



ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**10
2000**

МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

АО «КОМПАНИЯ "РОССТАНКОИНСТРУМЕНТ"»

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Алексейчук Г.П., Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Гановски В.С., Древалъ А.Е. (председатель секции технологии машиностроения), Дроздов Ю.Н. (председатель секции конструирования и расчета машин), Коновалов Л.В., Кузьмицкий А.А., Кутин А.А., Логунов А.В., Пименов А.Ф., Поляков Д. И., Попов Д.Н., Рыбакова Л.М., Салтыков М.А., Семенов Е.И. (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Сумский С.Н., Трегубов Г.П., Третьяков Э.А. (председатель секции организации и экономики производства), Цыганкова И.А. (ответственный секретарь)

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал переводится
на английский язык,
переиздается
и распространяется
во всем мире фирмой
"Аллертон Пресс" (США)

**Ордена Трудового Красного
Знамени издательство
"Машиностроение"**

Адрес редакции:

*129836, Москва, ГСП-110,
проспект Мира, д. 106
Телефоны: 287-87-93, 287-23-20*

Журнал зарегистрирован 4 ноября
1998 г. за № 018246 в Комитете
Российской Федерации по печати

Отпечатано в Подольской
типографии Чеховского
полиграфического комбината.
142100, г. Подольск, ул. Кирова, 25

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

К 170-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана

Юдин Е. Г. — Университет инженерных школ	3
Решетов Д. Н. — Состояние и тенденции развития деталей машин	11
Сухарев И. П. — Записки инженера	15
Тимофеев Г. А. — Кафедра "Теория механизмов и машин" МГТУ им. Н. Э. Баумана	19
Мухин А. В. — Развитие новых форм прикладных исследований в технологии машиностроения на основе теоретической технологии	22
Грубый С. В. — Теоретические основы операционной технологии сверхточной лезвийной обработки протяженных металлооптических поверхностей	27
Банных О. А., Белокуров О. А., Блинов В. М., Лавриненко В. Ю., Семенов Е. И. — Штамповка поковок с направленным волокнистым строением	33

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Подгаевский О. Л., Жужжалкин Г. В. — Проектирование плоскоцилиндрических передач (базовое звено—плоское колесо)	38
---	----

В помощь конструктору

Иванов А. С. — Соединения валов двигателя и редуктора, редуктора и рабочего органа в конкурентоспособных приводах	45
---	----

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Гусейнов А. Г. — Моделирование абразивного износа прецизионных деталей	49
Попов А. В. — Влияние формы зерен алмазных порошков марок АС4, АС6 на работоспособность шлифовальных кругов	57

ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

Фасхиев Х. А. — Оценка экономической эффективности, качества и конкурентоспособности изделий машиностроения	59
---	----

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Мусатов А. К. — Профессор В. А. Гавриленко — инженер, педагог, ученый (к 100-летию со дня рождения и 170-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана)	67
Головин А. А. — Международный симпозиум по истории машин и механизмов	70
Реклама	48,72
Вниманию читателей	58

To the 170th anniversary of the MSTU after N. E. Bauman

Yudin E. G. — University of engineering schools	3
Reshetov D. N. — State and development trends of the machine parts	11
Sukharev I. P. — Engineer's writings	15
Timofeev G. A. — Chair 'Theory of mechanisms and machines' of the MSTU after N. E. Bauman	19
Mukhin A. V. — Development of the new applied investigation forms in manufacturing engineering on a basis of theoretic technology	22
Gruby S. V. — Theoretic foundations of operating technology for ultraprecision machining of the extended metal-optic surfaces	27
Bannykh O. A., Belokurov O. A., Blinov V. M., Lavrinenko V. Yu., Semenov E. I. — Stamping of forgings with directed fibrous structure	33

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Podgaevsky O. L., Zhuzhalkin G. V. — Design of plane-cylindrical gears (basic link — plane gear)	38
--	----

For designer's benefit

Ivanov A. S. — Shafts connections of motor and gearbox, gearbox and actuator in competitive drives	45
--	----

MANUFACTURING ENGINEERING

Guseynov A. G. — The abrasive wear simulation of precision parts	49
Popov A. V. — The grains form of the diamond powders AC4 and AC6 influence on the grinding wheels efficiency	57

PRODUCTION ORGANIZATION AND ECONOMICS

Faskhiev Kh. A. — The economic efficiency quality and competitiveness evaluation of the machine-building articles	59
---	----

TECHNICAL INFORMATION

Musatov A. K. — Professor V. A. Gavrilenko — engineer, teacher, scientist (to the birth centenary and 170 th anniversary of MSTU after N. E. Bauman)	67
Golovin A. A. — International symposium on history of machines and mechanisms	70

Художественный редактор *Т. Н. Галицына*
 Технический редактор *И. С. Павлова*
 Корректор *Л. Е. Солюшкина*

Сдано в набор 03.08.2000. Подписано в печать 14.09.2000
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага книжно-журнальная. Печать офсетная.
 Усл.-печ. л. 8,82. Усл. кр.-отт. 10,78. Уч.-изд. л. 11,16. Заказ 1128.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.
 При перепечатке ссылка на журнал "Вестник машиностроения" обязательна.

