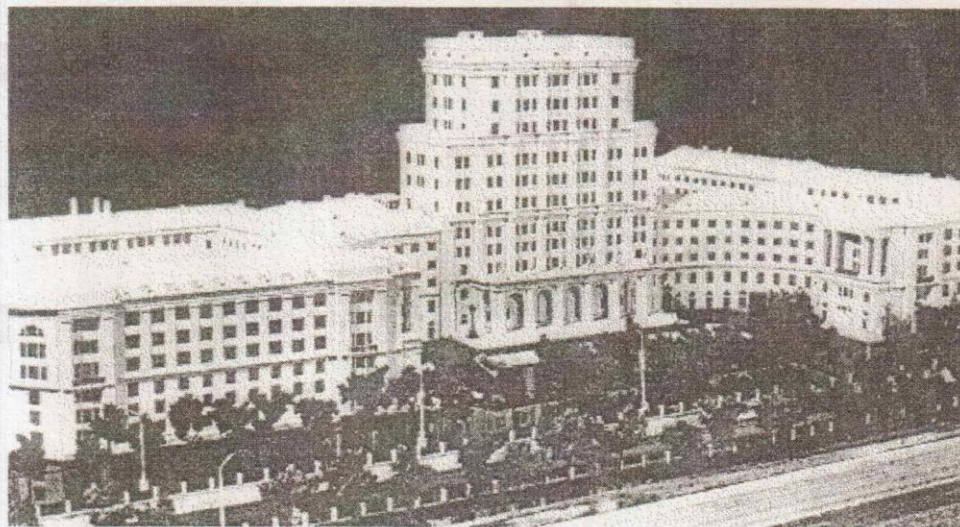


Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

РЕЗАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ



Москва
2000

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

РЕЗАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ

Сборник статей
Под редакцией А.Е. Древаля

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана
2000

УДК 621.9.02
ББК 34.63
Р34

Р34 Резание и инструмент: Сборник статей / Под ред. А.Е.Древаля. М.:
Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. 132 с.

ISBN 5-7038-1599-1

В сборнике представлены обзорные статьи, написанные по итогам ряда продолжительных научных исследований сотрудниками кафедры «Инструментальная техника и технология».

Предлагаемые материалы представляют интерес для технологов механообработывающего производства и исследователей процессов резания и инструментов, а также будут полезны для аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в указанном направлении.

УДК 621.9.02
ББК 34.63

Научное издание

РЕЗАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ

Редактор *С.А. Серебрякова*
Корректор *О.Ю. Соколова*

Изд. лиц. № 020523 от 25.04.97. Подписано в печать 19.05.2000.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печ. л. 8,25. Усл. печ. л. 7,67.
Уч. изд. л. 10,01. Тираж 100 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана.
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

ISBN 5-7038-1599-1

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000

К 70-летию организации кафедры
«Инструментальная техника и технологии»

К 100-летию со дня рождения
д-ра техн. наук, проф. Г.И. Грановского

К 170-летию основания МГТУ им. Н.Э.Баумана

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник «Резание и инструмент» коллектив кафедры посвящает 70-летию организации кафедры «Инструментальная техника и технологии» (МТ2), 100-летию со дня рождения одного из основателей кафедры д-ра техн. наук, проф. Герберта Ивановича Грановского и 170-летию основания МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Кафедра МТ2 является одной из старейших в МГТУ им. Н.Э. Баумана и одной из первых в отечественной высшей школе, осуществляющей подготовку инженеров и специалистов высшей квалификации в области обработки материалов резанием, электрофизическими и электрохимическими способами, проектирования режущих инструментов и технологии инструментального производства. Ранее подготовка специалистов осуществлялась в рамках специальности 050100 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», в настоящее время – в рамках специальности 120100 «Металлорежущие станки и инструменты».

За годы существования кафедра прошла большой эволюционный путь, что отражалось в ее названии: первое название «Теория резания металлов», далее «Теория резания металлов и инструментальное дело», «Теория резания металлов и инструментальное производство», «Теория механической обработки и инструмент», «Процессы и инструментальные системы механической и физико-химической обработки», «Инструментальная техника и технологии». Изменение названий показывает, что кафедра постоянно находилась в пределах одной области науки и техники, при этом происходит углубление и расширение учебной и научной подготовки, ее фундаментализация, свойственная университетскому образованию. Отличительной особенностью работы кафедры является ее постоянная, тесная связь с промышленностью и подготовка инженеров, способных быстро адаптироваться к решению крупных производственных и научных задач.

