

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 5 (83)

2018

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Михайлов А.Н., Ивченко Т.Г., Петряева И.А. Научно обоснованная оптимизация стойкости режущего инструмента по критерию себестоимости 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Шестопалова Л.П. Применение наукоёмких технологий для повышения эксплуатационных свойств легированных прецизионных деталей за счёт нитридов легирующих элементов 8

Гаар Н.П. Лазерно-электрохимическая обработка безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия 14

Скрябин М.Л. Получение стойких оксидных пленок на поверхности поршневых алюминиевых сплавов при микродуговом оксидировании 19

НАУКОУМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Хандожко А.В., Федукон А.Г. Особенности шлифования лейкосапфира алмазными кругами и их правки 27

Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности силового контактного взаимодействия в зоне резания при лезвийной механической обработке заготовок из полимерных композитных материалов 34

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Суслов А.Г., Медведев Д.М., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Система автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием 40

ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Тюсенков А.С., Рубцов А.В., Мирхайдарова К.А. Исследование жаростойкости труб печей пиролиза 45

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение 05.16.00 – Металлургия и материаловедение

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г.

Председатель редакционного совета
чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета
д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)
д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)
д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)
д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)
д.т.н., проф. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)
акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)
д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)
д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)
д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)
д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)
д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)
д.т.н., проф. КУЗЬМИН С.В. (г. Волгоград)
д.т.н., проф. ЛАВРИНЕНКО В.Ю. (г. Москва)
д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)
акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)
д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)
д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк, Украина)
д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)
д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)
д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)
д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)
д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)
д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)
д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)
д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)
д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)
д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)
д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)
д.т.н., проф. ШЛЯПИН А.Д. (г. Москва)

Зам. главного редактора
ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: «Роспечать» 79195, «Пресса России» 39536).
Тел. редакции: 8-903-572-87-39
E-mail: naukatm@yandex.ru
www.ntmash.tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 5 (83)

2018

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s. SUSLOV A.G.

Chairman of Editorial Committee
m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M.

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G.

Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

d.en.s., prof. KUZMIN S.V. (Volgograd)

d.en.s., prof. LAVRINENKO V.Yu. (Moscow)

d.en.s., prof. LARIN S.N. (Tula)

Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm')

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. OLEJNIK A.V. (Moscow)

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

d.en.s., prof. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. HEJFETS M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. CHIGIRINSKY Yu.L. (Volgograd)

d.en.s., prof. SHLYAPIN A.D. (Moscow)

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195, «Pressa Rosii» 39536).

Editorial office Ph: 8-903-582-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate

ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Michailov A.N., Ivchenko T.G., Petryaeva I.A. Scientifically substantiated optimization of cutter life on criterion of cost price 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Shestopalova L.P. Science intensive technology application for performance attributes increase of alloy high-precision parts at expense of alloy element nitrides. . 8
Gaar N.P. Laser electro-chemical treatment tungsten free hard alloy KNT16 in 10% aqueous solution of sodium chloride 14
Skryabin M.L. Steady oxide film obtaining on surface of piston aluminum alloys at micro-arc oxidation. 19

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

Khandozhko A.V., Fedukov A.G. Peculiarities of leucosapphire grinding with diamond disks and their stropping. 27
Zubarev Yu.M., Priyomyshev A.V., Zastrovsky A.S. Peculiarities of power contact interaction in cutting area at blade machining of polymeric composite blanks. 34

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

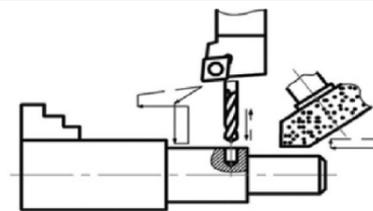
Suslov A.G., Medvedev D.M., Petreshin D.I., Fedonin O.N. System for automated wear-resistance technological control of machinery at cutting. 40

SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

Tyusenkov A.S., Rubtsov A.V., Mirkhaidarova K.A. Pipe high-temperature strength research of pyrolysis furnace 45

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for academic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines, 05.16.00 – Metallurgy and Materials Science.

Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»



УДК 621.98:539.376

DOI: 10.30987/article_5ad8d28f838620.71670808

А.Н. Михайлов, д.т.н., Т.Г. Ивченко, к.т.н., И.А. Петряева, к.т.н.
(Донецкий национальный технический университет, Украина)
E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

Научно обоснованная оптимизация стойкости режущего инструмента по критерию себестоимости

Представлена методика оптимизации режимов резания с учетом закона распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины. На основании анализа критерия оптимизации – себестоимости как функции случайного аргумента получены аналитические зависимости, позволяющие количественно учитывать рассеивание стойкости режущего инструмента при определении ее оптимального значения.

Ключевые слова: стойкость; коэффициент вариации; закон распределения; оптимизация; себестоимость.

A.N. Michailov, D. Eng., T.G. Ivchenko, Can. Eng., I.A. Petryaeva, Can. Eng.
(Donetsk National Technical University, Ukraine)

Scientifically substantiated optimization of cutter life on criterion of cost price

A procedure for optimization of cutting modes taking into account a distribution law of cutter life as a random variable is presented. On the basis of the analysis of the optimization criterion – cost price as a function of the random argument there are obtained analytical dependences which allowed taking into account quantitatively cutter life spreading at its optimum value definition.

Keywords: durability; coefficient of variation; distribution law; optimization; cost price.

Одним из резервов повышения эффективности механообработки является обоснование рациональных условий функционирования режущего инструмента. В связи с этим весьма актуальна задача совершенствования методики оптимизации режимов резания с учетом реальных производственных условий.

Согласно современным представлениям, процесс резания – это сложный физико-химический механизм взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом в условиях рассеивания свойств составляющих элементов технологической системы, что обуславливает стохастический характер параметров процесса резания [1].

Однако в настоящее время основные методы решения задач оптимизации основаны на рассмотрении параметров процесса резания

как детерминированных величин и замене случайных параметров их средними значениями [2].

В настоящее время накоплено достаточно большое количество как экспериментальной, так и теоретической информации о законах распределения стойкости инструмента в различных условиях эксплуатации [3]. Однако методы учета законов распределения при оптимизации режимов резания практически отсутствуют.

Выполненные в этом направлении исследования по оптимизации режимов резания с учетом случайного характера стойкости инструмента на основании критерия максимальной производительности [4] требуют дальнейшего развития.

Цель работы – совершенствование методи-

ки оптимизации режимов резания с учетом закона распределения стойкости инструмента как случайной величины по критерию минимальной себестоимости.

Стохастический характер функционирования режущего инструмента обусловлен действием случайных параметров процесса резания [1]. К их числу относят неконтролируемые изменения физико-механических свойств заготовки и инструмента, припуска, статические и динамические характеристики оборудования и технологической оснастки. В результате случайный характер имеет и основной выходной параметр процесса резания – стойкость режущего инструмента T .

При анализе стойкости режущего инструмента как случайной величины наиболее распространен закон Вейбулла [3], для которого интегральная $P(t)$ и дифференциальная $f(t)$ функции распределения равны:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad (1)$$

где a, b – параметры масштаба и формы закона распределения.

Результаты исследований в производственных условиях законов распределения стойкости сборных резцов с механическим креплением квадратных пластин Т5К10 представлены на рис. 1.

Условия обработки:

1. Сталь 45 (163...207 НВ); скорость резания $v = 95$ м/мин; подача $S = 0,7$ мм/об; глубина резания $t_p = 1,8$ мм.

2. Сталь 20ХГН (174...217 НВ); скорость резания $v = 63$ м/мин; подача $S = 0,78$ мм/об; глубина резания $t_p = 2,4$ мм.

В результате экспериментов установлены средние периоды стойкости $T_{cp1} = 35$ мин; $T_{cp2} = 40$ мин; коэффициенты вариации стойкости $V_{T1} = 0,4$; $V_{T2} = 0,85$.

Проверка по критерию Фишера подтверждает адекватность закона Вейбулла распределения стойкости режущего инструмента в указанных условиях. Параметры законов распределения стойкости:

$$b = \exp(-1,092 \ln V_T): b_1 = 2,7; b_2 = 1,2;$$

$$a = T_{cp} / \Gamma(1+1/b): a_1 = 39; a_2 = 43;$$

$\Gamma(1+1/b)$ – гамма-функция.

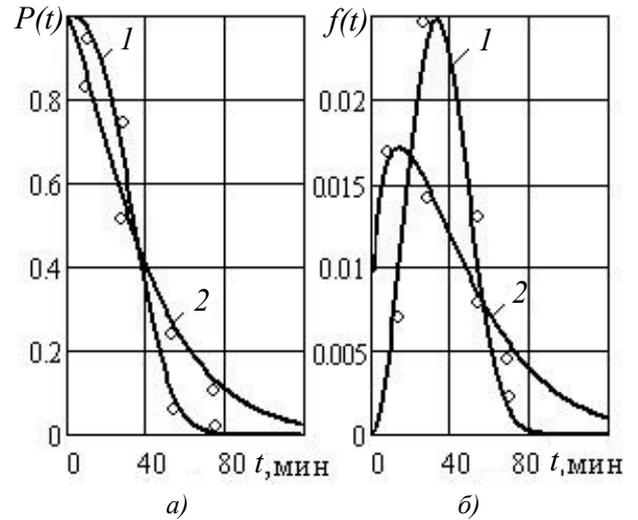


Рис. 1. Графики интегральной (а) и дифференциальной (б) функций распределения стойкости инструмента в различных условиях эксплуатации

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о значительном рассеивании стойкости инструмента в реальных производственных условиях.

В представляемой работе рассматривается пример однопараметрической оптимизации скорости резания при заданных значениях глубины резания и подачи по критерию минимальной себестоимости. В этом случае в качестве параметра оптимизации сначала определяется стойкость инструмента, а затем рассчитывается скорость резания.

В качестве критерия оптимизации K рассматривается переменная часть себестоимости, зависящая от режимов резания:

$$K = A(t_0 + t_c t_0 / T) + A' t_0 / T, \quad (2)$$

где t_0 – основное время обработки; t_c – время смены инструмента; A – стоимость станкоминуты; A' – стоимость инструмента, приведенная к одному периоду стойкости: $A' = C_n / KT$ (C_n – стоимость инструмента; K – количество периодов стойкости инструмента).

Целевая функция, выражающая зависимость критерия K от параметра оптимизации T , выражается следующим образом:

$$K(T) = C \left(T^m + (t_c + A'/A) T^{m-1} \right), \quad (3)$$

где $C = \pi D L t^{x_v} S^{y_v} / 1000 C_v K_v$ – постоянный коэффициент; D – диаметр обрабатываемой поверхности; L – длина обработки; C_v, K_v – коэффициенты; x_v, y_v, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины t_p , подачи S и стойкости T на скорость резания v .

Для учета закона распределения стойкости

инструмента при решении задачи оптимизации рассмотрим целевую функцию $K(T)$ как функцию случайного аргумента T . При известном законе распределения случайного аргумента T может быть определен и закон распределения целевой функции как функции случайного аргумента $K(t)$. Интегральная $G[K(t)]$ и дифференциальная $g[K(t)]$ функции распределения имеют вид [5]:

$$G[K(t)] = F(\varphi[K(t)]);$$

$$g[K(t)] = f(\varphi[K(t)])\varphi'[K(t)], \quad (4)$$

где $\varphi[K(t)]$ – функция, обратная $[K(t)]$ по аргументу t .

Для рассматриваемой целевой функции сложно получить аналитическое выражение ее распределения. Однако представляется возможным определить численные характеристики, а именно математическое ожидание функции случайного аргумента $M[K(t)]$, что является вполне достаточным для решения задачи оптимизации [5]:

$$M[K(t)] = \int_0^{\infty} K(t)f(t)dt. \quad (5)$$

Рассмотрим общее решение для определения параметров функции одного случайного аргумента [5]. Случайная величина Y есть нелинейная функция случайного аргумента X с математическим ожиданием M_x и дисперсией D_x : $Y = \varphi(X)$.

Разлагая функцию $y = \varphi(x)$ в ряд Тейлора в окрестности точки m_x (сохраняя в разложении первые три члена), имеем приближенно:

$$Y = \varphi(x) \approx \varphi(M_x) + \varphi'(M_x)(X - M_x) + \frac{1}{2}\varphi''(M_x)(X - M_x)^2. \quad (6)$$

Математическое ожидание M_y и дисперсия D_y величины Y определяются следующим образом:

$$M_y = \varphi(M_x) + \frac{1}{2}\varphi''(M_x)D_x; \quad (7)$$

$$D_y = [\varphi'(M_x)]^2 D_x + \frac{1}{2}[\varphi''(M_x)]^2 D_x^2.$$

С учетом выполненного анализа математическое ожидание M_K , дисперсия D_K и коэффициент вариации V_K целевой функции себестоимости $K(T)$ как функции случайного аргумента представляются как:

$$M_K = C(T^m + cT^{m-1}) + \frac{C}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} (T^m + cT^{m-1})(V_T T)^2, \quad (8)$$

$$D_K = [C(T^m + cT^{m-1})]^2 (V_T T)^2 + \left[\frac{C}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} (T^m + cT^{m-1})(V_T T)^2 \right]^2; \quad (9)$$

$$V_K = \sqrt{D_K} / M_K,$$

где параметр $c = t_c + A'/A$.

Закономерности изменения математического ожидания целевой функции $K(T)$ как функции случайного аргумента в зависимости от периода стойкости инструмента T целесообразно рассматривать на основании относительной функции $M_{oK} = M_K/K(T)$.

Графики двухпараметрических зависимостей математического ожидания целевой функции M_{oK} и коэффициента ее вариации V_K от периода стойкости инструмента T и коэффициента ее вариации V_T представлены на рис. 2.

График свидетельствует об экстремальном характере зависимости целевой функции себестоимости M_{oK} от параметра оптимизации (периода стойкости инструмента T).

Полученные зависимости подтверждают то, что математическое ожидание целевой функции M_K как функции случайного аргумента T отличается от значения целевой функции, рассчитанной по математическому ожиданию этого аргумента $\varphi(M_x) = \varphi(T)$. Количественно это отличие характеризуется величиной второго слагаемого в формуле (8), которое с достаточной степенью точности может служить оценкой погрешности приближенной аппроксимации случайных моделей детерминированными моделями. При этом изменяется не только величина целевой функции, но и оптимальное значение случайного аргумента.

Графики зависимости математического ожидания целевой функции M_K и ее доверительных интервалов (при 5 %-ном уровне значимости) от стойкости инструмента T (для ранее указанных результатов экспериментальных исследований) представлены на рис 3.

Без учета случайного характера стойкости инструмента (целевая функция $K(T)$) оптимальный период стойкости $T_o = 30$ мин (время смены инструмента $t_c = 5$ мин, отношение $A'/A = 2,5$).

С учетом коэффициента вариации стойкости инструмента ($V_{T1} = 0,4$; $V_{T2} = 0,85$) оптимальные периоды стойкости $T_{o1} = 34$ мин; $T_{o2} = 48$ мин.

С учетом случайного характера стойкости инструмента оптимальное значение периода стойкости T_o и целевая функция – себестоимость обработки M_{oK} , а также коэффициент ее

вариации V_K повышаются с увеличением коэффициента вариации V_T .

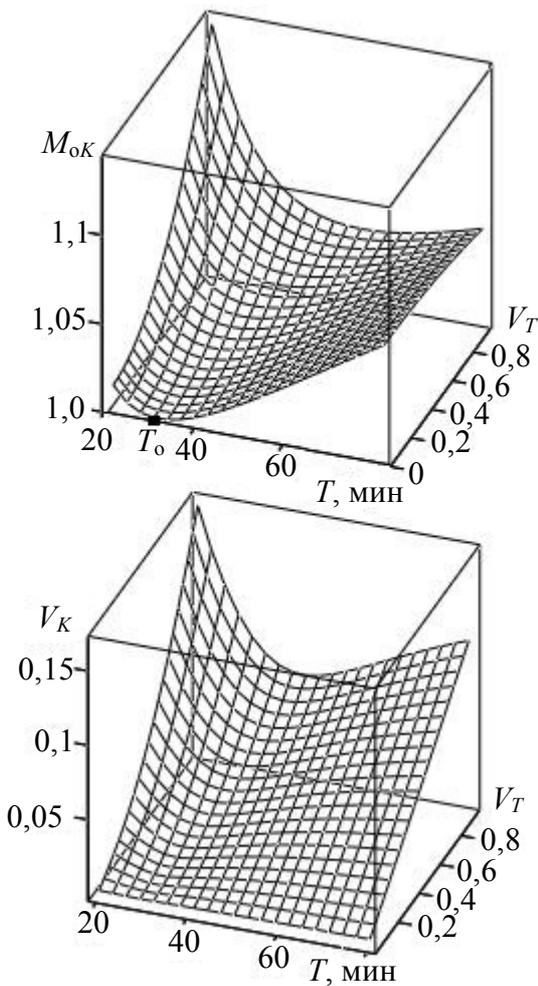


Рис. 2. Графики двухпараметрических зависимостей математического ожидания целевой функции $M_{ок}$ и коэффициента ее вариации V_K от периода стойкости инструмента T и коэффициента вариации V_T

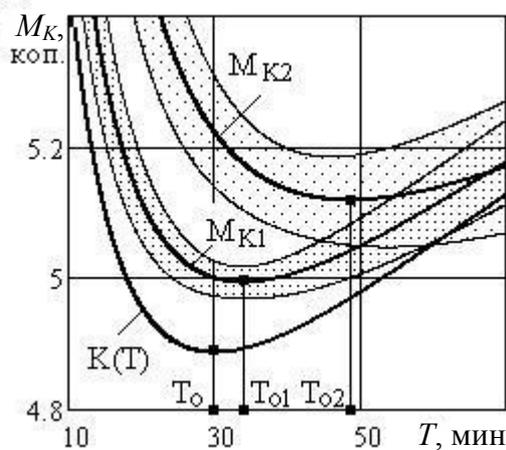


Рис. 3. Графики зависимости математического ожидания целевой функции M_K и ее доверительных интервалов от стойкости инструмента T

Для поиска оптимального значения периода

стойкости с учетом случайного характера критерия и параметра оптимизации численными методами решается дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial T} [T^m + cT^{m-1}] + \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{(V_T T)^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} (T^m + cT^{m-1}) \right] = 0. \quad (10)$$

Без учета случайного характера стойкости инструмента (коэффициент вариации $V_T = 0$) оптимальный период стойкости T_0 определяется известной зависимостью:

$$T_0 = (1/m - 1)(t_c + A'/A). \quad (11)$$

С увеличением коэффициента вариации оптимальный период стойкости T_0 увеличивается. Поправочный коэффициент на оптимальный период стойкости $\mu(V_T) = T_0(V_T)/T_0(0)$, может быть определен численными методами, исходя из решений для различных значений коэффициента вариации стойкости V_T следующего дифференциального уравнения:

$$1 - \frac{\frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{(V_T T)^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} (T^m + cT^{m-1}) \right]}{(1/m - 1)(t_c + A'/A)} = 0. \quad (12)$$

На рис. 4, а представлен график зависимости поправочного коэффициента $\mu(V_T)$ на оптимальный период стойкости T_0 от коэффициента ее вариации V_T .

Для оценки оптимального периода стойкости с учетом коэффициентов вариации V_T в расчетную формулу (11) вводится поправочный коэффициент $\mu(V_T)$, определяемый с использованием графика, представленного на рис. 4, а.

$$T_i(V_T) = \mu(V_T)(1/m - 1)(t_{\tilde{n}} + A'/A). \quad (13)$$

При значении коэффициента вариации $V = 0$ рассеивание отсутствует, коэффициент $\mu(V_T) = 1$, что соответствует детерминированной модели. При коэффициенте вариации $V < 0,3$ степень его влияния на оптимальный период стойкости весьма незначительна, что свидетельствует о возможности использования детерминированной модели и расчетной формулы (11) с погрешностью, не превышающей 7%.

Существенное влияние на оптимальный период стойкости коэффициент вариации имеет при $V_T > 0,4$. В этом случае возможная ошибка в оценке оптимального периода стойкости может достигать 80%, что свидетельствует о необходимости учета случайного характера критерия и параметра оптимизации.

Для приближенной оценки оптимального периода стойкости при $V_T > 0,3$ поправочный коэффициент $\mu(V_T)$ может быть аппроксимирован следующей зависимостью:

$$\mu_a(V_T) = e^{0,8(V_T-0,3)} \text{ при } V_T \geq 0,3. \quad (14)$$

График аппроксимированной зависимости $\mu_a(V_T)$, представленный на рис. 4, б в логарифмической шкале, достаточно хорошо (погрешность не превышает 7 %) совпадает с поправочным коэффициентом на оптимальный период стойкости $\mu(V_T)$ в диапазоне изменения коэффициента вариации $V_T > 0,3$.

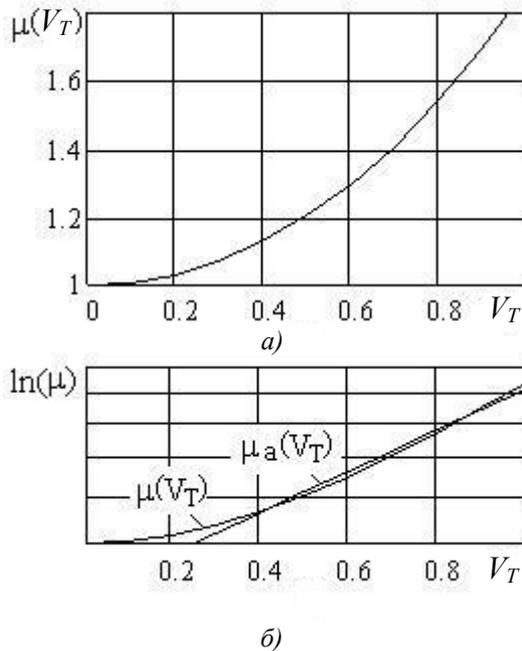


Рис. 4. Графики зависимостей теоретического $\mu(V_T)$ и аппроксимированного $\mu_a(V_T)$ поправочных коэффициентов на оптимальный период стойкости T_o от коэффициента вариации V_T

Оптимальная скорость резания v_o с учетом коэффициента вариации стойкости инструмента определяется по соответствующей оптимальной стойкости T_o :

$$v_o(V_T) = \frac{K_V(V_T) C_V K_V}{T_o^m S^{y_v} t_p^{x_p}}, \quad (15)$$

где $K_V(V_T) = \mu(V_T)^{-m}$ – поправочный коэффициент на оптимальную скорость резания, учитывающий коэффициент вариации стойкости инструмента: $K_V(0) = 1$; $K_V(0,4) = 0,97$; $K_V(0,8) = 0,92$; $K_V(1) = 0,88$.

Таким образом, представление критерия оптимизации как функции случайного аргумента дает возможность количественно оценить влияние рассеивания стойкости инстру-

мента, характеризуемой коэффициентом вариации V_T , на ее оптимальное значение и, соответственно, на оптимальную скорость резания.

Выводы

Разработана методика оптимизации режимов резания с учетом закона распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины. На основании анализа критерия оптимизации – себестоимости как функции случайного аргумента получены аналитические зависимости, позволяющие количественно учитывать рассеивание стойкости режущего инструмента при определении ее оптимального значения, а также оптимального уровня скорости резания.

Предлагаемый метод учета коэффициента вариации при решении задачи оптимизации повышает эффективность использования режущего инструмента в реальных условиях эксплуатации.

