) состояниях после коррозионных испытаний на растровой электронной микроскопии

Рентгенофазовый анализ позволил определить наличие крупной фракции (более 50%) гидроксида $TiNi$ в крупнозернистом состоянии после коррозионных испытаний, а в ультрамелкозернистом состоянии - только фазы $TiNi$. На рис. 4 представлены данные рентгенофазового анализа образцов после коррозионных испытаний. Сплав $TiNi$ содержит фазу Ti_2Ni , обогащенную Ti , как в крупнозернистом, так и в ультрамелкозернистом состоянии. Причем в крупнозернистом состоянии его доля в 2 раза выше.

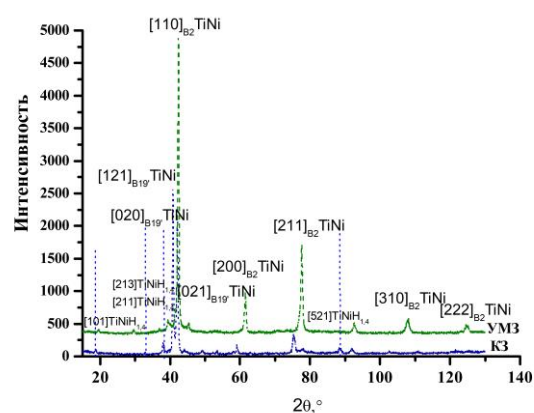


Рис. 4 - Рентгенограммы образцов сплава $Ti_{49.0}Ni_{51.0}$ после коррозии

В крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии сплав $TiNi$ имеет аустенитную структуру и незначительную долю мартенсита (в случае КЗ, УМЗ), а также фазы Ti_2Ni до испытаний на коррозию. После коррозионных испытаний в крупнозернистом состоянии наблюдается 3 фазы: аустенитная, мартенситная и R-фаза. В ультрамелкозернистом состоянии также наблюдаются 3 фазы, все они соответствуют матрице $TiNi$, объемная доля аустенитной фазы увеличилась, с небольшим уменьшением мартенситной фазы B19' и образование R - мартенсита. Образование гидроксида $TiNi$ - $TiNiH_{1.4}$, вероятно, связано с большой долей фазы Ti_2Ni в исходном крупнозернистом состоянии, наиболее склонной к образованию гидридов $TiNi$. При этом меньшее содержание этой фазы в ультрамелкозернистом состоянии способствует образованию

R - мартенсита и продуктов коррозии на основе Ti.

Исследования на сканирующем атомно-силовом микроскопе показали, что в случае крупнозернистого состояния параметры шероховатости и изменения высоты значительно выше, чем в случае ультрамелкозернистого состояния.

Перепад высот в случае крупнозернистого состояния составляет от 0,1 до 9,4, а в случае ультрамелкозернистого состояния от 2,0 до 5,0, что также подтверждает более глубокую коррозию образцов в состоянии КЗ. Кроме того, если в крупнозернистом состоянии наблюдается равномерное распределение высот по поверхности, тогда как в ультрамелкозернистом состоянии наблюдаются только одиночные пики, вероятно соответствующие продуктам коррозии на поверхности образца.

Исследования показали, что в крупнозернистом состоянии коррозионное растворение происходит гораздо труднее, чем в ультрамелкозернистом состоянии. Согласно полученным результатам, скорость коррозии в крупнозернистом состоянии более чем в 120 раз превышает скорость коррозии образцов в ультрамелкозернистом состоянии. Анализ рентгенофазового анализа показал, что в крупнозернистом состоянии после коррозионных испытаний наблюдается значительная доля фазы $TiNiH_{1.4}$, тогда как в ультрамелкозернистом состоянии все фазы соответствуют только фазам $TiNi$. Следы питтинговой коррозии хорошо видны на поверхности образца, тогда как в ультрамелкозернистом состоянии наблюдаются лишь незначительные следы продуктов коррозии.

Благодарности

Работа поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-6202.2021.1.2).

Список литературы

1. Otsuka K., Ren X., 2005 Physical Metallurgy of Ti-Ni-Based Shape Memory Alloys Prog. Mater. Sci. (50) pp. 511–678.
2. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. Shape Memory Alloys: Fundamental, Modeling and Applications (Ecole de Technologie Superieure, Quebec) 2003.
3. Kurdymov G.V., Khandros L.G., 1949 On the thermoelastic equilibrium on martensitic transformations Sov. Phys. Dokl. (66) pp. 211–214.
4. Christian J.W. The Theory of Transformations in Metals and Alloys (Elsevier Science, Oxford) 2002.
5. Xie Z.L., Sundqvist B., Hanninen H., Pietikainen J., 1993 Isothermal martensitic transformation under hydrostatic pressure in an Fe,Ni–C alloy at low temperatures Acta Metall. Mater. (41) pp. 2283–2290.
6. Meisner L.L., 2006 Corrosion properties of TiNi-TiAu quasi-binary cut alloys in biochemical solutions Physics and chemistry of material processing (1) pp. 78–84.
7. Ustinskaya T.N., 1987 Composition, electrochemical and protective properties of anode films on the TiNi intermetallide Electrochemistry (23) pp. 254–259.
8. Kossy G.G., 1978 Protection of metals 14(6) pp. 662–666.
9. Stepanova T.P., 1978 Protection of metals 14(2) pp. 169–171.
10. Deryagina O.G., 1980 Electrochemical behavior of anodically oxidized Ni-Ti alloys in sulfate solutions containing chlorine ions Electrochemistry 16(12) pp. 1828–1833.
11. Tan L., 2003 Corrosion and wear – corrosion behavior of NiTi modified by plasma source ion implantation Biomaterials (24), pp. 3931–3939.
12. Okazaki Y., 1998 Corrosion resistance, mechanical properties, corrosion fatigue strength and cytocompatibility of new Ti alloys without Al and V Biomaterials (19), pp. 1197–1215.
13. Hofman A., 1996 Classes of materials used in medicine Biomaterials Science Academic Press, pp. 37–50.
14. Shabalovskaya S.A., 2002 Surface, corrosion and biocompatibility aspects of nitinol as an implant material Bio-Medical materials and Engineering (12), pp. 69–109.
15. Liu Chenglong, 2006 In vitro electrochemical corrosion behaviour of functionally graded diamond-like carbon coatings on biomedical Nitinol alloy Thin Solid Films (496), pp. 457–462.
16. Shevchenko N., 2004 Studies of surface modified NiTi alloy Applied Surface Science (235), pp. 126–131.
17. Vandenkerckhove R., 2004 Corrosion behaviour of a superelastic Ni-Ti alloys Materials Science and Engineering 378, pp. 532–536.
18. Denton M., 2005 Corrosion evaluation of wear tested nitinol wire Materials Science and Engineering (25), pp. 276–281.

19. Xiao Xu, 2004 Shock synthesis and characterization of nanostructured NITINOL alloy Materials Science and Engineering (A 384) 194-201.

20. Primak O., 2005 Morphological characterization and vitro biocompatibility of a porous nickel-titanium alloy Biomaterials (26), pp. 5801-5807.

21. Starosvetsky D., 2001 Corrosion behaviour of titanium nitride coated Ni-Ti shape memory surgical alloy Biomaterials (22), pp. 1853-1859.

22. Ryhanen J., 1999 Biocompatibility evolution of nickel-titanium shape memory metal alloy.

References

1. Otsuka K., Ren X., 2005 Physical Metallurgy of Ti-Ni-Based Shape Memory Alloys Prog. Mater. Sci. (50) pp. 511-678.

2. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. Shape Memory Alloys: Fundamental, Modeling and Applications (Ecole de Technologie Superieure, Quebec) 2003.

3. Kurdymov G.V., Khandros L.G., 1949 On the thermoelastic equilibrium on martensitic transformations Sov. Phys. Dokl. (66) pp. 211-214.

4. Christian J.W. The Theory of Transformations in Metals and Alloys (Elsevier Science, Oxford) 2002.

5. Xie Z.L., Sundqvist B., Hanninen H., Pietikainen J., 1993 Isothermal martensitic transformation under hydrostatic pressure in an Fe,Ni-C alloy at low temperatures Acta Metall. Mater. (41) pp. 2283-2290.

6. Meisner L.L., 2006 Corrosion properties of TiNi-TiAu quasi-binary cut alloys in biochemical solutions Physics and chemistry of material processing (1) pp. 78-84.

7. Ustinskaya T.N., 1987 Composition, electrochemical and protective properties of anode films on the TiNi intermetallide Electrochemistry (23) pp. 254-259.

8. Kossy G.G., 1978 Protection of metals 14(6) pp. 662-666.

9. Stepanova T.P., 1978 Protection of metals 14(2) pp. 169-171.

10. Deryagina O.G., 1980 Electrochemical behavior of anodically oxidized Ni-Ti alloys in sulfate solutions containing chlorine ions Electrochemistry 16(12) pp. 1828-1833.

11. Tan L., 2003 Corrosion and wear – corrosion behavior of NiTi modified by plasma source ion implantation Biomaterials (24), pp. 3931-3939.

12. Okazaki Y., 1998 Corrosion resistance, mechanical properties, corrosion fatigue strength and cytocompatibility of new Ti alloys without Al and V Biomaterials (19), pp. 1197-1215.

13. Hofman A., 1996 Classes of materials used in medicine Biomaterials Science Academic Press, pp. 37-50.

14. Shabalovskaya S.A., 2002 Surface, corrosion and biocompatibility aspects of nitinol as an implant material Bio-Medical materials and Engineering (12), pp. 69-109.

15. Liu Chenglong, 2006 In vitro electrochemical corrosion behaviour of functionally graded diamond-like carbon coatings on biomedical Nitinol alloy Thin Solid Films (496), pp. 457-462.

16. Shevchenko N., 2004 Studies of surface modified NiTi alloy Applied Surface Science (235), pp. 126-131.

17. Vandenkerckhove R., 2004 Corrosion behaviour of a superelastic Ni-Ti alloys Materials Science and Engineering 378, pp. 532-536.

18. Denton M., 2005 Corrosion evaluation of wear tested nitinol wire Materials Science and Engineering (25), pp. 276-281.

19. Xiao Xu, 2004 Shock synthesis and characterization of nanostructured NITINOL alloy Materials Science and Engineering (A 384) 194-201.

20. Primak O., 2005 Morphological characterization and vitro biocompatibility of a porous nickel-titanium alloy Biomaterials (26), pp. 5801-5807.

21. Starosvetsky D., 2001 Corrosion behaviour of titanium nitride coated Ni-Ti shape memory surgical alloy Biomaterials (22), pp. 1853-1859.

