

УДК 621.941.1

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-7-20-29

# Анализ условий и выбор режимов алмазного микрофрезерования плоских поверхностей

С.В. Грубый<sup>1</sup>, В.В. Лапшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49

## An Analysis of Conditions and Selection of Modes for Diamond Micro-Milling of Flat Surfaces

S.V. Grubyi<sup>1</sup>, V.V. Lapshin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

<sup>2</sup> OAO Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT, 107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49



e-mail: grusv@yandex.ru, vasylap@mail.ru



Рассмотрена сверхточная обработка плоских поверхностей из алюминиевого сплава, монокристалла дигидрофосфата калия и монокристалла кремния однорезцовой алмазной фрезерной головкой. Разработана методика расчета сил резания в диапазоне толщин срезаемого слоя от сотых до десятых долей микрометра, что соответствует подаче от десятых долей до целых значений микрометра на оборот. Проведен анализ изменения сил, температур резания и погрешности обработки в зависимости от подачи инструмента и пути резания. Приведены сравнительные данные по силам резания, полученные из литературных источников. Предложенная расчетная методика использована для анализа режимных параметров, обеспечивающих обработку, в том числе крупногабаритных плоских поверхностей монокристалла дигидрофосфата калия с погрешностью менее 1 мкм и шероховатостью 6 нм.

**Ключевые слова:** микрофрезерование, сила резания, шероховатость, дигидрофосфат калия, кремний, алюминиевый сплав



This article presents an analysis of high accuracy machining of flat surfaces made of aluminium alloys, potassium dihydrogen phosphate single crystals and silicon single crystals using a single-blade diamond milling cutter. A technique for calculating cutting forces with the cut layer thickness ranging from hundredths to tenths of micrometre that corresponds to the feed from tenths to whole values of micrometre per revolution is developed. An analysis of the variation in the force, cutting temperature and machining accuracy depending on the tool feed and cutting pattern is performed. Comparative data on the cutting forces obtained from literature is presented. The proposed calculation technique is used for investigating operating parameters that provide machining with errors of less than 1 mcm and roughness of 6 nm, including large-size flat surfaces of potassium dihydrogen phosphate single crystals.

**Keywords:** micro-milling, cutting force, roughness, potassium dihydrogen phosphate, silicon, aluminum alloy

Лезвийная обработка оптических элементов и прецизионных деталей машин и приборов находит все более широкое применение благодаря созданию и производству новых сверхточных станков. Такие станки выпускают несколько фирм в США, Германии, Японии и Китае. Историческим центром по разработке и изготовлению отечественных сверхточных станков был Московский станкостроительный завод «Красный пролетарий». В настоящее время лидирующую позицию в этом направлении занимает ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ». В частности, за последние годы здесь разработаны и выпущены несколько сверхточных станков, в том числе для микрофрезерования крупногабаритных плоских поверхностей.

Цель работы — создание расчетной методики для обоснования и выбора режимов микрофрезерования алмазной однорезцовой фрезерной головкой поверхностей оптических элементов из алюминиевого сплава, монокристалла дигидрофосфата калия (KDP) и монокристалла кремния.

В литературных источниках имеются в основном экспериментальные данные по сверхточной лезвийной обработке плоских поверхностей. Например, в работе [1] рассмотрена обработка алюминиевого сплава на сверхточном строгальном станке, погрешность прямолинейности которого составляла 0,53 мкм на 250 мм перемещения, а жесткость между инструментом и заготовкой — 22 Н/мкм. Условия резания были следующими: скорость — 100 мм/с, подача — 40 мкм/ход, смазывающая жидкость — керосин. Использован монокристаллический алмазный резец с радиусом вершины 0,5 мм, передним углом 0° и задним углом 3°. Силы резания измерены прецизионным динамометром модели Kistler 9251A. По результатам обработки экспериментальных данных определены следующие параметры:

- отношение максимальной толщины среза к длине режущей кромки  $A_s$ ;
- площадь среза  $F$ ;
- удельная сила  $P_s$  и главная тангенциальная составляющая силы резания  $F_c$ :

$$P_s = 0,0235/A_s + 0,7; \quad F_c = P_s F / 1000; \quad (1)$$

- радиальная (нормальная) составляющая силы резания

$$F_d = F_c / \{3,3[1 - \exp(-A_s / 0,025)] + 0,1\}. \quad (2)$$

Значения составляющих силы резания при строгании алюминиевого сплава на сверхточном станке, рассчитанные по формулам (1) и (2), приведены в табл. 1.

