



# ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



5/2015

УДК 621.941.1

В. В. ЛАПШИН (ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ"), С. В. ГРУБЫЙ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана),  
e-mail: vasylap@mail.ru, grusv@yandex.ru

## Повышение точности и качества алмазной лезвийной обработки плоских поверхностей<sup>1</sup>

Исследованы точность и качество обработки плоских алюминиевых поверхностей алмазным монокристаллическим инструментом и динамика аэростатического шпинделя. Установлено определяющее влияние тепловой деформации и износа алмазного монокристаллического резца на погрешность обработки, рассчитана ее величина. Определен режим обработки поверхностей оптических деталей, в частности из монокристаллического кремния.

**Ключевые слова:** точение, алмазный резец, аэро-статический шпиндель, сверхточная обработка, погрешность, качество обработанной поверхности.

The accuracy and quality of processing of plane aluminum surfaces by diamond monocrystalline tool and dynamics of an aerostatic spindle are investigated. The principal influence of heat deformation and wear of diamond monocrystalline cutter on processing error is determined, the value of the error is calculated. The processing mode of surface of optical parts, in particular, made from monocrystalline silicon, is determined.

**Keywords:** turning, diamond cutter, aerostatic spindle, extremely-accuracy processing, error, quality of processed surface.

Сверхточную (ультрапрецизионную) лезвийную обработку применяют при изготовлении оптических элементов. Для получения обработанной поверхности с параметром шероховатости  $Ra < 0,01$  мкм и погрешностью формы менее 1 мкм используют сверхточное оборудование высокой жесткости и алмазный монокристаллический инструмент с радиусом скругления режущей кромки менее 50 нм.

При выборе технологии изготовления плоских металлических зеркал, входящих, например, в состав радиационных космических холодильников, которые используют в системах дистанционного зондирования поверхности Земли, главными являются точность и качество обработки.

С целью поиска путей совершенствования ультрапрецизионной лезвийной обработки был проведен анализ публикаций в области моделирования и экспериментальных исследований. В работе [1] по обработке электролитического никеля приведены данные по изнашиванию задней поверхности резца, в частности установлено, что износ резца составляет 4 мкм на пути резания 200 км. При этом путь резания незначительно влияет на шероховатость обработанной поверхности. Определена зависимость шероховатости от подачи  $S_{об}$  инструмента: при подаче за один оборот  $S_{об} = 10$  мкм/об параметр шероховатости обработанной поверхности составил  $Ra = 0,007$  мкм, при  $S_{об} = 50$  мкм/об —  $Ra = 0,025$  мкм.

В работе [2] исследовали шероховатость поверхности композита Al6061/SiC<sub>p</sub> при разных режимах обработки:  $S_{об} = 2,5 \div 8$  мкм/об, глубина резания  $t = 1 \div 5$  мкм. В испытаниях использовали резец с радиусом скругления вершины 0,76 мм и отрицательным передним углом, который составлял 25°. Экспериментально установлено, что при частоте вращения шпинделя  $n = 5000$  мин<sup>-1</sup>,  $S_{об} = 6$  мкм/об и  $t = 1$  мкм параметр шероховатости поверхности составил  $Ra = 0,040$  мкм, а при  $n = 8000$  мин<sup>-1</sup>,  $S_{об} = 4$  мкм/об и  $t = 3$  мкм —  $Ra = 0,020$  мкм.

В работе [3] разработана динамическая модель аэростатического шпинделя, позволяющая оценить шероховатость поверхности с учетом динамической вибрации шпинделя при обработке. Выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных показателей шероховатости при прерывистой обработке медной поверхности при следующих параметрах:  $n = 4000 \div 4900$  мин<sup>-1</sup>,  $S_{об} = 20$  мкм/об,  $t = 5, 10$  и 20 мкм; использовали алмазный резец с радиусом скругления вершины  $R = 0,62$  мкм. Установлено, что шероховатость поверхности практически не зависит от частоты вращения шпинделя. При  $t = 5$  мкм экспериментальный параметр шероховатости составил  $Rz = 0,06$  мкм, а расчетный —  $Rz = 0,040$  мкм, т. е. моделированием можно установить шероховатость обработанной поверхности при сверхточной обработке.