22. Ryhanen J., 1999 Biocompatibility evolution of nickel-titanium shape memory metal alloy.

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ВЕРОЯТНОСТЬ УДАЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ЧИСТОВОМ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

С.М. Братан¹, А.С. Часовитина¹, Ю.К. Новоселов¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В настоящее время для изготовления широкого спектра деталей машин используются такие материалы как титан и титановые сплавы, указанные применяются в различных отраслях промышленности: судостроение, приборостроение, авиастроение и т.д. В статье обозначены закономерности и приведены особенности изменения вероятности удаления материала при чистовом шлифовании заготовок из титана и титановых сплавов. Произведено моделирование для расчета и дальнейшего прогнозирования параметров качества изделий с учетом пластических деформаций возникающих в процессе удаления материала абразивными зёрнами.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, прогнозирование, параметры качества, титановые сплавы, обработка титана, пластические деформации

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATIONS ON THE PROBABILITY OF MATERIAL REMOVAL DURING THE FINAL GRINDING OF TITANIUM ALLOYS

S.M. Bratan¹, A.S. Chasovitina¹, Yu.K. Novoselov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Currently, materials such as titanium and titanium alloys are used for the manufacture of a wide range of machine parts, which are used in various industries: shipbuilding, engineering, aircraft construction, etc. The article outlines the regularities and features of the change in the rate of removal of material during the final grinding of titanium and titanium alloy workpieces. Modeling was performed to calculate and further predict the quality parameters of products, taking into account the plastic deformations that occur during the removal of the material by abrasive grains.

Keywords: internal grinding, prediction, quality parameters, titanium alloys, titanium processing, plastic deformations

В настоящее время такие материалы как титан и титановые сплавы применяются в различных отраслях промышленности: судостроение, приборостроение, авиастроение и т.д. Основными преимуществами титана является его значительная коррозионная стойкость, небольшая плотность и высокие прочностные характеристики. Но при окончательной обработке титана наблюдается ряд трудностей, связанный с высокой химической активностью и вязкостью материала, которые впоследствии приводят к наросту-образованию на обрабатываемом инструменте [1-7]. Поэтому проблема обеспечения требуемого уровня качества изделий при шлифовании является до сих пор недоста-

точно изученной. Также это связывают с тем, что для математического описания окончательной обработки используется аналитическая модель, которая не учитывает стохастических характер операции шлифования и влияния взаимодействия процесса микрорезания и пластических деформаций при удалении материала [8-12].

Для установления закономерностей удаления материала в зоне контакта заготовки и абразивного инструмента были разработаны теоретические и вероятностные модели [13-15]. Вероятность удаления материалов при шлифовании рассчитывается по формуле:

$$P(M) = 1 - \exp(-a_0 - a_1(y, \tau)), \quad (1)$$

где – a_0 индикатор, характеризующий начальное состояние поверхности заготовки до начала процесса шлифования; $a_1(y, \tau)$ – показатель, характеризующий изменение площади углублений, образовавшихся в результате процесса механической обработки; y – расстояние от поверхности заготовки до текущего уровня; τ – время обработки.

Принятые ранее модели вершин зерен и плотности их распределения по глубине [15] позволяют установить функциональную зависимость вероятности неудаления материала от технологических факторов.

Для расчета показателя, характеризующего изменение площади углублений, образовавшихся в результате процесса механической резки, получено выражение:

$$a_1(y, z) = \frac{3\pi \cdot K_c \cdot \sqrt{2\rho_z} \cdot (V_k \pm V_u) \cdot n_z \cdot (t_f - y)^2}{8 \cdot V_u \cdot H_u^{3/2}} \times \\ \times \left(z - \frac{2 \cdot z^3}{3 \cdot \sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5 \cdot L_y} + \frac{8}{15} \cdot L_y \right), \quad (2)$$

где n_z – количество зерен на единицу площади рабочего слоя инструмента; V_k – окружная скорость инструмента (круга); V_u – окружная скорость заготовки; H_u – толщина слоя рабочей поверхности инструмента, контактирующего с обрабатываемой деталью; t_f – фактическая глубина резания; L_y – длина зоны контакта от условной внешней поверхности инструмента до основной плоскости; z – координата, направленная вдоль зоны контакта; ρ_z – радиус округления вершины зерна; K_c – коэффициент стружкообразования.

Для учета влияния пластических деформаций на процесс удаления материала в вышеупомянутую теоретико-вероятностную модель вводится коэффициент стружкообразования. Коэффициент стружкообразования позволяет учитывать влияние пластической деформации на вероятность удаления материала и шероховатость поверхности. Коэф-

фициент стружкообразования не является постоянной величиной, его значения зависят от глубины резания и окружной скорости абразивного инструмента.

Для моделирования величин коэффициента стружкообразования K_c из переменных факторов использовалась степенная регрессионная зависимость, и был проведен полный факторный эксперимент $2^2 - 4$. На рис.1 приведена схема внутришлифовального станка, где инденторный элемент 1 закреплен на металлическом диске 2, закрепленном на оправке 3 внутришлифовального станка.

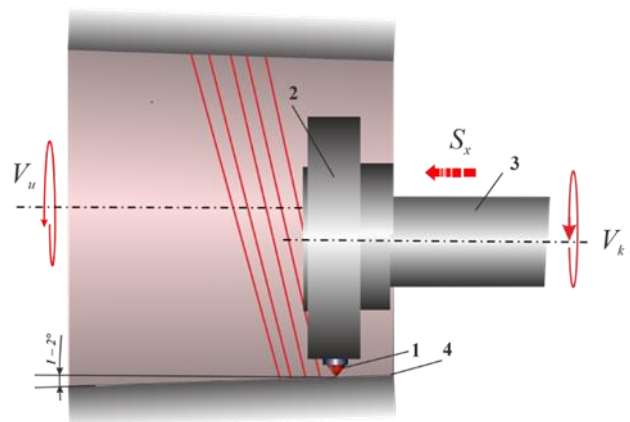


Рис.1 - Схема настройки внутришлифовального станка:

1 - элемент абразивной ленты; 2 - металлический диск; 3 - оправка; 4 - образец

В результате эксперимента была получена зависимость для расчета коэффициента стружкообразования K_c для титанового сплава ВТ3-1:

$$K_c = 0,267 \cdot (t_f \cdot 10^6)^{0,254} \cdot V_k^{0,071} \quad (3)$$

Эта зависимость показывает, что наибольшее влияние на величину коэффициентов стружкообразования K_c оказывают влияние глубина микрорезания. Скорость резания влияет на коэффициент стружкообразования в гораздо меньшей степени.

После подстановки зависимости (3) в формулу (2), получим:

$$a_1(y, z) = \frac{0,1 \cdot \pi \cdot \sqrt{2\rho_z} \cdot (V_k \pm V_u) \cdot n_z \cdot (t_f - y)^2}{V_u \cdot H_u^{3/2}} \times \\ \times (t_f \cdot 10^6)^{0,254} \cdot V_k^{0,071} \cdot \left(z - \frac{2 \cdot z^3}{3 \cdot \sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5 \cdot L_y} + \frac{8}{15} \cdot L_y \right)$$

Анализ полученных данных (таблица 1) дает наглядную иллюстрацию закономерности удаления материала вдоль зоны контакта на разных уровнях, в двух случаях: 1 – $K_c = const$; 2 – $K_c = variable$.

Мы рассчитаем вероятность неудаления и вероятность удаления материала при шлифовании отверстий диаметром 150 мм в за-

готовках из ВТЗ-1 инструментом АW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 35 м/с (при скорости вращения колеса – 35 м/с, скорости заготовки – 0,25 м/с, продольной подаче – 33 мм/с, поперечной подаче – 0,008 мм/ход).

Из расчета баланса перемещений [13] мы определяем, что для заданных условий обработки $t_f = 14,63 \cdot 10^{-6}$ м. Основываясь на данных исследований [17, 20, 21], мы принимаем: $\rho_z = 7,31 \cdot 10^{-6}$ мм; $n_z = 15,86 \cdot 10^6$ зерен/мм². Для рассматриваемых условий $L_y = 0,85 \cdot 10^{-3}$ м.

Таблица 1 - Значения вероятности удаления материала при шлифовании отверстий в заготовках из сплава ВТЗ-1

z	Коэффициент стружкообразования			
	$K_c = const$		$K_c = variable$	
	Значения параметров зоны контакта в радиальном направлении (уровни y)			
	$y = 0,50 \cdot t_f$	$y = 0,75 \cdot t_f$	$y = 0,50 \cdot t_f$	$y = 0,75 \cdot t_f$
$-0,8 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,756	0,473	0,703	0,455
$-0,6 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,879	0,535	0,829	0,505
$-0,4 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,94	0,589	0,902	0,551
$-0,2 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,97	0,637	0,943	0,593
0	0,985	0,679	0,967	0,631
$0,2 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,993	0,716	0,981	0,665
$0,4 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,996	0,749	0,989	0,697
$0,6 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,998	0,779	0,994	0,725
$0,8 \cdot \frac{L_y}{2}$	0,999	0,804	0,996	0,75

Приведенные выше аналитические модели могут быть использованы для плоских,

круглых схем наружного и внутреннего шлифования.

На рис. 2 показан пример расчета изменения вероятности удаления материала в зоне контакта при шлифовании отверстия в титановом сплаве ВТ3-1: сплошными линиями указаны значения вероятности с учетом изменения пластических деформаций при резании, пунктиром - без.

Анализ полученных данных показывает, что пластические деформации зависят от окружной скорости инструмента и глубины микрорезания, которые непосредственно входят в уравнение для расчета вероятности удаления материала, влияют на интенсивность удаления материала.

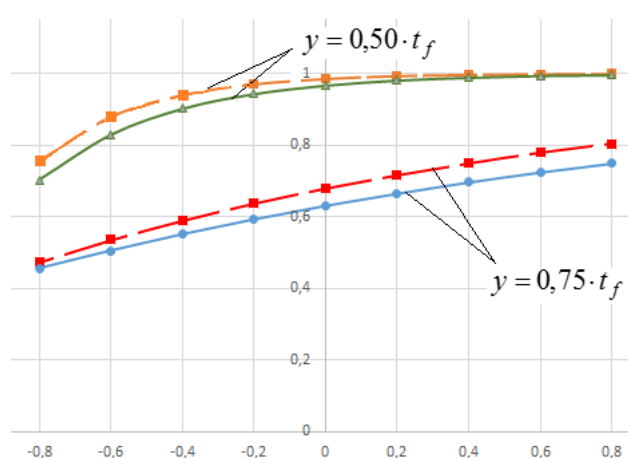


Рис. 2 - Изменение вероятности удаления материала при шлифовании отверстий в заготовках из титанового сплава ВТ3-1

Вывод

Разработанные математические модели позволяют проследить влияние на вероятность удаления материала изменения коэффициента стружкообразования при шлифовании отверстий в титановом сплаве ВТ3-1 с учетом пластических деформаций, возникающих в зоне контакта. Полученные закономерности изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом и аналитические зависимости [14, 15] справедливы для широкого диапазона режимов шлифования, характеристик инструмента и других технологических факторов при условии адекватного определения зна-

чений коэффициентов стружкообразования материалов обрабатываемой детали.

