

# Технология Металлов

Ежемесячный производственный,  
научно-технический  
и учебно-методический журнал

**2**  
**2008**

# Технология Металлов

## 2.2008

Ежемесячный производственный, научно-технический и учебно-методический журнал

Издается с июля 1998 г.

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций  
на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических наук

Автор(ы) статьи передает(ют) исключительное право издательству ООО «Наука и технологии» на ее публикацию  
в любой форме в данном журнале и его зарубежных аналогах. Гонорар выплачивается только за русскоязычное издание

*Главный редактор журнала*  
д-р техн. наук С.Б. Масленков  
*Зам. главного редактора*  
д-р техн. наук Б.К. Ушаков  
*Члены редакционной коллегии*  
акад. РАН Банных О.А.  
проф. Гаврилюк В.С.  
докт. техн. наук, проф. Васильев В.А.  
канд. экон. наук Ковалевский М.А.  
акад. РАН Леонтьев Л.И.  
докт. техн. наук, проф. Лялякин В.П.  
докт. техн. наук, проф. Матюнин В.М.  
докт. техн. наук, проф. Резниченко В.А.  
докт. техн. наук, проф. Семенов Б.И.  
докт. техн. наук, проф. Схиртладзе А.Г.  
акад. РАН Счастливец В.М.  
докт. техн. наук, проф. Фетисов Г.П.  
докт. техн. наук, проф. Кохан Л.С.

*Члены редакционной группы*

Атрощенко В.В.; Васильев А.С.; Марченко И.Ф.;  
Морозов А.А.; Прилуцкий А.И.; Ракова Н.Н.;  
Румянцев В.К.; Формаковская А.А.;  
Чертов В.М.; Гаврилов Г.Н.

*Поволжский региональный центр*

Руководитель д-р техн. наук А.К. Тихонов  
Ляченков Н.В.; Выбойщик М.А.; Глинер Р.Е.;  
Гречников Ф.В.; Сидоров В.П.; Большаков С.В.;  
Титуренко С.Г.; Уваров В.В.; Фавстов Ю.К.;  
Яшин Ю.Д.

Адрес центра: 445633, г. Тольятти,  
Южное шоссе, 36

Тел. (8482) 37-6298, 37-8875

*Челябинский региональный центр*

Руководитель  
канд. техн. наук А.К. Ольховацкий  
Гурьянов Ю.А.; Рябчиков И.В.; Ерофеев В.В.;  
Попов Л.М.; Соловьев Н.М.; Шаверг Б.Я.

Адрес центра: 454080, г. Челябинск,  
пр. Ленина, 75, ЧГАУ

Тел.: (3512) 65-5595, 65-5598

За достоверность информации и рекламы  
ответственность несут авторы и  
рекламодатели. При использовании  
материалов журнала в любой форме ссылка  
на журнал "Технология металлов"  
обязательна.

Адрес редакции:  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1  
Тел./факс: (495) 269-49-96,  
(495) 268-36-12

e-mail: admin@nait.ru  
http://www.nait.ru

© ООО "Наука и технологии", 2008

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Резниченко В. А., Гончаренко Т. В. Получение пигментного  
диоксида титана гидрохлоридным способом . . . . . 2

#### ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВ

Горожанин П. Ю., Хотинин В. А., Черных Е. С., Жукова С. Ю.,  
Фарбер В. М. Влияние состава сталей и технологии производства  
на механические свойства насосно-компрессорных и обсадных труб. . . 5

#### МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ; ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Тришкина И. А., Ватник Л. Е., Трыков Ю. П., Гуревич Л. М.  
О восстановлении термической обработкой жаропрочности  
металла печных змеевиков после длительной эксплуатации. . . . . 9

#### СВАРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ; ПАЙКА

Гуреева М. А., Грушко О. Е., Овчинников В. В., Клочков Г. Г.  
Импульсная дуговая сварка алюминиевого сплава В-1341 . . . . . 13

Макиенко В. М., Строителев Д. В., Романов И. О.,  
Верхотуров А. Д. Использование циркониевого сырья для  
сварочных материалов. . . . . 22

#### КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Дун Гоцзюнь, Грубый С. В. Анализ закономерностей процесса  
алмазного точения и точности обработки поверхностей  
металлооптики . . . . . 26

#### НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Семенов Я. С., Лебедев М. П. К технологии поверхностного  
легирования концентрированными потоками энергии. . . . . 33

#### РЕМОНТ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Гадалов В. Н., Серебровский В. В., Емельянов С. Г.,  
Корневский Н. А., Гнездилова Ю. П., Романенко Д. Н. Химико-  
термическое упрочнение электроосажденных сплавов на основе  
железа . . . . . 37

#### ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Суцев А. К. Методы и приборы оперативного контроля  
технологических свойств магнитных порошков . . . . . 40

#### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЙ

Бутусов О. Б., Мешалкин В. П. Компьютерное моделирование  
и управление процессами загрязнения воздушного бассейна  
выбросами промышленных предприятий. . . . . 44

#### СПРАВОЧНИК ИНЖЕНЕРА-ТЕХНОЛОГА

Баурова Н. И. Цианакрилатные клеи . . . . . 52

# Metall Technology 2.2008

Production, scientific-technical and educational methods journal

## Editor-in-Chief

Maslenkov S. B.