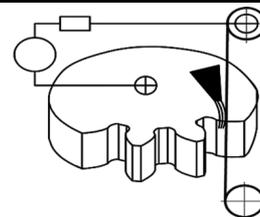
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
2. Ивченко, Т.Г. Определение оптимального уровня показателей качества режущего инструмента с учетом случайного характера критерия и параметров оптимизации // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – №27. – С. 97–104.
3. Ивченко, Т.Г. Прогнозирование параметров закона распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. – 2016. – №3(54). – С. 49–54.
4. Ивченко, Т.Г. Оптимизация режимов резания с учетом случайного характера стойкости режущего инструмента // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. – 2017. – №4(59). – С. 24–30.
5. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1979. – 576 с.

REFERENCES

1. Starkov, V.K. *Physics and Optimization of Metal Cutting*. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 640.
2. Ivchenko, T.G. Optimum level definition of cutter quality taking into account random character of criterion and optimization parameters // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems*. – Donetsk: DonNTU, 2004. – No.27. – pp. 97-104.
3. Ivchenko, T.G. Parameter prediction of law of cutter durability distribution as random value // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems*. – Donetsk: DonNTU, 2016. – No.3 (54). – pp. 49-54.
4. Ivchenko, T.G. Cutting mode optimization taking into account random character of cutter durability // *Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems*. – Donetsk: DonNTU, 2017. – No.4 (59). – pp. 24-30.
5. Wentzel, E.S. *Probability Theory*. – М.: Science, 1979. – pp. 576.

Рецензент д.т.н. А.М. Козлов



УДК [621.794+621.78]–034.14-022.532
DOI: 10.30987/article_5ad8d28fd2fb79.30041344

Л.П. Шестопалова, к.т.н.
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64)
E-mail: ntibr@mail.ru

Применение наукоёмких технологий для повышения эксплуатационных свойств легированных прецизионных деталей за счёт нитридов легирующих элементов

Рассмотрен наукоёмкий химико-термический процесс обработки в воздушно-аммиачной атмосфере, позволяющий получить на поверхности прецизионных деталей из легированных сталей износостойкий слой за счёт нитридов легирующих элементов. Приведены результаты распределения микротвёрдости по толщине слоя. Показано преимущество рассмотренного процесса по сравнению с традиционным азотированием.

Ключевые слова: прецизионные детали; легированная сталь; износостойкость; микротвёрдость; воздушно-аммиачная среда.

L.P. Shestopalova, Can. Eng.
(Moscow Auto-road State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow)

Science intensive technology application for performance attributes increase of alloy high-precision parts at expense of alloy element nitrides

A science intensive chemical-thermal processing in air-ammonia environment allowing the formation a wear-resistant layer on high-precision alloy steel parts surfaces at the expense of nitrides of alloy elements is considered. The results of micro-hardness distribution throughout a layer thickness are shown. The advantage of the process considered in comparison with common nitride hardening is shown.

Keywords: high-precision parts; alloy steel; wear-resistance; micro-hardness; air-ammonia environment.

Одной из серьёзных проблем современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей гидроаппаратуры различных установок, работающих в условиях износа и больших удельных нагрузок. Для этого необходимо получение на поверхности изделий упрочнённого слоя, обладающего высокой твердостью и износостойкостью. К числу распространённых способов решения данной задачи справедливо относят азотирование [1], способное сформировать на поверхности металлических изделий твердый и износостойкий слой.

Однако в процессе азотирования образу-

ющиеся как на поверхности, так и внутри зерен упрочняемого слоя нитриды железа вызывают изменение геометрических размеров изделия, что требует его последующего шлифования, а это приводит к ухудшению свойств поверхности. Формирование же поверхностного диффузионного слоя на стальных изделиях из легированных сталей только из нитридов легирующих элементов позволяет получить заданные свойства без изменения геометрических размеров изделий. В работе Ю.М. Лахтина [2] отмечено, что если количество поглощаемого азота увеличивается с повышением степени легирования при азотировании с предвари-

тельным окислением, а глубина азотирования уменьшается, то это приводит к увеличению объемной доли азота в растворе и, соответственно, к увеличению твердости.

Наибольшая эффективность азотирования в атмосфере, содержащей аммиак и воздух, достигается при разделении (сегрегации) этих двух атмосфер, т.е. сначала осуществляется подача воздуха с целью окисления, а затем азотирование в атмосфере аммиака [3]. При этом нагрев деталей до температуры насыщения проводят в инертной атмосфере с последующей подачей в печь воздуха для образования оксидной пленки и дальнейшей подачей аммиака, как носителя активного азота.

По существу в этом методе обработка деталей в воздушно-аммиачной среде проходит три стадии. На 1-м этапе изделие нагревают до температуры насыщения в инертной атмосфере, которая не допускает процесса насыщения поверхности изделия азотом из-за отсутствия активного азота. На 2-м этапе изделие выдерживают при той же температуре насыщения в воздушной атмосфере, в результате чего на его поверхности формируется зона оксидов железа, которая является энергетическим барьером, уменьшающим энергию активации азота, участвующего в процессе азотирования (рис. 1).

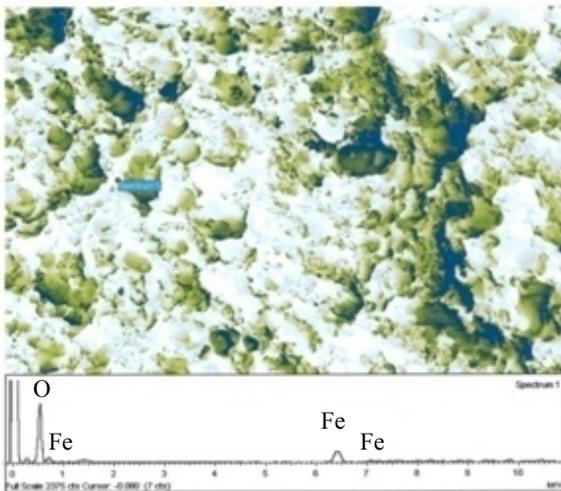


Рис. 1. Оксидная пленка на поверхности стали (сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-800, рентгеноспектральный анализатор INCA x-act)

На 3-м этапе изделие, не меняя температуры, выдерживают в атмосфере аммиака, формируя, таким образом, поверхностную упрочненную зону только на базе твердого раствора легирующего элемента и азота в матрице.

Предложенная технология была реализована

на в системе «металл – оксид – газовый полупроводник» (рис. 2). В качестве образца исследовались детали из легированной стали 30ХМВС.



Рис. 2. Система «металл – оксид – газовый полупроводник», в которой происходит формирование оксидного барьера

Рассмотрим возможность протекания процессов в данной системе при температуре изотермической выдержки предложенной технологии.

Известно [4], что свободные электроны с большой энергией значительно легче эмитируют из оксидов, чем с поверхности любых металлов. Следовательно, ионизация газа насыщающей атмосферы над оксидной пленкой будет протекать более интенсивно, и сопровождаться образованием ионов (в нашем случае отрицательных ионов азота и нейтральных молекул водорода и аммиака, в котором происходит насыщение поверхности).

Из-за эмиссии ионов из оксидной пленки изделия, вокруг него создаётся электрическое поле, ускоряющее движение образовавшихся ионов азота к поверхности изделия. Если толщина оксидной пленки достаточно мала (наноразмерна), то некоторые из ионов азота проникают через неё к поверхности стали, теряя при этом кинетическую энергию. Таким образом, оксидная плёнка с одной стороны служит источником потока электронов, ионизирующего газ насыщающей атмосферы, с другой – буферной зоной, поглощающей часть кинетической энергии ионов этой атмосферы.

Толщина оксидной пленки варьируется в зависимости от количества легирующих элементов в металле. Условием создания буферной зоны является именно выдержка изделий в атмосфере воздуха при изотермической температуре в течение времени, необходимого для получения пленки заданной толщины. В свою очередь определенная толщина полу-

чаемой буферной зоны позволяет регулировать потерю энергии активации ионов азота.

Исходя из такого понимания процесса упрочнения можно считать, что после прохождения оксидного слоя энергия активации ионов азота снизилась настолько, что ее хватило только на образование диффузионного слоя на базе твердого раствора дисперсных нитридов легирующего элемента и азота в твердом растворе α -железа, заполняющего все пустоты (известно, что энергия активации образования нитридов легирующих элементов значительно ниже, чем энергия активации всех нитридов железа [5]).

В процессе охлаждения нитриды легирующих элементов, находящиеся в растворе, коагулируют до наноразмерной величины, что приводит к искажению кристаллической решетки и, соответственно, изменению свойств по схеме дисперсионного твердения, т.е. твердость повышается (рис. 3).

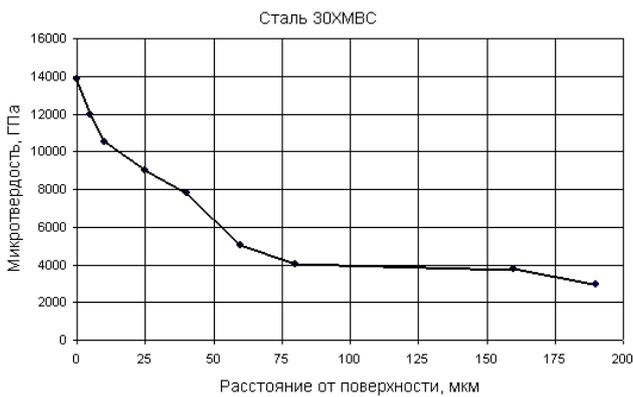


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине образца из стали 30ХМВС

Большой уровень упрочнения объясняется высокой объемной долей нитридов, так как исходная концентрация хрома в стали составляет 2,8...3,3 %, а ванадия – 0,6...0,85 %. Непосредственно вблизи поверхности микротвердость выше, чем на основной части зоны внутреннего азотирования. Это можно объяснить тем, что суммарный вклад упрочнения за счет повышения концентрации азота в легированном феррите и за счет дисперсных нитридов легирующих элементов подчиняется правилу аддитивности. При упрочнении стали предполагается аддитивность вклада упрочняющих механизмов в суммарный прирост твердости сплава.

Плавный переход распределения микротвердости (см. рис. 3) по глубине азотированного слоя говорит о равномерном снижении

объемной доли нитридных фаз легирующих элементов в слое и постепенном уменьшении концентрации растворенного азота в α -железе от поверхности вглубь слоя.

В результате получается дисперсно-упрочненный слой, состоящий из нитридов легированных элементов и растворенных ионов азота, занявших пустоты в матрице. Толщина упрочненного слоя зависит от времени выдержки изделий в атмосфере аммиака.

Полученный результат по изменению коэффициента трения в процессе износа образцов в качестве показателя их износостойкости и характеристики качества поверхности слоя изделий показан на рис. 4.

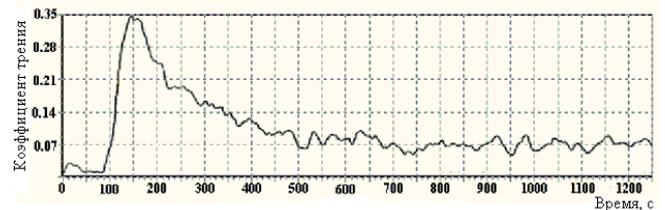


Рис. 4. Изменение коэффициента трения на поверхности упрочненной стали 30ХМВС

Как видно на рис. 4, упрочненный диффузионный слой, состоящий из нитридов легирующих элементов, обеспечивает незначительные изменения коэффициента трения в процессе износа и ровную поверхность упрочненного слоя. Незначительные изменения коэффициента трения (0,06...0,08) и скорости износа (0,004 мм³/мин) при изнашивании диффузионного слоя обусловлены наличием на поверхности оксидной пленки, способствующей лучшей прирабатываемости, снижающей склонность к схватыванию (холодной сварке) при контакте трущихся поверхностей деталей, а также зоны внутреннего азотирования из твердого раствора с нанодисперсными нитридами легирующих элементов и растворенного азота в Fe_α. Малая амплитуда колебаний коэффициента трения указывает на ровную поверхность, что предполагает сохранение геометрии поверхности.

Как видно из табл.1 эллипсность изделия практически не изменилась.

Таким образом, можно утверждать, что получен слой с достаточно высокой износостойкостью с сохранением первоначальных размеров образцов. Наличие нитридов легирующих элементов, как на поверхности пленки, так и под ней определено по величине импульсов на графиках, полученных с помощью электронного микроскопа Cameka MS-46.

1. Эллипсность деталей при различных технологиях азотирования

Технология азотирования	Температура азотирования, °С	Время азотирования, мин	Толщина упрочнённого слоя, мкм	Твёрдость, HV, ГПа	Эллипсность, мкм
Классическая	540	60	40...42	8,5...9,0	4,5...5,0
Азотирование через оксидный барьер	540	45	45...50	13,5...14,0	1,0...1,5

Распределение импульсов, полученных на поверхности оксидной пленки (рис. 5), свидетельствует о практическом отсутствии нитридов, т.к. кривая лежит почти на уровне фона.

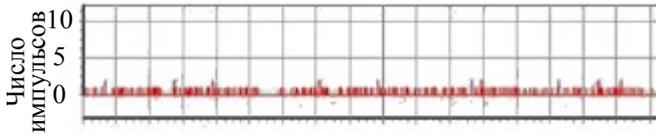


Рис. 5. Распределение нитридов на поверхности оксидной пленки

Наличие нитридов на поверхности в зоне упрочнения определяли, предварительно сняв оксидную пленку, которая имеет характерный черный цвет (рис. 6). По интенсивности кривой распределения нитридов на поверхности в упрочненном слое (рис. 7) можно утверждать о достаточно высокой степени их наличия.

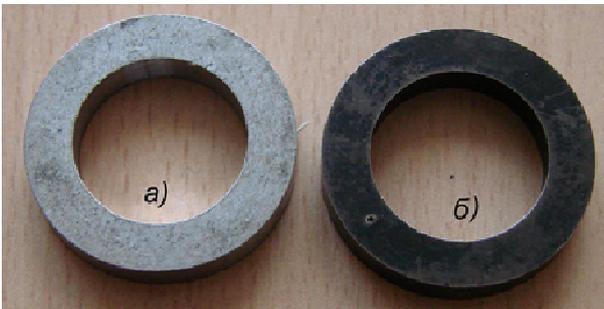


Рис. 6. Вид рабочей поверхности: а – в исходном состоянии; б – после поверхностного упрочнения

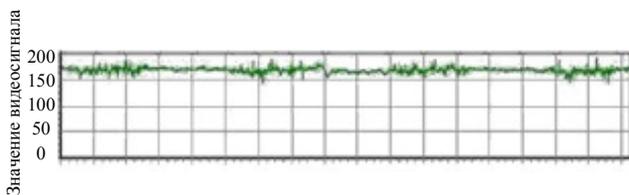


Рис. 7. Распределение нитридов под оксидной пленкой

Рентгеноструктурный анализ (РСА), проведенный под оксидной пленкой, не показал наличия оксидов, на дифрактограмме наблюдается пик альфа Fe_α (рис. 8.), однако наблюдается уширение дифрактограммы, что свидетельствует об изменении периода кристалли-

ческой решетки исследуемого образца за счет повышения легированности твердого раствора и образования нитридов легирующих элементов по схеме дисперсионного твердения, а также азотистого феррита [5].

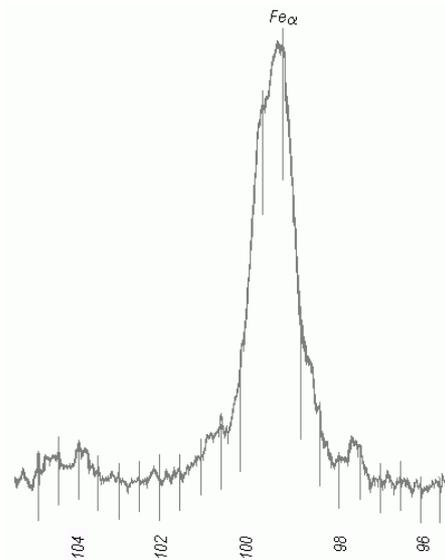


Рис. 8. Дифрактограмма с поверхности азотированного слоя стали 30ХМВС под оксидной пленкой ($t_{аз} = 540\text{ °C}$; $\tau_{аз} = 45\text{ мин}$)

Образовавшиеся мелкодисперсные нитриды сложно обнаруживаются электронно-микроскопическими методами и рентгеном [6], поэтому, чтобы засвидетельствовать наличие нескольких нитридных фаз были сделаны по методу Кирлиана электрография азотированного слоя по глубине (рис. 9) и послойные электрографии поверхности азотированного слоя под оксидной пленкой на глубине 5 и 15 мкм (рис. 10).

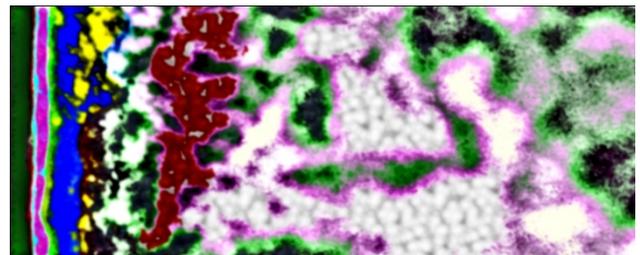
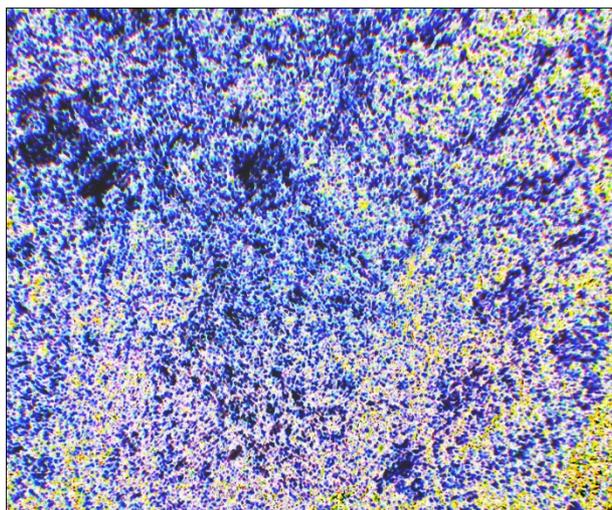


Рис. 9. Электрография стали 30ХМВС по глубине азотированного слоя, $\times 1000$

Электрографический метод исследования основан на анализе плазменного свечения электрических разрядов на поверхности предметов, помещённых в переменное электрическое поле высокой частоты, в результате между электродом и исследуемым объектом возникает поверхностное напряжение 5...30 кВ.



а)



б)

Рис. 10. Электрографии поверхности стали 30ХМВС на глубине 5 мкм (а) и 15 мкм (б)

С помощью интерпретации изображения специфического свечения образца, помещённого в электрическое поле высокой частоты, можно проанализировать структурные и фазовые изменения в металлах на основе различий в излучающей способности элементов, входящих в состав конкретных сплавов. Так как каждый из элементов, содержащихся в исследуемых образцах, имеет индивидуальный спектр излучения, на фотографии получается сочетание цветов, которое указывает на наличие тех или иных элементов, фаз или структурных составляющих. Такой метод позволяет исследовать структурные и фазовые измене-

ния упрочнённых зон.

На рис. 9 наблюдается неравномерная по тональности структура (на цветной фотографии она представлена пестрой цветовой гаммой, каждый из цветов соответствует определенной структурной составляющей).

В соответствии с изменением неравномерной черно-белой тональности (рис. 9) происходит изменение фазового состава по глубине азотированного слоя. Учитывая химический состав стали и термодинамическую активность легирующих элементов по отношению к азоту, можно предположить, что в твердом растворе α -железа находятся: нитрид хрома CrN в большей степени, а также VN, MoN. Как видно на рис. 9, в диффузионном слое по глубине наблюдается определенная слоистость, что дает возможность предположить о последовательном образовании нитридов легирующих элементов в зависимости от их термодинамической активности.

Послойные электрографии поверхности на глубине 5 и 15 мкм (см. рис. 10) отличаются по тональности черно-белой гаммы цвета, по характеру и величине структурных составляющих (в цветном варианте структурные составляющие резко отличаются по цвету), что подтверждает изменение структурного и фазового состава. Однако надо отметить, что в послойных электрографиях, как на глубине 5 мкм, так и на глубине 15 мкм наблюдается практически полная цветовая палитра в разном процентном соотношении, что дает возможность предположить о смешении различных фаз.

При азотировании такие технологические факторы как температура, время и атмосфера насыщения оказывают существенное влияние на поверхностную твердость и микротвердость. Выявленные за последние годы структурные закономерности образования диффузионных покрытий дают возможность объяснить природу упрочнения азотированного слоя.

Как уже отмечалось, проведение азотирования с предварительным оксидированием для получения тонкой оксидной пленки позволяет регулировать строение диффузионного слоя, что нашло свое отражение и в изменении микротвердости упрочнённого слоя.

Относительно механизма упрочнения существуют различные взгляды. Одни авторы [6 – 9] придерживаются мнения, что причиной возрастания твердости азотированного слоя является блокирование плоскостей скольжения высокодисперсными нитридами. Другие

авторы [7] находят объяснение высокой твердости слоя в сильном упругом и неупругом искажении кристаллической решетки.

Авторы работы [9] на основе анализа уширения интерференционных максимумов α -фазы показали непропорциональность в изменении ширины линий от плоскости (200) и (211) α -фазы. Увеличение уширения линии от плоскости (200) было значительно больше, чем от плоскости (211).

Такой характер изменений в уширении интерференционных максимумов, очевидно, можно объяснить тем, что при азотировании формируется сильно фрагментированная субструктура, которая оказывает значительно большее влияние на уширение дифракционных линий с малыми углами отражения (плоскости с малыми кристаллографическими индексами).

Во время изотермической выдержки развиваются диффузионные процессы и, по мере насыщения стали азотом, возрастают внутренние напряжения, связанные с изменением параметра решетки α -фазы, что в наибольшей мере отражается на уширении дифракционных линий с большими углами отражения (плоскости с большими кристаллографическими индексами). Однако по достижении предела растворимости создаются условия для образования нитридных фаз. Выделение нитридных фаз должно приводить к некоторому уменьшению внутренних напряжений и, соответственно, уменьшению уширения интерференционных максимумов. Таким образом, упрочнение сталей может быть связано как с формированием блочной структуры, с искажениями кристаллической решетки, так и с образованием высокодисперсных нитридных фаз.

Упрочнение азотированного слоя, связанное с дополнительным легированием твердого раствора азотом и с выделением высокодисперсных частиц нитридов легирующих элементов, которые представляют собой полностью когерентные с α -матрицей зоны выделения, сопровождается повышением микротвердости азотированного слоя по сравнению с неазотированными (как отожженными, так и деформированными) образцами (рис. 11).

Выводы

1. В результате процесса в воздушно-аммиачной среде на упрочняемой поверхности формируется модифицированный дисперсно-упрочненный слой, состоящий из нитридов легированных элементов и растворенных ионов азота, занимающих все пустоты.

2. Возможно получение упрочненного слоя необходимой толщины за счет регулирования временем выдержки изделий в атмосфере аммиака, что очень важно для прецизионных деталей.