Разработка теории и технологии сверхточной токарной обработки

Развитие размерных и чистовых методов механической обработки в последние десятилетия основано на использовании сверхточного оборудования и технологии (нанотехнологии), направленных на обработку прецизионных деталей машин и приборов, имеющих микрометрическую и доле-микрометрическую точность размеров, формы и расположения поверхностей. Характерными объектами такой технологии наряду с гироскопами, элементами систем наведения и слежения, вычислительной техники, скоростными прецизионными электрическими и пневматическими приводами (шпинделями), турбодетандерами, являются металлооптические элементы лазерных резонаторов и фокусирующих оптических систем. Такие оптические элементы в соответствии со своим назначением имеют требования: по отклонениям формы – десятые доли микрометра, средней арифметической высоты неровностей профиля – менее 10 нм, отражательной способности поверхностей на длине волны излучения 10,6 мкм – до 99 %. Требования по точности и качеству поверхностного слоя обработанных поверхностей возрастают с уменьшением длины волны падающего лазерного излучения.

В последние десятилетия находит развитие и применение метод прецизионной лезвийной обработки – алмазного микроточения (АМТ), как метод автоматизированной обработки поверхностей металлооптики алмазным монокристаллическим инструментом на специальных сверхточных станках. Анализ характера такой обработки показывает возможность достижения точности формы поверхностей, в том числе крупногабаритных, порядка нескольких микрометров или менее [1, 2].

К основным преимуществам метода 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. Помимо металлооптических отражателей имеются многочисленные примеры использования метода АМТ и сверхточных станков для обработки отражателей для лазерного синтеза, магнитных дисков памяти, барабанов светокопий, полупроводниковых элементов, элементов видеотехники, больших интегральных микросхем, элементов медицинской техники и других изделий.

Отмеченные преимущества АМТ в полном объеме могут быть проявлены только при использовании специальных сверхточных станков, отли-

чительной особенностью которых является наличие азростатических подшипников высокой жесткости во всех подвижных узлах, специализированных систем ЧПУ или непосредственного взаимодействия с управляющей ЭВМ, использование встроенных лазерных измерителей микроперемещений, пьезоприводов, активных средств защиты от внешних вибраций. Специализация станков заключается в возможной форме обрабатываемых поверхностей и допустимых габаритах обрабатываемых изделий. Следует отметить, что использование этих станков требует сложного инженерного обеспечения: кондиционирования и температурной стабилизации помещения, оборудования и зоны резания, виброизоляции, тонкой очистки сжатого воздуха.

Отечественные уникальные сверхточные станки по своим технологическим возможностям приближаются к лучшим зарубежным аналогам [3]. Такие станки разработаны и изготовлены в МСПО «Красный пролетарий» и в СКТБ с ОП Института сверхтвердых материалов АН Украины. Кафедра на протяжении ряда лет проводила совместные работы с рядом организаций по разработке и освоению сверхточных станков мод. МО1805, САТ1805, МК6516, САТ1815 и технологии на производственно-экспериментальной базе НПО «Композит».

Накопленный положительный опыт и понимание значения сверхточной обработки как своеобразного эталонного уровня отечественной станкоинструментальной промышленности позволили выделить в самостоятельное научное направление разработку теории и технологии такой обработки. В рамках этого направления проводятся исследования, направленные на разработку научных основ, технологических рекомендаций и анализ перспектив сверхточной лезвийной обработки. В частности, разрабатываются теоретические основы достижения требуемой точности геометрических параметров и оптических характеристик отражающих поверхностей, математические модели процесса сверхточной обработки и модели формирования поверхностного слоя, алгоритмы оптимального управления режимами, расчетные и управляющие программы; конструкции алмазного инструмента, приспособлений, оснастки и оптических элементов, формулируются требования к перспективному сверхточному технологическому оборудованию.