## Assistant Editor-in-Chief

Ushakov B. K.

## Editorial Board:

Bannykh O. A.

Gavrilyuk V. S.

Vasiliev V. A.

Kovalevski M. A.

Leontiev L. I.

Lyalyakin V. P.

Matunin V. M.

Reznichenko V. A.

Semenov B. I.

Skhirtladze A. G.

Schastlivcev V. M.

Fetisov G. P.

Kokhan L. S.

OOO "Nauka & Technology",  
4/1, Stromynski per., Moscow,  
107076, Russia.

e-mail: admin@nait.ru

http://www.nait.ru

Tel./Fax: (495) 269-49-96,  
268-36-12

## CONTENTS

### TECHNOLOGIES FOR PRODUCING THE FERROUS AND NON-FERROUS METALS

**Reznichenko, V. A.; Goncharenko, T. V.** Production of pigment dioxide of titanium by hydrochloride method ..... 2

### PLASTIC METALS AND MATERIALS WORKING

**Gorožhanin, P. Yu.; Khotinov, V. V.; Chernykh, E. S.; Zhukova, S. Yu.; Farber, V. M.** Influence of steel compositions and production technology on mechanical properties of the tubing strings and the casing pipes. .... 5

### PHYSICAL METALLURGY; TECHNOLOGIES FOR HEAT TREATMENT AND CHEMICAL HEAT TREATMENT

**Trishkina, I. A.; Vatnik, L. E.; Trykov, Yu.P.; Gurevich, L. M.** About restoring the high-temperature strength of metal of furnace coils after long-term operation by means of heat treatment ..... 9

### THE WELDING TECHNOLOGIES; SOLDERING

**Gureeva, M. A.; Grushko, O. E.; Ovchinnikov, V. V.; Klochkov, G. G.** Pulsed arc welding of aluminium alloy of V-1341 grade ..... 13

**Makienko, V. M.; Stroitelev, D. V.; Romanov, I. O.; Verkhoturov, A. D.** Utilization of zirconium raw materials for the welding materials ..... 22

### COMBINED METHODS OF PROCESSING

**Dong Guojun; Grubiy, S. V.** Study of regularities in process of diamond turning and accuracy of processing the surfaces of metal optics ..... 26

### COATING APPLICATION

**Semenov, Ya.S.; Lebedev, M. P.** To technology for surface alloying with concentrated fluxes of energy ..... 33

### REPAIR AND MODERNIZATION OF EQUIPMENT

**Gadalov, V. N.; Serebrovskij, V. V.; Emel'yanov, S. G.; Korenevskij, N. A.; Gnezdilova, Yu.P.; Romanenko, D. N.** Surface impregnation of electrically deposited alloys on basis of iron ..... 37

### EQUIPMENT AND INSTRUMENTS

**Sushchev, A. K.** Methods and instruments for on-line monitoring of technological properties of magnetic powders ..... 40

### SAFETY ENGINEERING

**Butusov, O. B.; Meshalkin, V. P.** Computer-aided modelling and control of processes of atmosphere contamination with emissions of industrial enterprises ..... 44

### REFERENCE BOOK OF INDUSTRIAL ENGINEER

**Baurova, N. I.** Cyanacrylate adhesives ..... 52

# Анализ закономерностей процесса алмазного точения и точности обработки поверхностей металлооптики

ДУН ГОЦЗЮНЬ\*<sup>1</sup> (DONG GUOJUN), С. В. ГРУБЫЙ\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Технологический институт г. Харбин, КНР

\*<sup>2</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана

**Т**радиционным методом чистовой обработки металлооптических элементов является шлифование и окончательное полирование свободным абразивом. По существу, этот метод основан на взаимном притирании инструмента и детали через слой абразивной суспензии. Предельно высокая точность обработки в этом случае достигается за счет многократной правки полировальника и перенастройки станка и во многом зависит от квалификации полировщика. Помимо этого на качество поверхностного слоя отрицательно влияет шаржирование микрометрическими абразивными частицами и загрязнение поверхности полировальным составом. Трудоемкость полирования значительно возрастает при обработке крупногабаритных и в особенности асферических металлооптических поверхностей.

Начиная с 70-х годов XX в. находит развитие и применение метод особо точной лезвийной обработки — алмазное точение (АТ), как метод автоматизированной обработки поверхностей металлооптики алмазным природным монокристаллическим инструментом на специальных станках. Основное преимущество метода заключается в существенном увеличении производительности по сравнению с традиционным методом, в особенности при обработке крупногабаритных, асферических поверхностей и металлических зеркал сложной формы. Поверхностный слой после АТ имеет повышенное качество и лучшее металлографическое состояние, чем полированный, а оптическое состояние — более высокий порог разрушения под действием лазерного излучения.