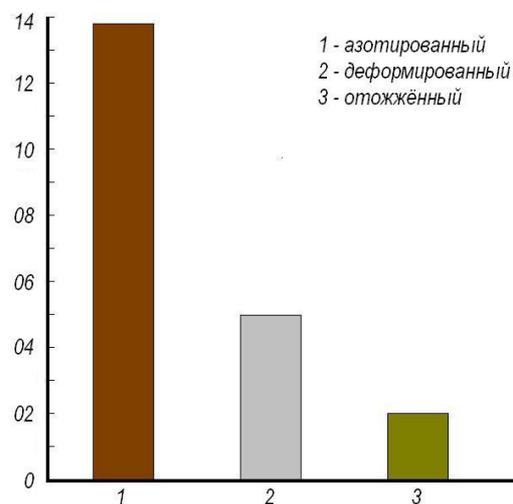


Рис. 11. Сравнение микротвердости упрочнённого слоя стали 30XMB после азотирования ($t_{аз} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_{аз} = 45 \text{ мин}$) с микротвердостью неазотированных образцов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лахтин, Ю.М., Коган, Я.Д. Азотирование стали. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
2. Лахтин, Ю.М. Оксизазотирование (нитрооксизазотирование) // МиТОМ. – 1994. – №9. – С. 2–5.
3. Шестопалова, Л.П. Закономерности взаимодействия контролируемых окислительных атмосфер с металлами и сплавами и их влияние на формирование модифицированного слоя при азотировании // МиТОМ. – 2010. – №5. – С. 46 – 52.
4. Мирдель Г. Электрофизика / перевод с нем. под ред. В.И. Раховского. – М.: Мир, 1972, – 608 с.
5. Самсонов, Г.В., Виницкий, И.М. Тугоплавкие соединения: справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 556 с.
6. Лахтин, Ю.М., Коган, Я.Д. Структура и прочность азотированных сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 160 с.
7. Яхнина, В.Д., Никитин, В.В. Формирование твердости азотированного слоя // Металлургия и термическая обработка металлов. – 1975. – №2. – С. 28–32.
8. Edenhafer B. Einfluss der Nitrierdauern und der Stahlrussammensetzung auf die Hexte von Nitrierschichten / B. Edenhafer, H. Trenkler. // Harter.- Nechnish. Mitt., 1980, v. 35, №5. pp. 220-229.
9. Косолапов, Г.Ф., Герасимов, С.А. О структуре α -фазы азотированного слоя сталей 38XМЮА и 1X13 // Металлургия и термическая обработка металлов. – 1973. – №5. – С. 71–72.
10. Шестопалова, Л.П., Петрова, Л.Г. Повышение

служебных характеристик хромистых сталей после оксидирования в контролируемой атмосфере // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №9(27). – С. 3–11.

REFERENCES

1. Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D. *Steel Nitride Hardening*. – M.: Mechanical Engineering, 1976. – pp. 256.
2. Lakhtin, Yu.M. *Oxy-nitride Hardening (Nitrooxynitride Hardening)* // MiTOM. – 1994. – No.9. – pp. 2-5.
3. Shestopalova, L.P. Regularities in *Interaction of Controlled Oxidative Media with Metals and Alloys and Their Impact upon Formation of Modified Layer at Nitride Hardening* // MiTOM. – 2010. – No.5. – pp-52.
4. Mirdel, G. *Electro-physics* / transl. from German. Under the editorship of V.I. Rakhovsky. – M.: Mir, 1972. – pp. 608.
5. Samsonov, G.V., Vinitsky, I.M. *Refractory Compounds: reference book*. – M.: Metallurgy, 1976 – pp. 556.

6. Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D. *Structure and Strength of Nitrided Alloys*. – M.: Metallurgy, 1982. – pp. 160.

7. Yakhmina, V.D., Nikitin, V.V. Hardness formation in nitrided layer // *Metallurgy and Thermal Treatment of Metals*. – 1975. – No.2. – pp. 28-32.

8. Edenhafer B. Einfluss der Nitrierdauern und der Stahlrussammensetzung auf die Hexte von Nitrierschichten / B. Edenhafer, H. Trenkler. // *Harter.- Nechnish. Mitt.*, 1980, v. 35, №5. pp. 220-229.

9. Kosolapov, G.F., Gerasimov, S.A. On structure of α -phase of nitride layer of steel 38HMYuA and 1H13 // *Metallurgy and Thermal Treatment of Metals*. – 1973. – No.5 – pp. 71-72.

10. Shestopalova, L.P., Petrova, L.G. Exceeding operational characteristic of chromium steels after oxynitride hardening in controlled medium // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – No.9(27). – pp. 3-11.

Рецензент д.т.н. Н.И. Баурова

УДК 621.9.047

DOI: 10.30987/article_5ad8d290122ee0.34615800

Н.П. Гаар, к.т.н.

(Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20)

E-mail: gaar@corp.nstu.ru

Лазерно-электрохимическая обработка безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия

Представлены результаты по лазерно-электрохимической обработке безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия при использовании лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. Установлено, что наложение лазерного излучения в зону обработки при электрохимическом растворении материала позволяет активировать процесс анодного растворения до 6 раз. Наибольшее значение плотности тока при анодном растворении безвольфрамового твердого сплава КНТ16 достигается при лазерной активации электрохимического растворения с использованием длины волны лазерного излучения 1,06 мкм с частотой следования импульсов 2,5 кГц.

Ключевые слова: безвольфрамовый твердый сплав; электрохимическое растворение; лазерно-электрохимическая обработка; хлорид натрия.

N.P. Gaar, Can. Eng.

(Novosibirsk State Technical University 20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073 Russia)

Laser electro-chemical treatment tungsten free hard alloy KNT16 in 10% aqueous solution of sodium chloride

The results on laser electro-chemical treatment of tungsten free hard alloy KNT16 in 16% aqueous solution of sodium chloride at the use of laser emission with the wave length 1.06 mkm at different values of the frequency of pulse sequence in the range of potentials from 0 to 5V are presented. The investigations were carried out with the use of polarization methods: a potentiostatic method and potentiodynamic one on the special developed plant in the electro-chemical cell with the platinum electrode of comparison. It is defined that the application of laser emission for process activation of the electro-chemical dissolution of tungsten free hard alloy in aqueous solution of sodium chloride results in current density increase up to 6 times. The impact of pulse sequence frequency upon electro-chemical alloy dissolution at the process activation with the length of 1.06 mkm is emphasized.

The highest value of current density is achieved at the frequency of pulse sequence 2.5kHz.

Keywords: tungsten free hard alloy; electro-chemical dissolution; laser-electrochemical treatment; sodium chloride.

Безвольфрамовые твердые сплавы появились как альтернатива существующим твердым сплавам на основе карбида вольфрама. Необходимость появления такой разновидности твердого сплава была обусловлена экономией стратегически важного элемента – вольфрама. В данный момент они используются в производстве, как для изготовления режущего инструмента, так и для изготовления износостойких деталей в России и за рубежом.

Сплав КНТ16 является одним из представителей безвольфрамовых твердых сплавов, в химический состав которого входит карбонитрид титана (74 %), никель (19,5 %), молибден (6,5 %) [1]. Данный сплав плохо поддается традиционной лезвийной и абразивной обработке, по этой причине для изготовления изделий из такого рода материалов ведутся работы по использованию электрофизических методов формообразования, например, электроалмазного шлифования [2]. Одним из электрофизических методов обработки, доказывающих свою эффективность для изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов, является лазерно-электрохимическая обработка (ЛЭХРО) [3–5].

Предварительные исследования по ЛЭХРО сплава КНТ16 в водном растворе нитрата натрия показали свою результативность (скорость электрохимического растворения повысилась в 5 раз (при использовании длины волны 0,53 мкм) по сравнению с электрохимическим растворением без наложения излучения [6]). Тем не менее, на данный момент нет литературных сведений по ЛЭХРО безвольфрамового сплава КНТ16 в других составах электролита, например, в хлориде натрия, который часто используется при электрохимической обработке твердых сплавов с высоким содержанием никеля в химическом составе. Данный состав электролита отвечает предъявляемым к ним требованиям для ЛЭХРО, описанным в работе [7].

Методика экспериментального исследования. Традиционно при изучении характера анодного растворения материала, на котором основана электрохимическая обработка, используют поляризационные исследования – потенциодинамические и потенциостатические. Потенциодинамические исследования позволяют выявить как области активного растворения, когда с ростом потенциала происходит увеличение плотности тока, так и области пассивного растворения, где рост потенциала сопровождается снижением плотнос-

ти тока или остается на прежнем уровне.

Потенциостатические исследования позволяют уточнить характер растворения материала при использовании конкретного значения потенциала, который может быть некорректно определен за счет инертности процессов электрохимического растворения при постоянной развертке потенциала.

Для проведения данных исследований используется электрохимическая ячейка с тремя электродами: катодом, анодом (образцом исследуемого материала) и электродом сравнения; потенциостат-гальваностат, при помощи которого производится задача потенциала и осуществляется регистрация установившегося значения тока. Определение эффективности наложения лазерного излучения в зону обработки производилось также при помощи поляризационных исследований.

Соблюдение идентичности результатов экспериментов обеспечивалось использованием специально разработанной установки [8] для всех видов активации электрохимического растворения, в состав которой входит специальная электрохимическая ячейка с платиновым электродом сравнения, подробно описанная в работе [9]. Данная установка была успешно использована и для исследования активации процесса электрохимического растворения материала в другом составе электролита [6].

В качестве прибора, задающего развертку потенциала и регистрирующего установившееся значение тока в данной установке, использовался потенциостат IPC-Pro-M. Развертка потенциала при исследовании потенциодинамическим методом осуществлялась от 0 до 5 В со скоростью 0,2 В/с. При исследовании потенциостатическим методом время выдержки определенного потенциала на электродах составляло 30 с.

Выбор длины волны лазерного излучения равной 1,06 мкм для активации процесса электрохимического растворения сплава КНТ16 обоснован эффективностью ЛЭХРО других материалов [4, 6]. Значение частот следования импульсов 2; 2,5; 5; 10 кГц также было выбрано на основании предварительных исследований по ЛЭХРО в данном электролите [5]. Среднее значение плотности мощности лазерного излучения, используемого при проведении исследований – $1,06 \cdot 10^6$ Вт/м² было установлено из математического моделирования процесса с учетом теплофизических свойств электролита и материала, представленного в работе [11], с учетом ограничений, связанных с нагревом электролита. Морфология поверх-

ности образцов после лазерно-электрохимической обработки оценивалась при помощи растровой электронной микроскопии на микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Результаты и обсуждение. Полученные при помощи потенциодинамического метода поляризационные кривые без наложения лазерного излучения в стационарных условиях, с использованием электролита с повышенной температурой и с наложением лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм для безвольфрамового твердого сплава КНТ16 представлены на рис. 1.

Анализ поляризационной кривой, полученной потенциодинамическим методом в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия без наложения лазерного излучения (кривая 1, рис. 1), указывает на тот факт, что в диапазоне потенциалов от 0 до 1,7 В значение плотности тока равно нулю, а следовательно, процесс электрохимического растворения отсутствует. Это подтверждают и результаты потенциостатического исследования для потенциала 0,8 В (кривая 1, рис. 2), указывающие на падение плотности тока с течением времени. В диапазоне потенциалов свыше 1,7 В наблюдается рост плотности тока с увеличением потенциала до 133 мА/мм² (при потенциале 5 В). Данное увеличение плотности тока может быть связано с началом восстановления анионов хлора (потенциал восстановления хлора ~ 1,36 В), которые вступают в реакцию с никелем, входящим в состав связки данного материала, и тем самым активизирует его.

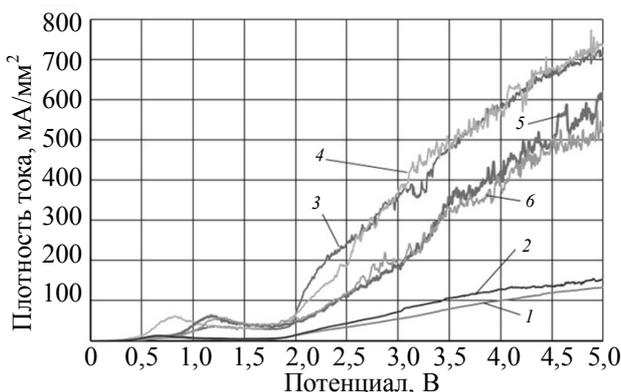


Рис. 1. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциодинамического метода для твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия:

1 – без наложения излучения; 2 – без наложения излучения с температурой электролита 40 °С; 3, 4, 5, 6 – при ЛЭХРО с $\lambda = 1,06$ мкм с частотой следования импульсов: 3...2 кГц; 4...2,5 кГц; 5...5,5 кГц; 6...10 кГц соответственно

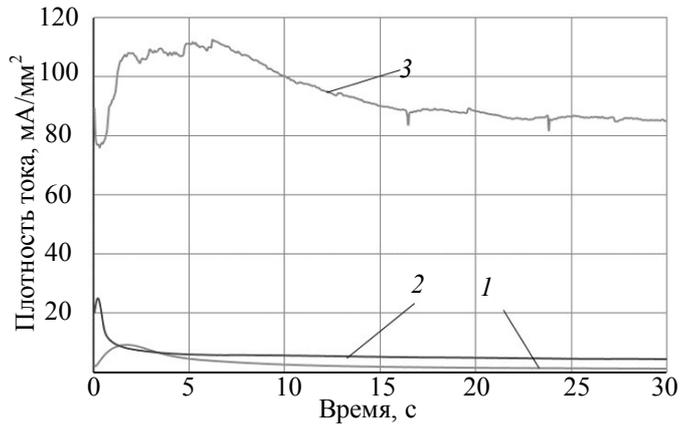


Рис. 2. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциостатического метода для твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия для потенциалов:
1 – 0,8 В; 2 – 1,8 В; 3 – 4,0 В

Характер потенциостатической кривой для потенциала 1,8 В (кривая 2, рис. 2) подтверждает начало процесса электрохимического растворения, так плотность тока с течением времени остается практически одной и той же. Характер потенциостатической поляризационной кривой для потенциала 4 В также указывает на процесс анодного растворения. Осцилляции значения плотности тока связаны с процессами активного роста и образования пузырьков газа на образце, что подтверждается визуальным наблюдением за процессом обработки.

Изменение концентрации соли в составе электролита с 10 до 20 % не привели к существенному изменению характера анодного поведения или сдвигу участков потенциалов активного и пассивного растворения.

Увеличение температуры электролита (кривая 2, рис. 1) до 40 °С существенно не изменяет характер анодного растворения материала. Как и в предыдущем случае наблюдается два характерных участка от 0 до 1,7 В – пассивации и свыше 1,7 В – активного растворения материала, что подтверждается потенциостатическими исследованиями в указанных диапазонах потенциалов. Значение плотности тока повысилось незначительно с 133 до 149 мА/мм² (при $\phi = 5$ В). Увеличение температуры электролита свыше 40 °С до 70 °С ни привели ни к изменению характера анодного растворения материала, ни к значительному увеличению плотности тока.

Использование лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм привело к активации процесса электрохимического растворения. На этот факт указывает повышение достигаемых значений плотности тока примерно в 6 раз с

133 мА/мм² (кривая 1, рис. 1) до 750 мА/мм² для $f = 2,5$ кГц при $\varphi = 5$ В (кривая 4, рис. 1).

Следует отметить, что потенциал начала процесса электрохимического растворения сдвинулся в область меньших значений с 1,7 В до 0,25 В для всех используемых частот следования импульсов (кривые 3 – 6, рис. 1). Анализ поляризационных кривых, полученных при помощи потенциостатического метода (рис. 3), подтверждает анодное растворение материала в указанном диапазоне потенциалов, о чем свидетельствуют постоянство плотности тока с течением времени. Осцилляции значений плотности тока при потенциалах 3 и 5 В (кривые 3 и 4, рис. 3, соответственно), как и в случае с электрохимическим растворением без наложения лазерного излучения (кривая 3, рис. 2), объясняются процессами образования и срывания пузырьков газа на образце.

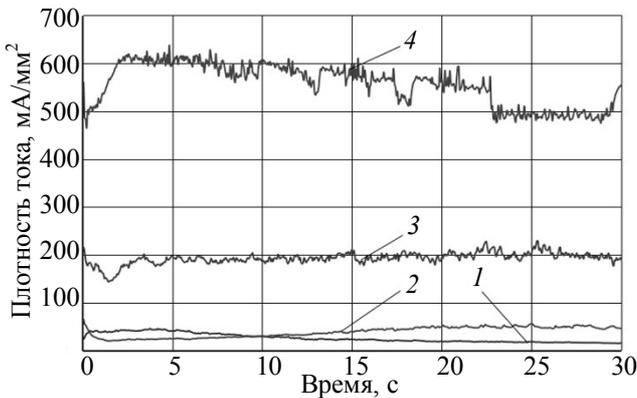


Рис. 3. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциостатического метода для твердого сплава КНТ16 в 10 % водном растворе хлорида натрия при ЛЭХРО с $\lambda = 1,06$ мкм, $f = 2,5$ кГц для потенциалов:

1 – 1,0 В; 2 – 1,5 В; 3 – 3,0 В; 4 – 5,0 В

Анализ поляризационных кривых, полученных при активации процесса электрохимического растворения с разными частотами следования импульсов, указывает на тот факт, что наибольший эффект достигается при использовании частоты следования импульсов 2,5...2 кГц. Повышение значения частоты следования импульса с 2 кГц до 10 кГц приводит к снижению достигаемых значений плотности тока с 750 мА/мм² (для $f = 2$ кГц) до 600...550 мА/мм² (для $f = 5$ кГц и $f = 10$ кГц, соответственно).

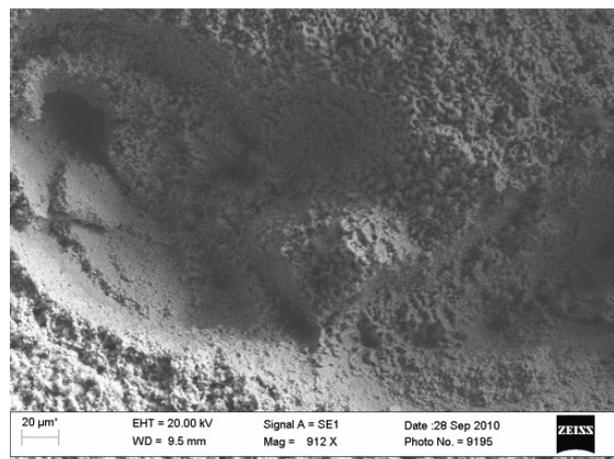
Анализ морфологии поверхности образца после активации электрохимического растворения лазерным излучением, представленной на рис. 4, а, указывает на наличие на поверх-

ности характерного углубления. Подобные углубления в месте наложения лазерного излучения наблюдались и для других материалов при активации электрохимического растворения [4, 6]. Это подтверждает предположение о локальном характере активации процесса электрохимического растворения материала.

Следует отметить, что форма углубления (рис. 4, а) схожа с формой пучка лазерного излучения, полученного при прожиге сажи на кварцевом стекле (рис. 5). Это позволяет предположить, что одним из дальнейших направлений развития ЛЭХРО может быть получение отверстий различной конфигурации при использовании пучков различной формы. Неоднородность углубления по глубине (рис. 4, б), вероятнее всего, связана с распределением интенсивности лазерного излучения внутри пучка.



а)



б)

Рис. 4. Морфология поверхности безвольфрамового твердого сплава КНТ16 после ЭХРО при $\lambda = 1,06$ мкм в 10%-ном водном растворе хлорида натрия:

а – общий вид образца; б – морфология поверхности в месте наложения лазерного излучения

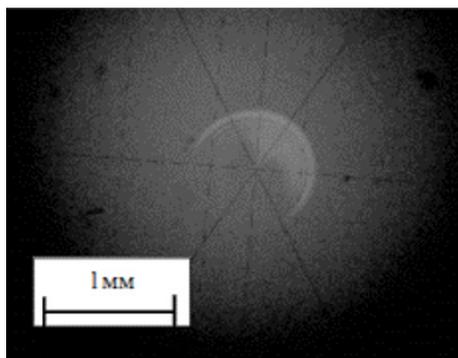


Рис. 5. Внешний вид пучка лазерного излучения, полученный при помощи прожига сажи на кварцевом стекле при использовании лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм

Заключение

Использование лазерного излучения для активации электрохимического растворения безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в водном растворе хлорида натрия является эффективным, так как значение плотности тока возросло в шесть раз по сравнению с традиционной электрохимической обработкой материала. При этом использование длины волны $\lambda = 1,06$ мкм с частотой следования импульсов $f = 2,5$ кГц оказалось наиболее перспективным. Наличие характерного углубления на поверхности образца материала после ЛЭХРО, схожего по своей форме с формой пучка используемого лазерного излучения, позволяет говорить о локальности активации процесса растворения материала и о перспективности использования различной конфигурации пучка для изготовления поверхностей различной формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 26530-85. Сплавы твердые спеченные безвольфрамовые. Введен 01.01.86. – М.: Издательство стандартов, 1985 г. – 8 с.
- Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Янпольский, В.В., Красильников, Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты.* – 2010. – № 3(48). – С. 3–7.
- Пат. Р. Ф. № 2451582. 2010. Рахимьянов, Х.М., Журавлев, А.И., Гаар, Н.П., Локтионов, А.А. Способ размерной обработки металлов и сплавов: Заявл. 07.07.2010 № 2010128204/02. Опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15. 11 с.
- Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П., Журавлев, А.И., Локтионов, А.А. Особенности активации анодного растворения при лазерно-электрохимической обработке нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10% водном растворе хлорида натрия // *Механика XXI века.* – 2015. – № 14. – С. 116–119.

рида натрия // *Механика XXI века.* – 2015. – № 14. – С. 116–119.

5. Rakhimyanov K.M. Role of laser radiation in activating anodic dissolution under electrochemical machining of metals and alloys / K. M. Rakhimyanov, N. P. Gaar, A. A. Loktionov // *MATEC Web of Confer-ences.* - 2017. - Vol.129. - Art. 01070 (4 p.). - DOI: 10.1051/mateconf/201712901070.

6. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П., Локтионов, А.А. Особенности активации анодного растворения при лазерно-электрохимической обработке безвольфрамового твердого сплава КНТ-16 в 10%-ном водном растворе нитрата натрия // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2016. – № 11 (65). – С. 37–43.

7. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Гаар, Н.П., Журавлев, А.И., Локтионов, А.А. Методика выбора электролита для лазерно-электрохимической обработки // *Обработка металлов: (технология, оборудование, инструменты).* – 2012. – № 2(55). – С. 18–21.

8. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Гаар, Н.П., Журавлев, А.И., Локтионов, А.А. Установка для исследования материалов в условиях лазерно-электрохимической обработки комбинированным излучением // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты.* – 2012. – № 3 (56). – С. 30–32.

9. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением // *Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: Тр. 1-й всерос. науч.-техн. конф.* – Кемерово: КузГТУ, 2007. – С. 251–254.

10. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П. Математическое моделирование при лазерной термоактивации электрохимической размерной обработке // В книге: *Современные технологические системы в машиностроении. Тезисы докладов.* – Барнаул, 2006. – С. 45–47.