В работе [4] исследовали шероховатость поверхности при обработке фосфор-бронзового сплава

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Соглашения № 14.579.21.0042 от 25.08.2014 (уникальный идентификатор RFMEFI57914X0042) между ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" и Министерством образования и науки РФ по теме "Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания".

Влияние подачи на расчетные параметры при чистовой обработке отражателя по схеме, представленной на рис. 1

$S_{об}$ , мкм/об	$L$ , км	$R_{max}$ , $10^{-3}$ мкм	$Ra$ , $10^{-4}$ мкм
1	19,4	24	70
2	9,7	29	74
4	4,8	36	80
6	3,2	42	90
8	2,4	47	94
12	1,6	55	97
14	1,4	58	100

при продольной подаче  $S = 1 \div 30$  мм/мин и  $t = 1; 5; 10$  мкм; использовали алмазные резцы с радиусами скругления вершины  $R = 1,02; 0,52$  и  $0,23$  мм. Получена зависимость

$$Ra = \sqrt{Ra_1^2 + (0,00665)^2}, \quad (1)$$

где  $Ra_1 = 0,032 S_{об}^2 / R$  — "кинематическая" шероховатость.

Установлено, что при  $S < 10$  мм/мин можно получить  $Ra = 0,010$  мкм. Минимальная шероховатость поверхности ( $Ra = 0,0059$  мкм) получена при  $n = 800$  мин $^{-1}$ ,  $S = 1$  мм/мин и  $R = 0,52$  мм.

Модель, представленная в работе [5], описывает рельеф поверхности после обработки, учитывает микропластичность материала и динамику процесса. Эксперименты проводили на монокристаллах алюминия с разной кристаллографической ориентацией. В качестве инструмента использовали алмазный резец с радиусом скругления вершины  $2,012$  мм;  $n = 2000$  мин $^{-1}$ , подача  $S_{об} = 10$  мкм/об,  $t = 5$  мкм; параметр шероховатости обработанной поверхности составил  $Ra = 0,017$  мкм.

Исследования показали, что одной из причин погрешностей обработки является вибрация шпинделя.

В ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" совместно с ООО "Ресурс точности" разработаны аэростатические шпиндельные узлы (ШУ) со сферическими опорами. Их конструктивные особенности и достоинства рассмотрены в статьях [6, 7], а также представлена методика определения динамических показателей.

### Исследование технологии обработки плоского отражателя

Практика показала, что окончательное алмазное точение медных и алюминиевых поверхностей с параметром шероховатости  $R_{max} \leq 50$  нм можно выполнять при  $t = 3 \div 4$  мкм и  $S_{об} < 9$  мкм/об [8, 9]. Получены эмпирические зависимости параметров

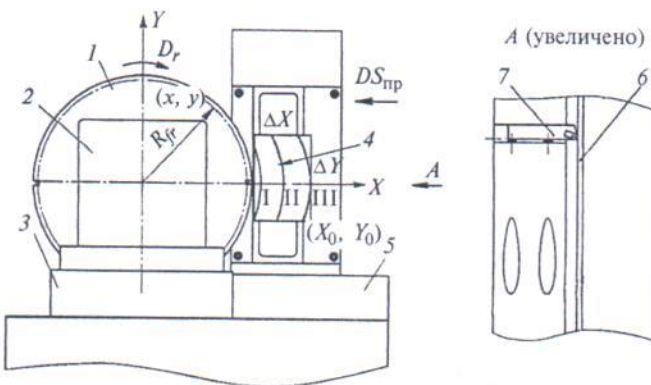


Рис. 1. Схема обработки плоского отражателя на сверхточном станке

шероховатости обработанной поверхности от подачи:

$$\left. \begin{aligned} R_{max} &= 11,85 S_{об}^{0,52} \pm 11,7 \text{ нм}; \\ Ra &= 3,77 S_{об}^{0,26} \pm 2,93 \text{ нм}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Исследовали прерывистую обработку отражателей с помощью однорезцовой алмазной фрезерной головки. На рис. 1 показана схема обработки прямоугольного отражателя.