Имеют место многочисленные литературные данные по эффективной обработке АТ изделий диаметром до 2000 мм и массой до 700 кг с поверхностями различных форм: осесимметричных

плоских, сферических и асферических; внеосевых параболических; асимметричных тороидальных, гиперболических, эллипсоидных, а также используемых в резонаторах лазеров большой мощности элементов конической оптики — линейных аксиконов и ваксиконов [1]. Сообщается, что при АТ даже крупногабаритных металлооптических элементов достигается точность обработки от 0,5 до 0,025 мкм со средней квадратической величиной микронеровностей < 10 нм.

Сложной технической проблемой при использовании метода АТ в оптико-механической промышленности является создание специальных особо точных станков, реализующих возможности метода, и инженерного обеспечения по термостабилизации, вибро- и шумоизоляции, тонкой очистке технологических и окружающей сред. Эти задачи успешно решаются станкостроительными фирмами в ряде промышленно развитых стран мира. В России накоплен большой положительный опыт по созданию таких станков, проведению теоретических, экспериментальных, технологических исследований процесса АТ при обработке плоских, сферических и асферических металлооптических поверхностей диаметром до 1500 мм. В последнее время (2002—2007 гг.) возобновлены усилия российского станкостроения по созданию таких станков нового поколения. Так, на ОАО "Красный пролетарий" разработаны опытные образцы специальных токарных станков особо высокой точности с УЧПУ мод. МК6510, МК6523, которые предназначены для высокопроизводительной обработки деталей гироскопов, авиационных двигателей, пневмо- и гидроаппаратуры, отражателей.

Значительный интерес к рассматриваемой проблеме, а также развитие станков и технологии алмазного точения имеют место в Китае. Там используют как зарубежные, так и станки собственной конструкции для обработки металлооптических элементов различного назначения и проведения научных исследований. Так, можно отметить полученные результаты экспериментальных исследований сил резания, приведенные в работе [2]. Эксперименты проведены на токарном станке мод. НСМ, который имеет точность позиционирования суппорта 0,01 мкм, погрешность линейного перемещения суппорта 0,13 мкм на 100 мм длины, погрешность вращения шпинделя  $\pm 0,1$  мкм. Обработывали образцы-отражатели из алюминиевого сплава резцом из монокристалла природного алмаза фирмы Contour Fine Tooling. Геометрические параметры резца составили (передний угол, задний угол, радиус при вершине, радиус округления кромки):  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $r = 1,5$  мм,  $\rho = 0,19$  мкм. Пьезоэлектрическим динамометром Kistler измеряли главную составляющую силы резания  $F_c$  (по направлению скорости резания) и составляющую  $F_t$  по нормали к обрабатываемой поверхности. Эксперименты проводили острым резцом в диапазоне подач 1...25 мкм/об и глубин резания 1...16 мкм. Во всех опытах составляющие силы резания были  $< 0,7$  Н. Для подач  $< 10$  мкм/об и глубин  $< 10$  мкм составляющие силы резания были  $< 0,35$  Н.

Такая малая величина сил резания не означает, что динамическими явлениями в процессе АТ можно пренебречь, так как к допустимой погрешности формы оптической поверхности предъявляются чрезвычайно жесткие требования, составляющие  $\lambda/10 \dots \lambda/20$  и менее длины волны падающего лазерного излучения. Такие требования сложно выполнить, особенно при обработке протяженных поверхностей, когда дополнительно накладываются погрешности, связанные с износом и тепловыми деформациями резца. Например, в работе [3] изучен износ алмазного резца, силы, шероховатость обработанной поверхности при точении заготовок с никелевым покрытием в диапазоне глубин резания 2...10 мкм, подач 2...50 мкм/об. Показано, что с увеличением пути резания до 200 км величина площадки износа резца составляет  $> 4$  мкм. В работе [4] подтверждено, что величина износа алмазного резца может составлять  $> 8$  мкм, и экспериментально получена степенная зависимость для условий алмазного точения медных

поверхностей, связывающая путь резания и величину площадки износа по задней поверхности, а также предложена методика для расчета теплового удлинения резца, оказывающего существенное влияние на погрешность обработки. При обработке прерывистых металлооптических поверхностей интенсивность изнашивания алмазного резца существенно возрастает, что нашло экспериментальное подтверждение в работе [5]. Из проведенного анализа следует, что экспериментальное и теоретическое изучение процесса и сопутствующих явлений позволит определить условия, обеспечивающие минимальную погрешность обработки при АТ.

АТ характеризуется чрезвычайно малыми толщинами и площадью срезаемого слоя. На рис. 1 показано, что резец с радиусом при вершине  $r$  имеет переменное значение толщины среза по элементарным участкам на режущей кромке. Расчетные значения толщины среза по участкам, заданным соответствующей глубиной  $t_i$  на главной кромке и  $t_j$  на вспомогательной кромке, показаны в виде графиков на рис. 2. Если принять величину радиуса округления кромки  $\rho = 0,1$  мкм, то срезать стружку будет только главная кромка на участке левее точки 1 (см. рис. 1). Для того чтобы в резании участвовали вся главная кромка и большая часть вспомогательной кромки, радиус округления должен составлять  $\rho = 0,01$  мкм. Су-