REFERENCES

- SSR 26530-85. *Tungsten Free Hard Sintered Alloys. Introduced 01.01.86.* – М.: Publishing House of Standards, 1985. – pp. 8.
- Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Yanpolsky, V.V., Krasilnikov, D.B. Electro-chemical treatment of tungsten free hard alloys // *Metal treatment: Technology, Equipment, Tools.* – 2010. – No.3(48). – pp. 3-7.
- Pat. RF. No.2451582. 2010. Rakhimyanov, Kh.M., Zhuravlyov, A.I., Gaar, N.P., Loktionov, A.A. *Method for Dimension Treatment of Metals and Alloys:* Applied 07.07.2010 No.2010128204/02. Published 27.05.2012, Bull. No.15. pp. 11.
- Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P., Zhuravlev, A.I., Loktionov, A.A. Peculiarities in anode dissolution activation at laser electro-chemical treatment of stainless steel 12H18N9T in 10% aqueous solution of sodium chloride // *Mechanics to XXI-th Century.* – 2015. – No.14. – pp. 116-119.
- Rakhimyanov K.M. Role of laser radiation in activating anodic dissolution under electrochemical machining of metals and alloys / K. M. Rakhimyanov, N. P. Gaar, A. A. Loktionov // *MATEC Web of Confer-ences.* - 2017. - Vol.129. - Art. 01070 (4 p.). - DOI: 10.1051/mateconf/201712901070.
- Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P., Loktionov, A.A. Peculiarities in anode dissolution activation at laser electro-

chemical treatment of tungsten free hard alloy KNT-16 in 16% aqueous solution of sodium chloride // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.(65). – pp. 37-43.

7. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Gaar, N.P., Zhyravlyov, A.I., Loktionov, A.A. Procedure of electrolyte choice for laser electro-chemical treatment // *Metal Treatment (Technology, Equipment, Tools)*. – 2012. No.2(55). – pp. 18-21.

8. Rakhimyanov, Kh.,M., Krasilnikov, B.A., Gaar, N.P., Zhuravlyov, A.I., Loktionov, A.A. Plant for material research under conditions of laser electro-chemical treatment with com-

bined emission // *Metal Treatment: Technology, Equipment, Tools*. – 2012. – No.3(56). – pp. 30-32.

9. Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P., Electro-chemical cell for research of ECRT with laser emission // *Current Ways for Development of Mechanical Engineering and Motor Transport of Kuzbass: Proceedings of the 1-st All-Russian Scientific. Tech. Conf.* – Kemerovo: KuzSTU, 2007. – pp. 251-254.

10. Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P. Mathematical modeling at laser thermo-activation of electro-chemical dimension treatment // *Current Technological Systems in Mechanical Engineering. Proceedings*. – Barnaul, 2006. – pp. 45-47.

Рецензент д.т.н. В.Г. Буров

УДК 621.794.6

DOI: 10.30987/article_5ad8d290551210.41386001

М.Л. Скрябин, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», 610017, г. Киров, ул. Октябрьский проспект, 133)

E-mail: max.dvs@mail.ru

Получение стойких оксидных пленок на поверхности поршневых алюминиевых сплавов при микродуговом оксидировании

Рассмотрено получение тонких оксидных пленок на поршневых алюминиевых сплавах методом микродугового оксидирования. Описан механизм формирования кристаллических включений и высокотемпературных структур в зависимости от плотности ионного тока во времени. Описан и проанализирован один из методов поверхностного упрочнения поршневых алюминиевых сплавов – микродуговое оксидирование. Рассмотрены механизмы формирования оксидных слоев с учетом влияния легирующих элементов поршневых алюминиевых сплавов. Проведен анализ пористых чешек, исследованы основные свойства покрытий.

Ключевые слова: поршневые сплавы; микродуговое оксидирование; пленочные покрытия; пористость.

M.L. Skryabin, Can. Eng.

(FSBEI HE "Vyatka State Agricultural Academy", 133, Ochyabrsky Avenue, Kirov, 610017)

Steady oxide film obtaining on surface of piston aluminum alloys at micro-arc oxidation

The formation of thin oxide films on piston aluminum alloys through the method of micro-arc oxidation is considered. The mechanism of the formation crystal inclusions and high-temperature structures depending on ion current density in time is described. One of the methods of surface strengthening piston aluminum alloys – micro-arc oxidation is described and analyzed. The mechanisms of oxide layers formation taking into account the impact of alloy elements of piston aluminum alloys are considered. The analysis of porous cells is carried out, basic properties of coatings are investigated.

Keywords: piston alloys; micro-arc oxidation; film coatings; porosity.

В настоящее время поршневая группа современных дизельных и бензиновых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) испытывает нагрузки, близкие к максимально допустимым. А если для питания двигателя используются альтернативные топлива, то температура и давление в камере сгорания увеличиваются на 15...20 %, что приводит к увеличению термической напряженности деталей всей цилиндропоршневой группы [1].

Применение сплавов на основе алюминия для изготовления поршневой группы ДВС дает возможность уменьшить общий вес двигателя и снизить удельный расход топлива. Современные поршневые сплавы достаточно технологичны, имеют относительно высокую прочность и пластичность, отличаются сложным химическим составом, так как для повышения жаропрочности их легируют медью, хромом, марганцем, никелем, кобальтом и

другими химическими элементами. В современном машиностроении к поршневым алюминиевым сплавам предъявляются все более серьезные требования и классические сплавы, разработанные в 1970-х гг., уже не отвечают необходимым для современных двигателей параметрам.

Создание деталей принципиально нового поколения на основе выпускаемой промышленностью сплавов, связано с нанесением на рабочие поверхности особых упрочняющих и защитных покрытий. Подобные покрытия имеют свойства, кардинально отличающиеся от свойств основного материала деталей. Подобное разделение функциональных свойств способствует многократному повышению надежности и ресурса работы деталей машин, работающих при циклических, динамических, знакопеременных нагрузках, в условиях повышенных рабочих температур и давлений [2].

Устранить недостатки такого плана можно созданием на поверхности поршней пленок, состоящих из оксида алюминия (Al_2O_3). Эти пленки обладают высокой теплостойкостью, твердостью, коррозионной стойкостью и низкой химической активностью. Именно эти свойства определяют практическую значимость применения этих покрытий на поршневых сплавах при работе в условиях повышенных температур и давлений, особенно при работе на альтернативных видах топлива.

Одним из перспективных методов, позволяющих получить на поверхности поршневых сплавов подобную пленку, является микродуговое оксидирование (МДО). МДО происходит в определенном электролите под действием микродуговых разрядов [3]. Данный вид поверхностной обработки определяется наличием электрохимических процессов, подобных анодированию. Однако характерным отличием от анодирования является использование свободной энергии электрических микро-разрядов в растворе электролита. В результате такого воздействия на поверхности поршня появляются покрытия, подобные керамике.

Достоинством этого процесса является возможность получения оксидных пленок на внутренней поверхности камеры сгорания, расположенной в поршне. Нанесение МДО покрытий на детали цилиндропоршневой группы способствует защите их от высокотемпературной газовой эрозии и позволяет снизить температуру металла основы примерно в 1,5 раза. Химический состав этих пленок можно легко регулировать в очень широком

диапазоне и использовать в качестве теплостойких, коррозионностойких и износостойких покрытий [3].

Проблемой микродугового оксидирования занимаются многие коллективы, среди которых Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск); Национальный исследовательский Томский политехнический университет (проф. Ю.П. Шаркеев и др.); Институт химии ДВО РАН (чл.-кор. С.В. Гнеденков и др.), МГТУ МАМИ, (Московский политехнический университет В.М. Смелянский, А.В. Жуковский); И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин; Объединенный институт машиностроения Национальной Академии наук Республики Беларусь (ОИМ НАН РБ), проф. М.А. Белоцерковский.

В свете развития современных технологий появилась возможность очень точного, быстрого неразрушающего определения качественного и количественного элементного состава различных сплавов, а вместе с тем и комплексного анализа полученных покрытий. Данная работа направлена не только на получение МДО покрытия, но и в будущем на проведение эксплуатационных исследований с промежуточной оценкой свойств и стабильности полученных пленок при работе в условиях повышенных температур и давлений.

Для МДО была выбрана поршневая группа дизеля Д-245. Для определения соответствия сплава ГОСТ и правильного подбора электролита был определен химический состав поршневой группы. Он определялся на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX-720P/800P, предназначенном для быстрого неразрушающего определения качественного и количественного элементного состава твердых и жидких образцов, порошков, гранул, пластин, пленок. Его принцип действия основан на возбуждении флуоресцентного излучения атомов исследуемого вещества излучением маломощной рентгеновской трубки.

Флуоресцентное излучение от образца отбирается полупроводниковым детектором SDD-типа, где кванты различной энергии преобразуются в электрические импульсы, амплитуда которых пропорциональна энергии поглощенных квантов. Частота следования импульсов определенной амплитуды пропорциональна концентрации химического элемента в пробе. Использование данного оборудования позволило определить содержание компонентов до тысячных долей процента, и провести комплексный анализ фазового со-

става сплава.

Полученный химический анализ показал (рис. 1), что поршни изготовлены из сплава АК4-1. Жаропрочные сплавы типа АК4-1 сис-

темы Al–Cu–Fe–Ni по химическому и фазовому составам весьма близки к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующих элементов содержат железо и никель.

Образец : Алюминий
 Оператор: Скрыбин М.Л.
 Комментарий : Metal, Vac, 2chan
 Группа : easy-Vac-Metal
 Дата : 2017-02-09 18:31:37

Количественный результат

Аналит	Результат	Ст. Откл.	Спос. Расч.	Линия Инт.	(имп.-в-сек/мкА)
Al	93.124 %	(0.134)	Кол-FP	AlKa	54.5834
Cu	2.130 %	(0.010)	Кол-FP	CuKa	16.7556
Mg	1.634 %	(0.024)	Кол-FP	MgKa	0.5187
Si	1.350 %	(0.005)	Кол-FP	FeLb1	28.7617
Ni	0.939 %	(0.004)	Кол-FP	NiKa	34.1022
Fe	0.953 %	(0.005)	Кол-FP	PbKa	11.1626
Pb	0.212 %	(0.002)	Кол-FP	SiKa	14.6344
Zn	0.193 %	(0.005)	Кол-FP	ZnKa	0.3082
Mn	0.187 %	(0.006)	Кол-FP	MnKa	0.2665
Cr	0.149 %	(0.011)	Кол-FP	CrLa	2.2282
Ti	0.080 %	(0.001)	Кол-FP	TiKa	3.8421
Ni	0.025 %	(0.001)	Кол-FP	NiKa	0.7671
W	0.024 %	(0.004)	Кол-FP	WLa	0.4939

Рис. 1. Количественный результат анализа поршневого алюминиевого сплава дизеля на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX-720P/800P

Микродуговое оксидирование поршней производили на экспериментальной лабораторной установке тиристорно-конденсаторного типа при обработке в электролитах с диапазонами концентраций KOH – от 1,5 до 2,0 кг/м³ и NaAlO₂ – от 14 до 16 кг/м³ (данная концентрация является оптимальной для исследуемых поршневых алюминиевых сплавов). В качестве базовой ванны использовалась ванна для нанесения гальванических покрытий с измененным на тиристорно-конденсаторный источником питания. Эта установка позволяет регулировать суммарную плотность ионного тока $i_{и}$ и количественное соотношение катодного и анодного токов $I_{к}/I_{а}$ в широких пределах.

При определенном значении напряжения на поверхности поршня появляются отдельные микродуговые разряды. Мощность этих разрядов обеспечивает появление в их каналах мощного ионного потока, который обладает высокой реакционной способностью. В этот момент начинают протекать химические реакции, которые приводят к образованию оксида алюминия Al₂O₃. Кроме того, в образующийся оксид алюминия могут включаться и компоненты электролита. Параллельно в окрестно-

стях плазменных кратеров происходит распад и оплавление продуктов промежуточных реакций. Следствием микродуговых разрядов является увеличение скорости процесса образования Al₂O₃ и изменение химических и физических свойств получаемых пленок. Вместо оксидов, обладающих аморфной структурой, происходит формирование кристаллических включений, и появляются высокотемпературные структуры [4, 5].

При постоянном напряжении толщина оксидного слоя увеличивается. Разряды передислоцируются на ближайшие участки, где толщина, и, соответственно, напряжение пробоя ниже. Оксидный слой растет до тех пор, пока плотность ионного тока не достигнет того уровня. Тогда процесс окисления прекращается. Оксидные слои, сформированные на поршневых сплавах, за счет четкой многофазной структуры, имеют высокую тепло-, износо-, коррозионную стойкость. Получаемая при МДО структура пористой оксидной пленки полностью отвечает представлениям физико-геометрической модели Келлера [6] (рис. 2).

Рассматривая данную модель, можно выделить следующие основные положения [4, 6]:

– пористая оксидная пленка представляет

собой плотноупакованные оксидные ячейки, имеющие форму призмы, в основе которой лежит шестиугольник (гексагональная призма);

- оксидные ячейки имеют нормальную ориентацию к поверхности металла;

- в центре элементарной ячейки присутствует одна пора, которая представляет собой канал, размер которого определяется составом электролита, химическим составом основного металла и электрическими параметрами процесса оксидирования (на рис. 2 – 35 нм);

- основой оксидной ячейки является барьерный слой беспористого типа (на рис. 3 – 0,145 мкм). Этот слой имеет ячеистую структуру. Размеры сопряженных ячеек совпадают;

- в процессе микродугового оксидирования начало формирования ячеек происходит с образования барьерного слоя, переходящего в пористый. В процессе МДО происходит удлинение пор, из-за того, что дно пор (поверхность барьерного слоя) подвергается постоянному травлению электролитом [6].

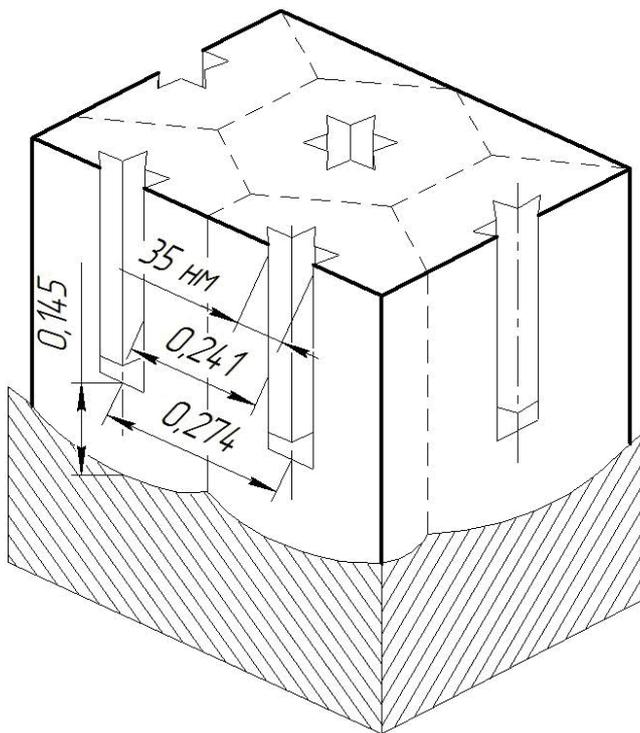


Рис. 2. Схематическое изображение идеальной структуры (согласно физико-геометрической модели Келлера)

Фазовый состав днища поршня после МДО, проведенный на спектрометре EDX-720P/800P, не выявил такого же количества Mg и Si на поверхности. Это объясняется их малой концентрацией и тем, что основная часть этих легирующих элементов раствори-

лась в алюминиевой матрице.

Микроструктурное исследование поверхности поршневого алюминиевого сплава после МДО проводилось растровым электронным микроскопом РЭМ-103-01. Данный микроскоп имеет возможность увеличения от 12 до 55 000 крат. Также можно рассматривать топографию поверхности со значительной шероховатостью. Особенностью данного микроскопа является сложность изучения на нем оксидных слоев, обладающих диэлектрическими свойствами. Это связано с попаданием электрического заряда на оксидную пленку и накоплением на ней поглощенных электронов (полученная при МДО пленка обладает диэлектрическими свойствами). В результате этого отсутствует стекание заряда на заземляющий контур. На пленке появляются заряженные электронами области, что приводит к искажению изображения и значительно изменяет эмиссию электронного потока.

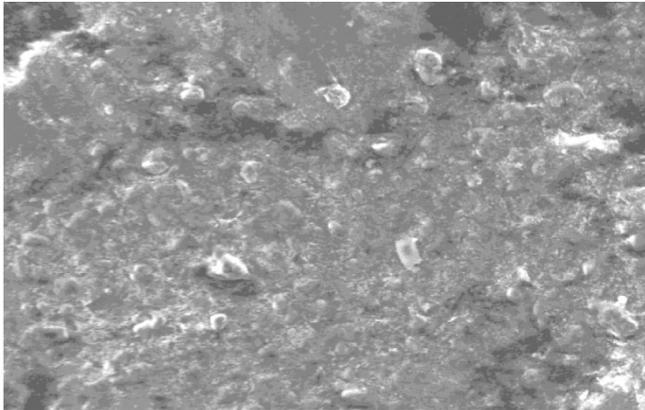
Для обеспечения четкости растрового изображения использовалась однокадровая экспозиция. На рис. 3 представлены микроснимки поверхностного слоя поршневого алюминиевого сплава после МДО [7].

На рисунке видно, что поверхность покрытия неоднородна, имеет развитый рельеф и обладает значительной шероховатостью. На ней имеются мелкие частицы, и поры. Изучение поперечных шлифов показало, что сквозной пористости в полученном покрытии нет, что может свидетельствовать о высоких защитных свойствах покрытия. Такая развитая поверхность оксидного покрытия может говорить о его высокой теплоизоляционной способности, что в целом приводит к снижению теплонапряженности поршневых групп дизельных двигателей.

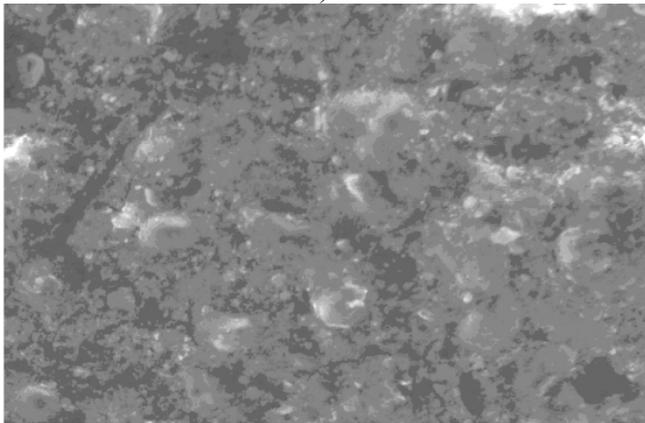
Проведенные исследования показали, что оксидные пленки на поверхности алюминиевых сплавов, которые формируются в растворяющих оксид алюминия водных электролитах, состоят из двух основных слоев. Эти слои имеют четко выраженную границу раздела. Первый слой – барьерный прилегает непосредственно к основному металлу. Имеет достаточно высокую плотность и характеризуется практически полным отсутствием пор. Второй слой – наружный с большой пористостью, образованной от множества микродуговых разрядов. Большинство исследователей также выделяют два аналогичных слоя, получаемых при оксидировании [8].

Для более детального изучения полученной пористости покрытий использовался элек-

тронный сканирующий микроскоп MIRA-3. На снимке видно, что размеры непосредственно пор изменяются в интервале от 0,1 до 8 мкм (рис. 4). Строение пор – разветвленное с множеством сложных ответвлений и замкнутых полостей. Покрытия, которые не содержат пор, получить нельзя. Это обусловлено характером протекания микродуговых разрядов.



а)



б)

Рис. 3. Морфологические особенности поршневого алюминиевого сплава после МДО при увеличениях $\times 184$ (а) и $\times 556$ (б)

В определенных случаях наличие пор является положительным моментом. При работе покрытия в условиях масляного голодания, смазка входит в поры покрытия и обеспечивает наличие постоянной масляной пленки. В поршнях дизелей влияние пористости на днище поршня на их эксплуатационные свойства минимально, ввиду особенностей образования сажи в результате сгорания углеводородных топлив.

Особенностью МДО является то, что в прикатодном слое в промежутке между жидким электролитом и поршнем возникают микродуги, локальная температура повышается и электролит закипает, начинает испаряться, образуя ионный поток электронов, имеющий

очень высокую плотность. Одновременно с этим происходит интенсивный процесс электролиза, при котором образуется свободный кислород.

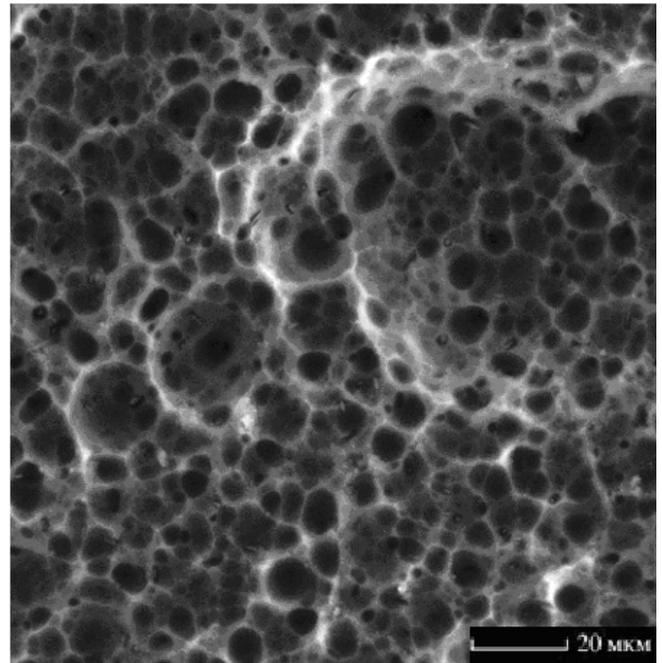


Рис. 4. Микрофотографии поверхности покрытий после МДО

Создаются условия для высокотемпературного окисления поверхности поршня. Поверхность днища поршня вступает в непосредственный контакт с активной средой, имеющей высокую концентрацию кислорода. Поверхность днища поршня начинает усиленно окисляться. Фазовый состав поверхности будет зависеть от количества легирующих элементов и состава жидкой фазы электролита [6 – 8].

В результате окислирования получается защитное покрытие, которое состоит из оксидов легирующих элементов, распределенных в пластичной матрице алюминия. Образованное при МДО покрытие обладает хорошей адгезией, а также имеет неоднородную, развитую поверхность. Это обстоятельство, при отсутствии сквозных пор, является предпосылкой для высокой жаропрочности и снижению теплонпряженности поршневой группы.

Исследование химического состава поверхности после МДО доказывает интенсивный массоперенос в оксидный слой элементов электролита и последующую диффузию вглубь основного металла. Образованное на поверхности покрытие достаточно однородно, ликвации по содержанию химических элемен-

тов отсутствуют.

Полученная на поверхности в процессе МДО особая нанопористая анодная структура оксида алюминия (рис. 5), была описана Келлером в середине 1950-х гг., но обобщенные модели образования подобных нанопористых структур при МДО до сих пор полностью не описаны.

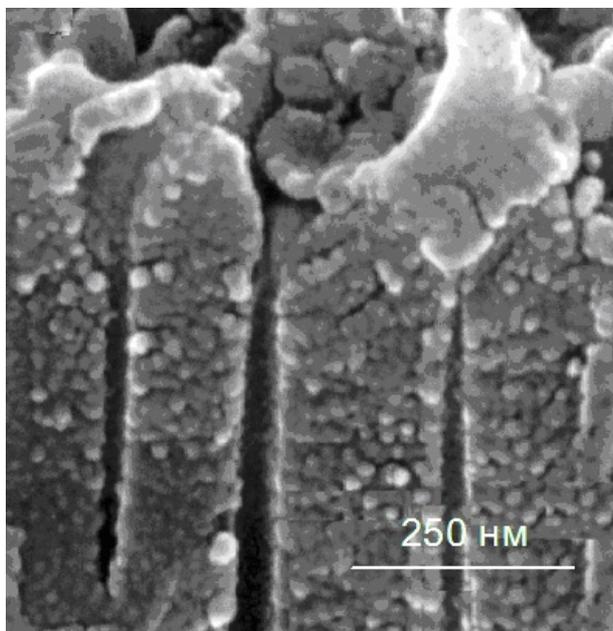


Рис. 5. Продольный разрез поверхности поршневого алюминиевого сплава, полученный с помощью электронного сканирующего микроскопа

В настоящее время нанопористые оксидные слои получены и на других металлах (Zr, Ta, Ti, Pb и др.). Показано, что МДО многих металлов приводит к получению упорядоченных структур двух типов: пористых и трубчатых с различной морфологией. Благодаря такой структуре, получаемые оксидные слои имеют широкий спектр применения. Причиной формирования таких структур служит синергетика химических процессов образования и растворения оксидной пленки, в результате воздействия мощного электрического поля. Однако завершенная теория, объясняющая механизм самоорганизованного роста оксидных пленок при МДО, еще не создана.