Особый интерес представляет разработка теории и технологии сверхточной обработки протяженных (крупногабаритных) металлооптических поверхностей. Преимущества и перспективы такой обработки практически доказаны в начале 90-х гг. в ходе совместных работ кафедры и ряда организаций по созданию и освоению сверхточного станка мод. САТ1815 (конструкторская разработка СКТБ с ОП ИСМ), реализующего возможность обработки плоских, сферических и асферических поверхностей металлооптики диаметром до 1500 мм [4]. Общий вид станка мод. САТ1815 показан на рис. 1. Кинематическая схема обработки предусматривает тор-

цевое точение поверхности заготовки, а анализ условий обработки крупногабаритных поверхностей показывает, что глубина резания должна находиться в пределах 3–5 мкм, подача – менее 9 мкм/об, требуемая жесткость технологической системы должна составлять не менее 200 Н/мкм [5].

Проведен комплекс работ по исследованиям механизма изнашивания и выбору условий эксплуатации специальных алмазных резцов. Для обработки крупногабаритных поверхностей изготовлены резцы, оснащенные кристаллами природных алмазов в форме октаэдра и ромбодекаэдра плотной структуры, прозрачные или полупрозрачные, без трещин и дефектов в рабочей части [6, 7]. По результатам технологических исследований установлено, что средняя стойкость резцов при непрерывном характере обработки (поверхность типа сплошного диска) составляет 191,1 км по пути резания при технологическом критерии затупления – выход параметров качества поверхности за пределы допустимого. В случае внеосевого расположения деталей и прерывистого характера обработки средняя стойкость резцов составляет 69,7 км, и повышение интенсивности изнашивания инструмента связано с усталостным характером нагружения режущей кромки.

Исследования кристаллов алмазов и полученные результаты испытаний резцов показывают, что напряжение кристаллической решетки и наличие примеси азота является основной причиной снижения износостойкости резцов. Электронно-микроскопические исследования передней поверхности кристаллов после использования резцов выявили наличие локаль-

ных раковистых сколов вблизи режущей кромки. При этом развитие фрагментационного разрушения наблюдается как на передней, так и на задней поверхностях. Для кристаллов с неоднородным внутренним строением необходимо оптимальное расположение характерных областей и недопустимо наличие макродефектов и протяженных дефектов в рабочей части кристалла. Разработаны рекомендации по отбору и аттестации природных алмазов и повышению износостойкости алмазных резцов [7].

Оценка состояния качества поверхностного слоя поверхностей, обработанных методом АМТ, показывает, что при оптимальном составе и структуре обрабатываемого материала и рациональных режимах обработки могут быть достигнуты значения параметров шероховатости: $R_{\max} = 17,3$ нм; $R_q = 5$ нм; $R_a = 4$ нм (поверхности из меди или алюминиевого сплава). Для этих поверхностей также характерна высокая отражательная способность. В ИК-области спектра лазерного излучения отражательная способность оптических поверхностей после АМТ практически соответствует отражательной способности полированных поверхностей. Так, для сплава АМг6 коэффициент зеркального отражения составляет 97,4...97,6 %, для медной поверхности М06 – 98,7...98,9 % (длина волны 10,6 мкм). Отражательная способность поверхностей может быть улучшена последующим нанесением отражающего покрытия [8].

Для ультрафиолетовой области спектра характерен разброс значений отражения, вызванный анизотропией свойств поверхности, причем значение диффузной составляющей может достигнуть более 4 % (длина волны 0,3 мкм). В этом случае операцию АМТ целесообразно дополнить последующей операцией полирования, а эффект достигается за счет значительного сокращения суммарной трудоемкости обработки.

С учетом возможности станка мод. САТ1815 накоплен положительный опыт по прецизионной обработке крупногабаритных поверхностей металлооптики. Так, в соответствии с отработанным технологическим процессом алмазного микроточения обработаны алюминиевые и медные (гальваническое медное покрытие на конструкционном материале) плоские и сферические крупногабаритные поверхности отражателей. На рис. 2 показана обработка сферической медной поверхности диаметром 1000 мм на станке мод. САТ1815, характеристики поверхностей приведены в табл.1, где зональная погрешность формы определена в интерференционных полосах с контролем по пробному стеклу.

Результаты контроля свидетельствуют о высокой точности обработки и возможности использования крупногабаритных металлооптических отражателей после алмазного микроточения без последующей операции полирования для инфракрасной области спектра.