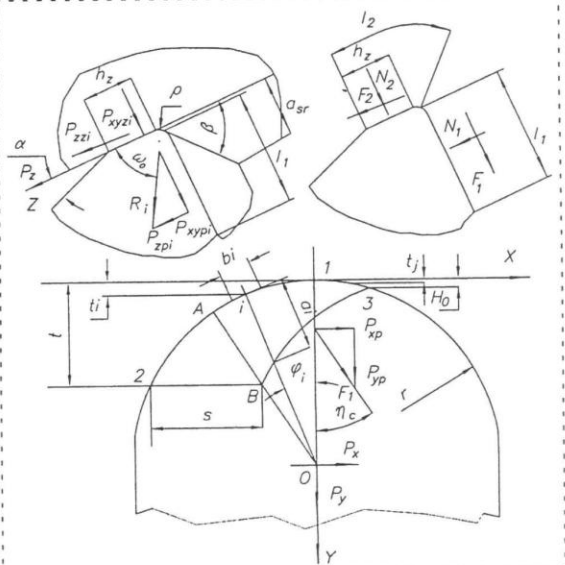


Рис. 1. Схема срезаемого слоя и сил резания при АТ

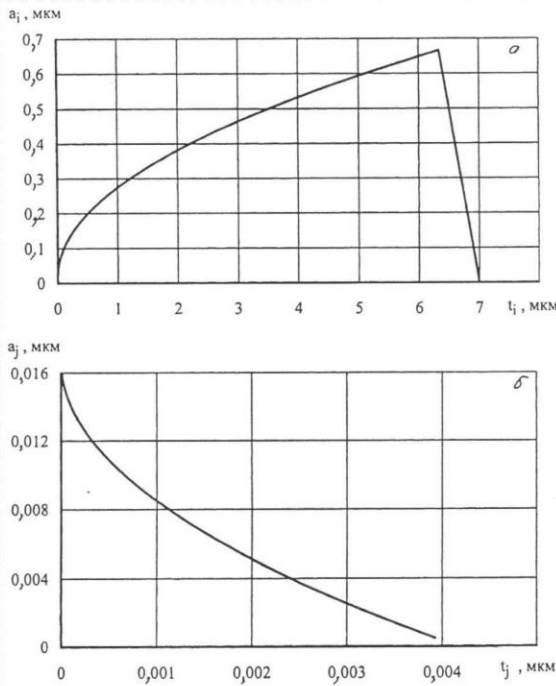


Рис. 2. Изменение толщины среза вдоль режущей кромки ( $t = 7$  мкм;  $s = 7$  мкм/об,  $r = 1,5$ ):  
 а — главная; б — вспомогательная кромка

для по литературным данным, радиус округления режущей кромки природных монокристаллических алмазных резцов для различной ориентации кристаллов и при тщательной доводке лезвия составляет  $\geq 0,03$  мкм.

Силы резания рассчитаны по элементарным участкам, равномерно распределенным вдоль режущей кромки. На рис. 1 показан участок кромки шириной  $b_p$ , заданный соответствующей глубиной  $t_i$  и углом в плане  $\varphi_i$ , и соответствующие силы:  $P_{xyi}$ ,  $P_{zpi}$  (на передней поверхности);  $P_{xyi}$ ,  $P_{zpi}$  (на задней поверхности). В расчетах использовано постоянное значение вдоль кромки угла сдвига  $\beta$ , угла действия  $\omega_0$  и известные значения касательных напряжений  $\eta$  в условной плоскости сдвига [6]. Отмеченные силы раскладываются в направлении осей системы координат  $XYZ$ , а их суммы по участкам дают составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . Равнодействующая силы резания на передней поверхности  $F_1$  определяет угол схода стружки  $\eta_c$  относительно оси  $Y$ . Силы резания, действующие в плоскости схода стружки,  $F_1$ ,  $N_1$  (на передней поверхности)

1. Характеристики резания при АТ алюминиевой поверхности

Характеристика	$s$ , мкм/об				
	3	5	7	9	15
$a_{sr}$ , мкм	0,19	0,31	0,42	0,53	0,83
$\eta_c$ , град	4,1	4,0	4,0	3,9	3,7
$P_z$ , мН	50	75	98	120	180
$P_y$ , мН	48	64	79	93	129
$P_x$ , мН	3	4	5	6	8

и  $F_2$ ,  $N_2$  (на задней поверхности) использованы для расчета температуры резания по методике А. Н. Резникова.

Расчетные значения характеристик резания для неизношенного резца ( $h_z = 0$ ) в зависимости от значений подачи приведены в табл. 1 ( $t = 7$  мкм,  $r = 1,5$  мм,  $\rho = 0,1$  мкм). Как следует из приведенных данных, средние толщины срезаемого слоя  $a_{s,r}$  находятся в пределах десятых долей микрометра, силы резания — десятых и сотых долей ньютона, угол схода стружки имеет малую величину, что приближает рассмотренные условия к схеме свободного прямоугольного резания.