Исследование получаемых нанопористых (нанотрубчатых) структур на поршневых алюминиевых сплавах, актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Существующие технологии получения подобных оксидных структур подразумевают использование специальных электролитов, большие затраты времени и электрической энергии, применения дорогостоящей регули-

рующей аппаратуры. Поэтому новые подходы к созданию подобных пористых анодных оксидов на алюминиевых сплавах являются весьма актуальными.

Комплексный подход к этому вопросу позволил создать экологичную методику формирования пористой анодно-оксидной пленки на поршневом алюминиевом сплаве. Применение предложенной методики МДО дает возможность за непродолжительное время сформировать на поверхности поршневого алюминиевого сплава пористые пленки оксида алюминия поликристаллической мезоструктуры с размерами пор от 15 до 160 нм, толщиной от 10 до 100 мкм.

Для поршневых алюминиевых сплавов основными характеристиками, определяющими их основные свойства, являются термостойкость, коррозионностойкость и абразивный износ. Эти характеристики определялись согласно ГОСТ Р 9.318-2013 [10].

Контроль термостойкости покрытий был исследован циклическим методом. Каждый из 100 циклов включал выдержку образцов в муфельной печи ПМ-10 при температуре $(280 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 60 мин. После этого проводилось погружение нагретых образцов в дистиллированную воду с температурой 20°C и выдержка в течение 20 мин до полного остывания. На МДО покрытия после исследования термостойкости визуально не было обнаружено заметных видимых повреждений в виде шелушений, вздутий, растрескивания, отслаивания или изменение цвета покрытия, что полностью удовлетворяет требованиям действующего ГОСТа.

Исследование коррозионной стойкости осуществлялось периодическим погружением образцов в испытательный раствор по ГОСТ.

Испытательный раствор состоял из 1000 см^3 раствора хлористого натрия с массовой долей 5 % с добавлением 0,3 г хлорной меди, доведенный уксусной кислотой до 3,3...3,5 pH. Продолжительность испытаний покрытий составляла 96 ч. После исследования на поверхности оксидированного образца отсутствовали продукты коррозии и изменение цвета покрытия. Следует отметить, что на образце без покрытия визуально наблюдались явные следы коррозии, составляющие порядка 70 % от общей поверхности исследуемого образца.

Определение абразивного износа проводилось на базе ФГБОУ ВО Вятский ГУ. Износ определялся по методу Табера с использованием абразиметра. Этот прибор обеспечивал измерение нагрузки с относительной по-

грешностью $\pm 5\%$. Абсолютная погрешность частоты вращения составляла ± 4 об./мин. Каждый образец был взвешен на аналитических весах, с абсолютной погрешностью не более ± 3 мг. Образец закреплялся под абразивными кругами с частотой вращения диска 60 об./мин, под нагрузкой 9,8 Н. Удаление продуктов износа из области абразивного воздействия осуществлялось с помощью сжатого воздуха и составляло 100 % при общем количестве циклов – 7000. По результатам исследований абразивный износ составил 55 мг на 1000 циклов, что удовлетворяет ГОСТ Р 9.318–2013.

Сформированные на поверхности поршня оксидные покрытия имеют высокую термостойкость, устойчивы к абразивному износу, химически инертны практически ко всем агрессивным средам. В целом, исследования поверхностной пленки доказали отсутствие сквозной пористости на поверхности сплава, что соответствует представлениям образования оксидного слоя согласно физико-геометрической модели Келлера.

Рассматривая результаты предыдущих и представленных исследований, можно обобщить представление о технологическом обеспечении коррозионной стойкости тонких МДО покрытий: данные покрытия обеспечивают максимально возможную коррозионную стойкость сплавов на алюминиевой основе, даже в условиях повышенных температур и давлений. В дальнейшем планируется установить взаимосвязь параметров качества тонких МДО покрытий и принципиальных закономерностей коррозионного разрушения, в зависимости от применяемых электролитов и толщины оксидного слоя.

Рассматривая и обобщая тематику МДО можно отметить, что большинство работ по данному вопросу носят исследовательский или прикладной характер, а совокупность теоретических разработок по механизму МДО основывается на аспектах, предложенных Келлером, и не учитывает многие факторы.

Если рассматривать работы по МДО в аспекте ГОСТ Р 9.318–2013, можно отметить практически полное отсутствие каких-либо данных по МДО, особенно в привязке к химическому составу упрочняемого сплава. В целом, количество работ, посвященных МДО воздействию на поверхность металлических материалов, постоянно растет, что характеризует данный процесс упрочнения как перспективный и далеко идущий.

Полученные результаты позволяют реко-

мендовать использование получаемых в результате МДО оксидных пленок для защиты поршней тепловых двигателей и снижения теплонапряженности поршневых групп.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Скрябин, М.Л.** Особенности выбора современных материалов для поршневой группы при работе дизеля на альтернативных видах топлива // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. «Наука–Технология–Ресурсосбережение»: Сб. науч. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2016. – Вып. 13. – С. 279–285.

2. **Скрябин, М.Л.** Обзор современных материалов для поршней двигателей внутреннего сгорания // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной научно-практической конференции «Наука–Технология–Ресурсосбережение»: Сборник научных трудов. – Киров: Вятская ГСХА, 2016. – Вып. 13. – С. 272–278.

3. **Плазменно-электролитическое** модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. – М.: Техносфера, 2011. – 464 с.

4. **Розен, А.Е., Артемьев, А.Ю.** Упрочнение поверхности деталей из алюминиевых, титановых и циркониевых сплавов микродуговым оксидированием. – М.: Наука, 2015. – 145 с.

5. **Микродуговое** оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.

6. **Смехова, И.Н., Скрябин, М.Л.** Этапы формирования пористых структур при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 192–196.

7. **Дударева, Н.Ю.** Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 217–222.

8. **Шандров, Б.В. и др.** Основы технологии микродугового оксидирования / Б.В. Шандров, Е.М. Морозов, А.В. Жуковский – М.: Альянс, 2008. – 80 с.

9. **Crossland A.S., Thompson G.E., Wan J., Habazaki H., Shimizu K., Skeldon P., Wood G.C.** Oxidation of the surface. *Surface and coatings technology*, 1999, No. 144, p.847-845. (In UK).

10. **ГОСТ Р 9.318–2013.** Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия нанокристаллические неметаллические неорганические, полученные методом микродугового оксидирования на алюминии и его сплавах. Общие требования и методы контроля.

REFERENCES

1. Skryabin, M.L. Peculiarities of modern material choice for a piston group during diesel engine work alternative fuel // *Operating Characteristics Improvement of Internal Combustion Engines. Proceedings of the IX-th Inter. Scientif. Pract. Conf. "Science-Technology-Resourcesaving"*: - Kirov: Vyatka SAA. 2016. – Edition 13. – pp. 279-285.

2. Skryabin, M.L. Review of current material for pistons of internal combustion engines // *Operating Characteristics Improvement of Internal Combustion Engines. Materials of the*

IX-th Inter. Scientif.Tech. Conf. "Science-Technology-Resourcesaving": Proceedings. – Kirov: Vyatka SAA, 2016. – Edition. – pp. 272-278.

3. Plasma-electrolytic modification of metal and alloy surfaces / I.V. Suminov, P.N. Belkin, A.V. Epelfeld, V.B. Lyudin, B.L. Krit, A.M. Borisov. – M.: *Technosphere*, 2011. – pp. 464.

4. Rozen, A.E., Artemiev, A.Yu. *Aluminum Titanium and Zirconium Parts Surfaces Strengthening by Micro-arc Oxidation.* – M.: Science, 2015. – pp. 145.

5. *Micro-arc Oxidation (Theory, Technology, Equipment)*/ I.V. Suminov, A.V. Epelfeld, V.B. Lyudin, B.L. Krit, A.M. Borisov. – M.: ECOMET, 2005. – pp. 368.

6. Smekhova, I.N., Skryabin, M.L. Stages of porous structure formation at micro-arc oxidation of piston aluminum alloys // *Polzunov Bulletin.* – 2017. – No.4. – pp. 192-196.

7. Dudareva, N.Yu. Micro-arc oxidation impact upon prop

erties of surface under formation // *Bulletin of Ufa State Aircraft technical University.* – 2013. – No. – pp. 217-222.

8. Shandrov, B.V. et al. *Technology Fundamentals of Microarc Oxidation* / B.V. Shandrov, E.M. Morozov, A.V. Zhukovsky – M.: Alliance, 2008. – pp. 80.

9. Crossland A.S., Thompson G.E., Wan J., Habazaki H., Shimizu K., Skeldon P., Wood G.C. Oxidation of the surface. Surface and coatings technology, 1999, No. 144, p.847-845. (In UK).

10. SSR R 9.318-2013. United Corrosion and Wear Resistant System (UCWRS). Nano-crystal, non-metal, inorganic coatings obtained by method of microarc oxidation on aluminum and its alloys. General requirements and methods of control.

Рецензент д.т.н. А.В. Томай

Уважаемые коллеги!

Приглашаем вас принять участие в работе конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» (ICMTMTE 2018)
 с 10 по 14 сентября 2018 г. в г. Севастополь

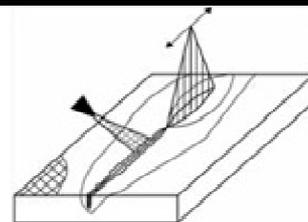
Организаторами конференции являются: Севастопольский государственный университет, Национальный исследовательский технический университет «МИСиС», Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова, общество с ограниченной ответственностью «Инлинк» и Международный союз машиностроителей.

Работа конференции направлена на предоставления возможности для ученых и представителей производства обобщить результаты последних достижений в области технологий производства изделий из всех типов материалов, промышленного оборудования и инструмента, обсудить направления развития новой техники и технологий, установить полезные связи между партнерами для будущего взаимодействия.

Тематика конференции

- Современные проблемы машиностроения
- Новые технологии обработки материалов
- Аддитивное производство
- Прецизионная микро- и нанообработка
- Высокоскоростная и абразивная обработка
- Нетрадиционные технологические процессы
- Мониторинг и диагностика технологических процессов
- Целостность и качество поверхностей после обработки
- Моделирование и расчет сложных технических систем и технологических процессов
- Механизация и автоматизация технологических процессов
- Функциональные и защитные покрытия
- Новое промышленное оборудование и инструмент
- Новые функциональные и конструкционные материалы, наноматериалы
- Современные CAD/CAM/CAE технологии
- Оптимизация производственных систем
- Машиноведение и детали машин
- Современные тенденции развития конструкций транспортных и технологических машин
- Эксплуатация транспортных и технологических машин, эксплуатационные материалы, испытания и сертификация
- Сельскохозяйственное машиностроение
- Другое

Секретарь конференции
Рощупкин Станислав Иванович
 Тел.: +7 (978) 70-40-395
 E-mail: icmtmte@gmail.com
<http://icmtmte.ru>



УДК 621.923

DOI: 10.30987/article_5ad8d290a12e62.81742494

А.В. Хандожко, д.т.н.,

А.Г. Федук, аспирант

(Брянский государственный технический университет,
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50-лет Октября, 7)

E-mail: chandosh@yandex.ru

Особенности шлифования лейкосапфира алмазными кругами и их правки

Рассмотрены проблемы шлифования изделий из лейкосапфира алмазными шлифовальными кругами на металлической связке и вопросы правки кругов.

Ключевые слова: лейкосапфир; шлифование; алмазный шлифовальный круг; правка; засаливание.

A.V. Khandozhko, D. Eng.,

A.G. Fedukov, Post graduate student

(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, Russia, 241035)

Peculiarities of leucosapphire grinding with diamond disks and their stropping

Problems in grinding leucosapphire products with diamond abrasive disks on metal bonds and matters of disk stropping are considered.

Keywords: leucosapphire; grinding; diamond grinding disk; stropping; loading (glazing).

Механическая обработка твердых монокристаллических материалов имеет специфику, связанную с их особыми свойствами – анизотропией, хрупкостью. Одним из наиболее характерных представителей таких материалов является лейкосапфир ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Его широко применяют для деталей оптики, электронной техники. Существует несколько методов выращивания лейкосапфира, наибольшее распространение получили технологии выращивания монокристалла из расплава в вакууме. Современные технологии позволяют получать кристаллы весом несколько десятков килограммов. Но из-за особенности процесса роста кристалл имеет неправильную грушевидную форму [1].

Для получения каких либо изделий из такой заготовки необходимо выполнить большое количество заготовительных операций. Как правило, эти операции включают вырезку заготовок из монокристалла в несколько этапов и шлифование. Обработка изделий включает операции шлифования, механического и химического полирования. Реже обработка выполняется с применением ультразвука, лазерных технологий.

Из-за высокой твердости и прочности механическая обработка лейкосапфира выполняется в основном алмазным инструментом. Поэтому на всех операциях (сверление, разрезка, шлифование, полирование) используется алмазный

инструмент со связанными или свободными зернами.

Так как твердость сапфира сопоставима с твердостью алмаза, его обработка имеет существенные отличия от традиционной алмазно-абразивной обработки. Особенно это относится к обработке закрепленным зерном, к шлифованию.

В отличие от упруго-пластичных материалов лейкосапфир при резании скалывается. При этом скалывание происходит не только в зоне резания. Согласно исследованиям Т.Б. Тепловой и В.В. Соловьева при финишной обработке лейкосапфира алмазным инструментом зернистостью 7/5 мкм на некоторой глубине от поверхности возникают большие пластические деформации и дефектный слой глубиной 15...25 мкм [3]. Шлифование при обработке лейкосапфира можно идентифицировать, как микрорезание (скалывание), сопровождающееся образованием поверхностных дефектов. Глубина дефектного слоя и величина сколов зависят, в первую очередь, от сил резания.

Главным методом борьбы с высокими силами резания является сохранение режущих свойств алмазного инструмента. Из-за высокой твердости и прочности лейкосапфира при резании алмазные зерна быстро изнашиваются и затупляются. Поскольку износ идет неравномерно, затупление круга сопровождается потерей геометрической точности — появлением биения и завалов краев круга. Для восстановления режущих свойств и точности нужно или организовать процесс шлифования в режиме самозатачивания или организовать правку.

Для обработки лейкосапфира обычно используют круги на металлической связке. Такая связка имеет высокую прочность, износостойкость и обеспечить режим самозатачивания для таких кругов крайне сложно. Это усугубляется спецификой стружкообразования. В результате резания возникает мелкодисперсная фракция, которая практически не изнашивает связку. Более того, в ходе исследований были зафиксированы случаи увеличения диаметра круга на 0,01...0,03 мм в ходе работы из-за внедрения большого количества шлама в связку. В ходе многочисленных экспериментов с варьированием условий шлифования удалось добиться лишь ограниченного самозатачивания при разрезке кристаллов тонкими отрезными кругами.

Таким образом, регулярная правка круга является обязательной при шлифовании лейкосапфира алмазными кругами на металлической связке. Существует несколько методов правки таких кругов. На практике, чаще всего, используется правка шлифованием абразивными кругами. Метод обеспечивает высокое качество правки, производителен, но требует больших энергозатрат и расхода абразивов.

Другими методами являются электрохимический и электрофизический, которые требуют создания специального оборудования, особых условий реализации. Электроэрозионный метод дает хорошие результаты по исправлению биений, производителен. Недостатком являются высокие локальные температуры при разрядах, что ведет к повреждению зерен и, как следствие, снижению стойкости кругов по сравнению с правкой шлифованием. Электрохимические анодные процессы обеспечивают щадящие условия правки, но малопродуктивны, плохо устраняют погрешности формы, провоцируют коррозию оборудования.

Интересную альтернативу представляют методы правки свободным абразивом, которые были разработаны, в первую очередь, в Донецком национальном техническом университете [5, 6].

Этот метод относительно легко реализуется, не наносит вреда оборудованию и экологии, эффективен. Некоторые ограничения существуют при восстановлении кругов работающих на врезание, кругов с малой шириной рабочей части. Результаты исследований эффективности различных методов правки приведены в данной статье.

Для реализации электрофизических и электрохимических методов была создана специальная лабораторная установка (рис. 1).

Основой установки является регулируемый привод вращения шпинделя, на который устанавливаются круги на оправке. Через скользящие контакты на круг и шпиндель подается ток. В зону контакта графитового электрода с кругом подается диэлектрическая жидкость (масло или дистиллированная вода) при электроэрозионной правке или электролит — при электро-химической правке. Частота вращения круга регулируется от 1,0 до 20 мин⁻¹. Источник обеспечивает регулирование напряжения и силы тока.

Исследование правки свободным абразивом было проведено применительно к

одной из наиболее простых для реализации схем с подачей его в полусвязанном состоянии [5]. Схема правки показана на рис. 2, процесс правки – на рис. 3.

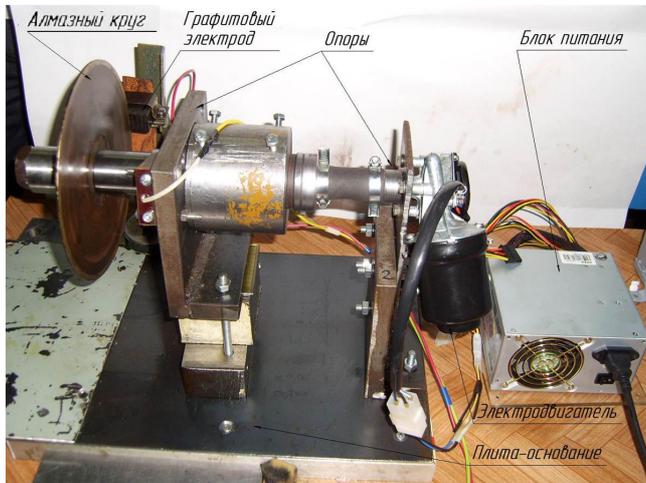


Рис. 1. Лабораторная установка для электроэрозионной и электрохимической правки алмазных кругов на металлической связке

В зазор между алмазным кругом и притиром постоянно подаются зерна абразива. Они захватываются кругом и движутся в этом зазоре. В процессе перекачивания зерно свободного абразива истирает связку, огибая алмазные зерна, обнажает их. Притир из мягкого материала (чугун, низкоуглеродистая сталь) по форме максимально приближен к кругу. Зазор в зоне контакта минимален, но достаточен для движения зерен правящего абразива. Длина рабочей части притира должна обеспечивать максимально возможную продолжительность взаимодействия зерен абразива со связкой круга. По мере изнашивания притира он периодически приближается к кругу.

Конструкция приспособления обеспечивает непрерывную подачу бруска с абразивом в зону правки. Брусок состоит из абразивного материала и мягкой связки (гипса). В качестве абразива были использованы шлифпорошок карбида бора и промытый речной песок.

Процесс происходил при непрерывной возвратно-поступательной поперечной подаче. Процесс выполнялся без использования СОТС.

Параметры процесса шлифования оценивались по силе резания, состоянию круга, его стойкости, шума и вибраций, параметры процесса правки – по длительности процесса и состоянию круга.

Силы резания измерялись с помощью специального динамометра (рис. 4). Динамометр

имеет плиту для установки заготовок, связанную с основанием плоскими пружинами. На пружины наклеены тензодатчики. Питание датчиков и обработка сигнала выполняется специальным контролером, связанным с ПЭВМ.

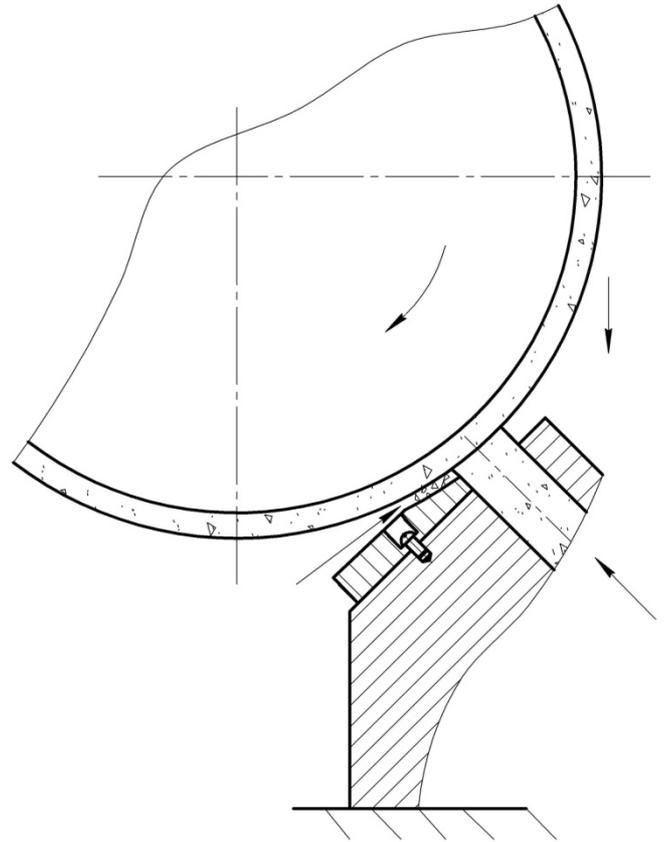


Рис. 2. Схема правки свободным абразивом с подачей его в зону в полусвязанном виде

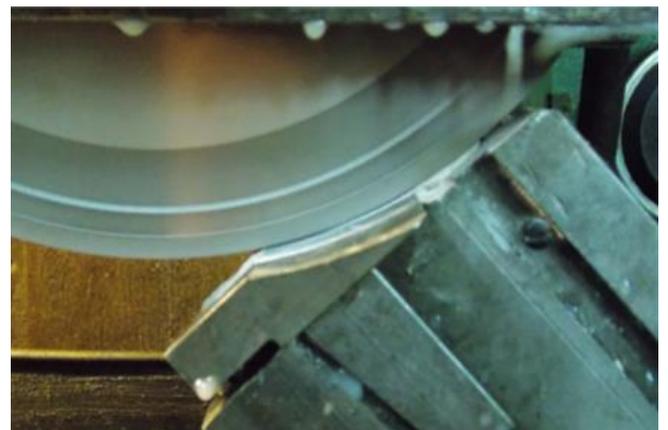


Рис. 3. Процесс правки алмазного шлифовального круга на металлической связке методом свободного абразива

На столе динамометра заготовки закреплялись механически, для установки на магнитной плите было изготовлено специальное приспособление (рис. 5).