Особенности сверхточного станка: станина установлена на виброизолирующих опорах; опоры основных формообразующих узлов (каретки 1 и 2 осей X и Z) — аэростатические; имеются синхронные маловиброактивные двигатели; однорезцовая алмазная фрезерная головка 4 закреплена на шпиндельном узле 3 с аэростатическими сферическими опорами. Обрабатываемый отражатель 5 закреплён на кронштейне с помощью оптического клея. Шпиндельный узел и кронштейн установлены на каретки 1 и 2 перемещения осей Z и X.

В табл. 1 приведены результаты расчета параметра шероховатости по верхнему пределу по формуле (2). Методика расчета пути резания  $L$  изложена в работе [10].

Анализ полученных данных показал, что для обработки оптической поверхности есть ограничения на подачу —  $S_{об} = 8$  мкм/об, при этом следует учитывать, что при уменьшении подачи увеличиваются путь резания и износ резца 6. Выбран следующий режим обработки плоского отражателя из алюминиевого сплава:  $t = 4$  мкм,  $S_{об} = 8$  мкм/об,  $n = 550$  мин $^{-1}$ .

Было установлено, что основными причинами погрешности обработки являются вибрация шпинделя, тепловая деформация и радиальный износ резца.

### Моделирование динамики аэростатического шпинделя со сферическими опорами

На рис. 2 представлена схема аэростатического шпиндельного узла с однорезцовой алмазной головкой.

При динамическом анализе рассмотрена система с тремя степенями свободы (перемещения по