Точение заготовки из алюминиевого сплава марки LY12 (модуль Юнга равен 74,2 ГПа, твердость — 1,4 ГПа) выполнено на ультрапрецизионном токарном станке с погрешностью вращения шпинделя 0,1 мкм и погрешностью линейного перемещения суппорта 0,13 мкм на 100 мм длины [2]. В экспериментах использован резец производства компании Contour Fine Tooling со следующими геометрическими параметрами: передний угол — 0°, задний угол — 7°, радиус вершины — 1,5 мм, радиус округления кромки — 190 нм. Составляющие силы резания регистрировались динамометром Kistler 9256A1. Результаты экспериментов — значения составляющих силы резания при точении алюминиевого сплава на сверхточном станке с подачей 10 мкм/об — приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Значения составляющих силы резания при строгании алюминиевого сплава на сверхточном станке**

Глубина резания $t$ , мкм	Безразмерный параметр $A_s$	Составляющая силы резания, Н	
		радиальная $F_d$	тангенциальная $F_c$
2	0,030	0,04	0,10
3	0,037	0,05	0,14
5	0,045	0,08	0,23
7	0,049	0,11	0,33
10	0,053	0,16	0,47

Таблица 2

**Значения составляющих силы резания при точении алюминиевого сплава на сверхточном станке**

Глубина резания $t$ , мкм	Составляющая силы резания, Н	
	радиальная $F_d$	тангенциальная $F_c$
1	0,06	0,06
3	0,075	0,075
5	0,09	0,20
7	0,15	0,28
10	0,20	0,35

Как видно из данных, представленных в табл. 1 и 2, силы резания при алмазной лезвийной обработке алюминиевого сплава составляют десятые и сотые доли ньютона.

Торцевое точение заготовки из монокристаллического кремния {111} (модуль Юнга — 131,0...155,8 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,21...0,27, твердость HV = 10 000 МПа) выполнено на сверхточном токарном станке [3]. В экспериментах использованы монокристаллические алмазные резцы с кристаллографической ориентацией передней поверхности {110}, {100}, {111}. Резцы имели следующие геометрические параметры: передний угол — 0°, задний угол — 7°, радиус вершины — 2 мм, радиус округления кромки — 30...60 нм. Были экспериментально обоснованы условия пластичного характера взаимодействия алмазного резца и монокристаллического кремния: скорость 185,4 м/мин, подача 100 нм/об (0,1 мкм/об) и глубина резания 1 мкм. Для этих условий мак-

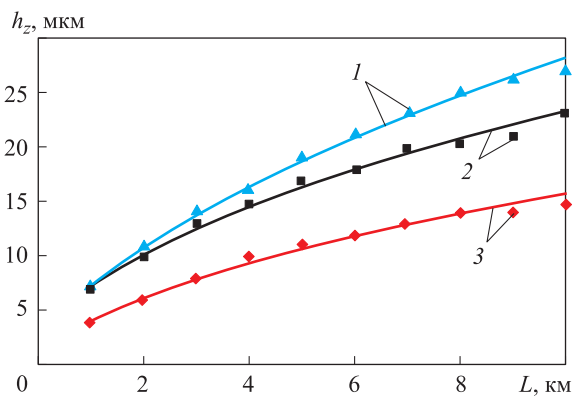


Рис. 1. Расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) зависимости износа резца  $h_z$  от пути резания  $L$  при обработке монокристалла кремния с различной ориентацией: 1 — {100}; 2 — {111}; 3 — {110}

Таблица 3

Параметры аппроксимации износа алмазных резцов при обработке монокристалла кремния

Обрабатываемый материал	Кристаллографическая ориентация алмаза	$C_h$	$m_h$
Монокристаллический кремний {111}	{110}	4,14	0,58
	{111}	7,17	0,51
	{100}	6,94	0,61
Алюминиевые сплавы, медь, кристаллы KDP	—	0,42	0,537

симальная толщина срезаемого слоя составила 3,16 нм. Зависимости износа алмазных резцов от пути резания при обработке монокристалла кремния приведены на рис. 1. Экспериментальные данные по износу аппроксимированы степенной зависимостью

$$h_z = C_h L^{m_h} I_d, \quad (3)$$

где  $C_h$  и  $m_h$  — параметры аппроксимации износа алмазных резцов (табл. 3);  $I_d$  — коэффициент.

Возможность использовать выражение (3) для расчета износа резцов при обработке кремния подтверждена результатами проведенных нами экспериментальных исследований алмазного микрофрезерования однорезцовой фрезерной головкой на сверхточном станке. Резец имел следующие геометрические параметры: радиус при вершине — 4,6 мм, передний угол — 0°, задний угол — 7°. Режимные параметры обработки кремния: глубина резания — 5 мкм, подача — 2,5 мкм/об. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использован изопарафин. Максимальная толщина срезаемого слоя для этих условий равна 111 нм.