Рис. 4. Динамометр для измерения сил резания при шлифовании



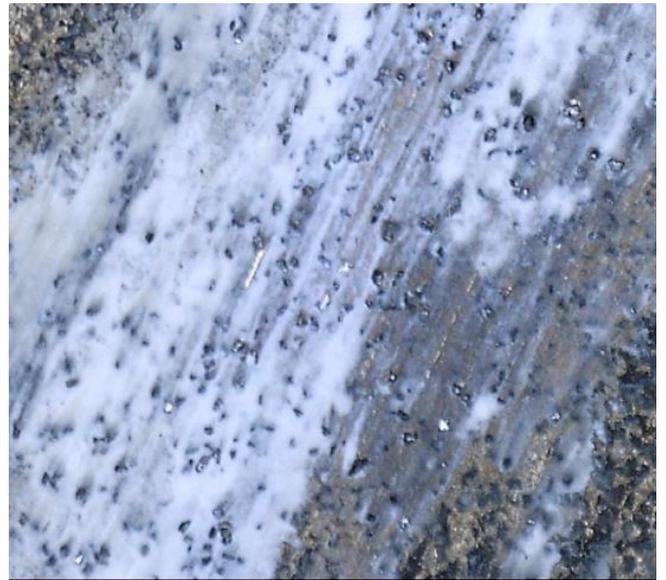
Рис. 5. Крепление заготовки из лейкосапфира для последующего его шлифования алмазным кругом на металлической связке

Приспособление представляет собой базовую шайбу, к которой винтами крепится кольцо. Контактующие плоскости шайбы и кольца притерты и параллельны основанию. Заготовки лейкосапфира устанавливались в нем с помощью клея (сургуча). Принятая схема базирования и закрепления обеспечила установку заготовок с погрешностью не более 0,03 мм.

Измерения геометрических погрешностей круга (биения и завалов) проводились с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 1,0 и 5,0 мкм.

Визуальная оценка режущей части круга выполнялась с помощью специального микроскопа, подключаемого к ПЭВМ.

Исследования сил резания показали, что по мере изнашивания круга силы резания резко возрастают. Измерения показали, что компоненты сил резания возрастают примерно одинаково. При этом силы резания предельно изношенным кругом превышают силы резания заправленным кругом более чем в 2 раза. В этом состоянии резание практически прекращается, резко возрастает температура в зоне резания и вероятность появления микротрещин. Это объясняется состоянием режущей части круга. На рис. 6 показаны несколько фотографий кругов в предельно изношенном состоянии.



а)



б)



в)

Рис. 6. Внешний вид рабочей части изношенного алмазного круга на металлической связке после шлифования лейкосапфира:

а – плоский круг, $\times 40$; б – плоский круг, $\times 5$;
в – отрезной круг, $\times 50$

У плоского круга наблюдается шаржирование связки шламом, зерна частично выкроше-

ны, частично полностью изношены. У отрезного круга все зерна выкрошены.

Эксперименты показали, что все рассмотренные методы правки обеспечили вскрытие новых режущих зерен. На рис. 7 показаны результаты электроэрозионной и электрохимической правки, на рис. 8 – правки свободным абразивом. Лучшую производительность при этом показала правка свободным абразивом. Процесс восстановления полностью изношенного профиля круга занимает не более 20 мин. При нормальном износе длительность составляет не более 5...10 мин.

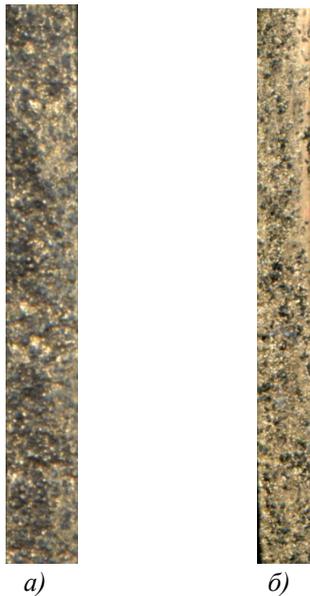


Рис. 7. Состояние кругов после правки:
а – электроэрозионная правка; б – электрохимическая правка

Несколько меньшую производительность показала электроэрозионная правка. Правка полностью изношенного круга составляет около 30 мин, т.е. больше почти на 50 %. Однако качество правки в этом случае значительно хуже. Вершины зерен (рис. 6, а) почернели, что свидетельствует о графитизации под действием высоких температур. Использование в качестве электрода пучка упругих проводников незначительно уменьшает повреждения режущих зерен. Испытания показали, что круги после такой правки имеют стойкость меньше, чем у заправленных свободным абразивом примерно на 20 %. Уменьшение напряжения снижает повреждаемость, но при этом быстро падает производительность процесса. Важным достоинством электроэрозионной правки является возможность восстановления точности профиля. Биения круга снижались в конце правки до 0,01 мм (сопоставимо с биением шпинделя станка).

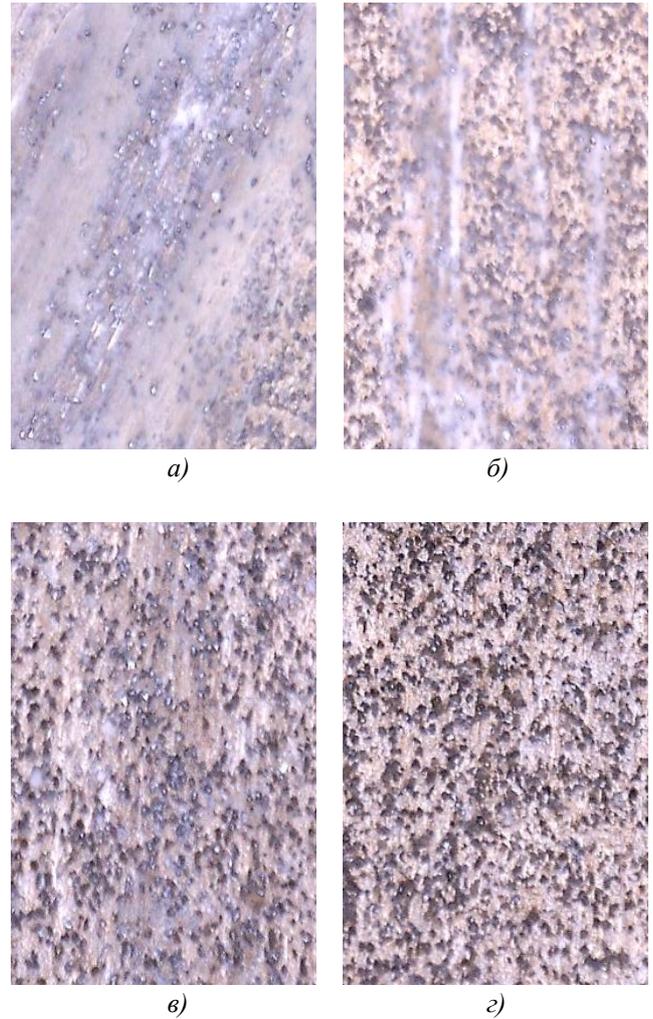


Рис. 8. Процесс правки алмазного шлифовального круга на металлической связке методом свободного абразива:

а – засаленный алмазный шлифовальный круг; б – круг после 5...7 мин правки; в – круг после 10...12 мин правки; з – круг после 15...20 мин правки

Электрохимическая обработка имеет самую низкую производительность. Длительность процесса восстановления режущих свойств круга после полного износа превысила 45 мин. При этом обеспечено практически идеальное качество формируемого профиля круга. Наблюдалось и снижение биений, хотя и не в той степени, что при электроэрозионной правке (с 0,04 до 0,025 мм).

Протекание процесса правки свободным абразивом представлено на рис. 7. Правка в течение 10...12 мин практически полностью формирует работоспособный профиль круга. Однако при увеличении длительности процесса до 15...20 мин можно получить более развитый рельеф поверхности круга, обеспечивающий размещение шлама и улучшение процесса шлифования.

Для дополнительной оценки эффективности правки свободным абразивом были проведены исследования изменения профиля и формы круга.

Анализ профиля круга проводился в нескольких сечениях до обработки лейкосапфира, после обработки лейкосапфира и после

правки. Оценка состояния образующей проводилась в 5-ти радиальных сечениях и в 7-ми осевых сечениях с помощью индикатора часового типа. Средние результаты измерения формы образующей алмазного шлифовального круга на различных стадиях обработки представлены на рис. 9 и табл. 1.

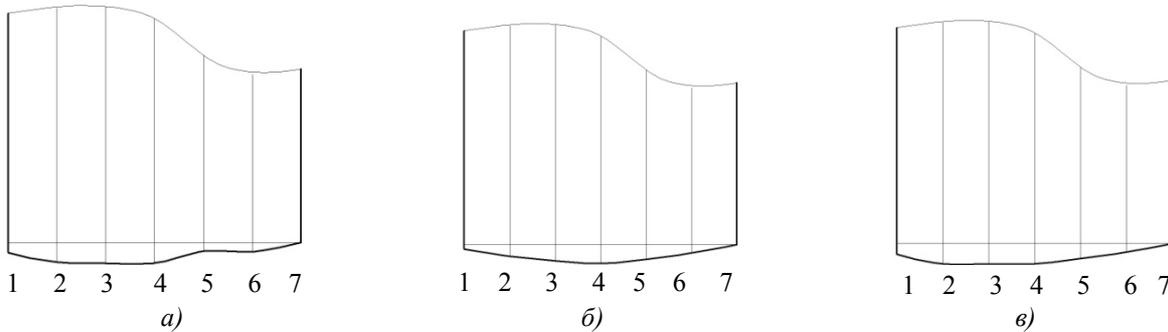


Рис. 9. Измерение профиля круга на различных этапах работы:

a – перед обработкой лейкосапфира; *б* – после обработки лейкосапфира; *в* – после правки методом свободного абразива

1. Результаты измерения профиля алмазного шлифовального круга на различных этапах работы

Этап обработки	Средние значения высоты профиля круга в разных сечениях, мм						
	1	2	3	4	5	6	7
До обработки лейкосапфира	0,024	0,042	0,045	0,045	0,034	0,020	0
После обработки лейкосапфира	0,007	0,020	0,031	0,038	0,021	0,010	0
После правки свободным абразивом	0,020	0,035	0,044	0,046	0,039	0,021	0

По результатам исследований было замечено, что по мере изнашивания круга, его образующая приобретает форму кривой, которая имеет максимум в середине. Величина завала кромок сопоставима с глубиной резания. Без удаления этого дефекта в процессе правки обработка будет вестись лишь частью круга, что негативно отразится на стойкости инструмента и качестве поверхности. В результате правки до полного вскрытия зерен профиль круга восстановлен лишь в средней части, завалы на краях сохранились. Эти показатели несколько хуже, чем при электроэрозионной правке.

Анализ радиального биения круга выполнялся в 16-ти сечениях в каждом из 5-ти осевых сечениях с помощью индикатора часового типа. Осредненные результаты измерений алмазного шлифовального круга на различных этапах обработки представлены на рис. 10 и табл. 2.

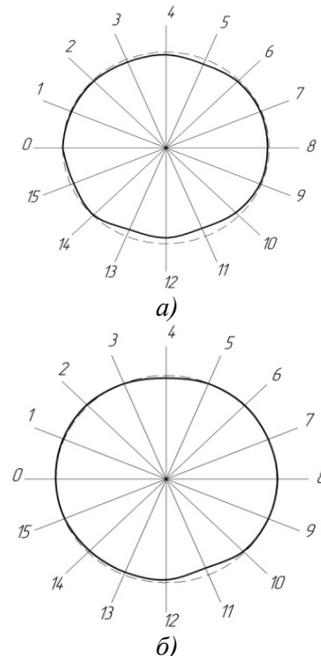


Рис. 10. Форма круга:

a – после обработки; *б* – после правки

1. Результаты измерения формы алмазного шлифовального круга на различных этапах работы

Этап работы	Средние значения высоты профиля круга в разных сечениях, мм							
	0	3	5	7	9	11	12	13
После обработки	0	-0,008	-0,014	-0,003	-0,004	-0,024	-0,015	-0,019
После правки	0	-0,001	-0,001	0	0	-0,019	-0,008	-0,007

Анализ результатов говорит о высокой эффективности правки свободным абразивом для исправления возникающих биений круга. При изнашивании радиальные биения круга увеличиваются. После правки биения уменьшаются. Практически во всех сечениях величина биения меньше 0,01 мм, а снижение погрешности произошло кратно.

В ходе исследований эффективности правки дополнительно были оценены технологические возможности алмазного плоского шлифования и пути управления этим процессом.

При шлифовании заправленным кругом на заготовке лейкосапфира нет краевых эффектов в виде завалов. Разнотолщинность образцов не превышает 0,01 мм.

Также была проведена оценка качества поверхностного слоя и степени влияния различных факторов на шероховатость. Шлифование выполнялось после правки свободным абразивом в течение 5...10 мин. Результаты измерений представлены в табл. 3.

3. Результаты измерения шероховатости лейкосапфира после правки методом свободного абразива шлифовального алмазного круга на металлической связке

$S_{\text{пол}}, \text{мм/ход}$	$t, \text{мкм}$	$Ra, \text{мкм}$	$Rz, \text{мкм}$	$R_{\text{max}}, \text{мкм}$
0,9	3	1,11...1,38	3,61...4,80	6,28...7,37
0,9	5	1,10...1,17	4,83...5,05	7,12...7,54
0,9	10	1,12...1,18	4,45...5,41	6,81...7,61
0,2	3	0,58...0,81	3,01...4,08	4,73...6,7
0,2	5	0,64...0,88	3,55...4,17	5,04...5,32
0,2	10	0,80...0,84	3,91...4,15	5,94...6,76

Анализ результатов показывает, что шероховатость поверхности зависит в основном от величины поперечной подачи. Некоторое влияние оказывает состояние круга. Как и для других материалов, наименьшая шероховатость получается при работе с кругом после его приработки.

Выводы

1. Алмазно-абразивная обработка лейкосапфира шлифованием при использовании алмазных кругов на металлической связке невозможна без принудительной правки.

2. Правка методом свободного абразива является одним из наиболее эффективных способов восстановления режущей способности и геометрической точности кругов.

3. Правка свободным абразивом обеспечивает вскрытие новых алмазных зерен без повреждения их острых граней.

4. Восстановление формы происходит медленнее, чем вскрытие режущих зерен.

5. При использовании принятой схемы правки возможно появление «завалов» на краях круга. По этой причине правка тонких кру-

гов (отрезных) методом свободного абразива малоэффективна.

6. Правка методом свободного абразива обеспечивает производительность не хуже электроэрозионной правки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Добровинская, Е.Р., Литвинов, Л.А., Пищик, В.В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2004. – 508 с.
- Хандожко, А.В. Особенности технологии механической обработки при получении заготовок из выращенного кристалла лейкосапфира // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – №2(8). – С.19 – 24.
- Теплова, Т.Б., Коньшин, А.С., Соловьев, В.В., Ашкинази, Е.Е. О выборе рациональных режимов процесса микрошлифования монокристалла лейкосапфира // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №9. – С. 76–83.
- Новиков, Г.В. Прогрессивные технологии алмазно-абразивной обработки природных алмазов и бриллиантов. Одесса: 2009. 580 с.
- Гусев, В.В., Медведев, А.Л. Закономерности изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным и полусвободным абразивом

вом // Вестник ДонГТУ, – 2009. №6. – С. 41–48.

6. **Калафатова, Л.П., Поезд, С.А., Шевченко, В.А.** Способ правки абразивного инструмента // Современные металлорежущие системы машиностроения / Матер.5-й всеукр. студ.конфер. Вып. 5-й. - Донецк: ДонНТУ. 2004.- 179 с.

7. **Любимов, В.В., Могильников, В.А., Чмир, М.Я.** Комбинированные методы алмазного шлифования: учебное пособие: изд. 2-е, испр. и доп. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – 100 с.

8. **Худобин, Л. В.** Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

REFERENCES

1. Dobrovinskaya, E.R., Litvinov, L.A., Pishchik, V.V. *Sapphire Encyclopedia*. – Kharkov: STC “Institute of Monocrystals”, 2004. – pp. 508.

2. Khandozhko, A.V. Machining technology peculiarities at manufacturing blanks of grown leucosapphire crystal // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.2(8). – pp. 19 – 24.

3. Teplova, T.B., Konshin, A.S., Soloviyov, V.V., Ashki-

nazy, E.E. Efficient mode choice for leucosapphire monocrystal micro-grinding // *Mining Information Analytical Bulletin*. – 2005. – No.9. – pp. 76-83.

4. Novikov, G.V. *Efficient Diamond-Abrasive Machining Technologies of Natural Diamonds and Brilliants*. Odesa: 2009, pp. 580.

5. Gusev, V.V., Medvedev, A.L. Regularities in changes of diamond grinding disk cutting ability at stropping with free and semi-free abrasive // *Bulletin of DonSTU*, - 2009, No.6. – pp. 41-48.

6. Kalafatova, L.P., Poezd, S.A., Shevchenko, V.A. Abrasive tool stropping method // *Modern Metal Cutting Systems in Mechanical Engineering / Proceedings of the 5-th All-Ukrainian Students' Conf.* 5-th edition – Donetsk: DonNTU. 2004. – pp. 179.

7. Lyubimov, V.V., Mogilnikov, V.A., Chmir, M.Ya. *Combined Methods of Diamond Grinding: manual: 2-d edition revised and supplemented*. – Tula: Publishing House of Tula-SU, 2007. – pp. 100.

8. Khudobin, L.V. *Minimization of Abrasive Disk Glazing / L.V. Khudobin, A.N. Unyanin; under the editorship of L.V. Khudobin*. – Ulyanovsk: UISTU, 2007. – pp. 298.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 678.067621.892

DOI: 10.30987/article_5ad8d291089c65.14476762

Ю.М. Зубарев, д.т.н.,
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. С-Петербург, Лоцманская ул, д.3)

А.В. Приемышев, к.т.н.,
А.С. Заостровский, аспирант
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. С-Петербург, Политехническая ул., 29)
E-mail: iuzubarev@mail.ru; priemyshev52@mail.ru

Особенности силового контактного взаимодействия в зоне резания при лезвийной механической обработке заготовок из полимерных композитных материалов

На основе результатов экспериментов выполнен анализ влияния параметров процесса резания на составляющие силы резания при обработке композитов режущими кромками в разных условиях резания. Выполнен анализ круговых диаграмм составляющих силы резания, исходя из определенной роли каждой в процессе резания. Полученные результаты позволяют оценить возможности физических моделей при резании заготовок из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: тангенциальная и радиальная составляющие силы резания; полимерные композитные материалы; упругие и пластические деформации.

Peculiarities of power contact interaction in cutting area at blade machining of polymeric composite blanks

On the basis of experiment results there is carried out an analysis of the cutting parameter impact upon force components of cutting at processing composites with cutting edges under different cutting conditions. The analysis of circular graphs of force components of cutting reasoning from the specified role of each force in the course of cutting is carried out.

Keywords: tangential and radial force of cutting; polymeric composites; elastic and plastic deformations.

Одним из основных параметров процесса резания, влияющим на систему образования всего комплекса выходных параметров обработки, является сила резания. Возникает необходимость изучения влияния полимерных композитных материалов (ПКМ), особенно его армирующих элементов, на изменение составляющих силы резания.

Сопротивление упругой и пластической деформации волокон в зоне резания увеличивает нормальную составляющую силы резания P_z , и, следовательно, упругие отжатия в технологической системе (ТС). Эти отжатия вызывают появления погрешностей размеров и формы обрабатываемых поверхностей и, учитывая специфику строения ПКМ, носят случайный характер. Анализ и количественная оценка случайных погрешностей производится с использованием методов математической статистики, основанных на теории вероятности [1].

Для анализа влияния параметров процесса на силу резания при обработке композитов режущими кромками в условиях ортогонального резания рассмотрим равновесное состояние её составляющих, исходя из определенной роли каждой составляющей в процессе резания (рис. 1).

Равнодействующую силу сдвига R можно представить в виде составной, как показано на рис. 1. Вдоль направления резания и перпендикулярно ему – это тангенциальная сила резания F_c и радиальная сила F_t соответственно. Также ее можно разложить на силу сдвига F_s и нормальную составляющую силы сдвига F_{ns} . Отношения между этими компонентами определяются следующим образом:

$$F_s = F_c \cdot \cos \varphi - F_t \cdot \sin \varphi; \quad (1)$$

$$F_{ns} = F_c \cdot \sin \varphi + F_t \cdot \cos \varphi = F_s \cdot \tan(\varphi + \beta - \alpha_0). \quad (2)$$

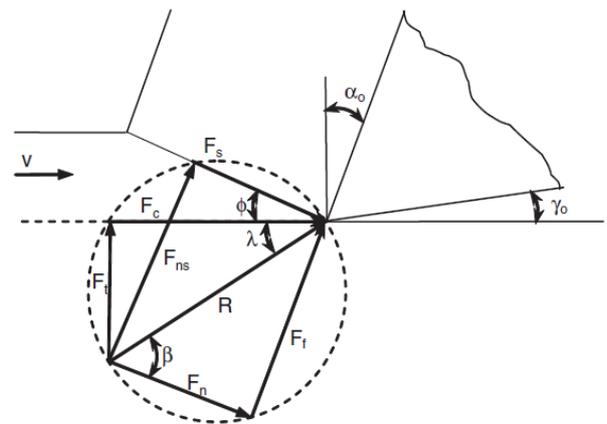


Рис. 1. Круговые диаграммы ортогонального резания:

R – равнодействующая силы сдвига; $\lambda = (\beta - \alpha_0)$ – ориентация равнодействующей силы; F_c – тангенциальная сила резания; F_t – радиальная сила; F_s – сила сдвига в плоскости сдвига; F_{ns} – нормальная сила сдвига в плоскости сдвига; F_f – сила трения на передней поверхности инструмента; F_n – нормальная сила трения на передней поверхности инструмента; β – угол трения

Напряжение сдвига в плоскости сдвига определяется путем деления силы сдвига на площадь плоскости сдвига A_s :

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \cos \varphi - F_t \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \varphi}{A_c}, \quad (3)$$

где $A_s = A_c / \sin \varphi$.

Аналогичным образом, нормальное напряжение на плоскости сдвига задается

$$\sigma_s = \frac{F_{ns}}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \sin \varphi + F_t \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{A_c}. \quad (4)$$

Тангенциальная сила резания F_c , действующая в направлении скорости резания, определяет объем работы, требуемый для удаления материала. Таким образом, мощность механической обработки определяется как

$$P_m = F_c \vartheta. \quad (5)$$

Удельная мощность резания представляет собой мощность механической обработки на единицу объема материала, удаляемого за единицу времени:

$$p_s = \frac{F_c \vartheta}{\vartheta A_c} = \frac{F_c}{A_c}. \quad (6)$$

Она не зависит от скорости резания и изменяется в зависимости от геометрии стружки, скорости подачи и твердости материала заготовки.

Энергия сдвига на единицу объема материала может быть получена из выражения

$$u_s = \frac{F_s \vartheta_s}{\vartheta A_c} = \frac{F_s \vartheta_s}{\vartheta A_s \sin \varphi} = \tau_s \cdot \gamma. \quad (7)$$

Энергия трения на единицу объема материала определяется как

$$u_f = \frac{F_f \vartheta_c}{\vartheta A_c} = \frac{F_f \cdot r}{A_c}. \quad (8)$$

При механической обработке металлов часть мощности резания, используемая на диспергирование металла, тратится на деформацию сдвига стружки вдоль плоскости сдвига и трения вдоль передней и задней поверхностей режущего инструмента. Почти вся она превращается в тепловую энергию. Отсюда вытекает, что

$$p_s \approx u_s + u_f. \quad (9)$$

Данное уравнение не может применяться при механической обработке композитов, так как при образовании стружки происходит небольшой сдвиг и хрупкое разрушение. Для полимерных композитных материалов это выражение можно записать в следующем виде [2]:

$$p_s \approx [(1 - V_f)u_m + V_f u_{fiber}] + u_d + u_f, \quad (10)$$

где u_m – удельная энергия резания для матрицы; u_{fiber} – удельная энергия резания волокна; u_d – удельная энергия, связанная с отделением волокна и матрицы.