С. В. ГРУБЫЙ, канд. техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Теоретические основы операционной технологии сверхточной лезвийной обработки протяженных металлооптических поверхностей

Развитие чистовых методов механической обработки в последние десятилетия основано на использовании сверхточного оборудования и нанотехнологий при обработке прецизионных деталей машин и приборов, точность размеров, формы и расположения поверхностей которых составляет микрометры или доли микрометров. Характерными объектами таких технологий наряду с гироскопами, элементами вычислительной техники, скоростными прецизионными электрическими и пневматическими приводами (шпинделями) являются металлооптические элементы лазерных резонаторов и фокусирующих оптических систем. К таким оптическим элементам в соответствии с их назначением предъявляются требования: отклонения формы — десятые доли микрометра; средняя арифметическая высота неровностей профиля — менее 10 нм; отражательная способность поверхностей на длине волны излучения 10,6 мкм — до 99 %. Оптическая поверхность таких элементов может быть плоской, сферической, асферической, конической и другой формы. Требования по точности и качеству поверхностного слоя обработанных поверхностей возрастают с уменьшением длины волны падающего лазерного излучения.

В XXI веке следует ожидать роста количества нанотехнологий, используемых в машино- и приборостроительных производствах, в связи с решением ряда глобальных задач, стоящих перед человечеством. Например, изучаются перспективы уменьшения энергетического кризиса за счет создания космических электростанций, в том числе и солнечных. Одним из возможных вариантов лазерной энергетической системы является солнечная электростанция на околоземной орбите, преобразующая солнечную энергию в лазерное излучение с передачей его потребителям на Земле или в космосе [1]. Здесь могут быть использованы газовые CO_2 - и СО-лазеры с длинами волн соответственно 10,6 и 5 мкм и телескопические ретрансляторы, обеспечивающие адаптивность управления волновым фронтом с точностью $\lambda/20$. Основой таких систем являются крупногабаритные составные и адаптивные зеркала различных конструкций с металлической отражающей поверхностью [2].

Традиционным методом чистовой обработки металлооптических элементов являются чистовое шлифование и окончательное полирование свободным абразивом и суспензией, что позволяет достичь наилучшего прилегания обрабатываемой поверхности к идеальной сферической или плоской поверхности. По существу, метод основан на взаимном притирании инструмента и детали через слой абразивной суспензии. Инструментом служит полировальник с рабочим слоем из полировальной смолы. 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 возрастает при обработке крупногабаритных и в особенности асферических металлооптических поверхностей и может достигать десятков и сотен часов, причем при изготовлении определенного вида асферической оптики [3] могут рекомендоваться различные методы полирования.

В последние десятилетия находит развитие и применение метод сверхточной лезвийной обработки — алмазное микроточение (АМТ) как метод автоматизированной обработки поверхностей металлооптики алмазными монокристаллическими резаками на специальных сверхточных станках. Основное преимущество метода заключается в существенном увеличении производительности по сравнению с традиционными методами, в особенности при обработке крупногабаритных асферических поверхностей и металлических зеркал сложной формы для высокоэнергетических лазерных установок. Поверхностный слой после АМТ имеет повышенное качество и лучшее металлографическое состояние, чем полированный, а оптические поверхности — более высокий порог разрушения при действии лазерного излучения [4].

Имеют место многочисленные литературные данные по эффективной сверхточной обработке изделий диаметром до 2000 мм и массой до 700 кг с поверхностями разных 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. Сообщается, что при алмазном микроточении даже крупногабаритных металлооптических элементов достигается точность обработки от 0,5 до 0,025 мкм со средней квадратичной величиной микронеровностей менее 10 нм.