Критерием стойкости алмазного резца принято ухудшение качества обработанной поверхности, что свидетельствует о переходе к хрупкому характеру взаимодействия в контакте алмаз-кремний вследствие увеличения износа инструмента. Шероховатость поверхности, обработанной неизношенным резцом, по параметру  $Ra$  составила 0,008 мкм, а по параметру  $Rz$  — 0,05 мкм. Шероховатость поверхности, обработанной изношенным резцом, варьировалась в пределах  $Ra = 0,01...0,014$  мкм,  $Rz = 0,058...0,077$  мкм.

На основании проведенных опытов сделан вывод, что для обеспечения микрофрезерования кремния при пластичном характере контактного взаимодействия путь резания не должен превышать 6 км. При увеличении указанного значения образуются сколы на режущей кромке резца и резко ухудшается качество обработанной поверхности.

Аналогичной зависимостью аппроксимирован износ по задней поверхности алмазного резца при сверхточной обработке алюминиевых и медных сплавов [4], а также кристаллов KDP. При непрерывном характере обработки коэффициент  $I_d$  приняли равным единице, а при прерывистом характере, как и при микрофрезеровании однорезцовой алмазной фре-

Таблица 4

## Механические характеристики обрабатываемых материалов

Характеристика	Материал		
	АМг6	KDP	Si
Модуль упругости $E_1$ , ГПа	71	38	143,4
Коэффициент Пуассона $\mu_1$	0,33	0,26	0,24
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	300	–	–
Твердость НВ, МПа	857	1100; 1220; 1830	10 000
Напряжение в плоскости сдвига $\tau_p$ , МПа	$0,95\sigma_b$	0,185 НВ	0,185 НВ
Напряжение на задней поверхности инструмента $\sigma_r$ , МПа	140	$\tau_p$	$\tau_p$
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , кал/(см·с·град)	0,29	0,003	0,47
Коэффициент температуропроводности $\omega_1$ , см <sup>2</sup> /с	0,53	0,006	1,19
<i>Примечание.</i> Коэффициент трения между алмазом и обрабатываемым материалом $f_{tr} = 0,06$ .			

зерной головкой, — 2,74. Износ в радиальном направлении (радиальный износ) определен по соотношению

$$h_r = h_z \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  — задний угол инструмента.

Параметры шероховатости обработанных поверхностей  $R_{\max}$  и  $R_a$  на деталях из алюминиевого сплава рассчитаны по эмпирическим соотношениям, заимствованным из работы [4]:

$$\begin{aligned} R_{\max} &= 11,85S^{0,52} \pm 11,7; \\ R_a &= 3,77S^{0,26} \pm 2,93, \text{ нм}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $S$  — подача, мкм/об.

По результатам проведенных экспериментов установлена возможность использовать соотношения (4) и для условий обработки кристаллов KDP.

Водорастворимые кристаллы типа KDP используют в оптике и лазерной физике для управления излучением в преобразователях частоты и электрооптических затворах. Современная лазерная техника нуждается в большом количестве таких крупногабаритных оптических элементов. Поэтому основное внимание уделяется как технологии скоростного выращивания крупногабаритных водорастворимых кристаллов, так и их оптической обработке методом алмазного микрофрезерования [5].

Механические характеристики кристаллов KDP приводятся в специальной литературе, причем их упругие свойства сохраняются до температуры 110 °С [6, 7].

Выполнены экспериментальные исследования сил резания при сверхточной обработке кристаллов с помощью динамометра Kistler 9256A1 [8]. Обработаны кристаллы KDP в плоскости (001) по кристаллографическим направлениям [100], [110], [010] по схеме торцевого точения при движении резца от периферии к центру. Использован монокристаллический алмазный резец с радиусом вершины 1 мм и передним углом 0°. Глубина резания составляла 10, 5 и 0,5 мкм, подача — 10, 5 и 1 мкм/об, что соответствовало наибольшей толщине срезаемого слоя 1361, 486 и 30 нм. Частота вращения шпинделя — 1000 мин<sup>-1</sup>. При толщине срезаемого слоя 30 нм качество обработанной поверхности удовлетворяет условиям пластичного взаимодействия алмазного резца и кристалла. Силы резания, фиксировавшиеся при скорости 62,8 м/мин, составили менее 0,08 Н.

По результатам анализа литературных данных в расчетах приняты механические характеристики обрабатываемых материалов, приведенные в табл. 4.

Для природного монокристаллического алмаза приняты следующие характеристики: модуль упругости  $E_2 = 1140$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu_2 = 0,2$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,350$  кал/(см·с·град), коэффициент температуропроводности  $\omega_2 = 0,83$  см<sup>2</sup>/с.