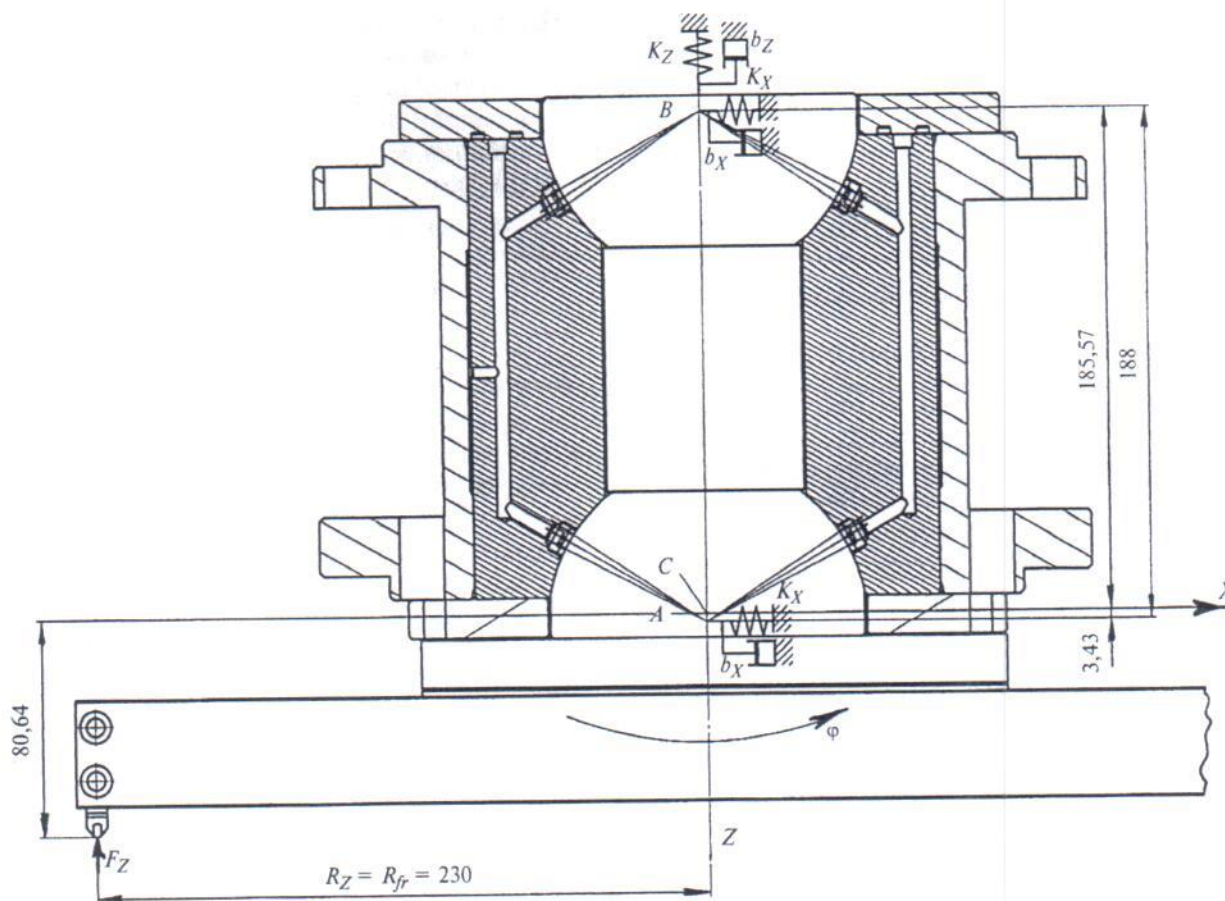


Рис. 2. Схема аэроэстатического шпинделя со сферическими подшипниками

осям  $X$ ,  $Z$  и поворот относительно центра  $C$  масс). В точках  $A$  и  $B$  наложены ограничения по числу степеней свободы в виде упругого подвеса и демпферов. Методики экспериментального определения параметров динамической жесткости, коэффициентов демпфирования (вязкого сопротивления) представлены в статье [6]. Динамические характеристики шпинделя при рабочем давлении приведены ниже.

**Техническая характеристика аэроэстатического шпинделя при рабочем давлении  $p = 0,5$  МПа**

**Осевые колебания**

Собственная частота $f_z$ , Гц	501,7 ± 0,39
Жесткость, соответствующая частоте колебаний $K_z$ , Н/м	8,446 · 10 <sup>7</sup>
Коэффициент вязкого сопротивления $b_z$ , Н · с/м	5,901 · 10 <sup>3</sup>

**Радиальные колебания**

Собственная частота $f_x$ , Гц	577
Жесткость, соответствующая частоте колебаний $K_x$ , Н/м	1,1166 · 10 <sup>8</sup>
Коэффициент вязкого сопротивления $b_x$ , Н · с/м	4,574 · 10 <sup>3</sup>

**Угловые колебания**

Собственная частота $f_\varphi$ , Гц	767,7 ± 0,55
Жесткость, соответствующая частоте колебаний $K_\varphi$ , Н/м	0,9867 · 10 <sup>6</sup>
Коэффициент вязкого сопротивления $b_\varphi$ , Н · с/м	40,76

Исходная система дифференциальных уравнений движения системы имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = \Sigma F_z; \\ m\ddot{x} = \Sigma F_x; \\ J_y\ddot{\varphi} = \Sigma M_x, \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  — масса вращающихся частей системы;  $\Sigma F_z$ ,  $\Sigma F_x$  — суммы проекций сил на оси  $Z$  и  $X$ ;  $x$ ,  $z$ ,  $\varphi$  — перемещения по осям  $Z$  и  $X$  и угол поворота относительно центра масс;  $\Sigma M_x$  — суммарный момент сил;  $J_y$  — момент инерции.

Преобразуем систему дифференциальных уравнений (3) движения в матричную форму:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J_y \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} 2b_x & 0 & b_x(d-e) \\ 0 & 2b_z & 0 \\ b_x(d-e) & 0 & b_x(d^2+e^2) \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} 2K_x & 0 & K_x(d-e) \\ 0 & 2K_z & 0 \\ K_x(d-e) & 0 & K_x(d^2+e^2) \end{bmatrix} \{q\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -F_z \\ F_z R_{fr} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\{q\} = \begin{Bmatrix} x \\ z \\ \varphi \end{Bmatrix}$  — вектор обобщенных координат;

$F_z$  — радиальная составляющая силы резания;  $R_{fr}$  — радиус однорезцовой алмазной головки;  $e = CB$  и  $d = CA$  — расстояния между центром масс и центрами сфер (см. рис. 2).

Уравнение (4) в компактной форме имеет вид:

$$\{\ddot{q}\} = -[M]^{-1}[B]\{\dot{q}\} - [M]^{-1}[K]\{q\} + [M]^{-1}[F], \quad (5)$$

где  $M$ ,  $B$ ,  $K$ ,  $F$  — матрицы масс, демпфирования, жесткостей, нагрузок.