Наиболее техничеки сложной проблемой применения метода АМТ в оптико-механической промышленности является создание специальных сверхточных станков, реализующих возможности метода, и сложного инженерного обеспечения по термостабилизации, вибро- и шумоизоляции, тонкой очистке технологических и окружающей сред. Эти задачи успешно решались отечественной станкоинструментальной промышленностью в период 80 — начала 90-х годов. В МСПО "Красный пролетарий", ЭНИМСе, СКТЬ ИСМ была создана гамма сверхточных станков, использованных на ряде предприятий [4—6]. В частности, в СКТЬ ИСМ

Таблица 1

Углы и параметры сечения срезаемого слоя в зависимости от текущего радиуса заготовки

R_0 , мм	λ_k^0	η_c^0	S_0 , мкм/об	a_{ef} , мкм
750	37,1	39,7	6,52	0,28
500	26,1	28,7	7,15	0,27
250	15,9	18,5	7,50	0,27
200	13,9	16,5	7,54	0,27
100	10,0	12,6	7,59	0,26
50	8,0	10,6	7,61	0,26
10	6,4	9,0	7,61	0,26
1	6,1	8,7	7,61	0,26
0,1	6,7	9,3	7,61	0,26
0,01	13,0	15,6	7,61	0,27

ругих свойств обрабатываемого и инструментального материалов [8, 9]. Рассчитаны силы, действующие на передней поверхности алмазного реза: F_f — трения; N — нормальная; P'_z , P'_y — составляющие тангенциальная и нормальная, действующие в направлении схода стружки; $P_{zр}$, $P_{yр}$, $P_{xр}$ — составляющие силы в системе координат XYZ (см. рис. 2).

Математически описано пятно контакта стружки с передней поверхностью инструмента, для чего принято, что длина контакта в каждом сечении пропорциональна толщине среза в направлении схода стружки.

Распределения контактных нормальных нагрузок на передней поверхности и их средние значения описаны выражениями:

$$\sigma_p = \sigma_m (1 - m)^{n_0}, \sigma_{psr} = \sigma_m / (n_0 + 1),$$

где σ_m — максимальная контактная нагрузка на режущей кромке; m — относительная координата; $n_0 = 3$ — показатель степени.

Тогда связь максимальной контактной нагрузки с нормальной силой на передней поверхности можно выразить как

$$\sigma_m = N(n_0 + 1) / f_p,$$

где f_p — площадь пятна контакта стружки с передней поверхностью.

Принимая условие, что максимальное значение контактной нормальной нагрузки является постоянным вдоль режущей кромки, определим средние нормаль-

ные и тангенциальные контактные нагрузки на задней поверхности:

$$q_z = \sigma_m \quad \text{при } h_z = 0;$$

$$q_z = \frac{\sigma_m}{l_2} \left[\rho |\gamma_k| + \frac{h_z + \rho(1 - \sin \gamma_k) \operatorname{ctg} \alpha_0}{n_0 + 1} \right] \quad \text{при } h_z > 0;$$

$$\tau_z = f_{tr} q_z,$$

где l_2 — длина общего контакта по задней поверхности; h_z — износ по задней поверхности; ρ — радиус скругления режущей кромки; $\gamma_k = -1,085$ рад — критическое значение переднего угла; α_0 — задний угол в направлении схода стружки; f_{tr} — средний коэффициент трения.

Анализ составляющих коэффициента трения показал преобладающее значение молекулярной составляющей, а общая величина коэффициента при обработке меди или алюминиевого сплава алмазным монокристаллическим резцом составляет $0,06 \div 0,07$. Нормальную N_z и тангенциальную F_z силы, действующие на задней поверхности, определяли через средние контактные нагрузки, а суммарное влияние сил на задней и передней поверхностях инструмента учитывали через общие составляющие P_{z0} , P_{y0} , P_{x0} силы резания.

Температуру резания рассчитывали по методике А. Н. Резникова с учетом действующих источников и стоков теплоты.

Анализ результатов расчетов показал, что общие составляющие силы изменяются при движении реза от периферии к центру вращения крупногабаритной заготовки, причем значительно возрастает радиальная составляющая P_{y0} вследствие изнашивания реза [11]. Глубина резания оказывает существенное влияние на силы резания, поэтому чистой проход должен иметь припуск не более $4 \div 6$ мкм. Следует обратить внимание на малую величину сил резания при сверхточной обработке, которые изменяются в пределах десятых и сотых долей ньютона.

Низкие значения сил резания и коэффициента трения определяют малую тепловую напряженность зоны резания. Так, температура резания в сумме с температурой окружающей среды для периферийной точки поверхности диаметром 1000 мм составляет при обработке сплава АМг6 50°C , при обработке меди М06 — 35°C ($\omega = 150 \text{ мин}^{-1}$, $v_s = 1,37 \text{ мм/мин}$, $h_z = 0$).