Общая схема геометрических параметров и сил на контактных поверхностях лезвия инструмента приведена в работе [9]. Учитывая, что модуль упругости алмаза многократно больше модуля упругости обрабатываемых ма-

териалов, зависимость для расчета угла сдвига  $\beta$ , заимствованная из работ [4, 9], упрощается и принимает вид

$$\beta = \arctg \left( \frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{k_1 \sqrt[4]{b/a} + \cos \gamma - \sin \gamma} \right), \quad (5)$$

где  $\gamma$  — среднее значение переднего угла инструмента с учетом его изменения на дуге округления кромки;  $k_1$  — коэффициент, отражающий влияние скорости резания на угол сдвига  $\beta$  (учитывается при обработке алюминиевого сплава);  $b$  и  $a$  — средние значения ширины и толщины срезаемого слоя, определенные по известным формулам С.С. Силина.

Относительный сдвиг также рассчитывается через угол сдвига и передний угол инструмента:

$$\varepsilon = \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \sin \beta}. \quad (6)$$

Результирующая сила стружкообразования направлена под углом действия  $\omega$  к скорости резания и вычислена через касательное напряжение в плоскости сдвига по формуле

$$R_c = \frac{\tau_p ab}{\sin \beta \cos(\beta + \omega)}. \quad (7)$$

Далее, исходя из геометрических и кинематических параметров, соотношений определяли силы:

- касательную  $F_1$  и нормальную  $P_n$  на передней поверхности инструмента;
- радиальную  $P_{yp}$  и тангенциальную  $P_{zp}$  по направлениям осей координат  $y$  и  $z$ ;
- результирующую силу на дуге окружности радиуса округления кромки и соответствующие составляющие по направлениям осей координат  $P_m$ ,  $P_{my}$  и  $P_{mz}$ ;
- нормальную  $P_2$  и тангенциальную  $F_2$  на площадке износа.

Результирующие силы по направлению осей системы координат учитывают составляющие на передней поверхности, на дуге округления режущей кромки и на задней поверхности:

$$P_y = P_{yp} + P_{my} + P_2; \quad P_z = P_{zp} + P_{mz} + F_2. \quad (8)$$

Вместе с тем анализ показывает, что уравнение (5) для расчета угла сдвига справедливо при отношении  $b/a \leq 120$ , т. е. для заданной ширины и относительно большой толщины среза. Относительный сдвиг, вычисленный по выражениям (5), (6) для отношения  $b/a = 120$  принят за реперное значение  $\varepsilon_0$  и соответствует толщине срезаемого слоя  $a_0 = 1,75\rho$ , где  $\rho$  —

радиус округления режущей кромки. Соответствующий угол сдвига  $\omega_0 = \arctg(0,18\varepsilon_0)$  [10].

Тогда в общем виде условия для определения относительного сдвига принимают вид

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0, & a_0 \leq a < b/120; \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{a_0 - a}{\rho} \right), & a < a_0. \end{aligned} \quad (9)$$

По предложению Ю.А. Розенберга и С.И. Тахмана представляется возможным рассчитать силы резания через давления на контактных поверхностях так, как это подробно изложено в работе [11].

Тангенциальная составляющая силы резания

$$P_z = P_{zp} + P_{zAC} + F_2, \quad (10)$$

где слагаемые на передней поверхности  $P_{zp}$ , радиусной части задней поверхности  $P_{zAC}$  и площадке износа  $F_2$  вычисляются по выражениям

$$\begin{aligned} P_{zp} &= C_{pp} ab; & C_{pp} &= \tau_p (\varepsilon_0 + 1); \\ P_{zAC} &= C_p K_p b; & C_p &= 1,5 \tau_p \varepsilon_0 \rho; \\ K_p &= \sqrt{a/a_0}, & a < a_0; & \quad K_p = 1, a \geq a_0; \\ F_2 &= C_h b; & C_h &= \sigma_t h_z f_{tr}. \end{aligned}$$

Нормальная составляющая силы резания

$$P_y = P_{yp} + P_{yAC} + N_2, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} P_{yp} &= U_{pp} ab; & U_{pp} &= \tau_p (\varepsilon_0 + 1) \operatorname{tg} \omega_0; \\ P_{yAC} &= U_p K_p b; & U_p &= 1,5 \tau_p \rho (3,17 \varepsilon_0 + 1) \operatorname{tg} \omega_0; \\ N_2 &= U_h b; & U_h &= \sigma_t h_z. \end{aligned}$$

Таким образом, рассмотрены две системы взаимосвязанных уравнений для определения сопутствующих параметров и сил резания для лезвия инструмента с округленной режущей кромкой:

- при  $b/a \leq 120$  вычисляются угол сдвига, относительный сдвиг по формулам (5), (6) с последующим расчетом силы стружкообразования (7) и составляющих силы (8);

- при  $b/a > 120$  рассчитываются составляющие силы резания по выражениям (10), (11) через удельные давления на контактных поверхностях инструмента.