Решение уравнения (5) получено в среде Matlab с использованием функции ode 45. Выходными параметрами программы являются движения центра масс системы в направлении осей  $X$  и  $Z$ , а также угловые колебания. Данная программа позволяет получить графики колебаний в центре масс системы и на вершине резца.

При контакте инструмента с заготовкой возникают периодические импульсы силы  $F_z$  равной величины с определенным шагом, который вызывает колебания в системе.

Расчитаны силы  $F_z$  резания на разных этапах обработки. Установлено, что сила резания увеличивается с увеличением пути резания, это обусловлено износом резца. При заданном режиме путь резания составил  $L = 2,42$  км, сила резания  $F_z = 96$  мН. Методики расчета сил и температур резания приведены в статье [10].

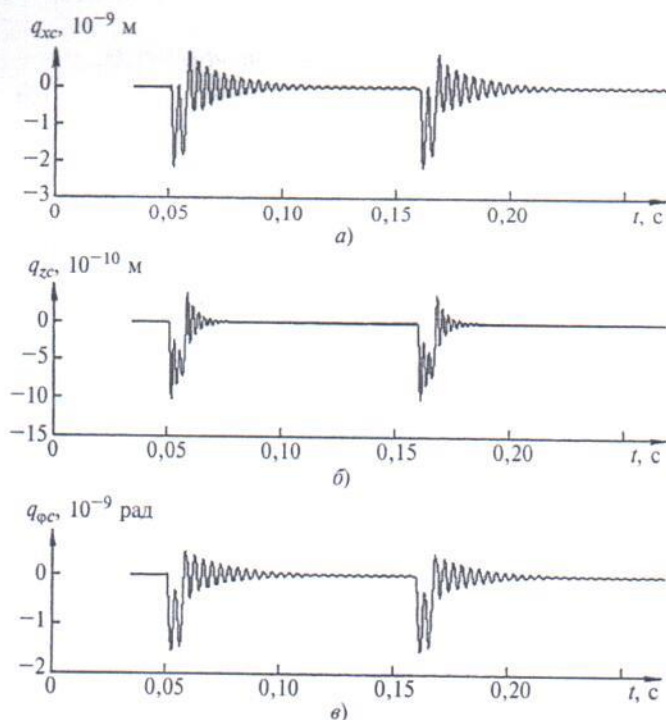


Рис. 3. Колебания по трем обобщенным координатам центра масс системы

На рис. 3 показаны формы колебаний центра масс системы по трем координатам, обусловленные импульсами радиальной силы  $F_z = 96$  мН.

Для оценки погрешностей обработки определены колебания вершины резца (рис. 4, см. обложку) по формулам:

$$\left. \begin{aligned} q_z &= q_{zc} - R_{fr} \cos(\omega t) \varphi; \\ q_x &= q_{xc} + R_x \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $q_{zc}$ ,  $q_{xc}$  — перемещения центра масс системы по осям  $Z$  и  $X$ ;  $q_z$ ,  $q_x$  — перемещение вершины резца по осям  $Z$  и  $X$ ;  $\omega$  — угловая частота вращения шпинделя;  $R_x$  — расстояние от вершины резца до центра масс по оси  $X$ .

Анализ показал, что при контакте с деталью резец совершает колебания, состоящие из нескольких периодов. Максимальная амплитуда колебаний резца в радиальном направлении по оси  $Z$  составляет  $q_z \approx 5$  нм.

### Расчет погрешности обработки

Погрешность обрабатываемой поверхности в результате износа обусловлена уменьшением радиального размера алмаза, а также увеличением силы и температуры резания, последнее вызывает увеличение тепловых деформаций резца. Радиальный износ и тепловое удлинение резца имеют разнонаправленные действия и могут частично компенсировать друг друга.

В расчетах использованы данные работы [11] по изменению радиуса скругления режущей кромки резца при увеличении пути резания для обработки алюминиевого сплава. Изменение радиуса  $\rho$  скругления резца учитывает поправочный коэффициент  $K_p = -0,061L^2 + 1,74L + 1$ :

$$\rho = K_p \rho_0,$$

где  $L$  — путь резания, км;  $\rho_0$  — радиус скругления после заточки.