Вместе с тем, исходя из уникальных требований по точности обработки — десятые доли микрометра, при анализе погрешностей необходимо учитывать составляющие: деформацию технологической системы под действием радиальной составляющей силы резания; радиальный износ реза; термическую деформацию (удлинение) реза. Установлено преобладающее влияние радиального износа и термического удлинения реза на погрешность обработки. На основании проведенного анализа [8, 11] отмечена возможность достижения погрешности обработки менее 1 мкм при сверхточной обработке крупногабаритных поверхностей. Намечены пути снижения погрешности обработки: оптимизация режимных параметров и управление процессом изнашивания инструмента; коррекция погрешности с помо-

Таблица 2
Влияние скорости подачи на величину подачи и эффективную толщину среза

v_s , мм/мин	S_0 , мкм/об	a_{ef} , мкм
0,76	4,9	0,14
1,14	7,3	0,22
1,37	8,8	0,23
1,52	9,8	0,26
2,28	14,6	0,44

щью пьезопривода рейсовой головки в процессе обработки в режиме реального времени.

Разработана методика оптимизации управления режимами резания, в основе которой лежит установленная функциональная связь между скоростью изнашивания инструмента, величиной износа и управляющими режимными параметрами. На основе изучения закономерностей изнашивания природных монокристаллических резцов при сверхточной обработке [10, 12, 13] определены выражения для расчета величины износа и скорости изнашивания инструмента в тангенциальном направлении действия вектора скорости резания:

$$h_z = 0,00042 L^{0,537},$$

$$I_{nt} = f_1(h_z, \omega, v_s) = I_d 2,7485 \cdot 10^{-13} h_z^{-0,863} v, \quad (1)$$

где L — путь резания, км; I_{nt} — скорость изнашивания, мм/мин; h_z — величина износа, мм; v — скорость резания, мм/мин. Прерывистое точение деталей при внеосевом их расположении или имеющих в плане форму прямоугольника, эллипса вызывает увеличение скорости изнашивания по сравнению с непрерывным точением сплошного диска, что учитывается коэффициентом I_d [14].

В качестве примера на рис. 3 приведены кривые, характеризующие изменение скорости изнашивания алмазного резца при непрерывной сверхточной обработке крупногабаритной алюминиевой поверхности в зависимости от текущего радиуса заготовки ($\omega = 150 \text{ мин}^{-1}$, $t = 4 \text{ мкм}$).

С целью обеспечения минимальной погрешности обработки на окончательном чистовом проходе решена задача оптимального управления режимными параметрами. В качестве объекта управления рассмотрен процесс изнашивания инструмента, математическая модель которого задана уравнением (1). Процесс изнашивания управляется режимными параметрами ω и v_s . Внешне изменение процесса изнашивания проявляется в том, что его фазовая координата — величина износа h_z , меняется с течением времени. При формулировке

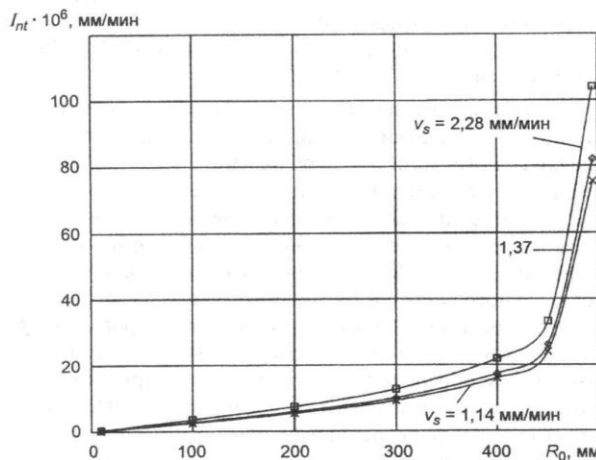


Рис. 3

краевых условий принято, что фазовое ограничение отсутствует, а общее время чистового прохода не фиксируется.

Качество процесса управления оценено количественным критерием — функционалом вида

$$x_0 = \int_{t_0}^{t_1} f_0(h_z, \omega, v_s) dt \rightarrow \min,$$

где f_0 — функция величины износа и режимных параметров; t_0 , t_1 — время начала и окончания чистового прохода.

Для непрерывной обработки функция f_0 в каждой точке управления представлена в виде

$$f_0 = |y_{sti} + h_{ri} + d_{ti}|,$$

где y_{sti} , h_{ri} , d_{ti} — соответственно статическая деформация технологической системы, радиальный износ и термическая деформация (удлинение) резца.

Для прерывистой обработки рассмотрены вынужденные колебания технологической системы, вызванные постоянной обобщенной силой, внезапно приложенной к системе и действующей в течение времени контакта резца с заготовкой. Наибольшая величина погрешности по времени каждого контакта находится в пределах действия импульса силы. Тогда функция f_0 на j -м обороте планшайбы будет иметь вид

$$f_0 = |d_{j \max}|, \\ d_{j \max} = \max(d_{1 \max}, d_{2 \max}, \dots, d_{k \max}) + d_{tj},$$

где $d_{k \max}$ — наибольшая деформация технологической системы и радиального износа резца при k -м контакте резца с заготовкой на j -м обороте планшайбы; d_{tj} — температурное удлинение резца.