С увеличением пути резания увеличивается износ резца, что приводит к увеличению составляющих силы, а также к изменению температуры резания. Например, для условий торцевого точения алюминиевого диска радиусом  $R_d = 500$  мм при движении резца от периферии к центру выполнены расчеты характеристик резания (путь резания, величина износа резца, составляющие силы, температура), результаты которых в зависимости от текущего радиуса обработки  $R_0$  приведены в табл. 2. Исходные данные приняты следующими: глубина  $t = 7$  мкм, подача  $s = 5$  мкм/об, частота вращения шпинделя  $\omega = 150$  мин<sup>-1</sup>, радиус при вершине  $r = 3$  мм, радиус округления кром-

2. Изменение характеристик резания в зависимости от текущего радиуса обработки протяженной алюминиевой поверхности

Характеристика	$R_0$ , мм					
	499,9	400	300	200	100	50
$L$ , км	0,06	56,5	100,5	131,9	150,8	155,5
$h_z$ , мкм	0,1	3,7	5,0	5,8	6,2	6,3
$P_z$ , мН	86	110	123	133	143	147
$P_y$ , мН	75	276	351	395	421	428
$P_x$ , мН	4	12	16	18	19	19
$T_p$ , °C	71	52	49	45	40	36

ки  $\rho = 0,05$  мкм. Путь резания составляет  $> 150$  км, величина износа резца  $> 6$  мкм, наиболее существенно возрастает радиальная составляющая силы резания  $P_y$  в связи с увеличением износа. Температура резания уменьшается с  $70^\circ\text{C}$  в периферийной зоне до  $36^\circ\text{C}$  в центральной, что связано с уменьшением скорости резания.

При анализе тепловых деформаций инструмента принято допущение, что термоупругие напряжения в рабочей части резца пренебрежимо малы и взаимовлияние термоупругих перемещений инструментального материала в различных направлениях несущественно. Тогда основное изменение размеров рабочей части резца происходит по закону линейного расширения. Закон распределения температуры по длине инструмента в момент времени  $\tau$  составит

$$\Theta(y, \tau) = T_p f(y, \tau), \quad (1)$$

где безразмерная функция, характеризующая закон распределения температуры по длине инструмента  $y$ , имеет вид [6]:

$$f(y, \tau) = \exp\left[-\frac{y^2}{4\omega_p\tau}\right] - \frac{y\sqrt{\pi}}{\sqrt{4\epsilon_p\tau}} \left(1 - \operatorname{erf}\left[\frac{y}{\sqrt{4\omega_p\tau}}\right]\right),$$

$\omega_p$  — коэффициент температуропроводности инструментального материала;  $\tau$  — время, прошедшее с начала процесса резания;  $T_p$  — температура резания.

На рис. 3 показана схема алмазного резца, жестко закрепленного в державке с вылетом  $l = h_1 + h_2$ . Тогда общее удлинение рабочей части резца в момент времени  $\tau$  составит:

$$d_t = \alpha_e T_p \int_0^l f(y, \tau) dy, \text{ или} \\ d_t = -\alpha_e T_p I(F_0)(h_1 + h_2), \quad (2)$$

где функция  $I(F_0) = \int_0^l f(\psi, F_0) d\psi$  задана графиком в работе [6];  $\psi = y/l$  — безразмерная длина;

$F_0 = \frac{\omega_p\tau}{l^2}$  — критерий Фурье;  $\alpha_e = \frac{h_1 + h_2}{h_1/\alpha_p + h_2/\alpha_d}$  —

эквивалентный коэффициент линейного расширения для алмаза и материала державки (в знаменателе использованы соответствующие коэффициенты для алмаза и стальной державки);  $h_1$  — длина алмаза;  $h_2$  — длина державки от опоры до

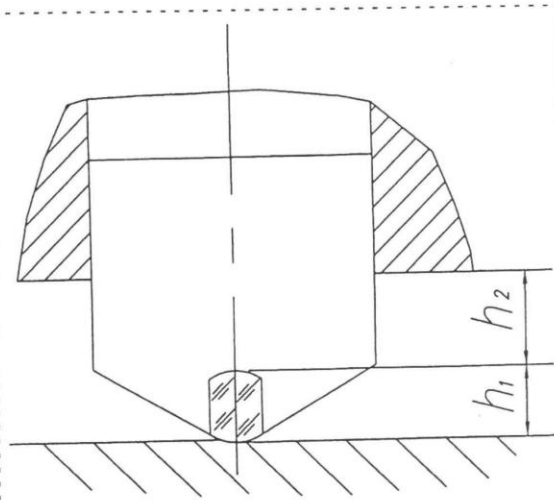


Рис. 3. Схема для расчета теплового удлинения алмазного резца

алмаза;  $\tau = \frac{R_d - R_0}{v_s} \cdot 60$  — текущее время;  $v_s$  —

скорость подачи, мм/мин. Анализ величины тепловой деформации алмазного резца показывает, что она может составлять существенное значение при обработке протяженной поверхности.