Для анализа влияния параметров процесса резания на силы резания при обработке композитов режущими кромками с отрицательным передним углом обычно рассматривают равновесное состояние ее составляющих, ис-

ходя из определенной роли каждой составляющей в процессе резания. При снятии стружки вершиной режущего лезвия действуют силы сжатия и сдвига в плоскости сдвига, трения и нормального давления по задней поверхности режущего лезвия и инерционная сила стружки. Эти составляющие силы резания приведены на рис. 2 в виде круговых диаграмм (кругов Мора).

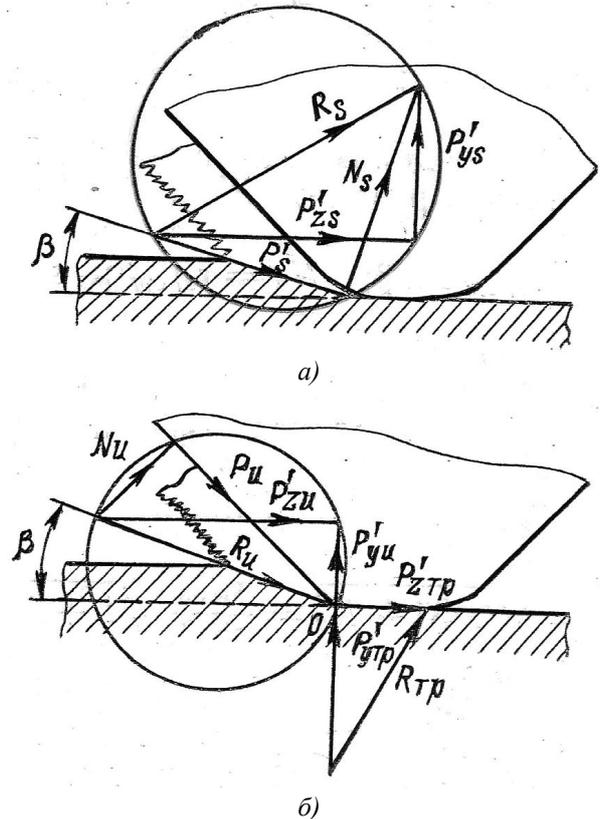


Рис. 2. Круговые диаграммы сил сдвига (а), сил инерции и трения (б), действующих при резании режущими кромками с отрицательным передним углом

Силу трения стружки о переднюю поверхность режущей кромки можно отдельно не рассматривать, так как она автоматически учитывается при экспериментальном определении коэффициента усадки стружки. При расчетах применяется схема с передним углом лезвия от $\gamma = -45^\circ$ до $\gamma = 80^\circ$ и «площадкой» с переменной шириной b , связанной с глубиной врезания a_z параболической зависимостью $b = 2\sqrt{2\rho a_z}$, где ρ – средний радиус округления вершин режущего лезвия инструмента.

Для определения составляющих силы резания P'_z и P'_y выражаются их элементы через

напряжение сдвига τ_s , коэффициенты внутреннего трения μ_s в плоскости сдвига и внешнего трения μ на задней поверхности режущей кромки.

Из рис. 2 можно определить P'_z и P'_y через силу сдвига:

$$P'_s = \tau_s \cdot f_{cp} / \sin \beta; N_s = \tau_s \cdot f_{cp} / \mu_s \cdot \sin \beta, \quad (11)$$

где P'_s и N_s – соответственно сила сдвига и нормальная сила в плоскости сдвига; f_{cp} – площадь сечения среза.

Равнодействующая силы сдвига:

$$R_s \sqrt{(P'_s)^2 + N_s^2} = \frac{\tau_s \cdot f_{cp}}{\sin \beta} \sqrt{1 + 1/\mu_s^2}. \quad (12)$$

Для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы сдвига коэффициент трения в плоскости сдвига заменяется углом трения $\varphi_s = \arctg \mu_s$:

$$P'_{Zs} = R_s \sin(\beta + \varphi_s) = \frac{\tau_s \cdot f_{cp} \cdot \sin(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta} \sqrt{1 + 1/\tan^2 \varphi_s} = \frac{\tau_s \cdot f_{cp} \cdot \sin(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \varphi_s} \quad (13)$$

$$P'_{ys} = R_s \cos(\beta + \varphi_s) = \frac{\tau_s \cdot f_{cp} \cdot \cos(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \varphi_s} \quad (14)$$

Для определения влияния силы трения $R_{тр}$ по задней поверхности на составляющие силы резания P'_z и P'_y можно воспользоваться подходом, приведенным в работе [3].

Нормальные напряжения, действующие в области вершины режущей кромки, уменьшаются вдоль задней площадки по криволинейному закону так, что средние напряжения $\sigma_{cp} = \sigma_{max}/3 = \tau_s/3\mu_s$, где σ_{max} – максимальное напряжение в точке. Тогда нормальная составляющая силы трения будет равна

$$P'_{утр} = \sigma_{cp} \cdot \pi \cdot b^2 / u = \pi \tau_s b^2 / (12\mu_s) \quad (15)$$

тангенциальная составляющая:

$$P'_{Zтр} = \pi \tau_s b^2 \mu / (12\mu_s). \quad (16)$$

Инерционную силу стружки обычно не учитывают при резании композитов, так как ее доля в суммарной силе резания незначительна. Однако если в процессе обработки

происходит резание волокон, то ее следует учитывать. Работа сил инерции тратится на изменение направления материала при переходе от обрабатываемой заготовки к стружке [4].

Предполагая, что движение материала – это свободный поток, который воздействует на твердую неподвижную поверхность (переднюю поверхность режущего лезвия), можно, используя уравнения гидродинамики, получить выражение для тангенциальной P'_{zu} и радиальной P'_{yu} составляющих сил инерции, равнодействующая которых $R_{и}$ направлена вдоль плоскости сдвига, а нормальная составляющая $N_{и}$ – перпендикулярна к ней. Тангенциальная составляющая силы инерции равна произведению секундной массы движущегося материала на изменение скорости его движения в тангенциальном направлении (см. рис. 2, б).

$$P'_{Zu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v(v - v_c \sin \gamma). \quad (17)$$

Радиальная составляющая силы инерции определяется аналогично

$$P'_{yu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v \cdot v_c \cdot \cos \gamma, \quad (18)$$

где p_m – плотность материала; v – «секундная» масса движущегося материала; $v_c = v \cdot \sin \beta / \cos(\beta - \gamma)$ – скорость движения стружки. Подставляя в уравнение для P'_{Zu} и P'_{yu} выражение для скорости стружки, получаем

$$P'_{Zu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v^2 [1 - \sin \beta \sin \gamma / \cos(\beta - \gamma)] \quad (19)$$

$$P'_{yu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v^2 [\sin \beta \cos \gamma / \cos(\beta - \gamma)]. \quad (20)$$

Суммируя тангенциальные и радиальные составляющие сил сдвига, трения и инерции, а также выразив площадь сечения среза f_{cp} через толщину a_z и ширину среза $2\sqrt{2pa_z}$ получим

$$P'_z = \tau_s a_z \sqrt{2pa_z} \frac{\sin(\beta + \varphi_s)}{(\sin \beta \sin \varphi_s)} + \frac{2\pi \tau_s a_z \rho \mu}{3\mu_s} + 10^{-4} a_z \sqrt{2pa_z} p_m v^2 [1 - \sin \beta \sin \gamma / \cos(\beta - \gamma)]; \quad (21)$$

$$P'_y = \tau_s a_z \sqrt{2pa_z} \frac{\cos(\beta + \varphi_s)}{(\sin \beta \sin \varphi_s)} + \frac{2\pi \tau_s a_z \rho}{3\mu_s} + a_z \sqrt{2pa_z} p_m v^2 [\sin \beta \cos \gamma / \cos(\beta - \gamma)]. \quad (22)$$

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что сила сдвига растет с увеличением напряжения сдвига τ_s , толщины сдвига a_z , коэффициента внутреннего трения μ_s ,

среднего радиуса округления вершин режущих лезвий ρ и с уменьшением угла сдвига β . Увеличение скорости резания приводит к снижению силы сдвига за счет уменьшения коэффициента трения между контактными поверхностями сдвига.

Сила трения зависит от коэффициента внешнего трения μ , толщины среза a_z , напряжений сдвига τ_s , определяющих силу нормального давления на задней поверхности режущего лезвия, и среднего радиуса скругления вершин режущих лезвий ρ . Величинами a_z и β определяют размеры площадки трения. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению коэффициентов μ , μ_s и силы трения.

Инерционная сила зависит от плотности материала ρ_m и от размеров стружки, а также от направления и скорости ее движения. С увеличением скорости резания эта сила увеличивается пропорционально квадрату скорости резания, при условии незначительного влияния изменения угла сдвига. Поэтому, при достижении определенной скорости резания, суммарная сила должна иметь минимальное значение. Превалирующее действие инерционных сил приведет к их резкому увеличению.

При механической обработке волокнистых полимеров наблюдается процесс колебания сил резания, частота которых зависит, в первую очередь, от ориентации волокон (рис. 3).

P_z , Н



Рис. 3. Влияние ориентации волокон на составляющую силы резания P_z , Н:

- 1 – ТК+А; $v = 0,5$ м/мин; $t = 0,1$ мм; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\rho = 8 \dots 10$ мкм;
- 2 – ПКА; $v = 4$ м/мин; $t = 0,25$ мм; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\rho = 2 \dots 3$ мкм;
- 3 – ВК+PVD; $v = 40$ м/мин; $t = 0,25$ мм; $\gamma = 7^\circ$; $\alpha = 20^\circ$; $\rho = 12$ мкм;
- 4 – КНБ; $v = 4$ м/мин; $t = 0,2$ мм; $\gamma = 6^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\rho = 2 \dots 3$ мкм

Амплитуда колебаний тангенциальной силы резания P_z превышает амплитуду колебания радиальной силы. При обработке со скоростью резания, направленной параллельно волокнам, инструментом с положительным передним углом амплитуда и частота колебаний силы свидетельствуют об отслаивании, изгибе и разрушении волокон, происходящих на передней поверхности инструмента. При резании волокон с положительной ориентацией сила резания отражает изменения в процессе сдвига и разрушения волокнистых и связующих материалов с изменением ориентации волокон [5, 6]. Радиальная сила определяет взаимодействие между обрабатываемой поверхностью и задней поверхностью режущего инструмента.

Амплитуда колебаний силы резания уменьшается, с увеличением угла ориентации волокон, а затем увеличивается при резании волокон с ориентацией 90° и больше. Следует отметить, что характер колебаний силы при резании волокон с большим углом ориентации (более 90°) отличается от резания волокон с малым положительным углом ориентации ($0 \dots 75^\circ$). При резании волокон с большим положительным углом ориентации большие амплитуды колебаний связаны с большими удельными давлениями в зоне сдвига и затем сдвигом волокон, а также с растрескиванием матрицы.

Заключение

При применении моделей плоскости сдвига к механической обработке однонаправленных композитов существуют два ограничения:

- сдвиг имеет место только для ограниченного диапазона направлений волокон от 10° до 75° . Поэтому данную модель нельзя применять для всех возможных направлений волокон в композитах ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$);
- межповерхностный сдвиг происходит вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей. Это приводит к скольжению стружки вверх по передней поверхности инструмента. При этом угол плоскости сдвига принимается равным углу ориентации волокон, независимо от принципа минимума энергии. Таким образом, результаты исследования дают приемлемое совпадение с экспериментальными данными только в диапазоне направлений волокон от 10° до 60° ;
- стружкообразование при резании волокон с положительным углом ориентации ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) происходит в процессе сжатия с

последующим сходом стружки вверх по передней поверхности инструмента за счет межслоевого сдвига вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей. Данный тип стружкообразования схож (только по внешнему виду из-за отсутствия пластической деформации) с образованием стружки путем сдвига при резании металлов. В этих случаях тангенциальная сила резания F_c и радиальная сила F_t преобразуются в силу сдвига F_s , действующую вдоль плоскости сдвига, и силу F_n , действующую перпендикулярно к плоскости сдвига;

– плоскость сдвига при резании волокнистых полимеров, как правило, совпадает с плоскостью волокон, имеющих угол ориентации $0^\circ < \theta < 90^\circ$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маталин, А.А. Технология машиностроения: учебник. 3-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 512 с.
2. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Полимерные материалы в машиностроении и технологии их обработки. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2017. – 172 с.
3. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 365 с.
4. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
5. Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенно-

сти механической обработки высокотехнологичных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна с термопластичной матрицей // Наука и образование: инновации, интеграция и развитие. – 2014. – №1. – С. 174–179.

6. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности лезвийной обработки резанием заготовок из полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – №2(80). – С. 40–48.

REFERENCES

1. Matalin, A.A. *Engineering Techniques: textbook*. 3-d edition. – S-Pb.: Publishing House “Lan”, 2010. – pp. 512.
2. Zubarev, Yu.M., Priomyshchev, A.V., Zaostrovsky, A.S. *Polymer Materials in Mechanical Engineering and Technologies of Their Processing*. – S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University. 2017. – pp. 172.
3. Korchak, S.N., *Productivity of Steel Parts Grinding*. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – pp. 365.
4. Bobrov, V.F. *Fundamentals of Metal Cutting Theory*. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 344.
5. Priomyshchev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of advanced technology polymer composite material machining based on carbon fiber with thermoplastic matrix // *Science and Education: Innovations, Integration and Development*. – 2014. – No.1. – pp. 174-179.
6. Zubarev, Yu.M., Priomyshchev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of polymer composite blank blade cutting // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.2(80). – pp. 40-48.

Рецензент д.т.н. А.Н. Волков

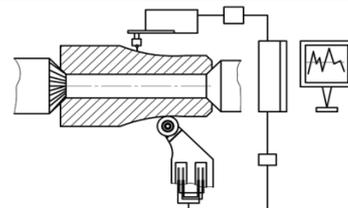
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru



УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5ad8d291cddcd8.06334386

А.Г. Суслов, д.т.н.

(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, 115409, Каширское шоссе, 31)

Д.М. Медведев, к.т.н., **Д.И. Петрешин**, д.т.н., **О.Н. Федонин**, д.т.н.

(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: atsys@tu-bryansk.ru

Система автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием

Рассмотрены особенности реализации алгоритмического и математического обеспечения системы автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при их обработке резанием. При этом используется адаптивная система управления качеством обрабатываемых поверхностей деталей на станках с ЧПУ. Данная система позволяет снизить себестоимость изготовления деталей и обеспечить требуемую их долговечность.

Ключевые слова: автоматизация; износостойкость; детали машин; обработка резанием; станок с ЧПУ; адаптивная система управления.

A.G. Suslov, D. Eng.,

(National Research Nuclear University "MIFI", 31, Kashirskoye Highway, 115409 Moscow)

D.M. Medvedev, Can. Eng., **D.I. Petreshin**, D. Eng., **O.N. Fedonin**, D. Eng.

(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, 241035)

System for automated wear-resistance technological control of machinery at cutting

The peculiarities in the realization of algorithmic and mathematical software for technological control of machinery wear during machine parts cutting are considered. At the same time the adaptive system of quality control of parts surfaces machining on NC machines is used. This system allows decreasing cost price of manufacturing parts and ensuring their required life.

The system developed allows choosing a method and modes of part surface finish cutting ensuring a value of its wear intensity at operation not exceeding permissible one with minimum technological cost price.

It allows carrying out finish cutting a part surface with the optimum method and in optimum modes on a machine, possibly, equipped with NC systems with the adaptive wear-resistance control of the part under machining.

Keywords: automation; wear-resistance; machinery; cutting; NC machine; Adaptive control system.

Введение

Одним из основных эксплуатационных свойств деталей машин является износостойкость, так как установлено, что до 70 % машин выходит из строя вследствие износа трущихся деталей. При эксплуатации износостойкость определяет долговечность деталей и их соединений в изделиях, которая, в свою

очередь, характеризует надежность машин. Система автоматизированного технологического управления износостойкостью позволит снизить себестоимость изготовления деталей, обеспечивая при этом требуемую надежность машин.

Износостойкость деталей машин оценивается величиной интенсивности их изнашивания при эксплуатации и зависит от состояния

поверхностного слоя деталей, которое формируется на окончательных операциях технологических процессов их обработки. Для окончательной обработки трущихся поверхностей деталей машин наиболее широко используются методы лезвийной и абразивной обработки резанием: точение и шлифование.

Алгоритмическое обеспечение системы. Алгоритм работы системы автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм работы системы автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием

Сначала вводятся данные о поверхности детали: материал и размеры, режимы эксплуатации, допустимая величина интенсивности изнашивания. Затем проводится поиск методов и наиболее производительных режимов

окончательной обработки резанием, обеспечивающих величину интенсивности изнашивания поверхности детали при эксплуатации, не превышающую допустимую. Производительность обработки резанием Q_v определяется как объем удаленного с поверхности детали слоя материала V за время T :

$$Q_v = \frac{V}{T}.$$

Далее среди найденных вариантов выполняется выбор метода, обеспечивающего окончательную обработку поверхности детали резанием с минимальной технологической себестоимостью. Расчет себестоимости проводится нормативным способом. Сущность этого способа заключается в определении суммы основной части косвенных затрат (связанных с содержанием и эксплуатацией оборудования), необходимых для выполнения обработки и нормативной заработной платы основных производственных рабочих (основной и дополнительной) с отчислениями на социальное страхование [6]:

$$C = (C_{сз} K_{мч} + C_{зп}) T_o,$$

где $C_{сз}$ – средние затраты на содержание и эксплуатацию оборудования в течение 1 мин работы; $K_{мч}$ – коэффициент машино-часа; $C_{зп}$ – норматив заработной платы станочника; T_o – основное (машинное) время.

Значения коэффициентов для расчета себестоимости [6] и расчетные формулы основного времени обработки точением и шлифованием приведены в табл. 1.

После этого будут получены и выведены результаты: метод и режимы окончательной обработки резанием поверхности детали, обеспечивающие величину интенсивности ее изнашивания при эксплуатации, не превышающую допустимую, с минимальной технологической себестоимостью. В итоге это позволяет выполнить окончательную обработку резанием поверхности детали оптимальным методом и на оптимальных режимах на станке, по возможности, оснащённом системой ЧПУ с адаптивным управлением износостойкостью обрабатываемой детали.

Математическое обеспечение системы. В системе автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием возможно использование как эмпирических, так и теоретических зависимостей интенсивности изнашивания поверхностей деталей машин при эксплуатации от режимов их окончательной обработки резанием.

1. Значения коэффициентов для расчета себестоимости и расчетные формулы основного времени обработки точением и шлифованием

Метод обработки	$C_{сз}$, коп/мин	$K_{мч}$	$C_{зп}$, коп/мин	T_o , мин
Точение	6,65	1	23,86	$T_o = \frac{bi}{ns\lambda}$
Шлифование		0,7	26,39	$T_o = \frac{a}{ns\lambda}$
<i>Примечание:</i> b – ширина обрабатываемой поверхности; i – число ходов режущего инструмента; n – частота вращения детали; s – величина подачи режущего инструмента; λ – коэффициент резания; a – припуск на сторону.				

При эмпирическом моделировании устанавливается непосредственная функциональная взаимосвязь между режимами окончательной обработки детали резанием и интенсивностью ее изнашивания при эксплуатации путем проведения специально поставленных опытов в определенных условиях. В результате обработки опытных данных получают эмпирические формулы – обычно в виде степенных функций.

Недостатки эмпирического моделирования: частный характер получаемых формул, отсутствие в них ясно выраженного физического содержания, необходимость проведения большого числа трудоемких опытов. Однако при проведении многофакторного экстремального эксперимента с использованием автоматизированных систем научных исследований последний недостаток теряет актуальность [5].

При теоретическом моделировании часто используется метод подстановки, при котором сначала определяются параметры качества поверхностного слоя детали в зависимости от режимов ее окончательной обработки резанием, затем для найденных параметров качества рассчитывается интенсивность изнашивания при эксплуатации [1]. Получаемые данным методом формулы обладают большей универсальностью, чем эмпирические, так как справедливы для всего диапазона учитываемых в них параметров и условий, но менее точны и достаточно громоздки.

Наиболее целесообразным является использование метода моделирования физической аналогии процессов окончательной обработки резанием и трения при эксплуатации

деталей машин. Его основные преимущества: возможность теоретического исследования физической природы взаимосвязи исследуемых процессов, наглядные и компактные формулы. Суть данного метода моделирования состоит в следующем.

Подавляющее большинство методов обработки основано на определенной кинематике относительных перемещений инструмента и заготовки при силовом, температурном, химическом или их совместном воздействии на обрабатываемую поверхность [1, 6]. В то же время любая изготовленная деталь имеет определенное функциональное назначение. Наряду с первоначальным позиционированием деталей в сборочной единице, определяемым точностью их размеров, в процессе эксплуатации детали имеют новые кинематику относительных движений, силовое, температурное и химическое воздействия. Это приводит к изменению взаимного положения собранных деталей, потере точности, и, иногда, к разрушению машин [3].

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод об идентичности процессов воздействия на деталь, как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо целенаправленное кинематическое, силовое, температурное и химическое воздействия на детали при изготовлении, исходя из их дальнейшего функционального назначения. Например, для повышения долговечности пар трения необходимо максимально уменьшить их приработку при эксплуатации. Этого добиваются окончательной обработкой деталей, моделирующей ускоренный процесс их приработки, который представляет собой микрорезание и пластические деформации микронеровностей поверхности [3].

В рамках энергетического подхода [2, 7, 8, 9] численным показателем, отражающим параметры процессов физического воздействия на деталь при окончательной обработке резанием и при трении в ходе эксплуатации, служит удельная энергоёмкость w , то есть энергия W , затрачиваемая на удаление единицы объема V материала детали:

$$w = \frac{W}{V}$$

При этом взаимосвязь между удельными энергоёмкостями при трении в ходе эксплуатации поверхностей деталей машин $w_{тр}$ и при их окончательной обработке резанием $w_{рез}$ описывается при помощи однофакторной статистической модели:

$$w_{тр} = b_0 w_{рез}^{b_1}$$

где b_0 и b_1 – коэффициенты.

В системе автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием наиболее целесообразно использовать следующие теоретические зависимости, полученные на основе энергетического подхода [2].

Зависимость величины интенсивности изнашивания I_h поверхностей деталей машин при эксплуатации от условий их механической обработки (продольное точение) определяется по формуле

$$I_h = 0,024 \frac{fN}{\pi db} \left(\frac{st}{P_z} \right)^{1,34}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; N – величина нормальной нагрузки на трущуюся поверхность; d – диаметр трущейся (обрабатываемой) поверхности; b – ширина трущейся (обрабатываемой) поверхности; s – величина продольной подачи резца на один оборот детали; t – глубина резания; P_z – величина касательной составляющей силы резания.

Зависимость величины интенсивности изнашивания I_h поверхностей деталей машин при эксплуатации от условий их механической обработки (круглое шлифование с радиальной подачей) определяется по формуле

$$I_h = 0,08 \frac{fN}{\pi db} \left(\frac{v_b b s_r}{P_z v_{кр}} \right)^{0,92}, \quad (2)$$

где v_b – скорость вращательного движения заготовки; s_r – величина радиальной подачи шлифовального круга на один оборот детали; $v_{кр}$ – скорость шлифовального круга.