В качестве примера результатов анализа процесса при вынужденных колебаниях технологической системы на рис. 4 приведены кривые, характеризующие общую величину и составляющие погрешности обработки поверхности, имеющей в плане форму прямоугольника с размерами 380×270 мм, при ее центральном расположении на планшайбе станка. Прерывистый характер обработки имеет место до значения текущего радиуса заготовки 135 мм при движении резца от периферии к центру. На рис. 4, а приведены графики, характеризующие изменение составляющих погрешности: радиального износа h_r резца (1); температурного удлинения d_{tj} резца (2) и общей погрешности $d_{j \max}$ (3) в зависимости от текущего радиуса R_0 заготовки при жесткости технологической системы 20 Н/мкм. Графики, характеризующие общую погрешность обработки при жесткости соответственно: 0,2 (1); 2,0 (2); 20 Н/мкм (3), показаны на рис. 4, б. По результатам проведенного анализа подтверждено преобладающее влияние радиального износа и температурного удлинения резца на общую погрешность обработки.

При решении общей задачи оптимального управления и в соответствии с формулировкой принципа максимума Л. С. Понтрягина [15] введена функция

$$H = \Psi_0 f_0(h_z, \omega, v_s) + \Psi_1 f_1(h_z, \omega, v_s), \quad (2)$$

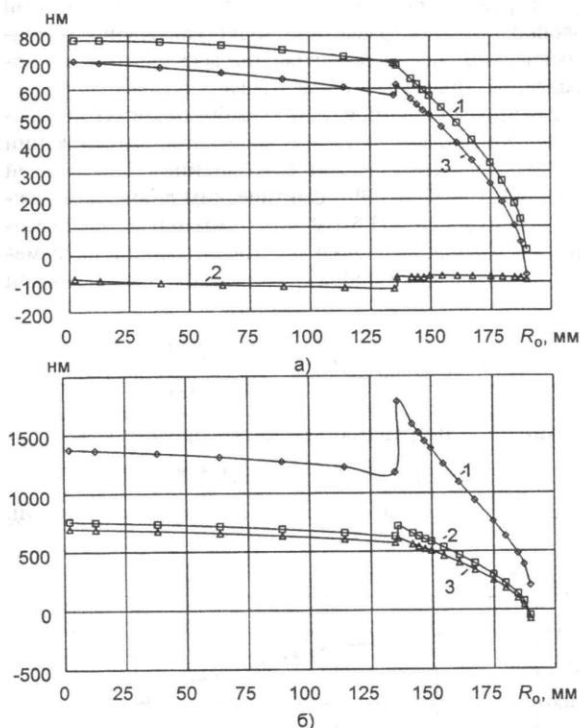


Рис. 4

где сопряженные переменные Ψ_0 и Ψ_1 связаны системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_0}{dh_z} &= -\frac{1}{f_0} \left(\Psi_0 \frac{df_0}{dh_z} + \Psi_1 \frac{df_1}{dh_z} \right); \\ \frac{d\Psi_1}{dh_z} &= -\frac{1}{f_1} \left(\Psi_0 \frac{df_0}{dh_z} + \Psi_1 \frac{df_1}{dh_z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

с частными производными по величине износа реза, которые найдены методом численного дифференцирования второго порядка точности [16].

Уравнения (3) суть дифференциальные уравнения первого порядка, применительно к которым поставлена задача Коши по поиску решений $\Psi_0(h_z)$, $\Psi_1(h_z)$ системы уравнений, удовлетворяющих начальным условиям: $\Psi_0(0) = -1$; $\Psi_1(0) = 0$.

Приближенное решение задачи Коши найдено на конечном множестве точек отрезка фазовой координаты $[h_{z0}, h_{z\max}]$, $h_z = h_{z0} + jh$, где h_{z0} — начальное значение; $h_{z\max}$ — конечное значение, соответствующее окончанию чистового прохода; h — дискрета по величине износа, определяет число точек управления. Для решения дифференциальных уравнений использован численный метод Рунге—Кутты четвертого порядка точности [16].