При анализе общего макроотклонения обработанной поверхности  $d_{st}$  учтены составляющие: деформация технологической системы под действием радиальной составляющей силы  $q_{st} = Py/j$ , где  $j$  — жесткость технологической системы;  $h_r$  — радиальный износ резца;  $d_t$  — тепловая деформация (удлинение) резца. В табл. 3 приведены значения составляющих и общей погрешности обработки  $d_{st}$  в зависимости от текущего радиуса для условий АТ, принятых для табл. 2. Установлено преобладающее влияние радиального износа и теплового удлинения резца на погрешность обработки при принятой же-

3. Изменение составляющих и погрешностей АТ поверхности диаметром 1000 мм

Характеристики	$R_0$ , мм					
	499,9	400	300	200	100	50
$q_{st}$ мкм	0,004	0,014	0,018	0,020	0,021	0,021
$h_r$ мкм	0,01	0,45	0,61	0,71	0,76	0,78
$d_t$ мкм	-0,85	-0,62	-0,58	-0,54	-0,48	-0,43
$d_{st}$ мкм	-0,83	-0,16	0,05	0,19	0,31	0,37

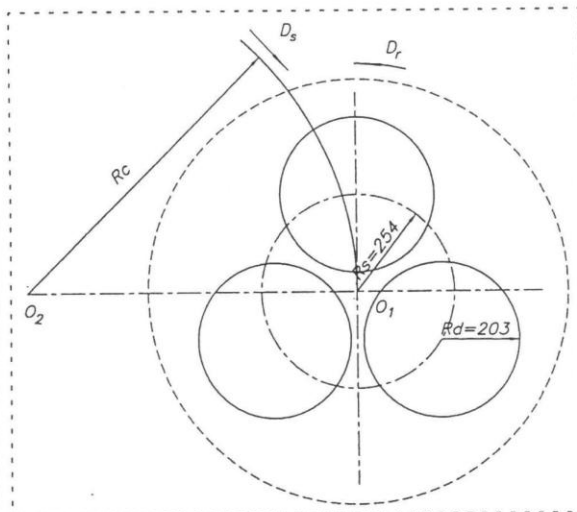


Рис. 4. Схема расположения деталей на планшайбе станка при прерывистом характере АТ

сткости технологической системы  $j = 20$  Н/мкм (размеры вылета державки и длины алмаза по схеме рис. 3 составляли  $h_1 = 4$  мм,  $h_2 = 4$  мм).

На основании проведенного анализа отмечена возможность достижения высокой точности обработки протяженных поверхностей (в приведенном примере общая погрешность поверхности диаметром 1000 мм от периферии к центру составляет 1,2 мкм).

Процесс резания при прерывистом характере обработки имеет особенности, оказывающие существенное влияние на макроотклонения обработанной поверхности. Количественный анализ проведен для случая внеосевого расположения трех деталей радиусом  $R_d = 203$  мм на планшайбе станка как показано на рис. 4. Рассмотрен общий случай колебания технологической системы с одной степенью свободы около положения устойчивого равновесия, когда на приведенную массу действуют силы: возмущающие, восстанавливающие и сопротивления. Под возмущающей силой понимается сила резания, действующая во время контакта резца с обрабатываемой поверхностью. Переходные процессы во время врезания и выхода резца из контакта с заготовкой несущественны в связи с малыми величинами снимаемого припуска и сечения срезаемого слоя.

Уравнение колебаний, вызванных постоянной обобщенной силой, приложенной к системе и

действующей в течение некоторого промежутка времени  $\tau$  контакта резца с заготовкой, имеет вид

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + jq = P_y(\tau)$$

$$\text{или } \ddot{q} + 2n\dot{q} + k^2q = \frac{1}{m}P_y(\tau), \quad (3)$$

где  $m = \frac{j \cdot 10^6}{k^2}$  — коэффициент инерции (приведенная масса);  $b$  — коэффициент диссипации;  $k$  — частота собственных колебаний;  $n = \xi k$  — коэффициент затухания (диссипации) или  $2n = b/m$ ;  $\xi$  — коэффициент. Для обработки деталей по схеме рис. 4 частота круговых колебаний будет составлять  $\omega_d = \frac{\pi \omega k_d}{30}$ , где  $\omega$  — частота

вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $k_d = 3$  — число деталей на планшайбе. Уравнения (3) имеют общий характер для различных вариантов прерывистой обработки.

В соответствии с технологической схемой обработки  $k_d$  деталей расположены на планшайбе станка, центры деталей находятся на радиусе  $R_s$  относительно центра вращения. Вращение планшайбы задает главное движение резания  $D_r$ , движение подачи  $D_s$  имеет резец по дуге окружности радиуса  $R_c$ .

Общая схема действия импульсов сил и деформаций технологической системы при контакте резца с каждой заготовкой приведена на рис. 5. Начальные условия по деформации и скорости деформации приведенной массы имеют вид:  $q(0) = 0$ ;  $\dot{q}(0) = 0$  — на первом импульсе;  $q(t_1) = q_1$ ;  $\dot{q}(t_1) = \dot{q}_1$  — на последующих импульсах, когда возмущающая сила начинает действовать в момент времени  $t_1$ , равном периоду на текущем радиусе обработки  $R_0$ . Общее решение дифференциального уравнения (3) в случае малого сопротивления найдены по известным из теории колебаний соотношениям.