Расчетные значения сил резания использованы для нахождения температур передней  $T_1$

и задней  $T_2$  поверхностей и температуры резания  $T_p$ , которая усреднялась по контактным площадкам инструмента.

На рис. 2 приведен график, характеризующий изменение относительного сдвига в широком диапазоне средних значений толщины срезаемого слоя, полученный по формулам (6), (9), для условий обработки кристалла KDP монокристаллическим алмазным резцом, имевшим следующие геометрические параметры: радиус вершины  $r=1$  мм, радиус округления кромки  $\rho=0,05$  мкм. В расчетах глубина резания  $t=2$  мкм, подача  $S=0,5...45,0$  мкм/об. Средняя ширина срезаемого слоя  $b$  составила  $63,5...85,7$  мкм. Отношение  $b/a=120$  соответствует толщине срезаемого слоя  $0,63$  мкм. При бóльших значениях  $b$  расчет проводился по соотношениям (8), при меньших — по формулам (10), (11). Относительный сдвиг для значений средней толщины  $a < 0,093$  мкм возрастает в соответствии с выражением (9). Максимальная толщина срезаемого слоя приблизительно в 2 раза больше ее среднего значения.

Соответствующие зависимости тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих си-

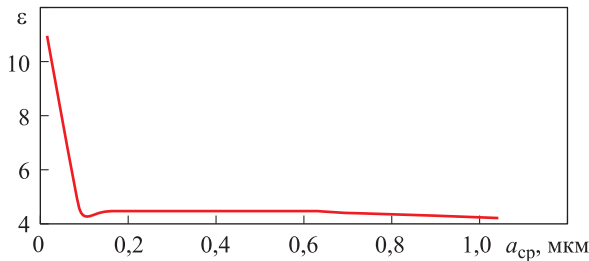


Рис. 2. Зависимость относительного сдвига  $\epsilon$  от средней толщины срезаемого слоя  $a_{cp}$

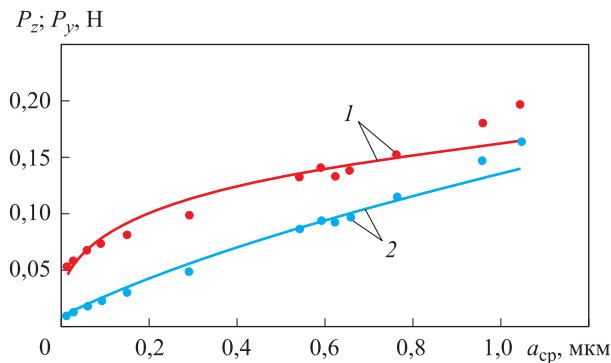


Рис. 3. Расчетные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости радиальной  $P_y$  (1) и тангенциальной  $P_z$  (2) составляющих силы резания от средней толщины срезаемого слоя  $a_{cp}$  при обработке кристалла KDP с износом резца  $h_z = 2$  мкм

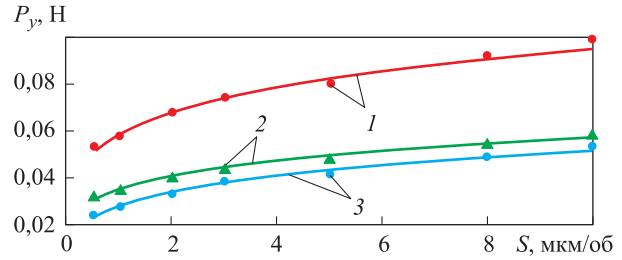


Рис. 4. Расчетные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости радиальной составляющей силы резания  $P_y$  от подачи  $S$  для кристаллов KDR твердостью 1830 (1) и 1100 МПа (2) и алюминиевого сплава АМг6 (3) при постоянном износе алмазного резца

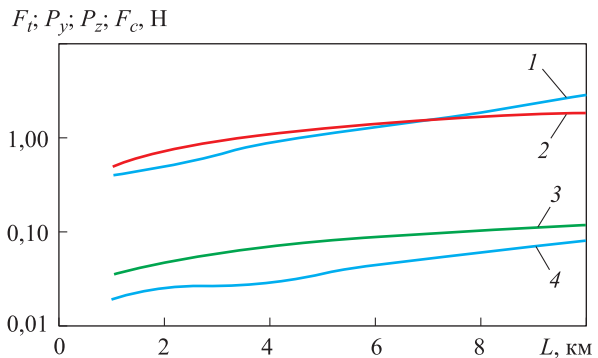


Рис. 5. Зависимости составляющих сил резания  $F_t$  (1),  $P_y$  (2),  $P_z$  (3),  $F_c$  (4) от пути резания  $L$  для условий пластичного взаимодействия алмазного резца и поверхности кремния

лы резания от средней толщины срезаемого слоя приведены на рис. 3. Здесь износ по задней поверхности алмазного резца принят постоянным и равным 2 мкм.