В соответствии с принципом максимума для любого текущего времени обработки, которому соответствует величина износа h_z инструмента, функция (2) достигает максимума при оптимальных значениях режимных параметров $(\omega, v_s)_{\text{opt}}$:

$$H[\Psi_0(h_z), \Psi_1(h_z), h_z, (\omega, v_s)_{\text{opt}}] \rightarrow \max.$$

При практической реализации расчетного алгоритма в каждой точке управления, которая характеризуется своей величиной износа, при фиксированных значениях $\Psi_0(h_z) = \text{const}$, $\Psi_1(h_z) = \text{const}$, рассчитанных в соответствии с формулами (3), осуществляли минимизацию функции $f_u(\omega, v_s)$ и находили соответствующие экстремуму оптимальные значения режимных параметров:

$$f_u(\omega, v_s) = -H; \quad f_u[(\omega, v_s)_{\text{opt}}] \rightarrow \min. \quad (4)$$

Минимизация функции (4) выполнена методом градиентного спуска. Режимные параметры имеют ограничения: по области определения: $\omega_{\max} = 300 \text{ мин}^{-1}$, $\omega_{\min} = 80 \text{ мин}^{-1}$; $v_{s\max} = 4,6 \text{ мм/мин}$, $v_{s\min} = 0,7 \text{ мм/мин}$, а также по наибольшему значению параметра R_{\max} шероховатости обработанной поверхности

$$v_s = S_{0\max} \omega / 1000; \quad S_{0\max} = 0,0086 R_{\max}^{1,923},$$

где $S_{0\max}$ — предельное значение подачи, мкм/об; R_{\max} — заданное значение шероховатости, нм.

Связь параметров шероховатости с величиной подачи установлена по результатам исследований состояния поверхностного слоя металлических зеркал, обработанных алмазным микроточением [14].

Варианты оптимального управления режимными параметрами без ограничений и с ограничениями по шероховатости обработанной поверхности представлены в виде зависимостей частоты вращения ω шпинделя (рис. 5, а) и скорости подачи v_s (рис. 5, б) от текущего радиуса R_0 заготовки. Графики рассчитаны для условий

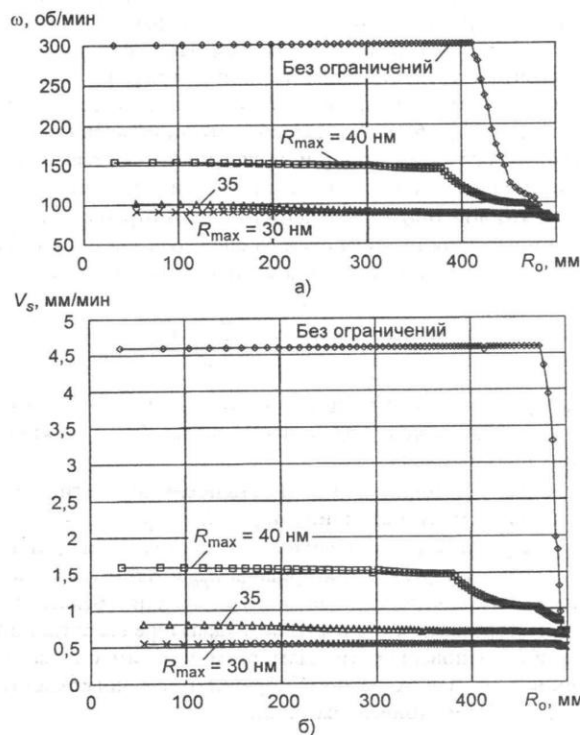


Рис. 5

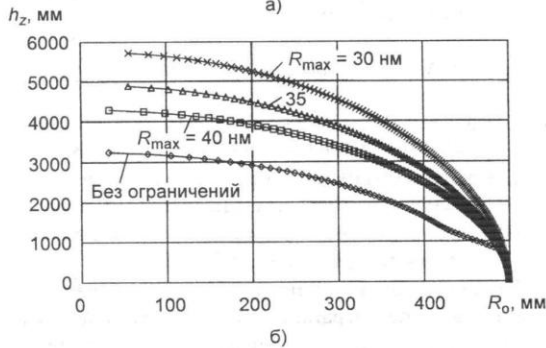
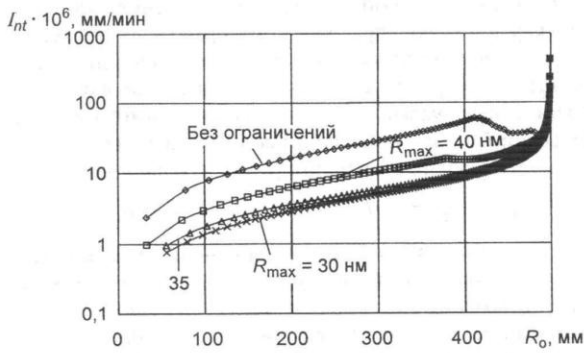


Рис. 6

непрерывного характера сверхточной обработки плоской (сферической) медной поверхности диаметром 1000 мм при движении резца от периферии к центру вращения: $t = 4$ мкм, $j = 20$ Н/мкм. На рис. 6 приведены соответствующие этим вариантам графики изменения скорости изнашивания I_{nt} (рис. 6, а) и величины износа h_z (рис. 6, б). Характерно, что минимальной шероховатости обработанной поверхности соответствует минимальная скорость изнашивания инструмента.

В каждой точке управления предусмотрена коррекция погрешности обработки за счет хода пьезопривода резцовой головки, величина которого равна

$$x_{pp} = -\text{sign}(d_{st}) T_r \left(\frac{d_{st}}{d_{pp}} \right) d_{pp},$$

где d_{st} — расчетная величина погрешности; T_r — функция, определяющая целую часть числа; d_{pp} — дискрета хода пьезопривода.

Тогда остаточная погрешность после корректировки составляет малую величину $d_{stк} = d_{st} + x_{pp}$.

Графики, характеризующие величины погрешности d_{st} обработки, хода пьезопривода d_{pp} и остаточной погрешности $d_{stк}$ при оптимальном управлении режимными параметрами и непрерывном характере сверхточной обработки поверхности диаметром 1000 мм с ограничением по шероховатости обработанной поверхности $R_{max} = 40$ нм, приведены на рис. 7.

В процессе формообразования асферической поверхности вершина резца кинематически перемещается

по поверхности базовой сферы, а пьезопривод резцовой головки в каждой расчетной точке управления накладывает дополнительное движение асферизации по направлению нормали к обрабатываемой поверхности.

Рассмотрен общий случай обработки вогнутой параболической поверхности при внеосевом расположении трех алюминиевых зеркал с уравнением образующей асферики $y = x^2/10160$ и фактическим диаметром каждой поверхности 403,5 мм [7]. Суммарный ход пьезопривода резцовой головки учитывает величину перемещения как для формообразования, так и для коррекции погрешности

$$x_{pp} = \text{sign}(d_{asf} - d_{j\max}) T_r \left(\frac{d_{asf} - d_{j\max}}{d_{pp}} \right) d_{pp}$$

с остаточной погрешностью после корректировки

$$d_{asfk} = -|(d_{asf} - d_{j\max}) - x_{pp}|,$$

где d_{asf} — заданная величина асферизации поверхности.

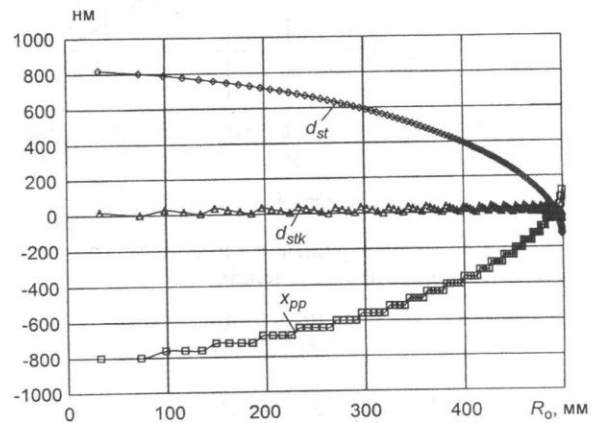


Рис. 7

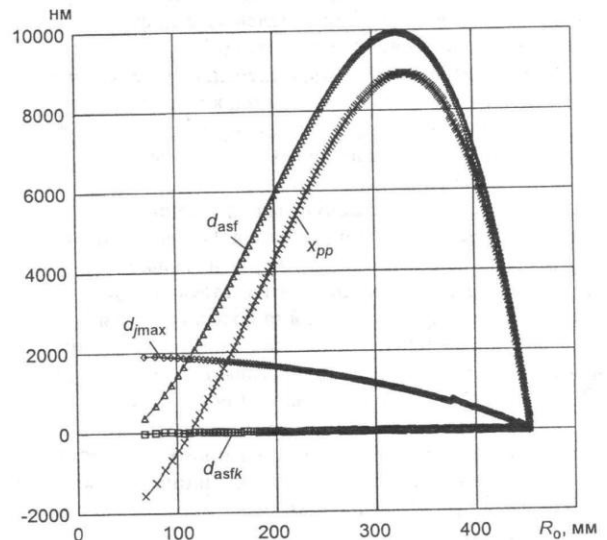


Рис. 8

При обработке внеосевых параболоидов наибольшая величина асферизации составила 9900 нм, погрешность при прерывистом характере обработки — около 2000 нм, суммарный ход пьезопривода резцовой головки обеспечивает как требуемое движение асферизации, так и коррекцию погрешности, а остаточная погрешность заключена в пределах дискретности хода пьезопривода (рис. 8). Представленные графики характерны для варианта оптимального управления режимными параметрами ($t = 4$ мкм, $j = 20$ Н/мкм) с ограничением по шероховатости обработанной поверхности $R_{\text{max}} = 35$ нм.