По результатам исследований изнашивания природных монокристаллических резцов в ходе сверхточной обработки деталей из меди и алюминиевого сплава получены формулы для расчета износа задней поверхности [12] резца:

$$\left. \begin{aligned} h_z &= 0,42L^{0,537} I_d; \\ h_r &= h_z \operatorname{tg} \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $I_d = 2,74$  — коэффициент, учитывающий интенсивность изнашивания инструмента при прерывистой обработке;  $\alpha$  — задний угол резца.

Тепловое удлинение резца рассчитываем по формуле [13]:

$$d_T = -\alpha_e T_p I(F_0)(h_1 + h_2)1000. \quad (8)$$

Здесь  $\alpha_e$  — эквивалентный коэффициент линейного расширения алмаза и стальной державки;  $T_p$  —

Таблица 2

Составляющие и общая погрешность обработки плоского отражателя из алюминиевого сплава

Траектория (см. рис. 1)	$L$ , км	$F_z$ , мН	$q_z$ , мкм	$h_r$ , мкм	$d_T$ , мкм	Отклонение профиля $\Delta$ , мкм
I	0,37	63	0,0030	0,082	-0,91	-0,825
II	1,26	80	0,0040	0,160	-0,84	-0,676
III	2,37	96	0,0048	0,220	-0,83	-0,606

Таблица 3

Показатели физико-механических свойств монокристаллов

Материал	$\mu$	$E$ , МПа	$\lambda$ , кал/(см $\cdot$ с $\cdot$ °С)	$\omega$ , см $^2$ /с	$HV$ , МПа
A	0,20	930,0	0,35	0,83	—
Si{111}	0,24	143,4	0,47	1,19	10 000

Примечание. Принято напряжение в условной плоскости сдвига  $\tau_p = 0,185 HV$ .

температура резания;  $I(F_0)$  — функция от критерия Фурье:

$$F_0 = \frac{\omega_0 x}{S_{об}(h_1 + h_2)^2},$$

где  $\omega_0$  — температуропроводность обрабатываемого материала;  $x$  — длина обработки;  $h_1$  — длина алмаза;  $h_2$  — длина державки от места закрепления до алмаза.

Для того чтобы оценить погрешность обработки детали, рассчитаны отклонения профиля по траекториям I, II и III (см. рис. 1). Габаритные размеры обрабатываемой поверхности из алюминиевого сплава АМг6 составили  $191 \times 124,5$  мм. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Отклонение профиля (погрешность) включает в себя упругую деформацию по оси  $Z$  с привязкой к вершине резца, определяемую по формуле (6), радиальный износ, рассчитываемый по формулам (7), и тепловое удлинение резца — по формуле (8):

$$\Delta = q_z + h_r + d_T. \quad (9)$$

Анализ показал, что основными причинами погрешности обработки являются радиальный износ и тепловая деформация резца. В расчетах принято, что обрабатываемая деталь — абсолютно жесткая. При этом допущении расчетная погрешность обработки составила менее 1 мкм.

Обработку плоского отражателя из алюминиевого сплава выполняли в ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" на сверхточном станке с ЧПУ Асферика, однорезцовую головку которого оснащали алмазным монокристаллическим резцом с параметрами: передний угол  $\gamma = 0$ ; задний угол  $\alpha = 7^\circ$ ,  $R = 2$  мм. Режимы обработки устанавливали на основании анализа и моделирования процесса. Для чистового прохо-

да назначены параметры резания:  $n = 550$  мин $^{-1}$ ,  $S_{об} = 8$  мкм/об,  $t = 4$  мкм.

Качество обработанной поверхности исследовали на конфокальном микроскопе  $\mu surf$  Nanofocus AG, параметр шероховатости составил  $Rz = 0,066$  мкм, что несколько больше, чем расчетное значение —  $Rz = 0,047$  мкм. Одной из причин данного расхождения является недостаточная жесткость детали при ее закреплении на планшайбе станка.