В процессе формообразования асферической поверхности вершина резца перемещается по поверхности базовой сферы, а пьезопривод резцовой головки в каждой расчетной точке накладывает дополнительное дви-

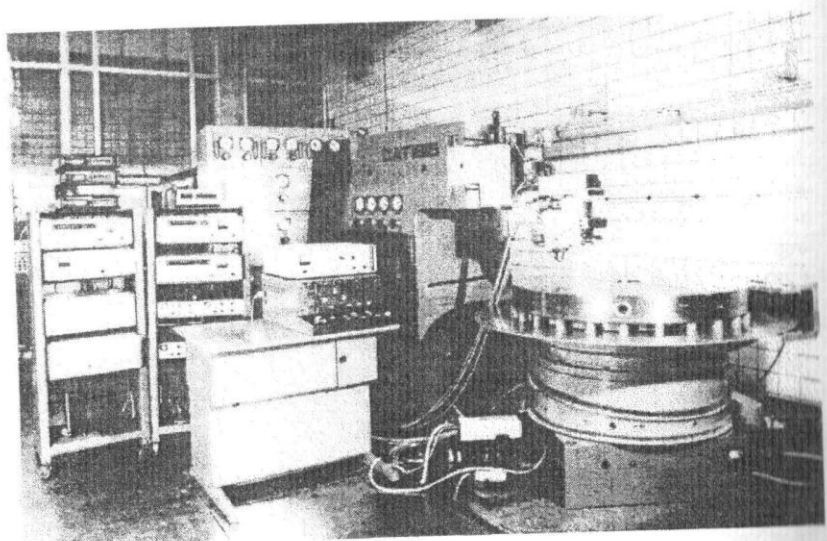


Рис. 1. Общий вид станка мод. САТ1815

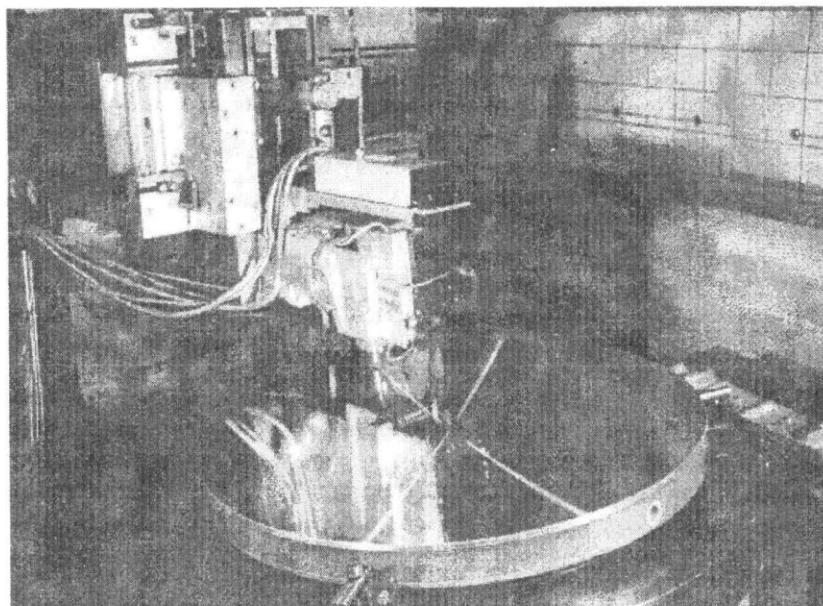


Рис. 2. Обработка сферической медной поверхности диаметром 1000 мм

Таблица 1

Характеристики крупногабаритных поверхностей после обработки алмазным микроточением на станке мод. САТ1815

Характеристики поверхности			Погрешность формы, интерференционные полосы
Материал	Габариты	Форма	
АлГб	Ø800 мм	Плоскость	1,1
АлГб	Ø800 мм	Сфера R=-6700 мм	1,0
АлГб	Ø500 мм	Плоскость	1,5
Медь	Ø1000 мм	Сфера R=-6700 мм	1,0
Медь, эллипс	380x270 мм	Плоскость	1,0

жение асферизации по направлению нормали к обрабатываемой поверхности. Например, на станке мод. САТ1815 реализована обработка одновременно трех крупногабаритных внеосевых параболических алюминиевых зеркал с уравнением образующей асферики $Y = \frac{X^2}{2 \cdot 5080}$ и фактическим диаметром каждой поверхности 403,5 мм (рис. 3). По результатам вы-