Для этих же условий обработки на рис. 4 показаны графические зависимости радиальной составляющей силы резания от подачи при обработке алюминиевого сплава и монокристаллов KDP с двумя значениями твердости при постоянном износе алмазного резца. Из рис. 3 и 4 следует, что значения сил резания при алмазном микрофрезеровании поверхностей из этих материалов составляют десятые доли ньютона. Вместе с тем при назначении режимов резания следует учесть, что с увеличением пути резания будет повышаться износ инструмента в соответствии с формулой (3), что приведет к росту сил и температур резания.

При сверхточной обработке монокристаллического кремния силы резания возрастают вследствие его твердости. Для проверки расчетных зависимостей вычислены значения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания, которые сравнивались с соответ-

Таблица 5

**Параметры, характеризующие микрофрезерование алюминиевого сплава  
при скорости резания  $v = 694$  м/мин**

Подача $S$ , мкм/об	Толщина $a$ , мкм	Путь резания $L$ , км	Износ реза $h_z$ , мкм	Погрешность $\Delta$ , мкм	Время обработки $\tau_o$ , мин	Шероховатость $Ra$ , нм
10,0	0,293	3,3	2,2	0,27	52,9	6,9
8,0	0,238	4,1	2,5	0,30	66,2	6,5
5,0	0,152	6,6	3,2	0,39	105,9	5,7
2,0	0,062	16,4	5,2	0,64	264,7	4,5
1,0	0,031	32,9	7,5	0,92	529,4	3,8
0,5	0,015	65,8	10,9	1,34	1 059,0	3,1

ствующими экспериментальными значениями  $F_c$  и  $F_t$ , для условий пластичного взаимодействия алмазного резца и поверхности кремния, принятых по данным работы [3]: подача  $S = 0,1$  мкм/об, глубина резания  $t = 1$  мкм, что обеспечивает максимальную толщину срезаемого слоя  $a_{\max} = 3,16$  нм. Здесь был непрерывный характер обработки при условиях торцевого точения заготовки алмазным резцом, поэтому в выражении (3) коэффициент  $I_d = 1$ . Зависимости составляющих сил резания  $P_y$ ,  $P_z$ ,  $F_t$ ,  $F_c$  от пути резания приведены на рис. 5.

По результатам выполненного анализа установлено, что при обработке относительно «мягких» материалов преобладающее влияние на погрешность оказывает радиальный износ инструмента. В табл. 5 представлены параметры, характеризующие микрофрезерование квадратной поверхности размером  $180 \times 180$  мм из алюминиевого сплава АМг6 при скорости резания  $v = 694$  м/мин и глубине резания  $t = 2$  мкм.

С уменьшением подачи снижается шероховатость обработанной поверхности, вместе с

тем возрастают погрешность и время обработки вследствие увеличения пути резания. Температура резания не превышает  $55^\circ\text{C}$ .

При малых значениях подачи радиальная составляющая силы резания растет вследствие увеличения относительного сдвига и уменьшения среднего значения переднего угла на участке округления режущей кромки. На рис. 6 приведены графические зависимости тангенциальной и радиальной составляющих силы резания от подачи при микрофрезеровании кристалла KDP с глубиной резания 2 мкм.

При обработке кристаллов KDP температура резания увеличивается вследствие малой теплопроводности материала. На рис. 7 показаны зависимости температуры резания от подачи при микрофрезеровании кристалла размером  $180 \times 180$  мм со скоростью резания  $v = 694, 510$  и  $408$  м/мин. Учитывая предельную теплостойкость кристалла KDP, равную  $110^\circ\text{C}$  (что следует из графиков по упругим свойствам этого материала, приведенным в работе [7]), необходимо обеспечить условия обработки, при которых температура резания не будет превышать  $110^\circ\text{C}$ .

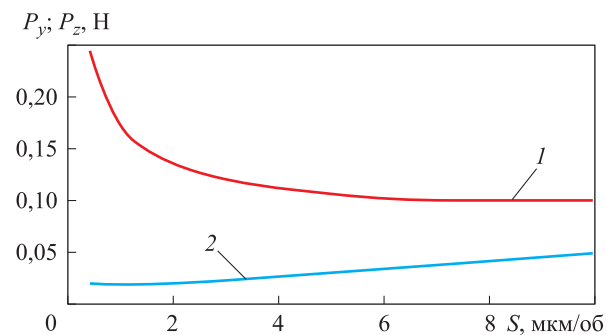


Рис. 6. Зависимости радиальной  $P_y$  (1) и тангенциальной  $P_z$  (2) составляющих сил резания от подачи  $S$  при микрофрезеровании монокристалла KDP с глубиной резания 2 мкм