### Исследование процесса наноразмерной обработки монокристаллического кремния

Предлагаемые методики расчета сил и температур резания при сверхточной обработке используются при анализе лезвийной наноразмерной обработки монокристаллического кремния.

Экспериментальные исследования приведены в работе [14], где обосновано, что для алмазного резца с радиусом скругления вершины 2 мм при  $t = 1$  мкм и  $S_{об} = 0,1$  мкм/об обработка кремния осуществляется в режиме квазипластичного резания.

Показатели физико-механических свойств природного монокристаллического алмаза и монокристаллического кремния с ориентацией {111} приведены в табл. 3.

На рис. 5 показаны зависимости изменения средней толщины  $a_{sr}$  и максимальной толщины  $a_{max}$  срезаемого слоя от подачи  $S_{об}$  при радиусе скругления вершины резца  $R = 2$  мм. При  $S_{об} = 0,1$  мкм/об имеем:  $a_{sr} = 0,0016$  и  $a_{max} = 0,003$  мкм,  $b = 63,3$  мкм. При ограничении толщины срезаемого слоя до 10 нм, подача должна быть меньше 0,5 мкм/об. Таким образом, при алмазном точении монокристаллического кремния параметры режима квазипластичного резания составляют:  $t = 1$  мкм,  $S_{об} = 0,1$  мкм, средняя толщина срезаемого слоя 1,6 нм, максимальная толщина — 3 нм.

Аппроксимация экспериментальных результатов по обработке кремния алмазным резцом [14] дала следующие данные:

износ по задней поверхности  $h_z = I_d A, 04 L^{0,61}$  мкм;

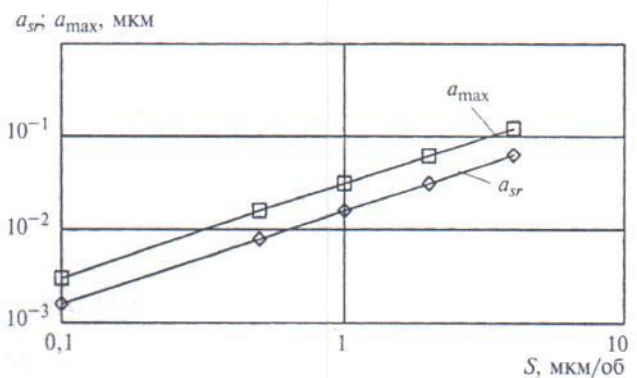


Рис. 5. Зависимости изменения средней и максимальной толщин срезаемого слоя от подачи  $S_{об}$  при радиусе скругления вершины резца  $R = 2$  мм

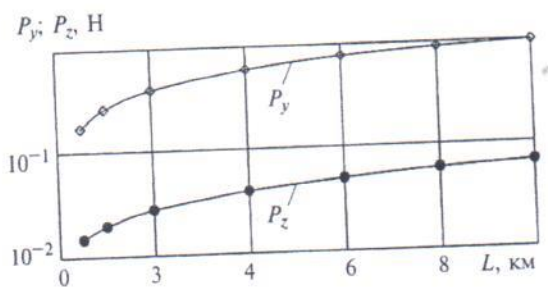


Рис. 6. Зависимости изменения составляющих  $P_y$  и  $P_z$  силы резания от пути  $L$  резания при режимных параметрах  $h = 1$  мкм,  $S_{об} = 0,1$  мкм/об наноразмерной обработки монокристаллического кремния

скорость изнашивания  $I_{нi} = I_d 2,46 \cdot 10^{-6} v \times L^{-0,39}$  мм/мин, где  $L$  — путь резания, км;  $v$  — скорость резания, мм/мин.

Износ и скорость изнашивания алмазного резца при обработке монокристаллического кремния значительно выше, чем при обработке цветных металлов.

Расчет сил и температур резания выполнен для торцевого точения заготовки кремния диаметром 35 мм при  $n = 1700$  мин<sup>-1</sup>,  $t = 1$  мкм,  $S_{об} = 0,1$  мкм/об. Методика расчета аналогична методике работы [10].