Список литературы

- Новоселов Ю.К., Братан С.М., Каинов Д.А. Моделирование случайных компонент профиля абразивного круга //Тр. Одесского политехнического университета. Науч.произв.практ.сб. по техническим и естественным наукам. –Одесса, – 2001 – Вып.5 – С. 70–74.
- Новоселов Ю.К., Братан С.М., Каинов Д.А. Влияние состояния рабочей поверхности инструмента на оценку параметров формирующего фильтра //Резание и инструмент в технологических системах.– Меж.нар.науч.тех.сб. – Харьков: ХГПУ, – 2002 – Вып.62 – С. 84–88.
- Братан С.М., Новоселов Ю.К., Каинов Д.А. Оценка распределения длин стружек при чистовом и тонком шлифовании //Резание и инструмент в технологических системах.– Меж.науч.тех.сб.– Харьков: ХГПУ, – 2003 - Вып.64 - С. 31-36.
- Malkin, S., Guo, C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.
- 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) 1579–1593. – doi: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
- Paweł Lajmert, Małgorzata Sikora, Dariusz Ostrowski, A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 148, P. 09004. – doi: org/10.1051/mateconf/20181480900.
- Marco Leonesio, Paolo Parenti, Alberto Cassinari, Giacomo Bianchi, Michele Monn. A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation. // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 4, P. 166-171. – doi: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
- N. Zhang, I. Kirpitchenko, D.K. Liu. Dynamic model of the grinding process. // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 280, P. 425-432. – doi: org/10.1016/j.jsv.2003.12.006.
- M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier. Estimation of Dynamic Grinding Wheel Wear in Plunge Grinding. // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 58, P. 422-427. – doi: 10.1016/j.procir.2017.03.247.
- I. Garitaonandia, M.H. Fernandes, J. Albizuri. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2008. – Vol. 48, P. 832-840. – doi: org/10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.
- Taghi Tawakoli, Holger Reinecke, Alireza Vesali. An Experimental Study on the Dynamic Behavior of

Grinding Wheels in High Efficiency Deep Grinding. // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 1, P. 382-387. – doi: 10.1016/j.procir.2012.04.068.

Jeehyun Jung, Pilkee Kim, Hyeonjun Kim, Jongwon Seok. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. Vol. 57, P. 88-99. – doi: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.

Novoselov Y., Bratan S., Bogutsky V., Gutsalenko Y. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding // *Fiabilitate si Durabilitate - fiability & Durability Editura «Academica Brancusi»*, Targu Jiu, Supplement no.1, 2013. – P. 5-15.

S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials. // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129, P. 01079. doi: org/10.1051/mateconf/201712901079.

S. Bratan, Y. Novoselov, B. Bogutsky. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear. // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150, P. 809-814. doi: sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314254.

References

1. Novoselov Yu.K., Bratan S.M., Kainov D.A. Modelirovanie sluchaynykh komponent profilya abrazivnogo kruga // *Tr. Odesskogo politehnicheskogo un-ta. Nauch.proizv.prakt.sb. po tehnikeskim i estestvennyim naukam*. – Odessa, – 2001 – Vip.5 – S. 70–74.

2. Novoselov Yu.K., Bratan S.M., Kainov D.A. Vliyaniye sostoyaniya rabochey poverhnosti instrumenta na otsenku parametrov formiruyuschego filtra // *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*. – *Mezh.nar.nauch.teh.sb.* – Harkov: HGPU, – 2002 – Vyip.62 – S. 84–88.

3. Bratan C.M., Novoselov Yu.K., Kainov D.A. Otsenka raspredeleniya dlin struzhek pri chistovom i tonkom shlifovanii // *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*. – *Mezh.nauch.teh.sb.* – Harkov: HGPU, – 2003 – Vyip.64 – S. 31-36.

4. Malkin, S., Guo, C. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.

5. 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) 1579–1593. – doi: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.

6. Paweł Lajmert, Małgorzata Sikora, Dariusz Ostrowski, A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 148, P. 09004. – doi: org/10.1051/mateconf/20181480900.

7. Marco Leonesio, Paolo Parenti, Alberto Cassinari, Giacomo Bianchi, Michele Monn. A Time-

Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation. // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 4, P. 166-171. – doi: 10.1016/j.procir.2012.10.030.

8. N. Zhang, I. Kirpitchenko, D.K. Liu. Dynamic model of the grinding process. // *Journal of Sound and Vibration*. – 2005. – Vol. 280, P. 425-432. – doi: org/10.1016/j.jsv.2003.12.006.

9. M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier. Estimation of Dynamic Grinding Wheel Wear in Plunge Grinding. // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 58, P. 422-427. – doi: 10.1016/j.procir.2017.03.247.

10. I. Garitaonandia, M.H. Fernandes, J. Albizuri. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model. // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2008. – Vol. 48, P. 832-840. – doi: org/10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.

11. Taghi Tawakoli, Holger Reinecke, Alireza Vesali. An Experimental Study on the Dynamic Behavior of Grinding Wheels in High Efficiency Deep Grinding. // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 1, P. 382-387. – doi: 10.1016/j.procir.2012.04.068.

12. Jeehyun Jung, Pilkee Kim, Hyeonjun Kim, Jongwon Seok. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. Vol. 57, P. 88-99. – doi: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.

13. Novoselov Y., Bratan S., Bogutsky V., Gutsalenko Y. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding // *Fiabilitate si Durabilitate - fiability & Durability Editura «Academica Brancusi»*, Targu Jiu, Supplement no.1, 2013. – P. 5-15.

14. S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials. // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129, P. 01079. doi: org/10.1051/mateconf/201712901079.

15. S. Bratan, Y. Novoselov, B. Bogutsky. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear. // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150, P. 809-814. doi: sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314254.

УДК 621.91.01

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СОТС

В.В. Скакун¹

¹ ГБОУ ВО «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

В данной статье рассмотрено влияния экологически безопасных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) на повышение качества обработанной поверхности в процессе растачивания сверхглубоких отверстий. Повышение качества обеспечивалось комплексным подходом, включающим использование специальной расточной головки, позволяющей производить процесс растачивания, обеспечивая при этом необходимую жесткость системы СПИД, использование масел растительного и животного происхождения, обладающих высокими смазывающими свойствами по сравнению с традиционно применяемыми маслами на минеральной основе. Подача СОТС осуществлялась при помощи экологически ориентированной стратегии минимального смазывания, реализуемой при помощи дозирующей установки MQL (Minimum quantity lubrication), а также при помощи специально разработанного устройства для подачи смазывающих технологических сред, позволяющего порционно (дозированно) подавать смазочный материал, в зону резания в необходимом количестве, обеспечивая минимальный расход технологической жидкости. Измерение шероховатости обработанной поверхности производилось при помощи специального стенда «Измеритель шероховатости TR 200». Показано, что растительные масла и животные жиры качественно влияют на снижение шероховатости обработанной поверхности, за счет наличия в своем составе поверхностно-активных веществ ПАВ, формирующих на контактной поверхности инструмента плотную смазочную пленку.

Ключевые слова: процесс растачивания, сверхглубокие отверстия, резцовая головка, смазочно-охлаждающая технологическая среда, технология минимального смазывания, шероховатость поверхности

IMPROVING THE QUALITY OF THE TREATED SURFACE DURING DRILLING HOLES BY USING ENVIRONMENTALLY SAFE CUTTING EMULSION

V.V. Skakun¹

¹ Fevzi Yakubov Crimean engineering and pedagogical university, Simferopol, Russian Federation

Abstract

This article discusses the influence of environmentally friendly cutting fluids on improving the quality of the processed surface in the process of boring superdeep holes. Improving the quality of the treated surface was ensured by an integrated approach, including the use of a special boring head that allows the boring process, while ensuring the necessary rigidity of the system, the use of vegetable oils with high lubricating properties compared to traditionally used mineral oils. The supply of cutting lubricants was carried out using an environmentally oriented strategy of minimum lubrication, implemented using an MQL dosing unit, which allows batch, dosed supply of lubricant in the required amount to the cutting zone, ensuring minimum consumption of process fluid. Measurement of the roughness of the processed surface was carried out using a special stand "Roughness Tester TR 200". It is shown that vegetable oils have a qualitative effect on reducing the roughness of the treated surface, due to the presence of surfactants in their composition, which form a dense lubricating film on the contact surface of the tool with the part.

Keywords: boring process, extra deep holes, lubricating process medium, minimal lubrication technology, surface roughness

Постановка проблемы.

В современном машиностроении, особенно в авиационной промышленности, энергетическом машиностроении, возрастает число использования тонкостенных изделий (глубинные насосы, штанговые глубинные насосы, компрессоры и др.) жесткость которых на порядок ниже, чем жесткость упругой системы станков, используемых для изготовления данных изделий [1]. Малая жесткость тонкостенных деталей приводит к появлению вибраций, которые являются одним из главных препятствий на пути дальнейшего повышения качества обработки. Шероховатость и погрешность обработанной поверхности, определяется относительными смещениями инструмента и обрабатываемой детали, которые вызваны колебаниями при её обработке. Амплитуда и частота колебаний, зависит в основном от характеристик упругой системы тонкостенной детали и режимов резания [1]. Для обработки глубоких отверстий применяют различные по конструкции резцовые головки, отличающиеся между собой различными конструктивными решениями [2-5].

Наряду с широким использованием резцовых головок, неотъемлемой частью любого производственного процесса является применение в процессе резания различных по составу смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), позволяющих повысить качество обработанной поверхности, стойкость режущего инструмента, а также снизить силу резания [6-7]. Однако в последнее время ужесточились экологические требования к применению СОТС на минеральной основе [8-10]. В связи с этим, вопросы технологии применения СОТС, а также изучение их влияния на окружающую среду, стало особенно актуальным. Одним из альтернативных решений, направленных на повышение экологической безопасности производства является применение в процессе резания СОТС на растительной и животной основе.

Разработка рекомендаций, направленных на повышение качества обработанной поверхности тонкостенных деталей при использовании резцовых головок оптимальной

конструкции [5], обеспечивающих необходимую жесткость технологической системы, а также разработка технологий, направленных на повышение эффективности применения СОТС в процессе резания, является актуальной производственной задачей.

Анализ литературы. Выбор геометрических параметров металлорежущего инструмента во многом зависит от параметров обрабатываемой заготовки, длины и диаметра обрабатываемого отверстия, физико-механических характеристик обрабатываемого материала, требований к качеству обработанной поверхности. При сверхглубоком растачивании для черновой, получистовой и чистовой обработки, используют различные по конструкции резцовые головки, например, при обработке отверстий с длиной более 70 мм, в основном используют резцовые головки с плавающими блоками резцов [2,3]. За счет большой жесткости резцов в радиальном направлении, обеспечивается достаточно высокая точность получаемого отверстия (в пределах 6...8 квалитетов). На основании конструктивных особенностей резцовых головок, величина погрешности обработки, в основном, зависит от настройки такого инструмента на заданный размер, реализуемый без дополнительного использования станка, с точностью (0,001...0,01) мм. В процессе обработки деталей, содержащих сверхглубокое отверстие, в основном применяют резцовые головки, оснащенные призматическими плавающими блоками, которые установлены в прямоугольном пазе, расположенном в державке инструмента, обеспечивая возможность радиального смещения блока [2-5]. При использовании резцовой головки с плавающими блоками, благодаря необходимой жесткости и возможности самоцентрирования, значительно снижается влияние на точность изготовления отверстий таких факторов, как погрешность оборудования, погрешность базирования инструмента и обрабатываемой заготовки, а также физико-механические параметры обрабатываемого материала [3].