Формулы (1) и (2) содержат управляющие факторы (величину подачи, глубину резания и скорость вращения заготовки), с помощью которых реализуется технологическое обеспечение износостойкости поверхностей деталей машин при их окончательной обработке резанием. Эти же формулы используются для адаптивного управления износостойкостью деталей машин при их окончательной обработке резанием на станках с ЧПУ.

Описываемую данными формулами взаимосвязь между удельными энергоемкостями при трении поверхностей деталей машин в ходе эксплуатации и при их окончательной обработке резанием иллюстрирует рис. 2.

Система адаптивного управления износостойкостью деталей машин при их окончательной обработке резанием на станках с

ЧПУ. Необходимость применения адаптивной системы управления износостойкостью обоснована тем, что изменение жесткости технологической системы, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок приводят к рассеянию величины интенсивности изнашивания поверхностей деталей машин при их эксплуатации. Кроме того, для ряда ответственных изделий требуется технологически обеспечивать закономерное изменение величины интенсивности изнашивания на различных участках поверхности детали [4; 10].

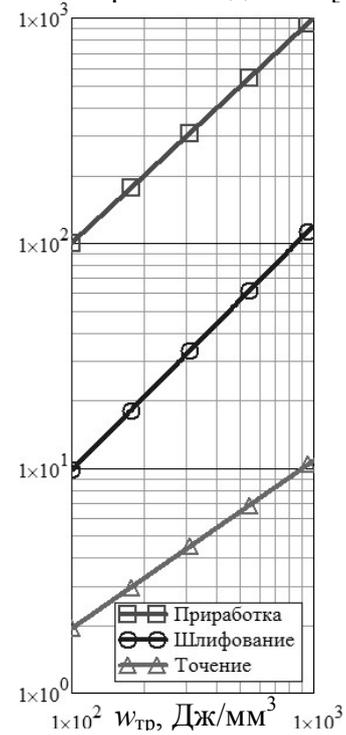


Рис. 2. Взаимосвязь между удельными энергоемкостями при трении поверхностей деталей машин в ходе эксплуатации и при их окончательной обработке резанием

При адаптивном управлении износостойкостью во время окончательной обработки деталей машин резанием на станках с ЧПУ формулы (1) и (2) могут использоваться для косвенной оценки величины интенсивности изнашивания поверхностей при их эксплуатации на основе измерения величины касательной составляющей силы резания.

В состав адаптивной системы управления износостойкостью входят: датчик, измеряющий величину касательной составляющей силы резания; контроллер сопряжения датчика с системой ЧПУ станка; устройство числового программного управления (УЧПУ) станка, реализующее управление технологической системой за счет изменения величины подачи режущего инструмента или скорости враще-

ния заготовки. Обычно УЧПУ станков предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для построения адаптивной системы управления износостойкостью деталей машин на базе УЧПУ необходимо дополнительно использовать ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, реализующим алгоритм адаптивной работы системы.

Заключение

Разработанная система реализует одноступенчатый подход к управлению износостойкостью поверхностей деталей машин, который основывается на объединении задач конструктора и технолога и определении оптимальных методов и режимов окончательной обработки резанием еще на стадии проектирования машин. Применение разработанной системы позволит получить следующие преимущества:

- снизить себестоимость изготовления деталей и обеспечить требуемую их долговечность;
- сократить время и повысить надежность процесса проектирования машин за счет автоматизации;

- выявить непосредственные технологические пути повышения износостойкости деталей машин;

- реализовать научный подход к выбору метода и режимов окончательной обработки деталей машин резанием, обеспечивающих их износостойкость с минимальной технологической себестоимостью;

- реализовать адаптивное управление износостойкостью деталей машин при их окончательной обработке резанием на станках с ЧПУ.

Математическое обеспечение разработанной системы одновременно используется как для технологического обеспечения износостойкости поверхностей деталей машин, так и для адаптивного управления их износостойкостью на станках с ЧПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

2. **Медведев, Д.М.** Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин при механической обработке // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (26). – С. 4–9.

3. **Научно-технические технологии в машиностроении** / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

4. **Петрешин, Д.И.** Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Научно-технические

технологии в машиностроении. – 2012. – № 9 (15). – С. 25–27.

5. **Прудников, М.И.** Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (18). – С. 48–56.

6. **Справочник** технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 2 / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение: Машиностроение-1, 2003. – 943 с.

7. **Суслов, А.Г.** Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 54–58.

8. **Суслов, А.Г., Медведев, Д.М., Шоев, А.Н.** Технологическое повышение долговечности поверхностей трения деталей машин на базе энергетического подхода // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 6. – С. 46–48.

9. **Суслов, А.Г., Медведев, Д.М., Шоев, А.Н.** Энергетический подход к технологическому обеспечению износостойкости поверхностей трения деталей машин // Вестник машиностроения. – 2011. – № 10. – С. 56–58.

10. **Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И.** Автоматизированное обеспечение параметров качества поверхностей, получаемых механической обработкой // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 54–58.

REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

2. Medvedev, D.M. Single-stage technological support of wear-resistance in cylindrical surfaces of machinery at machining // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2010. – No.2(26). – pp. 4-9.

3. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezъazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 528.

4. Petreshin, D.I. Technological support of quality parameters in parts surfaces of machinery under conditions of uncertainty // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.9(15). – pp. 25-27.

5. Prudnikov, M.I. Method of tribotechnical tests of cylindrical friction surfaces // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2008. – No.2(18). – pp. 48-56.

6. *References Book of Technologist-Machinist*: in 2 Vol, Vol.2 / A.M. Dalsky [et al.]; 5-th edition revised. – M.: Mechanical Engineering: Mechanical Engineering-1, 2003. – pp. 943.

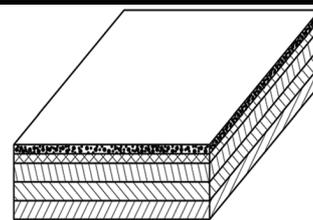
7. Suslov, A.G. Single-stage technological support of wear-resistance in cylindrical surfaces of machine parts // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2010. – No.6. – pp. 54-58.

8. Suslov, A.G., Medvedev, D.M., Shoev, A.N. Technological life increase of in friction surfaces of machine friction parts based on energy approach // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2011. – No.6. – pp. 46-48.

9. Suslov, A.G., Medvedev, D.M., Shoev, A.N. Energy approach to technological support of wear-resistance in friction surfaces of machine parts // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2011. – No.10. – pp. 56-58.

10. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Automated quality parameter support of surfaces obtained by machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2013. – No.4. – pp. 54-58.

Рецензент д.т.н. С.М. Братан



УДК 620.19

DOI: 10.30987/article_5ad8d2928f4af3.41991916

А.С. Тюсенков, к.т.н., **А.В. Рубцов**, к.т.н., **К.А. Мирхайдарова**, магистрант
(ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)
E-mail: anton.tyusenkov@yandex.ru

Исследование жаростойкости труб печей пиролиза

Представлены результаты исследований зависимости скорости газовой коррозии высоколегированных сталей от температуры. Высокая коррозионная стойкость сталей достигается при введении в них легирующих элементов (хром, алюминий, никель). На жаростойкость были испытаны стали 10X23N18 (новый образец и образец из змеевика печи, отработавшего 6800 ч) и 10X17N13M2T при температурах 500...1000 °С.

Ключевые слова: газовая коррозия; печь пиролиза; змеевик; жаростойкость; сталь; массовый показатель коррозии.

A.S. Tyusenkov, Can. Eng., **A.V. Rubtsov**, Can. Eng., **K.A. Mirkhaidarova**, Master degree student
(FSBEI HVE "Ufa State Technical University", 1, Cosmonauts Str., Ufa, 450062)

Pipe high-temperature strength research of pyrolysis furnace

The investigation results of the dependence of high alloy steel gas corrosion rate upon temperature are presented. Steel high corrosion-resistance is achieved at the introduction in steel alloy elements (chromium, aluminum, nickel). Steel 10C23N18 (a new sample and a sample from the furnace coil operated 6800h) and steel 10C17N13M2T at temperatures 500...1000°C were tested for heat-resistance.

Keywords: gas corrosion; pyrolysis furnace; coil, high-temperature strength; steel; corrosion mass index.

В данной статье исследуется зависимость скорости газовой коррозии высоколегированных сталей от температуры. Высокая коррозионная стойкость сталей достигается при введении в их состав элементов, образующих на поверхности тонкие и прочные оксидные пленки. Наиболее эффективными легирующими элементами являются хром, алюминий и никель. Сталь, содержащая данные элементы, становится устойчивой против газовой коррозии при высоких температурах. Стали, содержащие меньшее количество хрома, подвержены газовой коррозии в такой же степени, как и углеродистые стали. На жаростойкость были испытаны стали 10X23N18 и 10X17N13M2T. Установлено, что сталь 10X23N18 более жаростойка по сравнению со сталью 10X17N13M2T. Показано, что жаростойкость стали 10X23N18 снижается после эксплуатации в печи пиролиза и имеет более низкие значения по сравнению с новой сталью. Установлено, что при эксплуатации змеевиков печей пиролиза, изготовленных из стали 10X23N18, при высоких температурах,

происходит снижение их твердости, а значит и прочности.

Технологические процессы современных производств характеризуются высокими значениями температур, нагрузок, давлений и скоростей. Эти условия приводят к тому, что конструкционные элементы оборудования, выполненные из обычных материалов, могут быстро оказаться неработоспособными [1, 2].

Газовая коррозия – химическая коррозия металлов в газовой среде при минимальном содержании влаги (как правило, не более 0,1 %) или при высоких температурах. Указанная проблема характерна для работы многих типов технологического оборудования и деталей (арматура и змеевики печей пиролиза, двигатели, турбины и т.д.). Кроме того, сверхвысокие температуры используются при обработке металлов высоким давлением (нагревание перед прокаткой, штамповкой, ковкой, термическими процессами и т.д.) [3–5].

Пиролиз – процесс термического разложения углеводородного сырья – основной способ по-

лучения низкомолекулярных ненасыщенных олефинов. В промышленных условиях пиролиз углеводородов осуществляют при температурах 800...900 °С и при давлениях, близких к атмосферному (на входе в нагреваемый трубопровод пирозмеевик ~0,3 МПа, на выходе из него – 0,1 МПа избыточного давления). Время прохождения сырья через пирозмеевик составляет 0,1...0,5 с [6, 7].

В настоящее время все большее распространение в нефтехимическом аппаратостроении получают стали, обладающие специфическими свойствами, характеризующиеся высокими значениями твердости, прочности, стойкости против коррозии в различных агрессивных средах. Для обеспечения этих свойств стали легируют различными элементами (Cr, Al, Si, Ni и т.д.). К таким материалам относятся, в том числе, жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы [9].

Методика эксперимента и материалы. На жаростойкость были испытаны стали 10X23H18 и 10X17H13M2T. Образцы из стали 10X23H18 были вырезаны из новой трубы и из змеевика печи пиролиза, отработавшего 6800 ч. Испытания проводили при температурах 500...1000 °С. Для определения скорости коррозии был использован гравиметрический метод, сущность которого заключается в определении потери массы металлических образцов за время их пребывания в испытываемой среде. Скорость газовой коррозии характеризуется массовым показателем K_m^+ (г/м²·ч) – это изменение массы металла ($m_1 - m_2$) в результате коррозии, отнесенное к единице его поверхности (S) в единицу времени (τ):

$$K_m^+ = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot \tau}$$

Химический состав исследуемых образцов представлен в табл. 1.

1. Химический состав исследуемых сталей

Содержание элементов, %	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti
10X23H18 новая	0,05	0,53	1,53	24,43	18,95	-	-
10X23H18 после 6800 ч работы	0,04	0,46	1,50	24,31	18,92	-	-
10X17H13M2T	0,1	0,08	2,00	16,50	13,40	2,10	0,22

Исследования проводили по следующей методике: зачищали образцы исследуемых сталей, производили измерение их размеров, затем

обезжировали поверхность и определяли массу образцов и пустых тиглей. После этого тигли с образцами помещали в муфельную печь, нагретую до заданной температуры, выдерживали при этой температуре 2 ч, извлекали и давали остыть на спокойном воздухе. Измеряли массу образцов после эксперимента и выполняли соответствующие расчеты (рис. 2, 3).

Результаты и обсуждение. Особенности состояния металлов при повышенных температурах обуславливаются двумя их свойствами – жаропрочностью и жаростойкостью. *Жаропрочность* – это степень устойчивости механических свойств металла при сверхвысоких температурах. Под устойчивостью механических свойств понимается сохранение прочности в течение продолжительного времени и сопротивляемости ползучести. *Жаростойкость* (окалиностойкость) – это устойчивость металла к коррозионной активности газов в условиях повышенных температур.

Жаростойкие стали и сплавы характеризуются высокой стойкостью против химического разрушения в ненагруженном и слабонагруженном состояниях в газовых средах при температурах выше 550 °С. Для повышения жаростойкости в состав стали вводят элементы, которые образуют с кислородом оксиды с плотным строением кристаллической решетки (хром, кремний, алюминий).

Степень легированности стали, для предотвращения окисления, зависит от температуры. Влияние хрома на жаростойкость хромистой стали показано на рис. 1.

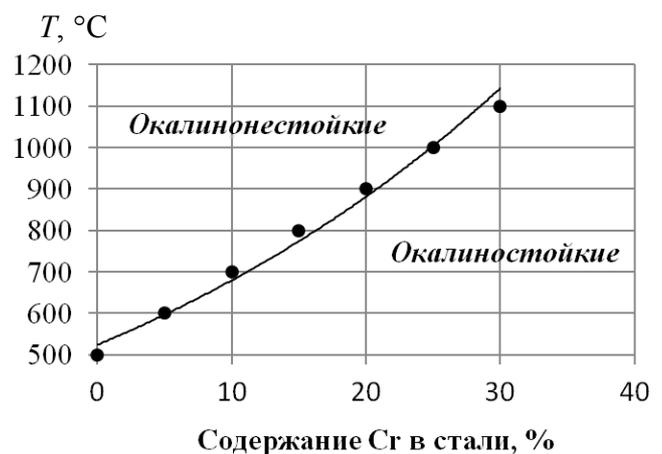


Рис. 1. Влияние хрома на жаростойкость стали

Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

2. Массовые показатели скорости коррозии исследуемых образцов, г/м²·ч

Температура, °С	500	700	800	1000
10X23H18 новая	0,01123	0,05466	0,05647	0,09451
	0,01074	0,05366	0,05805	0,09697
	0,01099	0,05735	0,05997	0,09864
10X23H18 после 6800 ч работы	0,01686	0,05689	0,06894	0,09503
	0,01775	0,05582	0,06474	0,09694
	0,01981	0,05987	0,06586	0,09847
10X17H13M2T	0,05677	0,06282	0,06923	0,11272
	0,05796	0,06319	0,07068	0,11413
	0,05899	0,06438	0,07137	0,11869

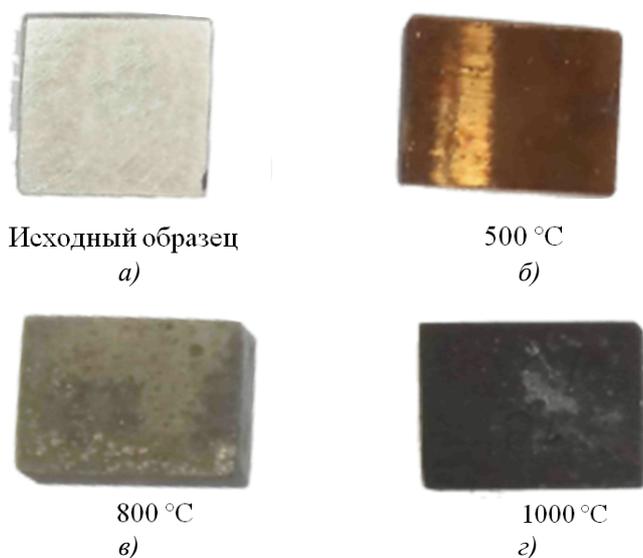


Рис. 2. Внешний вид образцов стали 10X23H18 до и после 2 ч выдержки в печи:

a – исходный образец; *б* – при 500 °С; *в* – при 800 °С; *г* – при 1000 °С

Для всех рассмотренных сталей повышение

температуры приводит к смещению изобарно-изотермического потенциала в положительную сторону, тем самым уменьшает термодинамическую вероятность коррозии. В то же время, высокие температуры увеличивают скорость реакции и ускоряют диффузионные процессы в окисных пленках. Поэтому в целом с увеличением температуры скорость коррозии возрастает.

Твердость является структурной характеристикой материала, ее связь с электронной структурой сложна и неоднозначна. При увеличении температуры твердость материала снижается из-за увеличения подвижности дислокаций и, как следствие, роста пластических деформаций. В табл. 3 представлены результаты определения твердости рассматриваемых сталей в процессе экспериментов.

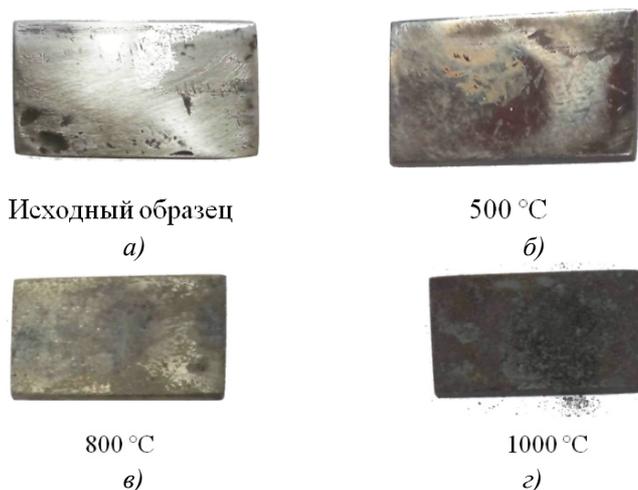


Рис. 3. Внешний вид образцов стали 10X17H13M2T до и после 2 ч выдержки в печи:

a – исходный образец; *б* – при 500 °С; *в* – при 800 °С; *г* – при 1000 °С

3. Твердость исследуемых сталей по Роквеллу (HRC)

T, °С	10X23H18 новая		10X23H18 после 6800 ч работы		10X17H13M2T	
	до эксперимента	после эксперимента	до эксперимента	после эксперимента	до эксперимента	после эксперимента
500	29,46	27,33	17,56	16,9	25,26	20,91
	21,81	21,63	18,21	16,7	24,73	19,67
	25,78	20,19	18,95	17,1	23,96	18,95
700	34,03	25,81	39,83	34,00	26,71	22,6
	31,16	26,94	39,83	28,63	25,13	23,77
	32,45	25,74	38,56	27,98	25,84	23,92
1000	22,81	18,77	26,17	20,95	27,3	20,93
	22,46	13,46	26,20	21,02	26,73	21,00
	21,95	18,46	25,97	19,87	26,51	21,12

Из анализа табл. 3 следует, что твердость стали 10X23H18, отработавшей в печи пиролиза на протяжении 6800 ч, снижается существенно, чем твердость стали предварительно

не эксплуатировавшейся.

Заключение

Установлено, что сталь 10X23H18 более жа-

ростойка по сравнению со сталью 10X17H13M2T. Однако жаростойкость стали снижается после эксплуатации при высоких температурах, так скорость газовой коррозии образцов из стали 10X23H18, изготовленных из трубы змеевика печи пиролиза, отработавшего 6800 ч, оказалась выше по сравнению с образцами из новой стали той же марки в среднем на 14 %.

При работе змеевиков печей пиролиза, изготовленных из стали 10X23H18, при высоких температурах происходит снижение твердости материала, а значит и прочности труб, кроме того, уменьшается стойкость к газовой коррозии. В этой связи для обеспечения безопасной эксплуатации печей пиролиза и другого оборудования, работающего при высоких температурах, необходимо контролировать изменение свойств применяемых сталей и своевременно заменять изношенные детали на новые.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия. 1976. – 404 с.
2. Шлямнев, А.П. и др. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справ. изд. – М.: Интернет Инжиниринг. 2000. – 232 с.
3. Tyusenkov A.S., Rubtsov A.V., Tlyasheva R.R. Heat Resistance of Certain Structural Steels, Solid State Phenomena. 265 (2017). 868–872.
4. Бугай, Д.Е., Латыпов, О.Р., Черепашкин, С.Е. Коррозионностойкие материалы: учебник. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2012. – 197 с.
5. Махутов, Н.А., Чиркова, А.Г., Рубцов, А.В., Наумкин, Е.А., Гайдукевич, У.П. Оценка прочности материала трубы змеевика реакционной печи от действия внутреннего давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – № 1. – С. 58–62.
6. Кравцов, В.В., Латыпов, О.Р., Макаренко, О.А., Ибрагимов, И.Г. Коррозия и защита нефтезаводского и нефтехимического оборудования: учебное пособие. – М.: Химия, 2010. – 344 с.
7. Рубцов, А.В., Наумкин, Е.А., Фахрутдинов, Н.М. Экспертиза промышленной безопасности, техническое диагностирование, разрушающий и неразрушающий контроль на объектах ТЭК // Матер.науч.-практ. конф., 18–19 марта 2015 г., г. Уфа. – 2015. – С. 100–102.
8. Гареев, А.Г., Насибуллина, О.А., Ризванов, Р.Г. Исследование особенностей коррозионного растрескивания под напряжением образца стали X70, отобранного из очаговой зоны разрушения // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 4. – С. 244–248.

REFERENCES

1. Zhuk, N.P. *Theory Course of Corrosion and Metal Protection*. – M.: Metallurgy. 1976. – pp. 404.
2. Shlyamnev, A.P. et al. Corrosion resistant, heat resistant and high-strength steels and alloys: reference edition. – M.: *Intermet Engineering*. 2000. – pp. 232.
3. Tyusenkov A.S., Rubtsov A.V., Tlyasheva R.R. Heat Resistance of Certain Structural Steels, Solid State Phenomena. 265 (2017). 868–872.
4. Bugay, D.E., Latypov, O.R., Cherepashkin, S.E. *Corrosion Resistant Materials: textbook*. – Ufa: Publishing House “Oil-Gas Matter”, 2012. – pp. 197.
5. Makhutov, N.A., Chirkova, A.G., Rubtsov, A.V., Naumkin, E.A., Gaidukevich, U.P. Estimate of pipe coil material strength of reaction furnace at inner pressure impact // *Factory Laboratory. Material Diagnostics*. – 2008. – No.1. – pp. 58-62.
6. Kravtsov, V.V., Latypov, O.P., Makarenko, O.A., Ibragimov, I.G. *Corrosion and Oil Company and Oil-Chemical Equipment Protection: manual*. – M.: Chemistry, 2010. – pp. 344.
7. Rubtsov, A.V., Naumkin, E.A., Fakhruddinov, N.M. Expert examination of industrial safety, technical diagnostics, destructive and non-destructive control at FPC objects // *Proceedings of the Scientific and Pract. Conf. March 18-19, 2015, Ufa*. – 2015. – pp. 100-102.
8. Gareev, A.G., Nasibullina, O.A., Rizvanov, R.G. Peculiarity investigation of corrosion cracking under stress of steel H70 sample selected from focal area of destruction // *Oil-Gas Matter*. – 2015. – Vol.13. – No.4. – pp. 244-248.

Рецензент д.т.н. О.Р. Латыпов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 17.03.2018. Выход в свет 31.05.2018.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Брянский государственный технический университет"
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16