С учетом соотношения толщины и ширины срезаемого слоя формула угла сдвига имеет вид:

$$\beta = \pi/2 - \text{arctg} \sqrt[4]{\eta E b / a_{sr}},$$

где  $\eta$  — упругая постоянная для двух сопрягаемых материалов — алмаза и кремния;  $E$  — модуль упругости кремния (см. табл. 3).

Расчетные зависимости радиальной ( $P_y$ ) и тангенциальной ( $P_z$ ) составляющих силы резания от пути  $L$  резания приведены на рис. 6. С увеличением  $L$  составляющие  $P_y$  и  $P_z$  значительно увеличиваются в результате износа инструмента. По экспериментальным данным [14] составляющие силы резания зависят от кристаллографической ориентации алмаза. При использовании алмаза с ориентацией {110} экспериментальные данные близки к расчетным значениям.

При торцевом точении кремниевого диска диаметром 35 мм от центра к периферии путь резания составил  $L = 9,6$  км, по наружному диаметру расчетные температуры составили: на передней поверхности алмазного резца — 42 °С, на задней поверхности — 28 °С.

По выражениям (9) получено: радиальный износ резца  $h_r = 1,97$  мкм, тепловое удлинение  $d_T = -0,43$  мкм, упругая деформация  $q_z = 0,013$  мкм, т. е. расчетная погрешность обработки составила 1,6 мкм. Параметр шероховатости обработанной поверхности монокристаллического кремния  $Ra = 2 \div 4$  нм и не зависит от пути резания [14].

Таким образом, исследованиями сверхточной обработки алмазной однорезцовой фрезерной головкой плоского отражателя из алюминиевого сплава установлено, что погрешность составит менее 1 мкм, а шероховатость обработанной поверхности будет соответствовать оптическому классу.

При использовании жесткого аэростатического шпинделя со сферическими подшипниками для погрешности обработки определяющими факторами являются радиальный износ и тепловое удлинение алмазного монокристаллического резца. Подтверждена необходимость жесткой конструкции и условий закрепления обрабатываемой детали на планшайбе станка.

Ряд публикаций подтверждают возможность алмазного точения монокристаллического кремния в режиме квазипластичного резания с параметром шероховатости поверхности  $2 \div 4$  нм. Расчетами также установлено, что при обработке монокристаллического кремния погрешность в результате повышения интенсивности изнашивания инструмента (по сравнению с алюминиевым сплавом) увеличивается до 1,6 мкм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Pramanik A., Neo K. S., Rahman M. Cutting of diamond tools during ultra-precision turning of electroless-nickel plated die materials // Journal of Material Processing Technology. 2003. N 140. P. 308—313.
2. Chan K. C., Cheung C. F., Ramesh M. V. A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/SiC<sub>p</sub> matrix composite // International Journal of Mechanical Sciences. 2001. N 43. P. 2047—2068.
3. Shaojian Zhang. Dynamic modeling of spindle vibration and surface generation in ultra-precision machining. The Hong Kong Polytechnic University, 2012.
4. Hocheng H., Hsieh M. L. Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds // International Journal of Machine and Manufacture. 2004. N 44. P. 1607—1618.
5. Lee W. B., Cheung C. F. A dynamic surface topography model for the prediction of nano-surface generation in ultra-precision machining // International Journal of Mechanical Sciences. 2001. N 43. P. 961—991.
6. Ударная диагностика аэростатического шпиндельного узла со сферическими опорами // Р. А. Пошехонов, В. В. Лапшин, Е. М. Захаревич, В. П. Кирьянов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 7, <http://technomag.bmstu.ru/doc/717582.html>.
7. Пошехонов Р. А., Лапшин В. В., Скворцова М. А. Экспериментальное исследование прецизионного шпиндельного узла со сферическими аэростатическими опорами и защитным алмазоподобным покрытием // Нанотехника. 2014. № 2 (38). С. 68—73.
8. Грубый С. В., Боговцева Л. П., Костеев В. А. Исследование состояния прецизионных поверхностей, обработанных методом алмазного точения // Вестник машиностроения. 1996. № 7. С. 19—24.
9. Грубый С. В., Татьяна Н. А. Исследование и применение кристаллов природных алмазов и резцов повышенной износостойкости // Вестник машиностроения. 1997. № 4. С. 19—23.