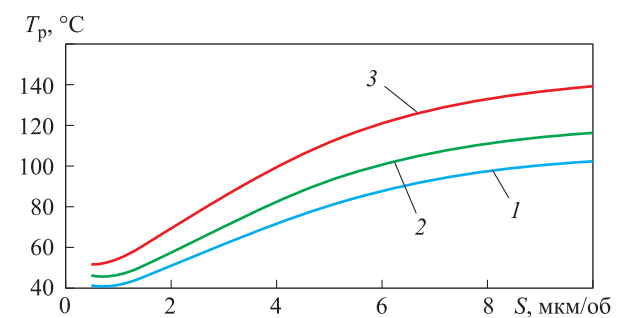


Рис. 7. Зависимости температуры резания  $T_p$  от подачи  $S$  при микрофрезеровании кристалла KDP размером  $180 \times 180$  мм со скоростью резания  $v = 408$  (1), 510 (2) и 694 (3) м/мин

Таблица 6

## Параметры, характеризующие микрофрезерование кристалла KDP со скоростью 694 м/мин

Подача $S$ , мкм/об	Основное время $\tau_0$ , мин	Износ резца $h_z$ , мкм	Радиальная составляющая силы $P_r$ , Н	Температура резания $T_p$ , °С
10,0	52,9	2,2	0,102	139,6
8,0	66,2	2,5	0,101	131,8
5,0	105,9	3,2	0,106	111,5
2,0	264,7	5,2	0,136	68,8
1,0	529,4	7,5	0,177	54,8
0,5	1 059,0	10,9	0,244	51,4

Таблица 7

## Параметры, характеризующие условия алмазного микрофрезерования крупногабаритного кристалла KDP

Подача $S$ , мкм/об	Основное время $\tau_0$ , мин	Износ резца $h_z$ , мкм	Радиальная составляющая силы $P_r$ , Н	Температура резания $T_p$ , °С	Погрешность $\Delta$ , мкм	Шероховатость $Ra$ , нм
8	154,4	6,3	0,19	106,9	0,79	6,5
5	247,1	8,2	0,22	86,2	1,02	5,7

В табл. 6 приведены параметры, характеризующие микрофрезерование кристалла KDP размером 180×180 мм со скоростью 694 м/мин (частота вращения шпинделя составляет 340 мин<sup>-1</sup> при радиусе фрезерной головки 325 мм).

Для крупногабаритного кристалла размером 420×420 мм рекомендовано выполнять микрофрезерование со скоростью резания 694 м/мин и подачей 8 и 5 мкм/об. Меньшие значения подачи дают очень большие значения основного времени обработки. Параметры, характеризующие условия алмазного микрофрезерования крупногабаритного кристалла KDP, приведены в табл. 7.

## Выводы

1. Расчетные значения сил резания при алмазном микрофрезеровании алюминиевого

сплава и кристаллов KDP соответствуют экспериментальным и составляют десятые и сотые доли ньютона.

2. Относительный сдвиг и радиальная составляющая силы резания значительно увеличиваются для подачи меньше 2 мкм/об (что соответствует средней толщине срезаемого слоя 0,06 мкм) вследствие уменьшения переднего угла, роста пути резания и износа резца при обработке плоской поверхности с заданными размерами.

3. Алмазное микрофрезерование крупногабаритного кристалла KDP рекомендовано проводить при подаче  $S = 5...8$  мкм/об и глубине резания  $t = 2$  мкм, что обеспечивает радиальную составляющую силы резания менее 0,25 Н, температуру резания ниже 110 °С, шероховатость обработанной поверхности 6...7 нм и отклонение от плоскостности менее 1 мкм.

## Литература

- [1] Furukawa Y., Moronuki N. Effect of Material properties on Ultra Cutting Processes. *Annals of the CIRP*, 1988, vol. 37/1, pp. 113–116.
- [2] Wang Hongxiang, Sun Tao, Zhang Longjiang. Experimental Research on Cutting Force in Ultra-precise Turning. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 10–12.
- [3] Uddin M.S., Seah K.H.W., Li X.P., Rahman M., Liy K. Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon. *Wear*, 2004, vol. 257, is. 7–8, pp. 751–759.