Расчетные значения деформаций технологической системы за время периода для различных значений текущего радиуса обработки показаны на рис. 6. Исходные данные для расчетов были приняты: глубина резания  $t = 7$  мкм, подача  $s = 5$  мкм/об, частота вращения шпинделя станка  $\omega = 500 \text{ мин}^{-1}$ , коэффициент  $\xi = 0,03$ , жесткость  $j = 20$  Н/мкм, приведенная масса  $m = 800 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ . Для этих условий значения частот колебаний составили,  $\text{с}^{-1}$ : круговых  $\omega_d = 157,08$ , собственной  $k = 158,11$ . Таким образом, при близких значениях частот колебаний деформации технологи-

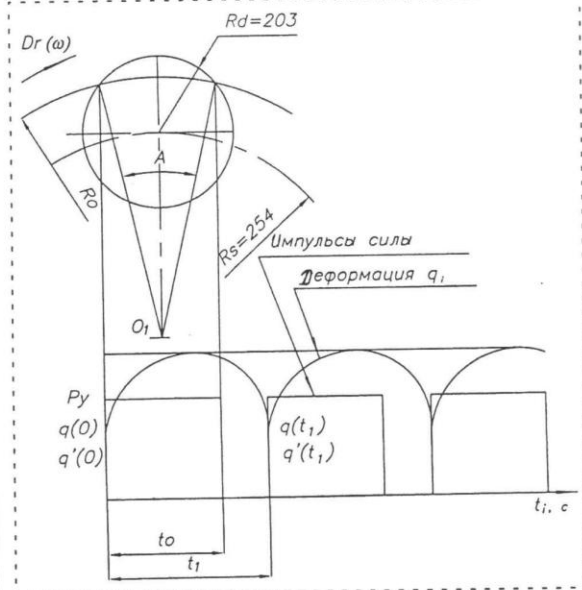


Рис. 5. Схема импульса сил и деформаций технологической системы при прерывистом характере АТ

ческой системы могут составить существенные значения (на каждом графике первые десять точек отражают деформацию по поверхности детали, остальные десять — вне поверхности). Для текущего радиуса обработки  $R_0 = 60$  мм деформации изменяются от  $-200$  до  $+220$  нм, т. е. дают суммарную погрешность  $420$  нм.

Деформации технологической системы могут быть существенно снижены, когда частоты круговых колебаний и собственной различаются. Последнее проиллюстрировано на графиках рис. 7, где показаны деформации технологической системы на одном текущем радиусе  $R_0 = 60$  мм и для различных соотношений частот колебаний. Соответствующее изменение собственной частоты колебаний технологической системы для заданной жесткости может быть достигнуто при изменении приведенной массы.

Общее макроотклонение обработанной поверхности для условий прерывистой обработки также учитывает радиальный износ и тепловую деформацию резца. На рис. 8 приведены графики, показывающие изменение составляющих погрешности АТ поверхностей рис. 4 при движении резца от периферии к центру в зависимости

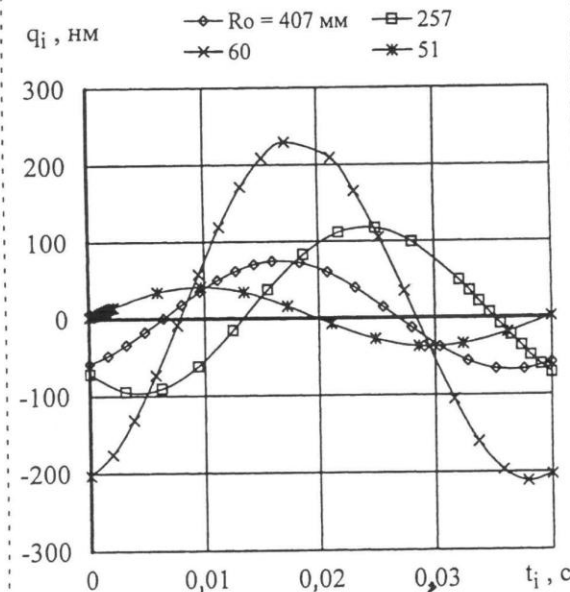


Рис. 6. Деформации технологической системы для различных значений текущего радиуса обработки

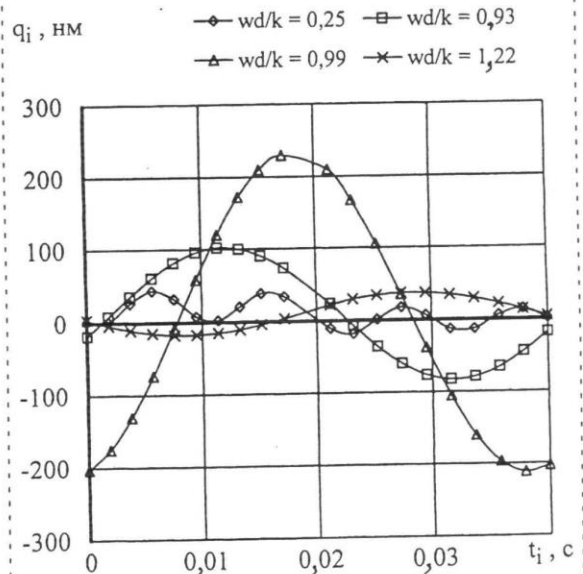


Рис. 7. Деформации технологической системы для различных соотношений частот колебаний