При контакте заборной части резца с поверхностью обрабатываемой заготовки инструмент центрируется относительно отвер-

ствия, формируя в процессе резания цилиндрическую поверхность, в свою очередь диаметр отверстия соответствует диаметру окружности, описанной вокруг вершины резца. Можно также выделить резцовую головку, обеспечивающую возможность радиального смещения, благодаря наличию шариков, контактирующих с пружинами, а также при помощи устройства, которое обеспечивает радиальное смещение резца (рис.1) [1].



Рис.1 - Резцовая головка с возможностью радиального смещения резца

При использовании такого инструмента производится обработка деталей, содержащих сверхглубокое отверстие, сохраняя при этом высокую точность обработки благодаря наличию специальных штанг, закрепленных посредством резьбового соединения, а также опорной базы, создаваемой пружинами, которые контактируют с металлическими шариками.

Из всего многообразия режущих инструментов, применяемых для сверхглубокого растачивания, отличающихся между собой всевозможными конструктивными решениями, направленными на повышение эффективности процесса изготовления отверстий, основным фактором, влияющим на повышение качества обработанной поверхности, является применение различных по составу СОТС, которые по своим свойствам обладают моющими, смазывающими, а также охлаждающими свойствами. На данном этапе развития машиностроительной отрас-

ли, применение СОТС стало неотъемлемой частью любого производственного процесса [6,7]. По классификации все СОТС делятся на четыре типа: твердые, пластичные, жидкие, газообразные. Наибольшее применение нашли жидкие СОТС, которые разделены на масляные и водные (водосмешиваемые). Исследования влияния СОТС на процесс резания, представлены в трудах В.Н. Латышева, М.И. Клушина, П.А. Ребиндера, В.Н. Подураева, Л.В. Худобина, А.С. Верещаки, Е.Г. Бердичевского, М.Б. Гордона, Ф. Бодуна, Д. Тейбора и др.

Несмотря на все преимущества от применения СОТС, экологическая сторона вопроса выдвигает на первый план экологическую безопасность производственных процессов и постепенный отказ от СОТС на минеральной основе. Одним из альтернативных решений, направленных на экологизацию производства, является применение в процессе резания экологически безопасных СОТС, к которым относятся масла на растительной основе и животные жиры, в свою очередь снижение расхода таких масел может быть обеспечено при помощи установки MQL (Minimum quantity lubrication), которая позволяет подавать смазочный материал в зону резания в распыленном состоянии [8-10].

Цель работы – повышение качества обработанной поверхности при растачивании сверхглубоких отверстий, путем применения экологически безопасных СОТС.

Изложение основного материала.

В процессе проведения экспериментальных исследований, наиболее информативным показателем при оценке эффективности применения резцовой головки [5], с возможностью радиального смещения резца, является обеспечение производственных условий при изготовлении деталей из конструкционной стали 20, которые предназначены для глубинных насосов. Для реализации поставленной цели использовался комплексный подход, обеспечивающий необходимую жесткость системы СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь), а также подачу СОТС в зону резания.

Эксперименты включали традиционные, при изучении процессов резания исследования. Опыты проводились на токарно-винторезном станке повышенной точности SAMAT 400M (рис. 2). Обрабатываемая заготовка устанавливалась в трёхкулачковом патроне. Материал заготовки – Сталь 20, внутренний диаметр заготовки $D = 70$ мм, наружный диаметр $D = 76$ мм, длина заготовки составляла $L = 400$ мм.



Рис.2 - Основные условия проведения экспериментальных исследований:

- 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – люнет;
- 3 – дозирующая установка MQL;
- 4 – резцовая головка; 5 – смазочно-охлаждающая технологическая среда; 6 – компрессорная установка SATVA OL 102

Резцовая головка располагалась в суппорте токарного станка. Поскольку длина обрабатываемой заготовки исключает консольное её закрепление, в процессе проведения экспериментов дополнительно был использован люнет.

Режимы резания для процесса точения составляли: $V_1=36,4$ м/мин, $V_2=58,3$ м/мин, $V_3=72,8$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,1$ мм.

Подача COTC в зону резания производилась при помощи дозирующей установки MQL, содержащей сопло, благодаря которому формировался факел распыления технологической жидкости с необходимыми параметрами.

Полученная воздушно-масляная среда подавалась в контактную зону режущего инструмента, которая практически полностью (без остатка) расходовалась. Параметры воздушно-масляной смеси также обеспечивались при помощи регулировочных винтов, расположенных в компрессоре. Для подачи

животного жира в зону резания, в распыленном состоянии, было использовано устройство для подачи смазывающих технологических сред (Патент РФ № 197266) (Рисунок 3) [11].

Подача сжатого воздуха обеспечивалась при помощи компрессорной установки SATVA OL 102. В процессе проведения экспериментальных исследований использовались следующие масла: индустриальное масло И-20, рапсовое масло, свиной жир, также процесс резания осуществлялся без применения COTC (сухое резание).



Рис.3 - Общий вид устройства для подачи смазывающих технологических сред:

- 1 – тигель; 2 – канал для подачи сжатого воздуха в тигель; 3 – канал для подачи сжатого воздуха в сопло; 4 – компрессорная установка SATVA OL 102;
- 5 – кран для регулировки подачи сжатого газа в сопло; 6 – кран для регулировки подачи смазывающей технологической среды в сопло; 7 – тумблер

Принцип работы устройства заключается в следующем. В тигель 1 помещается свиной жир затем закрывается крышкой, далее через тумблер 7 подается питание 220 V на теплоэлектронагреватели, расположенные вдоль стенок тигля 1, а также вдоль каналов для подачи смазывающей технологической среды. Свиной жир посредством вытопки подается в сопло благодаря сжатому воздуху, который поступает в тигель 1 через канал 2, соединенный с компрессорной установкой 4. Расход технологической жидкости регулируется при помощи крана 5. После того, как расплавленный свиной жир поступил в сопло, по каналу 3 подается сжатый воздух в сопло, который далее смешивается с

расплавленным жиром, образуя воздушно-масляную смесь. Параметры воздушно-масляной смеси регулируются при помощи кранов 5, 6. Устройство позволяет также подавать СОТС в зону резания свободно падающей струей, а также струей под давлением [11].

Измерение шероховатости обработанной поверхности производилось при помощи устройства – Измеритель шероховатости TR 200 (рис. 4), который содержит порт, для связи с персональным компьютером, а также программное обеспечение для дальнейшей обработки данных и построения соответствующего графика.



Рис.4 - Основные условия исследования шероховатости обработанной поверхности после процесса растачивания.

Результаты исследования влияния СОТС на шероховатость обработанной поверхности при сверхглубоком растачивании представлены на рис. 4.

Из представленного графика (рис. 5) видно, что наибольший эффект с позиции повышения качества обработанной поверхности показал свиной жир, шероховатость при котором составила $Ra = 0,8$ мкм ($V=36,4$ м/мин), $Ra = 0,49$ мкм ($V=58,3$ м/мин), $Ra = 0,38$ мкм ($V=72,8$ м/мин). Также эффективным себя показало применение растительного (рапсового) масла.

В зависимости от вязкости, растительные масла и животные жиры содержат сложные эфиры при этом молекулы натуральных жирных кислот полярные, в отличие углеродно-водородных молекул минерального масла. В процессе резания, молекулы растительного масла и животного жира

формируют на поверхности режущего инструмента плотную смазочную пленку, обеспечивая повышенный смазочный эффект, и как следствие снижение интенсивности изнашивания инструмента, что также оказывает положительное влияние на качество обработанной поверхности.

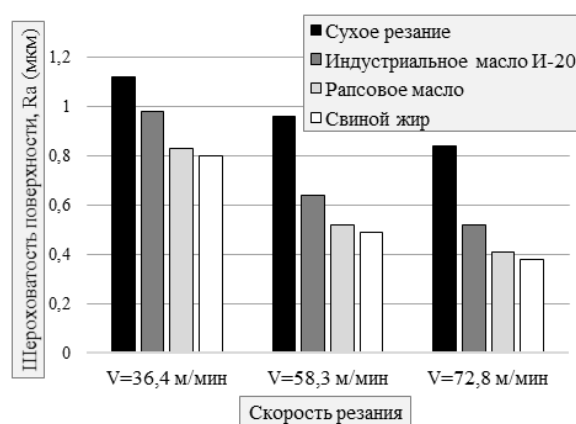


Рис.5 - Значения шероховатости обработанной поверхности при сверхглубоком растачивании отверстий в условиях применения различных СОТС

Выводы.

На основании проведенных исследований показано, что применение резцовой головки с возможностью радиального смещения блока целесообразно при обработке сверхглубоких отверстий. В свою очередь значительное повышение качества обработанной поверхности и снижение шероховатости поверхности, при использовании в качестве СОТС рапсового масла и свиного жира обусловлено, возможно, высоким содержанием рицинолевой кислоты (до 90%), которая в свою очередь является поверхностно-активным веществом (ПАВ). Растительные масла и животные жиры построены на основе натурального или сложного эфира. В отличие от углеродно-водородных молекул минерального масла, молекулы, содержащиеся в растительных маслах и жирах животного происхождения полярные. Данное обстоятельство качественно влияет на процесс резания. Повышенные смазочные свойства растительных масел и животных жиров можно объяснить также благодаря содер-

жанию полярных молекул, которые подобно магнитам, формируют на поверхности режущего инструмента плотную смазочную пленку. Для расширения технологических возможностей применения растительных масел и животных жиров в металлообрабатывающей промышленности, перспективным также является разработка технологий подачи СОТС в зону резания, с обеспечением необходимых параметров воздушно-масляной смеси.