- [4] Лапшин В.В., Грубый С.В. Повышение точности и качества алмазной лезвийной обработки плоских поверхностей. *Вестник машиностроения*, 2015, № 5, с. 57–62.
- [5] Андреев Н., Бабин А., Бредихин В., Ершов В. Производство крупногабаритной оптики из водорастворимых кристаллов. *Фотоника*, 2007, № 5, с. 34–37.
- [6] Nikogosyan D.N. *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*. Springer Science+Business Media Inc., 2005. 427 p.
- [7] Блистанов А.А. *Кристаллы квантовой и нелинейной оптики*. Москва, МИСИС, 2000. 432 с.
- [8] Chen H., Dai Y., Zheng Z., Gao H., Li X. Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals. *Machining science and technology*, 2011, vol. 15, is. 2, pp. 231–242.
- [9] Грубый С.В., Лапшин В.В. Моделирование процесса и разработка технологии сверхточной обработки плоских отражателей однорезцовой алмазной фрезерной головкой. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 2, с. 49–74, doi: 10.7463/0214.0699743. URL: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/518/520> (дата обращения 15 января 2018).
- [10] Розенберг Ю.А. *Резание материалов*. Курган, Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. 294 с.
- [11] Грубый С.В. Расчет сил резания при обработке пластичных материалов в широком диапазоне толщин срезаемого слоя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 2, с. 3–10.

## References

- [1] Furukawa Y., Moronuki N. Effect of Material properties on Ultra Cutting Processes. *Annals of the CIRP*, 1988, vol. 37/1, pp. 113–116.
- [2] Wang Hongxiang, Sun Tao, Zhang Longjiang. Experimental Research on Cutting Force in Ultra-precise Turning. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 10–12.
- [3] Uddin M.S., Seah K.H.W., Li X.P., Rahman M., Liy K. Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon. *Wear*, 2004, vol. 257, is. 7–8, pp. 751–759.
- [4] Lapshin V.V., Grubyi S.V. Povyshenie tochnosti i kachestva almaznoi lezviinoi obrabotki ploskikh poverkhnostei [Improvement of accuracy and quality of diamond edge cutting machining of plane surfaces]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 5, pp. 57–62.
- [5] Andreev N., Babin A., Bredikhin V., Ershov V. Proizvodstvo krupnogabaritnoi optiki iz vodorastvorimyykh kristallov [Large-size optics made from water-soluble crystals]. *Fotonika* [Photonics]. 2007, no. 5, pp. 34–37.
- [6] Nikogosyan D.N. *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*. Springer Science+Business Media Inc., 2005. 427 p.
- [7] Blistanov A.A. *Krystally kvantovoi i nelineinoi optiki* [Crystals of quantum and nonlinear optics]. Moscow, MISIS publ., 2000. 432 p.
- [8] Chen H., Dai Y., Zheng Z., Gao H., Li X. Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals. *Machining science and technology*, 2011, vol. 15, is. 2, pp. 231–242.
- [9] Grubyi S.V., Lapshin V.V. Modelirovanie protsessa i razrabotka tekhnologii sverkhtochnoi obrabotki ploskikh otrazhatelei odnoretzsovoi almaznoi frezernoi golovkoi [Process modeling and ultra-precision machining technology development for flat reflectors using a diamond milling head]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and education: scientific publication]. 2014, no. 2, pp. 49–74, doi: 10.7463/0214.0699743. Available at: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/518/520> (accessed 15 January 2018).
- [10] Rozenberg Iu.A. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]. Kurgan, Poligraficheskii kombinat Zaural'e publ., 2007. 294 p.
- [11] Grubby S.V. Raschet sil rezaniya pri obrabotke plastichnykh materialov v shirokom diapazone tolshchin srezhaemogo sloya [Calculation of the Cutting Forces When Processing

Plastic Materials with a Wide Range of Thicknesses of the Cutting Layer]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2018, no. 2, pp. 3–10.

Статья поступила в редакцию 19.06.2018

## Информация об авторах

**ГРУБЫЙ Сергей Витальевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

**ЛАПШИН Василий Владимирович** (Москва) — инженер-технолог. ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: vasylap@mail.ru).

## Information about the authors

**GRUBYI Sergey Vitalievich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Tools and Tooling Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

**LAPSHIN Vasily Vladimirovich** (Moscow) — Manufacturing Engineer. OAO Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49, e-mail: vasylap@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В., Лапшин В.В. Анализ условий и выбор режимов алмазного микрофрезерования плоских поверхностей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 7, с. 20–29, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-20-29.

### Please cite this article in English as:

Grubiy S.V., Lapshin V.V. An Analysis of Conditions and Selection of Modes for Diamond Micro-Milling of Flat Surfaces. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 7, pp. 20–29, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-20-29.



### В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 4-е издание учебного пособия **В.П. Строгалева, И.О. Толкачевой** **«Имитационное моделирование»**

Изложены основные вопросы, связанные с построением моделей реальных систем, проведением компьютерных экспериментов на моделях и управлением этими экспериментами. Подробно рассмотрены принципы имитационного моделирования и представлен соответствующий математический аппарат с большим количеством примеров.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, специализирующихся в области разработки сложных технических систем, а также для специалистов, занимающихся прикладными исследованиями, и руководителей различного рода предприятий.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru