

## Развитие метода алмазного микроточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики

С.В. ГРУБЫЙ

**В** изделия машиностроения и приборостроения входят детали, взаимодействующие в процессе эксплуатации с направленным электромагнитным излучением, в том числе — лазерным. По своему назначению можно выделить металлооптические элементы, входящие в состав лазерных резонаторов, фокусирующих оптические системы различного назначения. Металлооптические элементы содержат отражающие поверхности, которые характеризуются предельно высокими требованиями по точности формы и оптическим характеристикам.

Традиционным методом обработки отражающих поверхностей является химико-механическое полирование свободным абразивом, дающее предельно высокую точность обработки. В последние десятилетия получил разработку и развитие метод тонкого алмазного точения — микроточения (АМТ) как метод автоматизированной обработки таких поверхностей лезвийным алмазным монокристаллическим инструментом на специальных сверхточных (ультрапрецизионных) станках.

К основным преимуществам АМТ относятся повышенное качество обработанной поверхности вследствие отсутствия вносимых дефектов (шаржирования абразивными частицами, фрагментации структуры, загрязнения полировальным составом), а также высокая производительность обработки, прежде всего асферических и крупногабаритных поверхностей.

Преимущества АМТ в полном объеме могут быть проявлены только при использовании специальных сверхточных станков (стендов), отличительной особенностью которых является наличие аэроэстатических подшипников высокой жесткости во всех подвижных узлах, специализированных систем ЧПУ или непосредственного

взаимодействия с управляющей ЭВМ, использование встроенных лазерных измерителей микроперемещений, пьезопроводов, активных средств защиты от внешних вибраций. В качестве примера в табл. 1 приведены параметры аэроэстатических шпинделей ряда станков алмазного точения (САТ).

Таблица 1

Модель САТ	Жесткость, Н/мкм		Наибольшая нагрузка, Н	Точность при вращении, мкм
	осевая	радиальная		
MS-300	1390	870	660	0,1
SS-155	175	175	1760	0,2
4B, 4R	116	451	880	0,05
10B	317	1736	5290	0,075
MO1045	900	300	1000	0,15

В период 1980–1990 годов усилиями ряда станкостроительных фирм и научно-исследовательских лабораторий США, Западной Европы и Японии (Lawrence Livermore Laboratory, Union Carbide, Moore Special Tools, Pneumo Precision, Ex-Cell-O, Philips Research Laboratory, Cranfield Union for Precision Engineering и др.) создана гамма уникальных станков, реализующих возможность АМТ прецизионных поверхностей. В научной печати сообщается, что в лабораторных условиях на этих станках достигнуто отклонение от заданной формы обработанной поверхности 25 нм, среднее квадратичное отклонение профиля 4,2 нм при максимальных габаритах обрабатываемых

Таблица 2

Регион	Модели CAT
США	POMA, LODTM, BODTM, O-M-18-AG, AG-105, MSG-700, ULTRA-2000
Западная Европа	KALAT, SUPER-MICROTURNT, ULTRA 300/500
Япония	AHP-30, DPL-400, SPM-4, UFG-200, SNC-220C, UPL-1, NIX-W, CERACOM
Россия	МК6562, МК6501, МК65102, МК6504, МК6516, МК6521Ф3, МК6522Ф3
Украина	СШД3820, МО1045ЛФ, МО1045, САТ1801, САТ1805, САТ1815, МО1805, МО200МГ, МО600ПЛ

изделий до 2000 мм (станок по проекту LODTM, США).

Отечественные уникальные сверхточные станки по своим технологическим возможностям приближаются к лучшим зарубежным аналогам. Такие станки разработаны и изготовлены в МСПО "Красный пролетарий" и в СКТБ с ОП Института сверхтвердых материалов АН Украины.

В табл. 2 приведены некоторые модели САТ, реализующие возможность АМТ прецизионных поверхностей.

Специализация станков определяется формой обрабатываемых поверхностей и допустимыми габаритами обрабатываемых изделий. Следует отметить, что применение этих станков требует сложного инженерного обеспечения: кондиционирования и температурной стабилизации помещения, оборудования и зоны резания, виброизоляции, тонкой очистки сжатого воздуха.

Метод АМТ и сверхточные станки используют не только для обработки металлооптических отражателей, но и отражателей для лазерного синтеза, магнитных дисков памяти, барабанов светокопий, полупроводниковых элементов, элементов видеотехники, больших интегральных микросхем, элементов медицинской техники и других изделий.

МГТУ им. Н.Э. Баумана на

протяжении ряда лет проводил совместные работы по разработке и внедрению сверхточных станков и технологии АМТ на производственно-экспериментальной базе НПО "Композит". Некоторые технические характеристики использованных САТ приведены в табл. 3.

Особый интерес представляет возможность обработки крупногабаритных поверхностей отражателей на станке САТ1815 (разработка СКТБ с ОП ИСМ), так как в этом случае проявляются основные преимущества АМТ по производительности обработки. Общий вид станка САТ1815 показан на рис. 1, а общая планировка станка – на рис. 2. Основой станка является монолитная станина из природного гранита, которая установлена на специальных пневматических виброизолирующих опорах на бетонный изолированный фундамент. Такая конструкция позволяет надежно защитить зону резания от внешних вибраций в полосе частот от нескольких герц и выше. На гранитной станине смонтированы шпиндельная и суппортная группы, взаимная настройка которых обеспечивает обработку заданной формы поверхности (плоскость, сфера выпуклая или вогнутая). Во всех подвижных узлах станка используются аэроэстатические подшипники, в качестве привода главного движения применен линейный электродвигатель. Движение подачи шпиндельной группы по базовой плоскости гранитной станины осуществляется неполноповоротным гидродвигателем.

Настройку станка на заданный радиус сферической поверхности осуществляют разворотом двух кососрезанных дисков шпиндельной группы

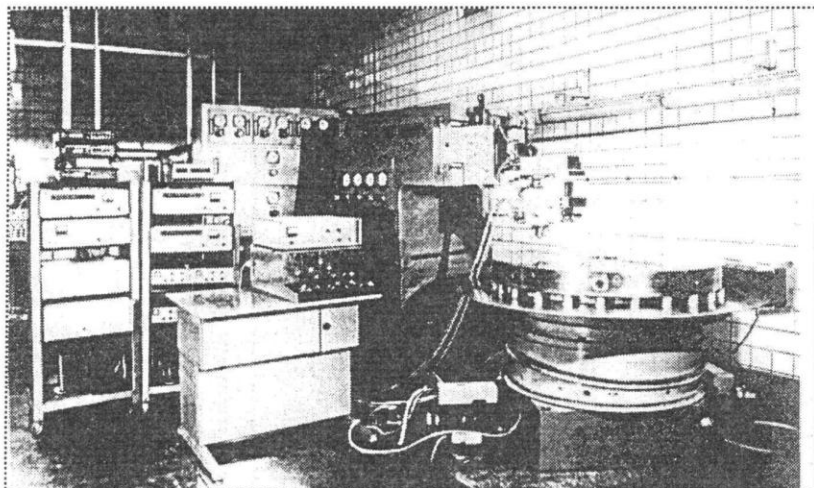


Рис. 1. Общий вид специального сверхточного станка САТ1815

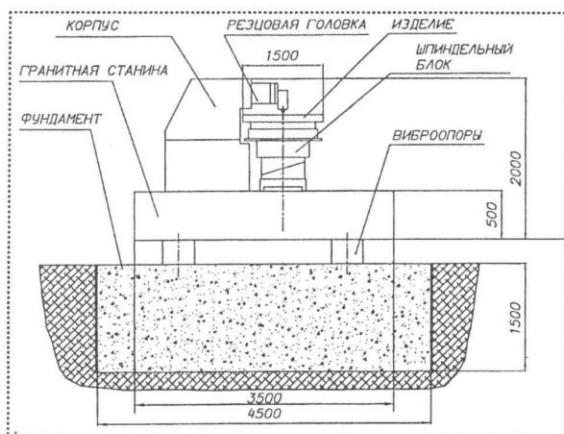


Рис. 2. Планировка станка CAT1815

на расчетные величины углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  (рис. 3). В процессе обработки планшайба и переходный крупногабаритный диск с закрепленным изделием вращаются с частотой  $\omega$  вокруг оси  $O_3-O_4$ . Шпиндельная группа перемещается по базовой плоскости гранитной станины по дуге радиуса  $L$  вокруг оси  $O_1-O_4$  со скоростью рабочей подачи. Ось резцовой головки разворачивается на расчетный угол  $\alpha$  за счет разворота верхнего кососрезанного диска, что обеспечивает заданный радиус сферической поверхности. Юстировкой станка добиваются такого положения, когда оси  $O_3-O_4$  и  $O_1-O_4$

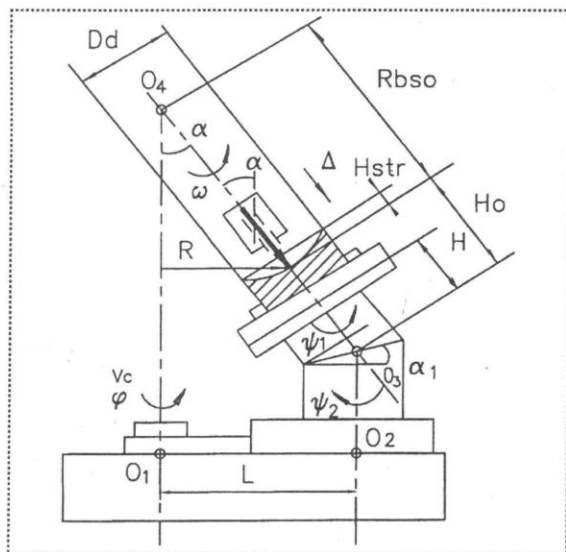


Рис. 3. Схема настройки станка CAT1815 на обработку сферы

находятся в одной плоскости (с помощью разворота нижнего кососрезанного диска), а траектория относительного движения реза проходит через центр вращения изделия. Обработка плоской поверхности является частным случаем обработки сферической поверхности, когда оси  $O_3-O_4$  и  $O_1-O_4$  параллельны.

Обработку асферической поверхности выполняют при настройке станка на сферу с наложением дополнительного движения формообразования от пьезопривода резцовой головки. Перемещения пьезопривода выполняются дискретно по 0,04 мкм от управляющей ЭВМ в режиме реального времени с контролем по лазерному измерителю микроперемещений и связаны с угловой координатой  $\phi$  положения шпиндельной группы на базовой плоскости гранитной станины.

Технологическая схема, характеризующая обработку крупногабаритной поверхности на станке CAT1815, приведена на рис. 4, где движение  $D_r$  – главное движение резания, относительное движение реза  $D_s$  – движение подачи. Процесс АМТ осуществляется природным монокристаллическим алмазным резцом, имеющим радиус  $r$  при вершине.

Проведенные технологические исследования показали, что для создания оптической поверхности глубина резания  $t$  на чистовом проходе должна находиться в пределах 4–6 мкм. Скорость движения подачи  $v_c$  оказывает влияние на величину подачи на оборот  $S_o$ , путь резания одного прохода  $L_p$  и основное технологическое время  $t_o$ , а также на качество обработанной поверхности (параметр  $R_{max}$ ). Ниже приведены технологические параметры для обработки отражающей поверхности диаметром 1000 мм на станке CAT1815, частота вращения шпинделя  $\omega = 150$  об/мин:

$v_c, \text{ }^\circ/\text{с}$ .....	0,008	0,005	0,003	0,0015	0,001
$S_o, \text{ мкм/об}$ .....	38	24	14	7,1	4,8
$L_p, \text{ мкм}$ .....	19	31	52	103	155
$t_o, \text{ мин}$ .....	82	131	219	438	657
$R_{max}, \text{ нм}$ .....	79	62	47	33	27

Из данных табл. 4 следует, что скорость движения подачи для создания оптической поверхности ( $R_{max} < 45$  нм) должна быть менее 0,003  $^\circ/\text{с}$ , однако ее уменьшение приводит к возрастанию пути резания (увеличивает износ инструмента) и значительно увеличивает время обработки. Таким

Таблица 3

Модель станка	Габарит изделия, мм	Форма поверхности	Радиус кривизны, мм	Асферизация, мкм	Точность формы, мкм	Показатель шероховатости, $R_{\text{max}}$ , нм
МО1805	300	Плоскость, сфера, асферика	500	20	0,5	25
САТ1805	500	Плоскость, сфера, асферика	500	140	0,1	25
СТ1815	1500	Плоскость, сфера, асферика	3000	110	Общая 3, местная 0,5	35
МК6516	500	Плоскость, сфера	1700	—	0,5	25

Таблица 4

Вид поверхности, размеры, мм	Форма поверхности	Материал	Расположение на планшайбе
Кольцо 198×120	Плоскость	АМг6	Осевое
Кольцо 198×120	Сфера $R = -6700$		
Круг 995	Сфера $R = -6700$	Cu	Внеосевое, 3 детали
Круг 500	Плоскость	АМг6	
Круг 406	Парабола		
Круг 500	Сфера $R = -5090$		
Эллипс 380×270	Плоскость	Cu	Осевое

образом, назначать режимы АМТ крупногабаритной поверхности необходимо с учетом стойкости алмазного инструмента и требуемого качества обработки. Следует отметить возможность уменьшения времени одного прохода за счет увеличения частоты вращения шпинделя, однако это допустимо при наличии прецизионной балансировки шпинделя с изделием вследствие больших вращающихся масс.