Список литературы

1. Минков М. А. Технология изготовления глубоких точных отверстий – М.: Машиностроение, 1965. – 176 с.
2. Лазарев Д.Е. Резцовые головки для обработки глубоких отверстий. Плавающая двухрезцовая головка, имеющая возможность радиального смещения/ Лазарев Д.Е.// «Вопросы науки и техники»: материалы международной заочной научно-практической конференции. Часть I. (16 января 2012 г.) — Новосибирск: Изд. «ЭКОР-книга», 2012. — 27-33 с.
3. Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В. И. Инструменты для обработки точных отверстий. – М., Машиностроение, 2003. 330 с.
4. Минков М.А. Технология изготовления глубоких точных отверстий. М., Л.: Машиностроение, 1965. 176 с.
5. Курманов Р.Д., Бекиров Э.Л., Абдулкеримов И.Д. Повышение производительности процесса растачивания сверхглубоких отверстий на основе применения резцовой головки с возможностью радиального смещения. Наука и образование сегодня. Олимп, 2017, №6 (17), с. 13-15.
6. Худобин, Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. — М.: Машиностроение, 1977. — 189 с.
7. Клушин М.И. Технологические свойства СОЖ для обработки металлов резанием. Москва, Машиностроение, 1992. 270 с.
8. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография» (СГТ), 2008. 156 с.
9. Скакун В.В., Джемалидинов Р.М., Сулейманов Р.И. Экспериментальная оценка влияния масел растительной и животной природы на контактные процессы при точении. Известия Волгоградского государственного технического университета. Волгоградский государственный технический университет, 2020, №1 (236), с. 46-49.
10. Скакун В.В. Влияние экологических смазочно-охлаждающих технологических сред на тепловую нагруженность процесса резания при зенкерообразовании отверстий / В. В. Скакун, Р. М. Джемалидинов, А. И.

Алиев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – № №4 (733). – С. 40-47, 8 п.л.

11. Устройство для подачи смазывающих технологических сред // Патент № 197266 Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации: 20 Января 2020. Срок действия патента истекает: 20.01.2030. Заявка № 2020102091. Патентообладатели: Скакун В. В., Джемалидинов Р.М., Якубов Ч.Ф.

References

1. Minkov MA Technology for the manufacture of deep precise holes - M.: Mashinostroenie, 1965. - 176 p.
2. Lazarev D.E. Deep hole cutting heads. Floating two-incisor head with the possibility of radial displacement / Lazarev D.E. Part I. (January 16, 2012) - Novosibirsk: Publishing house. "EKOR-kniga", 2012. - 27-33 p.
3. Kirsanov SV, Grechishnikov VA, Skhirtladze AG, Kokarev VI Instruments for processing exact holes. - M., mechanical engineering, 2003.330 p.
4. Minkov M.A. Deep precision hole making technology. M., L.: Mashinostroenie, 1965.176 p.
5. Kurmanov R.D., Bekirov E.L., Abdulkirimov I.D. Increasing the productivity of the superdeep hole boring process based on the use of a cutting head with the possibility of radial displacement. Science and education today. Olympus, 2017, No. 6 (17), p. 13-15.
6. Khudobin, L.V. Technique of using lubricating and cooling agents in metalworking / L.V. Khudobin, E.G. Berdichevsky. - M.: Mashinostroenie, 1977. - 189 p.
7. Klushin M.I. Technological properties of cutting fluid for metal cutting. Moscow, Mechanical Engineering, 1992.270 p.
8. Yakubov Ch.F. The hardening effect of cutting fluids in metal cutting. Simferopol: JSC "Simferopol City Printing House" (SGT), 2008. 156 p.
9. Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Suleimanov R.I. Experimental evaluation of the influence of vegetable and animal oils on contact processes during turning. Bulletin of the Volgograd State Technical University. Volgograd State Technical University, 2020, No. 1 (236), p. 46-49.
10. Skakun V.V., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Aliyev A.I. Influence of environmentally friendly lubricating and cooling technological media on the thermal loading of the cutting process during hole counter-sinking // Izvestiya vysshikh educational institutions. Mechanical engineering. - Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 2021. - No. 4 (733). - S. 40-47, 8 pp.
11. Ustroystvo dlya podachi smazyvayushchikh tekhnologicheskikh sred // Patent № 197266 Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reyestre poleznykh modeley Rossiyskoy Federatsii: 20 Yanvarya 2020. Srok deystviya patenta istekayet: 20.01.2030. Zayavka № 2020102091. Patentobladateli: Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Yakubov Ch.F.

УДК 621.9.06

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ ПРОФИЛЯ КАРМАНА ОПОРЫ

Ю.О. Стреляная¹, А.Ю. Тараховский¹, О.В. Мухина¹, П.К. Сопин¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Учитывая массы и габариты тяжелых станков, точности обработки на таком оборудовании необходимо уделять особое внимание. Один из способов повышения точности оборудования за счет модернизации опор шпиндельных узлов рассматривается в данной статье. Анализируется применение гидростатических подшипников в тяжелых станках. В статье приводится обоснование, выбор и расчет профиля дна кармана для опоры жидкостного трения. Выбору профиля гидростатического подшипника необходимо уделять особое внимание, вследствие определяющего влияния на нагрузочную способность опоры и на динамические характеристики тяжелого станка в целом.

Ключевые слова: подшипник, опора, цапфа, вкладыш, карман, профиль, тяжелый станок, нагрузочная способность.

CONSTRUCTION OF MODEL OF THE HYDROSTATIC BEARING TAKING INTO ACCOUNT A PROFILE OF A POCKET OF A SUPPOR

Yu.O. Strelyanaya¹, A.Yu. Tarakhovskiy¹, O.V. Mukhina¹, P.K. Sopin¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Considering the mass and dimensions of heavy machines, the processing accuracy on such equipment must be given special attention. This article discusses one of the ways to improve the accuracy of heavy machine tools by upgrading the bearings of the spindle assemblies. The application of hydrostatic bearings in spindle assemblies is analyzed. The article provides the rationale, selection and calculation of the shape of the bottom of the pocket for the support of fluid friction. The choice of a hydrostatic bearing profile must be given special attention, due to the decisive influence on the load capacity of the support and on the dynamic characteristics of the heavy machine as a whole.

Keywords: bearing, support, trunnion, bushing, pocket, shape, heavy machine, load capacity.

Повышение точности обработки изделий на тяжелых станках, ввиду больших габаритов узлов станка, участвующих в формообразовании, погрешностей сборки, упругих, тепловых деформаций, является актуальной проблемой и на сегодняшний день [1,2,3,4, 5,6].

При разработке и модернизации существующих тяжелых станков, с целью расширения возможностей диапазона их эксплуатационных параметров, широкие перспективы получают гидростатические подшипники (ГСП), которые обеспечивают снижение или устранение нелинейностей и нестабильности характеристик [7,8,9].

При инженерных расчетах ГСП принимают упрощенную модель: изотермическое

ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости между двумя эксцентрически расположенными жесткими телами, одно из которых неподвижно (опора), а другое движется с некоторой скоростью (цапфа). При смещении цапфы вниз и в сторону вращения между рабочими поверхностями вала и подшипника, ниже линии центров OO_1 образуется клинообразный сужающийся в направлении движения слой смазки. При этом считают, что частицы жидкости перемещаются только вследствие действия постоянной силы трения [10,11,12]. Такая модель характеризует задачу Рейнольдса и может быть использована для расчета широкого класса гидростатических подшипников [13]

При расчете ГСП, особое внимание следует уделять профилю карманов подшипника, в существенной степени определяющих характеристики нагрузочной способности опоры.

На рис. 1 представлены расчетные модели четырехкамерных ГСП с отдельным подводом масла в каждый из карманов.

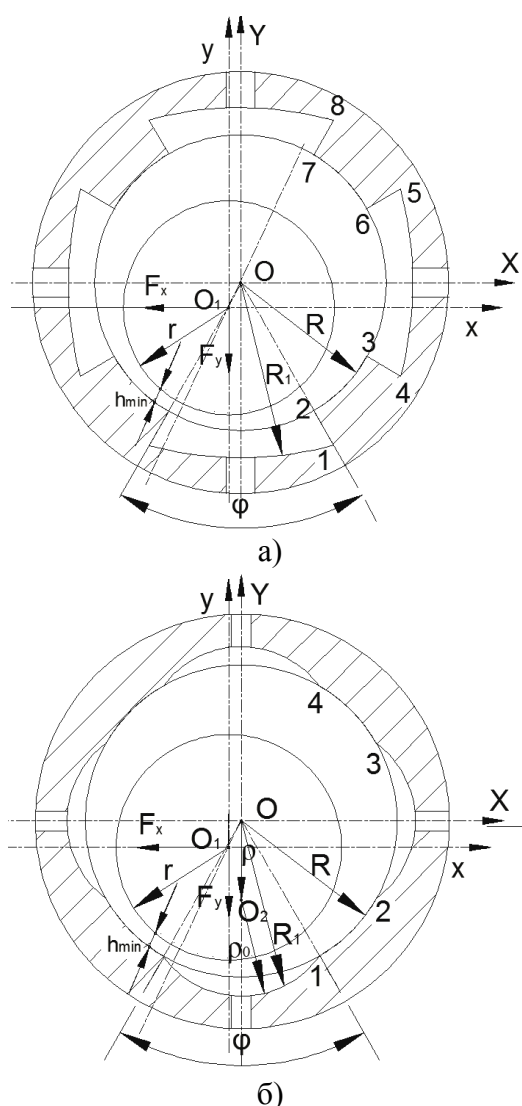


Рис. 1. Схематическое изображение ГСП

Согласно рис. 1-а [13], в сечение ГСП профиль опоры правой полуплоскости для цилиндрической системы координат запишется при R, R_1 – соответствующие постоянные, так:

$$\begin{cases} \varphi_{1,2} \leq R \leq \varphi_{3,4}, \\ \varphi_{3,4} \leq R_1 \leq \varphi_{5,6}, \\ \varphi_{5,6} \leq R \leq \varphi_{7,8} \end{cases} \quad (1)$$

Однако, такая функция профиля (1) является негладкой, неоднозначной с разрывами первого рода в точках $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ и т.п., и недифференцируемой. Наличие неоднозначности, в частности, определяет негладкость [14] и не позволяет использовать классические методы анализа для определения минимума, но может быть решена численными методами.

Вполне логичным является использование описания дна кармана и перехода от перемычки к профилю кармана функциями с устранимым разрывом [15].

Учитывая схему рис. 1-а, необходимо ввести некоторую липшицевую функцию описания ГСП без разрывов в точках 1,2,3,4. Например рис. 1-б. Тогда граничные условия, с учетом смещения центра O на O_2 при $R_1(\varphi)$, запишутся так:

$$\begin{cases} \varphi_1 \leq R \leq \varphi_2, \\ \varphi_2 \leq R_1(\varphi) \leq \varphi_3, \\ \varphi_3 \leq R \leq \varphi_4 \end{cases}$$

Для того чтобы получить зависимости, определяющие значение подъемной силы, рассматривается равновесие элементарного объема жидкости единичной толщины (рис.2).