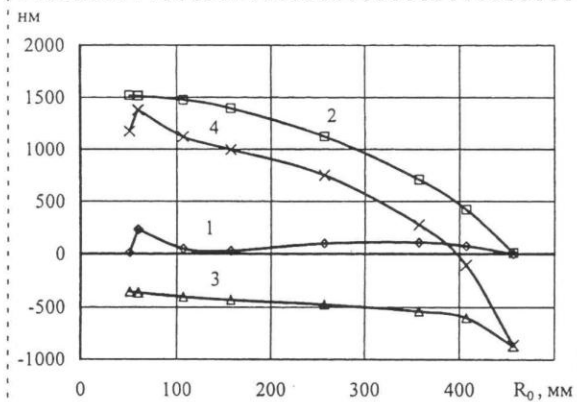


Рис. 8. Изменение составляющих и общей погрешности обработки алюминиевой поверхности при прерывистом характере АТ:

1 — деформация технологической системы; 2 — радиальный износ; 3 — тепловое удлинение резца; 4 — общее макротоклонение

от текущего радиуса обработки: деформацию системы  $q$  (1), радиальный износ резца  $h_r$  (2), тепловую деформацию  $d_t$  (3), суммарное отклонение  $d_j$  (4). Графики рассчитаны для условий рис. 6. Здесь общая погрешность обработки по всей поверхности составляет  $N = |d_{j,\min}| + d_{j,\max} = 2255$  нм, причем следует отметить существенный вклад радиального износа и тепловой деформации резца.

Анализ показывает, что общее макротоклонение обработанной поверхности может быть несколько снижено при увеличении демпфирующей способности технологической системы. Связь погрешности обработки с коэффициентом, характеризующим диссипацию в технологической системе, показана ниже.

Коэффициент $\xi$ , ...	0,005	0,01	0,03	0,05	0,07
$N$ , нм	2875	2601	2255	2170	2131

При выбранном коэффициенте диссипации и приведенной массе ( $\xi = 0,03$ ,  $m = 50$  Н · с<sup>2</sup>/м) жесткость технологической системы изменяет соотношение частот колебаний и оказывает существенное влияние на общую погрешность обработки. Влияние жесткости на погрешность обработки показано ниже.

$j$ , Н/мкм	0,2	0,5	1	1,2	1,4
$\omega_d/k$	2,49	1,57	1,11	1,01	0,94
$N$ , нм	3805	2826	3005	6612	3640
$j$ , Н/мкм	2	5	10	20	50
$\omega_d/k$	0,79	0,5	0,35	0,25	0,16
$N$ , нм	2512	2544	2144	2112	2054

На основании проведенного анализа разработаны технологические рекомендации, направленные на повышение эффективности алмазного точения, в том числе протяженных и асферических металлооптических поверхностей. Например, реализована обработка одновременно трех внеосевых параболических алюминиевых зеркал по схеме рис. 4. Интерферометрический аттестационный контроль изделий позволил провести оценку величины макротоклонений формы отражающей поверхности, которая составила ~3,95 мкм на полном световом диаметре зеркал.

По результатам проведенных технологических исследований намечены пути снижения макротоклонений обработанных АТ металлооптических поверхностей: рациональный выбор параметров, характеризующих технологическую систему; использование кристаллов алмазов повышенного качества и размеров, обеспечивающих повышение износостойкости алмазных резцов и снижение величины радиального износа инструмента; применение материалов и конструкций инструмента, обеспечивающих снижение тепловых деформаций; управление режимными параметрами и коррекция текущей погрешности приводом резцовой головки в режиме реального времени.

Список литературы

1. Попов Л. В., Любарский С. В., Соболев В. Г., Шевцов С. Е. Алмазное точение в производстве оптических деталей / Оптико-механическая промышленность. 1990. № 11. С. 12—17.
2. Wang Hongxiang, Sun Tao, Zhang Longjiang. Experimental Research on Cutting Force in Ultra — precise Turning // China Academic Journal Electronic Publishing House. 2003. V. 37. N 5. P. 10—12.
3. Cutting performance of diamond tools during ultra-precision turning of electroless-nickel plated die materials / Pramanik A., Neo K., Rahman M. / Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 140. P. 308—313.
4. Добровольский Г. Г., Дятлов Ю. А. Точность формы изделий при алмазном микроточении / Сверхтвердые материалы. 1990. № 4. С. 58—62.
5. Грубый С. В., Татьяна Н. А. Исследование и применение кристаллов природных алмазов и резцов повышенной износостойкости / Вестник машиностроения. 1997. № 4. С. 19—23.
6. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
7. Грубый С. В. Выбор условий алмазного микроточения крупногабаритных поверхностей / Вестник машиностроения. 1994. № 11. С. 40—43.
8. Грубый С. В. Сверхточная токарная обработка крупногабаритных поверхностей / Технология металлов. 2000. № 3. С. 13—18.