Таким образом, повышение эффективности сверхточной обработки достигнуто за счет разработки математической модели процесса и оптимального управления режимными параметрами. С учетом отсутствия активных средств контроля погрешности обработки непосредственно на станке в процессе обработки расчетная методика является единственным эффективным инструментом достижения предельной точности лезвийной обработки протяженных металлооптических поверхностей. Развитие метода в части практической реализации возможно только при создании сверхточных станков нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернявский Г. М., Чернов А. А. Лазерные системы в космосе (информационная технология). М.: Радио и связь. 1995. 224 с.
2. Цеснек Л. С., Сорокин О. В., Золотухин А. А. Металлические зеркала. М.: Машиностроение. 1983. 231 с.
3. Казаков Н. П., Горелик В. В. Изготовление асферической оптики. М.: Машиностроение, 1978. 248 с.

4. Алмазное точение в производстве оптических деталей / Л. В. Попов, С. В. Любарский, В. Г. Соболев, С. Е. Шевцов // Оптико-механическая промышленность. 1990. № 11. С. 12—17.
5. Ашкеров Ю. В., Владиславский Ю. А., Минаев А. И. Станок для предварительного алмазного точения сферических оптических поверхностей // Оптико-механическая промышленность. 1987. № 8. С. 31—33.
6. Грубый С. В. Развитие метода алмазного микроточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики // Технология металлов. 1999. № 5. С. 26—30.
7. Грубый С. В., Милов И. В. Технологические особенности алмазного микроточения крупногабаритных прецизионных поверхностей // Вестник машиностроения. 1995. № 6. С. 37—40.
8. Грубый С. В. Выбор условий алмазного микроточения крупногабаритных поверхностей // Вестник машиностроения. 1994. № 11. С. 40—43.
9. Добровольский Г. Г., Жоголев Д. А. Расчет угла сдвига и усадки стружки при алмажном микроточении // Сверхтвердые материалы. 1983. № 5. С. 44—49.
10. Добровольский Г. Г., Дятлов Ю. А. Точность формы изделий при алмажном микроточении // Сверхтвердые материалы. 1990. № 4. С. 58—62.
11. Грубый С. В. Сверхточная токарная обработка крупногабаритных поверхностей // Технология металлов. 2000. № 3. С. 13—18.
12. Грубый С. В., Муратова Н. И. Повышение эффективности прецизионной обработки резами, оснащенными природными алмазами // Изв. вузов. Машиностроение. 1990. № 9. С. 107—112.
13. Грубый С. В., Татьяна Н. А. Исследование и применение кристаллов природных алмазов и резцов повышенной износостойкости // Вестник машиностроения. 1997. № 4. С. 19—23.
14. Грубый С. В., Боговцева Л. П., Костеев В. А. Исследования состояния прецизионных поверхностей, обработанных методом алмазного микроточения // Вестник машиностроения. 1996. № 7. С. 19—24.
15. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. М.: Наука. 1983. 392 с.
16. Волков Е. А. Численные методы. М.: Наука. 1982. 256 с.

УДК 621.7.01

О. А. БАННЫХ, академик РАН, д-р техн. наук (ИМЕТ РАН),
О. А. БЕЛОКУРОВ (МГТУ им. Н. Э. Баумана),
В. М. БЛИНОВ, д-р техн. наук (ИМЕТ РАН), В. Ю. ЛАВРИНЕНКО,
Е. И. СЕМЕНОВ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Штамповка поковок с направленным волокнистым строением

Получение деталей с повышенными стойкостными характеристиками на сегодняшний день является актуальной задачей для отечественного машиностроения. Большинство деталей в машиностроении имеют контактные поверхности, работающие на истирание или контактную прочность. К таким деталям относятся коленчатые валы двигателей, работающие в паре с подшипниками скольжения, шаровые пальцы шарнира рулевого управления, шариковые и роликовые подшипники и т. д. Среди показателей качества изготов-

ляемых деталей можно выделить ряд факторов, определяющих износостойкость, усталостную контактную прочность, а следовательно, и долговечность детали; это — благоприятное расположение волокон по рабочему контуру (контактной поверхности детали) штампованной заготовки, равномерное распределение полей деформаций и напряжений в поверхностном слое детали, оптимальная окончательная термическая обработка [1, 2].

Одним из наиболее эффективных способов существенного повышения

износостойкости и усталостной контактной прочности является создание благоприятного расположения волокон на рабочей контактной поверхности детали. Получение этих свойств можно обеспечить путем изменения технологии изготовления детали.

Исследования влияния волокнистого строения на контактную износостойкость деталей показали существенную зависимость стойкости от направления волокон при выходе на контактную поверхность [3]. Вместе с тем технология обработки давлением в настоящее время позволяет получать любое заданное направление волокон при выходе на контактную поверхность.

Также созданы программы для моделирования процессов формоизменения при обработке металлов давлением, позволяющие моделировать расположение волокон по конфигу-