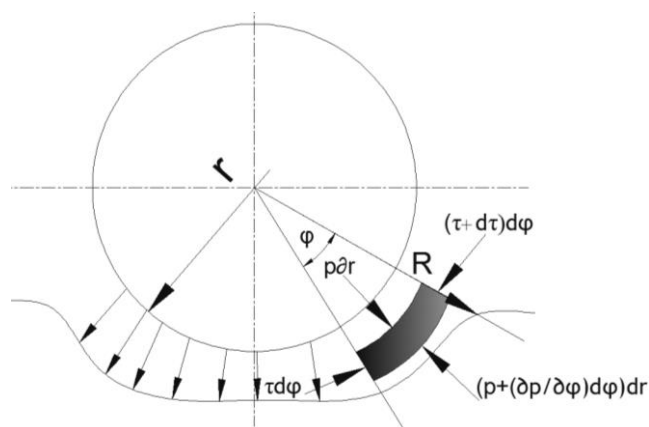


Рис. 2. Расчетная модель

При перемещении этого объема жидкости в направлении φ с окружной скоростью v на него действует подъемная сила, вызванная разностью давлений

$$p \frac{dr}{r} - \left(p + \frac{\partial p}{\partial \varphi} d\varphi \right) dr.$$

Интегрирование этого выражения с учетом (2) по φ позволяет проанализировать влияние профиля $R(\varphi)$ на несущую способность ГСП. Ввиду сложности непосредственного решения вариационной задачи выбора функции $R(\varphi)$ по критерию оптимальной несущей способности ГСП, предложено осуществить конечномерную параметризацию и решать такую задачу методами численной оптимизации.

Учитывая то, что движение частиц жидкости происходит не по самой стенке, а по тонкому слою молекул жидкости, удерживаемых молекулярными силами на стенке и, воспользовавшись законом Ньютона, можно записать удельную силу трения τ :

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr}$$

$$p \frac{dr}{r} - \left(\frac{p + \partial p}{r \partial \varphi} d\varphi \right) dr = -(\tau + d\tau) d\varphi + \tau d\varphi$$

$$\frac{1}{r} p dr - \frac{1}{r} p dr - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial \varphi} d\varphi \right) dr = -\mu \frac{\partial v}{\partial r} d\varphi - \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} dr \right) d\varphi + \mu \frac{\partial v}{\partial r} d\varphi$$

Или

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \quad (3)$$

Так как в уравнении (3) r изменяется в пределах от r_0 до $r_0 + \delta$, причем δ – величина малая в сравнении с r_0 , то в этом уравнении r можно заменить на r_0 , а так же введем вместо r новую независимую переменную y и положив $r = r_0 + y$, получим

$$\frac{1}{r_0} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \quad (4)$$

Величину скорости течения жидкости v можно получить двукратным интегрированием уравнения (4), в виде

$$V = \frac{1}{2r_0\mu} \frac{\partial p}{\partial \varphi} y^2 + Ay + B$$

Произвольные постоянные A и B находятся из следующих граничных условий:

$$V|_{y=0} = U$$

$$V|_{y=h} = 0$$

Для скоростей течения в слое смазки:

$$V = \frac{1}{2r_0\mu} \frac{\partial p}{\partial \varphi} y(y - h(\varphi)) + \frac{U}{h(\varphi)} \quad (5)$$

С учетом (5), расход жидкости Q через зазор $h(\varphi)$ равен

$$Q = \int_0^{h(\varphi)} V dy = \frac{Uh(\varphi)}{2} - \frac{h^3(\varphi)}{12\mu r_0} \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

Если зазор, координате которого соответствует наибольшая величина давления, обозначить через h_m , условие неразрывности потока можно представить, как равенство объемов жидкости, проходящих через поперечные сечения с зазорами $h(\varphi)$ и h_m в единицу времени:

$$\frac{Uh(\varphi)}{2} - \frac{h^3(\varphi)}{12\mu r_0} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \frac{Uh_m}{2} - \frac{h_m^3}{12\mu r_0} \left[\frac{\partial p}{\partial \varphi} \right]_{p=p_{\max}} \quad (6)$$

где $h_m = R - r_0 - e(\cos \phi)$,

e - относительный эксцентриситет OO_1 (рис.1).

Угол ϕ , при котором достигается максимум удельного давления $p = p_{\max}$, определяется известным условием экстремума $\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0$. Тогда уравнение неразрывности потока (6) принимает вид:

$$\frac{Uh(\varphi)}{2} - \frac{h^3(\varphi)}{12\mu r_0} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \frac{Uh_m}{2} \quad (7)$$

Из уравнения (7), можно получить дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 6\mu U r_0 \frac{(h(\varphi) - h_m)}{h^3(\varphi)},$$

после интегрирования левой и правой частей позволяет построить

$$p(\varphi) = p(0) + 6r_0\mu U \left[\int_0^\varphi \frac{\partial \varphi}{h(\varphi)^2} - h_m(\varphi) \int_0^\varphi \frac{\partial \varphi}{h(\varphi)^3} \right]$$

В предположении, что смещение цапфы в подшипнике происходит плоскопараллельно (отсутствие перекаса) можно записать силы F_x и F_y как результат интегрирования векторной функции удельных давлений (см. рис.1)

$$\begin{cases} F_x = L \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} p(\varphi_i) \sin(\varphi_i) d\varphi_i \\ F_y = L \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} p(\varphi_i) \cos(\varphi_i) d\varphi_i \end{cases}$$

где L – ширина подшипника;
Несущая способность подшипника

$$W = \frac{L d_0 \omega \mu}{\delta^2} K_w,$$

где $\delta = R - r_0$ - радиальный зазор,

ω - угловая скорость вращения вала

$K_w = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ - коэффициент, характеризующий несущую способность опоры

Для расчета нагрузочной способности подшипника составлены графики значений функции F_x, F_y (рис.3).

Кроме того, вычисление F_x, F_y легко провести с помощью ПК методами численного интегрирования. В обоих случаях результат расчета зависит от ряда конструктивных параметров, в частности от протя-

женности несущей поверхности подшипника, которая измеряется углом $\varphi_2 - \varphi_3$ и т.д. (рис.1).

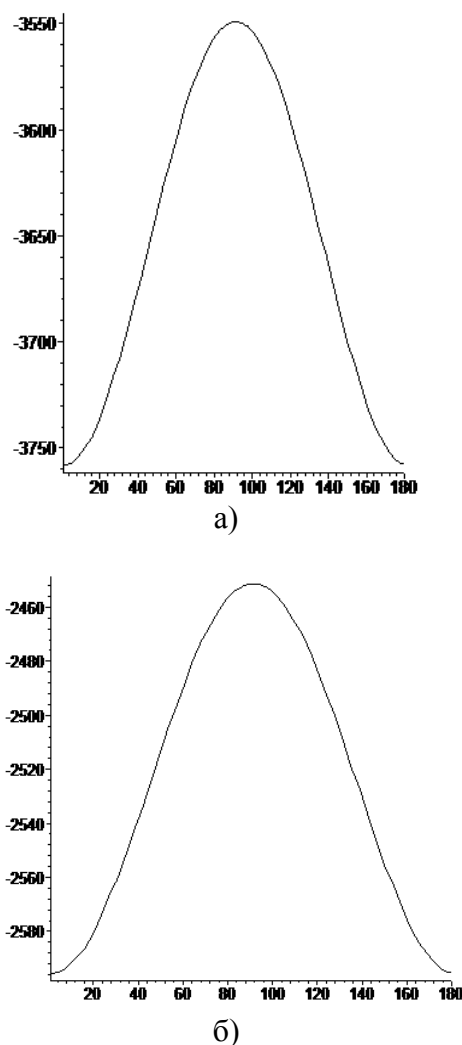


Рис. 3. График распределения сил по x и y

Влияние эффекта «негладкости» описания профиля опоры не только не позволяет использовать классические методы анализа и оптимизации, но и не гарантирует выполнение базовой гипотезы о ламинарности течения смазочной жидкости в элементах опоры.

Выбору профиля подшипника необходимо уделять особое внимание вследствие определяющего влияния на нагрузочную способность опоры и на динамические характеристики станка в целом.

Список литературы

1. Проников А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник – учебник. В 3-х т. Т.2 Ч.1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А.С. Проников – М.: Машиностроение, 1995. – 371 с.
2. Бушуев В.В. Станочное оборудование автоматизированного производства.-Т.1 / В.В. Бушуев – М: МГТУ «СТАНКИН», 1995.– 225 с.
3. Бушуев В.В. Станочное оборудование автоматизированного производства.-Т.2. / В.В. Бушуев – М: МГТУ «СТАНКИН», 1995.– 234 с.
4. Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков, т.2. / Д.Н. Решетов – М.: Машиностроение, 1972.- 482с.
5. Стреляная Ю.О Обеспечение стабильности показателей качества поверхностей при чистовом и тонком точении на тяжелых станках / Ю.О. Стреляная С.М. Братан, П.А. Новиков // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2012. № 36. С. 49-53.
6. Стреляная Ю.О. Повышение эффективности процесса чистового точения на тяжелых станках / Ю.О. Стреляная, П.А. Новиков, С.М. Братан / Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2013. – № 38. – С. 61-63.
7. Бушуев В.В. Гидростатическая смазка в тяжелых станках / В.В. Бушуев – М.: Машиностроение, 1989.– 162с.
8. Бушуев В.В. Гидростатические опоры тяжелых и уникальных станков: автореф. дис. докт. техн. наук. 05.03.01/ Московский станкоинструментальный институт. – М., 1983. - 33 с.
9. Стреляная Ю.О. Управление точностью шпиндельного узла при помощи адаптивных гидростатических опор с обратной связью / Ю.О. Стреляная // Вестник современных технологий: сб. научн. тр. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2017. – №7. – С. 43.- 49.
10. Бушуев В.В. Гидростатические опоры тяжелых станков / В.В. Бушуев М.: Машиностроение, 1989.- 176 с.
11. Бушуев В.В. Основы конструирования станков. / В.В. Бушуев – М: МГТУ «СТАНКИН», 1995.- 178 с.
12. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика: В 2 ч. Ч.2 / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе– М: Физматгиз, 1963. – 728с.
13. Ковалев В.Д. Опоры и передачи жидкостного трения станочного оборудования: составление и анализ. Учебное пособие./ В.Д. Ковалев, О.Ф. Бабин – Краматорск: ДГМА, 2005. – 188с.
14. Смирнов В.И. Курс высшей математики: В 4-х т. Т.2 / В.И. Смирнов – М: Наука, 1974. – 656с.
15. Кларк Ф. Оптимизация и негладкий анализ / Ф. Кларк – М: Физмат, 1988. – 280с.