За время эксплуатации станка САТ1815 на производственной базе НПО "Композит" накоплен положительный опыт по обработке крупногабаритных прецизионных поверхностей различного типа из меди и алюминиевого сплава [1]. Показана возможность обработки с требуемой точностью и качеством поверхностей в виде диска или кольца, центр которых совпадает с осью вращения планшайбы (непрерывный характер обработки), а

также поверхностей в виде прямоугольника, эллипса, перфорированных поверхностей или с

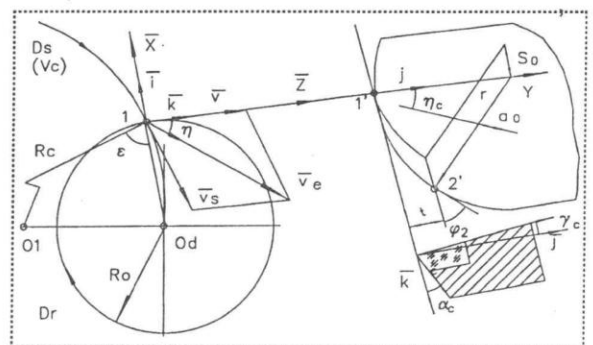


Рис. 4. Технологическая схема обработки поверхности на станке САТ1815

внеосевым расположением деталей на планшайбе (прерывистый характер обработки). В табл. 4 приведены характеристики крупногабаритных поверхностей отражателей, обработанных на станке САТ1815.

На основании анализа сил резания выполнена оценка составляющей погрешности обработки (отклонение от плоскостности), вызванной деформацией технологической системы и радиальным износом резца [2]. Показано, что с увеличением жесткости технологической системы до 200 Н/мкм суммарная погрешность обработки составляет не более 0,32 мкм. Дальнейшее увеличение жесткости практически не влияет на повышение точности обработки, которая будет определяться радиальным износом инструмента. В этом случае резервом повышения точности обработки является использование резцов повышенной износостойкости при оптимальных режимах и условиях обработки.

Оценка точности обработки крупногабаритных поверхностей металлооптики показала, что

зональная погрешность формы составила 0,25–0,38 мкм с контролем по пробному стеклу.

Проведенные технологические исследования и результаты обработки поверхностей металлооптики подтвердили перспективность алмазного микроточения как высокопроизводительного метода обработки прецизионных поверхностей. Совершенствование метода АМТ должно быть направлено на создание новых сверхточных станков, реализующих возможность обработки поверхностей нетрадиционных форм, например для лазерного резонатора цилиндрического типа.

#### Список литературы

1. Грубый С.В., Милов И.В. Технологические особенности алмазного микроточения крупногабаритных прецизионных поверхностей // Вестник машиностроения. 1995. № 6. С. 37–40.
2. Грубый С.В. Выбор условий алмазного микроточения крупногабаритных поверхностей // Вестник машиностроения. 1994. № 11. С. 40–43.

### Памятка автору

*Статья, представленная в издательство, должна быть в двух экземплярах, подписана авторами и содержать около 12 стр. машинописного текста.*

*Текст статьи с краткой аннотацией, УДК, выводами, списком литературы и подрисуночными подписями должен быть отпечатан: на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через два интервала (~30 строк, ~60 ударов). Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Формулы в тексте следует разметить простым карандашом: прописные буквы подчеркнуть двумя чертами снизу, строчные – двумя чертами сверху; греческие буквы обвести в кружок красным карандашом; верхние индексы описать дугой снизу, нижние – дугой сверху; русские буквы подчеркнуть корытцем (┘), латинские – волнистой линией. Пронумеровывают только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Все единицы должны быть в СИ.*

*Рисунки должны быть четкими, хорошо выполненными (не требующими перерисовки), пронумерованными. В тексте на полях необходимо указать их место расположения. Фотографии необходимо представить на глянцевой бумаге без изломов и помятостей (все обозначения внести на одном – втором – экземпляре).*

*К статье необходимо приложить акт экспертизы и сведения об авторе: фамилия, имя, отчество, день, месяц и год рождения, адрес (указать почтовый индекс, страну), телефон(ы), паспортные данные (серия, номер, когда и кем выдан); текущий счет и реквизиты банка, в который перечислять гонорар.*

**ВНИМАНИЕ!** Авторам, которые не приведут указанных выше сведений о себе, гонорар выплачиваться по техническим причинам не будет.