References

1. A.S.Pronikov. Design of metal-cutting machine tools and machine-tool systems: Handbook - textbook. In 3 vol. Vol.2 part 1. Calculation and design of units and elements of machine tools / A.S. Pronikov – M. Mechanical engineering, 1995. – p.371
2. V.V. Bushuev. Machine-tool equipment for automated production Vol.1 / V.V. Bushuev. – M.: MSTU "STANKIN", 1995 – p.225
3. V.V. Bushuev Machine-tool equipment for automated production Vol.1 / V.V. Bushuev – M.: MSTU "STANKIN".1995. – p.234
4. D.N. Reshetov Parts and mechanisms of metal-cutting machines vol.2 / D.N. Reshetov – M. Mechanical engineering 1972 p.482
5. Yu.O. Strelyanaya Ensuring the stability of surface quality indicators during finishing and fine turning on heavy machines / Yu.O.Strelyanaya S.M.Bratan P.A.Novikov // Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2012. №. 36. p. 49-53.
6. Yu.O.Strelyanaya Improving the efficiency of the clean turning process on heavy machines / Yu.O.Strelyanaya S.M.Bratan P.A.Novikov // Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2013. №. 38. p. 61-63.
7. V.V.Bushuev Hydrostatic lubrication in heavy machine tools / V.V.Bushuev M. Mechanical engineering 1989 p.162
8. V.V.Bushuev Hydrostatic supports of heavy and unique machine tools: author. dis. doct. tech. sciences. 05.03.01 / Moscow Machine-Tool-Mental Institute M.,1983 p.33
9. Yu.O.Strelyanaya Controlling the precision of the spindle assembly using adaptive hydrostatic bearings with feedback / Yu.O.Strelyanaya / Bulletin of modern technologies: collection of scientific papers – Sevastopol FSAEI of HE SevSU 2017 №7 p.43-49
10. V.V.Bushuev Hydrostatic bearings for heavy machine tools / V.V.Bushuev M. Mechanical engineering 1989 p.176
11. V.V.Bushuev Fundamentals of Machine Tool Design / V.V.Bushuev MSTU "STANKIN"1995-p.178
12. N.E.Kochin Theoretical hydromechanics:Vol.2 part 2 / N.E.Kochin, I.A.Kibel`, N.V.Roze – M. Fizmatgiz, 1963 – p.728
13. V.D. Kovalev Supports and transmission of fluid friction of a hundred-night equipment: compilation and analysis. Tutorial. / V.D. Kovalev, O.F.Babin Kra-matorsk:DSMA, 2005 – p.188
14. V.I.Smirnov Higher Mathematics Course: in 4 vol. Vol.2 / V.I. Smirnov – M:Science 1974 – p.656
15. F. Klark Optimization and nonsmooth analysis / F.Klark – M: Fizmat, 1988 – p.280

УДК 621.7.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ FDM

А.С. Фарниев¹, П. А. Новиков¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В статье описаны результаты исследования точности внутренних резьб, сформированных с помощью технологии FDM. Для проведения исследования была создана 3D-модель образца, содержащая внутренние резьбы M14, M8 и M3. Разработаны управляющие программы для печати образцов из ABS, PETG и PLA – пластиков. Образцы напечатаны на 3D-принтере MakerBot MethodX. Профиль резьбы в разрезанных образцах исследовались при помощи микроскопа БМИ-1. С помощью данного микроскопа были получены фотографии резьб в 50-кратном увеличении и измерены величины отклонений от номинального профиля резьбы по среднему диаметру внутренней резьбы.

Ключевые слова: внутренние резьбы, профиль резьбы, технологии FDM, точность формирования.

RESEARCH OF THE ACCURACY OF INTERNAL THREADS FORMED BY FDM TECHNOLOGY

A.S. Farniev¹, P.A. Novikov²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article describes the results of a study of the accuracy of internal threads formed using the FDM technology. For the study, a 3D model of the sample was created containing internal threads M14, M8 and M3. Control programs have been developed for printing samples from ABS, PETG and PLA - plastics. Samples printed on a MakerBot MethodX 3D printer. The thread profile in the cut samples was examined using a BMI-1 microscope. With the help of this microscope, photographs of threads were obtained at 50-fold magnification and the values of deviations from the nominal thread profile were measured along the average diameter of the internal thread.

Keywords: internal threads, thread profile, FDM technology, forming precision

1. Введение

Развитие современного машиностроения требует применения новых технологий, повышающих гибкость производства и качество продукции при низких затратах ресурсов.

На сегодняшний день перспективной тенденцией развития машиностроения является применение аддитивных технологий. Аддитивные технологии предполагают изготовление (построение) физического объекта (детали) методом послойного нанесения (добавления, англ. – «add») материала, в отличие от традиционных методов формирования детали, за счёт удаления материала из массива заготовки [1].

Наиболее широкодоступной аддитивной технологией на сегодняшний день яв-

ляется Моделирование методом наплавления (FDM) – объект формируется путём послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, воск) [2].

Данными технологиями получают детали из пластика, которые точно повторяют конфигурации 3D-моделей, построенных в системах автоматизированного проектирования.

Наиболее распространённым разъёмным соединением в машиностроении является резьбовое. По этой причине необходимо предусмотреть возможность формирования внутренних резьб в деталях, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий, с требуемой точностью.

Процесс подготовки детали к печати состоит из создания 3D-модели детали и управляющей программы (G-кода) для оборудования. 3D-модель детали необходимо создать в любой системе автоматизированного проектирования (САПР), которая имеет возможность сохранять 3D-модели в формате STL. Для создания управляющей программы по трехмерной модели детали необходима программа-слайсер. Слайсер – компьютерная программа, послойно преобразующая виртуальную трехмерную модель формата STL в машинный код (G-code).

Вследствие того, что детали изготавливаются послойно на их угловых и криволинейных поверхностях проявляется дефект ступенчатости. В большинстве программ-слайсеров, разрабатываемых производителями 3D-принтеров и независимыми разработчиками (Slic3r, Cura, Simplify3D, KISSLICER, IntamSuite и т.п.), торцы слоев на угловых поверхностях располагаются так, чтобы номинальная угловая или криволинейная поверхность, построенная в САПР, проходила через середину их толщины (рис. 1). [3]

Дефект ступенчатости характерен для профилей внутренних резьб формируемых вдоль оси Z в системе координат 3D-принтера. Кроме данного дефекта погрешности профиля возникают в связи с усадкой материала и погрешностями позиционирования печатающей головки 3D-принтера.

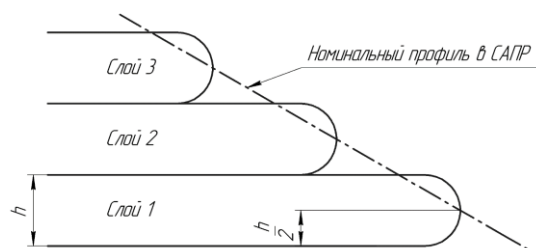


Рис. 1. Расположение слоев на угловых поверхностях при их разделении в программах-слайсерах

По этим причинам, чтобы определить точность внутренних резьб сформированных при помощи аддитивных технологий, необходимо провести исследование их профилей.

2. Основная часть

Для проведения исследования точности внутренних резьб сформированных с помощью технологии FDM, были подготовлены образцы деталей. Образцы деталей формировались из ABS-пластика, PLA-пластика и PETG-пластика с целью сравнения точности внутренних резьб, полученных в данных материалах.

В исследовании рассматривались метрические внутренние резьбы нескольких конфигураций для сравнения точности полученных резьб в зависимости от геометрических параметров. Для исследования были выбраны резьбы: М3, М8 и М14.

Геометрические параметры внутренних резьб представлены в таблице 1 [4,5].

Для повышения производительности и меньшего расхода материала при печати образцов деталей все резьбы выполнены на одной детали. 3D-модель детали с резьбами выполнена в САПР SolidWorks. Внутренние резьбы были построены с помощью команды «Вырез по траектории», для чего были построены профили внутренних резьб М3, М8 и М14 по ГОСТ 9150-2002, в плоскости на которой лежат оси отверстий, а затем в качестве траектории выреза построены спирали с шагами равными шагам резьб.

Таблица 1. Геометрические параметры резьб М3, М8, М14

Параметр	Значения для резьб, мм		
	М3	М8	М14
Номинальный наружный диаметр резьбы D	3	8	14
Шаг резьбы P	0,5	1,25	2
Номинальный средний диаметр резьбы D_2	2,675	7,188	12,701
Номинальный внутренний диаметр D_1	2,459	6,647	11,835
Высота исходного треугольника резьбы H	0,433	1,082	1,732
Высота профиля резьбы $(5/8)H$	0,2706	0,6766	1,0825
Фаска $Z \times 45^\circ$	0,5	1,6	2

3D-модель образца с внутренними резьбами M3, M8 и M14, выполненная в САПР SolidWorks представлена на рис.2.

3D-модель образца была сохранена в формате STL, а затем по данной модели в программе-слайсере MakerBot Print были установлены параметры деления 3D-модели образца на слои и режимы печати, после чего были созданы управляющие программы для разных видов пластиков.

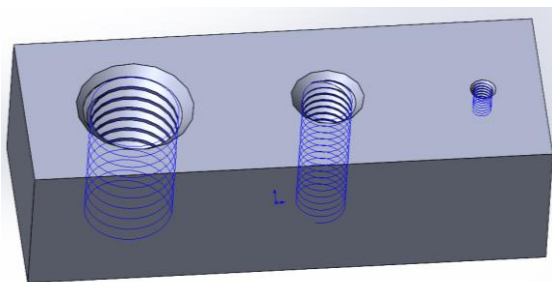


Рис. 2. 3D-модель образца с внутренними резьбами M3, M8 и M14, выполненная в САПР SolidWorks

Параметры печати образцов представлены в таблице 2.

Образцы деталей были напечатаны с помощью 3D-принтера промышленного класса MakerBot Method X. Данный принтер имеет возможность печатать пластики различного вида в том числе и ABS-пластик, из-за наличия камеры печати с циркуляционным подогревом. Процесс печати на принтере оптимизирован датчиками, контролирующими температуры сопла и камеры, а также подачи материала.

Таблица 2. Параметры печати образцов

Параметр	ABS-пластик	PLA-пластик	PETG-пластик
Температура экструдера	245°C	215°C	230°C
Температура камеры печати	80°C	55°C	70°C
Скорость перемещения экструдера, мм/с	35	40	50
Толщина слоя, мм	0,15		
Ширина внешних стенок, мм	0,4		
Количество внешних стенок, шт	5		
Плотность заполнения	30%		

Напечатанный образец с внутренними резьбами представлен на рис. 3.

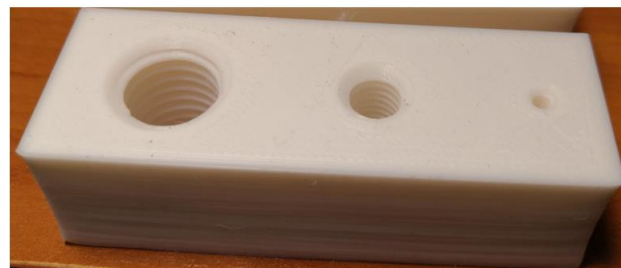


Рис. 3. Образец с внутренними резьбами напечатанный на 3D-принтере MakerBot Method X

Для исследования с помощью микроскопа профилей внутренних резьб, полученных в образцах, была удалена часть материала с образцов до плоскости, в которой лежат оси резьбовых отверстий.

Поскольку образцы изготовлены из пластиков, обработка, связанная с повышенными температурами и усилиями может привести к плавлению и деформации пластиков, поэтому материал удалялся вручную.

Часть материала образцов, содержащая внешние стенки удалялась ножовкой, чтобы упростить дальнейшую обработку, оставшая часть материала удалялась шлифовальными шкурками на ровной поверхности. Последовательно использовались шлифовальные шкурки с зернистостью P150, P320 и P500. Материал удалялся равномерно до середины ширины образца, при этом производились измерения ширины образца с помощью штангенциркуля.

Образец после удаления половины материала представлен на рис. 4.



Рис. 4. Образец после удаления половины материала

Профили внутренних резьб, сформированные в образцах, исследовались при

помощи инструментального микроскопа БМИ-1 (рис. 5).



Рис. 5. Исследование профилей внутренних резьб образца под микроскопом БМИ-1

На всех образцах проявился дефект ступенчатости профиля внутренней резьбы. Данный дефект вызывает отклонение от номинального профиля резьбы. Фотографии профилей резьб M14 сформированных в образцах из ABS, PETG, PLA – пластиков представлены на рис. 6-8.

При печати резьб меньших размеров с такой же толщиной слоя печати h в пределах профиля резьбы размещается меньшее количество слоев, тем самым получаемый профиль резьбы в большей степени отличается от номинального профиля по ГОСТ 9150-2002.

Фотографии профилей резьб M14 сформированных в образцах из ABS, PETG, PLA – пластиков представлены на рис. 9-11.

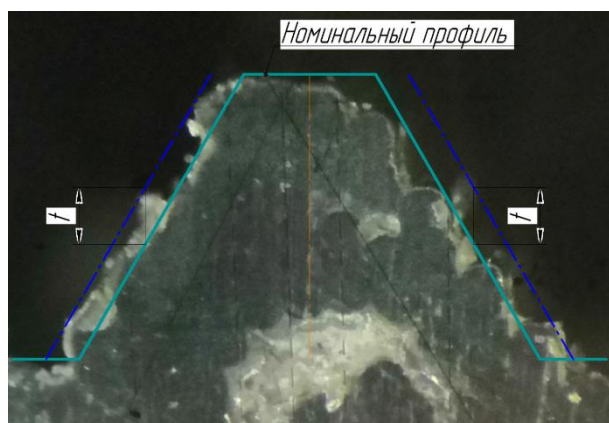


Рис. 6. Профиль резьбы M14, сформированной в образце из ABS-пластика

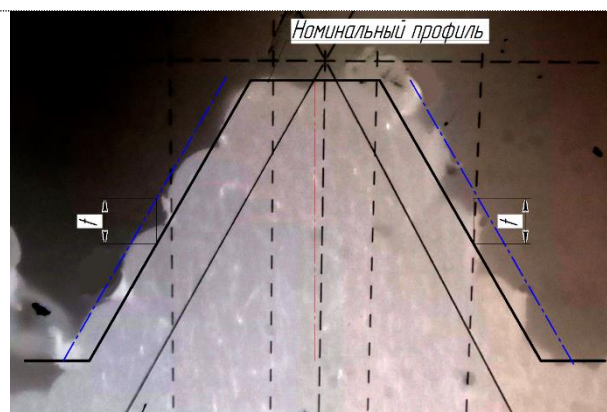


Рис. 7. Профиль резьбы M14 сформированной в образце из PETG-пластика

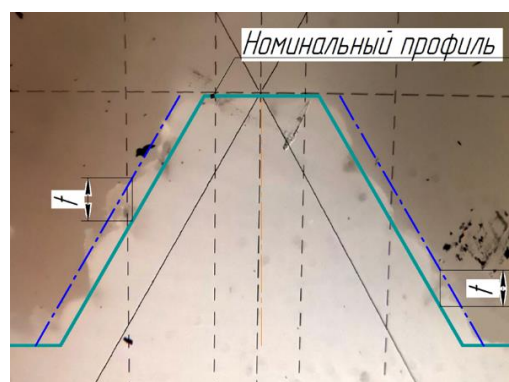


Рис. 8. Профиль резьбы M14, сформированной в образце из PLA-пластика

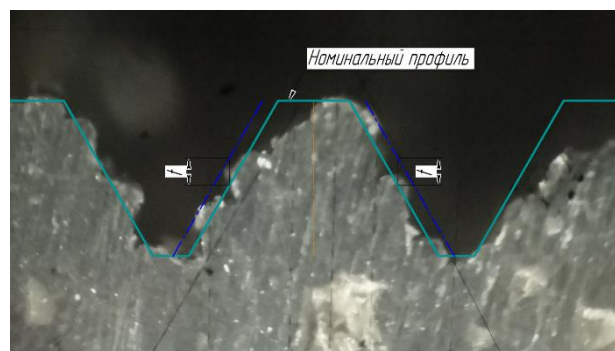


Рис. 9. Профиль резьбы M8, сформированной в образце из ABS-пластика

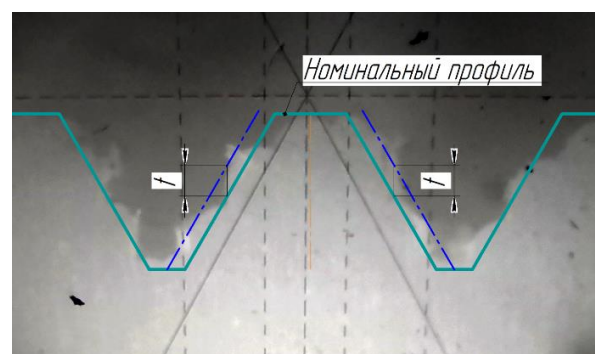


Рис. 10. Профиль резьбы M8, сформированной в образце из PETG-пластика

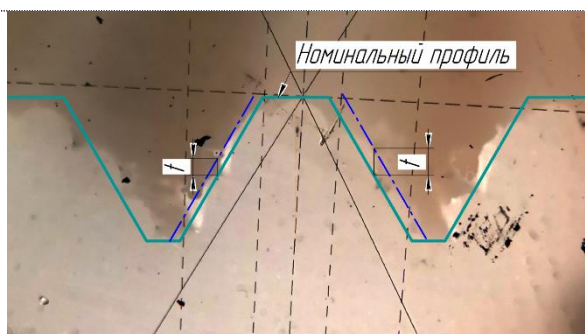


Рис. 11. Профиль резьбы М8, сформированной в образце из PLA-пластика

Для образцов с внутренними резьбами М14 и М8 были измерены величины отклонений t , соответствующие отклонениям по среднему диаметру резьбы D_2

Исходя из значения допусков по ГОСТ 16093-2004, внутренние резьбы, сформированные во время печати образцов соответствуют 9-ой степени точности по среднему диаметру резьбы.

Таблица 3. Параметры печати образцов

Размер резьбы	Материал	Измеренное отклонение t , мкм
М14	ABS-пластик	204
	PETG-пластик	183
	PLA-пластик	199
М8	ABS-пластик	141
	PETG-пластик	150
	PLA-пластик	137

Сформировать профили резьб М3 близкими к номинальному профилю по ГОСТ 9150-2002 при печати с толщиной слоя 150 мкм не удалось, поскольку толщина слоя печати h превышала ширину впадины и выступа резьбы.

Фотография профилей резьб М3, полученных при печати с толщиной слоя 150 мкм в образцах из ABS, PETG, PLA – пластиков представлены на рисунках 12-14.

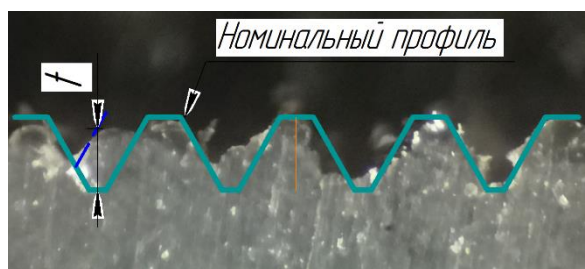


Рис. 12. Профиль резьбы М3, сформированной в образце из ABS-пластика



Рис. 13. Профиль резьбы М3, сформированной в образце из PETG-пластика

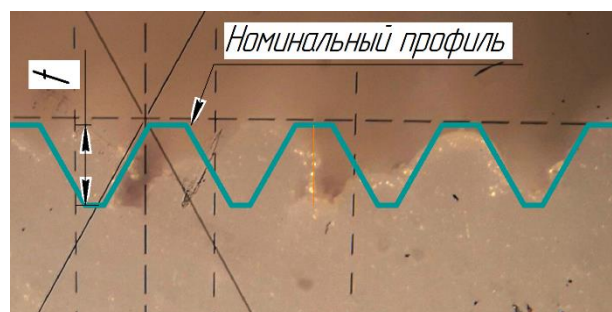


Рис. 14. Профиль резьбы М3, сформированной в образце из PLA-пластика

3. Выводы

Таким образом, при делении 3D-моделей деталей с внутренними резьбами на слои, возникает дефект ступенчатости на поверхностях профиля резьбы. Данный дефект приводит к отклонениям размеров у полученного при делении на слои профиля резьбы от номинального профиля резьбы, установленного по ГОСТ 9150-2002. Кроме того, на величину отклонения влияет усадка пластика и точность позиционирования печатающей головки 3D-принтера.

Сформированные во время печати внутренние резьбы с толщиной слоя 150 мкм могут достигать 9-ой степени точности по среднему диаметру резьбы. Формирование с такой же толщиной слоя резьб М3 приводит к значительным отклонениям, поскольку толщина слоя печати превышает ширину выступа и впадины профиля данной резьбы. Исходя из геометрических параметров резьбы М3 для формирования ее профиля близким к номинальному толщина слоя печати не должна превышать 50 мкм.

В том случае, когда толщина слоя печати превышает размеры шага резьбы, то формирование резьбы с таким шагом при

помощи аддитивных технологий становится невозможным.

Список литературы

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. – 220 с.
2. Слюсар, В.И. Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант / В.И.Слюсар // Конструктор. – 2002. – № 1. – С.5 – 7.
3. Sigmund A. Dimensional accuracy of threads manufactured by fused deposition modeling / A. Sigmund., W. Torgeir., E. Christer // Procedia Manufacturing – 2018. – №26. – P. 763–773.
4. ГОСТ 16093-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором
5. ГОСТ 9150-2002 (ИСО 68-1-98). Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Профиль.

References

1. Zlenko M.A. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii / M.V. Nagajcev, V.M. Dovbysh // posobie dlya in-zhenerov. – M.: GNC RF FGUP «NAMI» 2015. – 220 s.
2. Slyusar, V.I. Fabber-tekhologii: sam sebe konstruktor i fabrikant / V.I.Slyusar // Konstruktor. – 2002. – № 1. – С.5 – 7.
3. Sigmund A. Dimensional accuracy of threads manufactured by fused deposition modeling / A. Sigmund., W. Torgeir., E. Christer // Procedia Manufacturing – 2018. – №26. – P. 763–773.
4. GOST 16093-2004. Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Rez'ba metricheskaya. Dopuski. Posadki s zazorom
5. GOST 9150-2002 (ISO 68-1-98). Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Rez'ba metricheskaya. Profil'.

[illegible]

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №1(21) 2021

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.