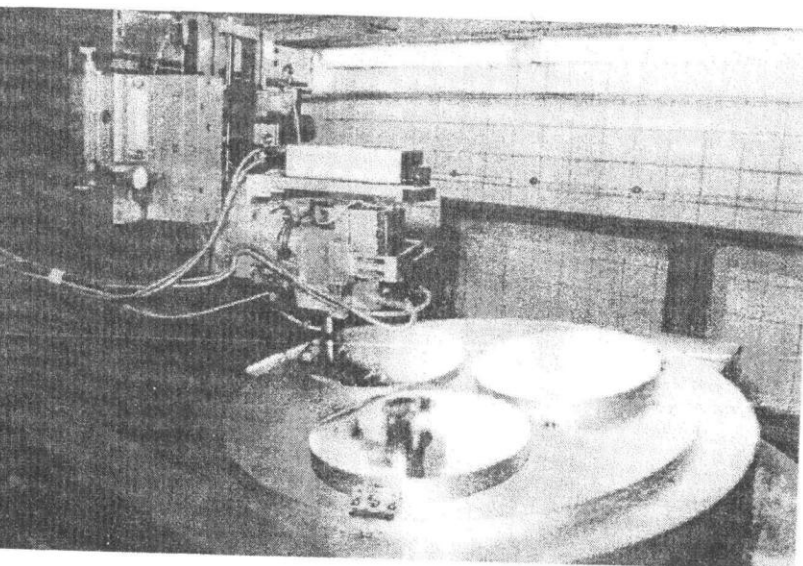


Рис. 3. Обработка одновременно трех параболических алюминиевых зеркал

ходного контроля размеры фокального пятна рассеяния и фокусного расстояния составили в пределах 570...600 мкм; 2535...2537 мкм соответственно. Отмечено практически полное соответствие расчетному фокусному расстоянию 2540 мм.

Интерферометрический аттестационный контроль изделий выполнен на автоматизированном стенде «Zygo» модели MARK-3. Схема контроля рассчитывалась и собиралась в соответствии с методом анаберрационных точек контроля асферических поверхностей второго порядка. На основании полученных данных проведена оценка величины отклонения формы отражающей поверхности, составившая 25 интерференционных полос на полном световом диаметре зеркала, при цене ширины полосы $\lambda/4$, где $\lambda=0,63$ мкм. При наблюдении интерференционной картины в малом канале (диаметр пучка 100 мм, диаметр поля на интерферограмме 70 мм) на основании оцифрованных интерферограмм фактические величины отклонений формы составили $\lambda/10... \lambda/7$. Результаты аттестационного контроля подтвердили соответствие техническим требованиям по точности формы обработанных асферических поверхностей.

На основе результатов практической реализации метода выполнен теоретический анализ, направленный на достижение предельно высокой точности обработки. С этой целью составлена модель процесса, включающая расчет сил и температур резания, выполнен анализ деформаций техноло-

гической системы, термических деформаций инструмента, суммарной погрешности обработки.

Отмечено, что составляющие силы резания изменяются при движении резца от периферии к центру вращения заготовки, причем значительно возрастает радиальная составляющая вследствие изнашивания инструмента. Следует обратить внимание на чрезвычайно малую величину сил резания, которые изменяются в пределах от десятых до сотых долей Ньютона. Малые значения сил резания и коэффициента трения определяют малую тепловую напряженность зоны резания. Так, температура резания (усредненная температура по передней и задней контактным площадкам, сложенная с температурой окружающей среды 20 °С) даже для периферийной точки поверхности диаметром 1000 мм не превышает 50...55 °С. На рис. 4 приведены графики, характеризующие изменение температуры резания T_p и составляющих силы резания P_{z0} , P_{y0} , P_{x0} при движении резца от периферии к центру вращения детали (частота вращения шпинделя 150 об/мин, глубина резания 4 мкм, скорость минутной обработки 1,4 мм/мин, подача 9 мкм/об).

При анализе погрешностей обработки учтены составляющие: деформации технологической системы под действием радиальной составляющей силы y_{st} ; радиальный износ резца h_r ; термическая деформация (удлинение) резца d_t . Установлено преобладающее влияние радиального износа и термического удлинения резца на общую погрешность обработки d_{st} (рис. 5).

Результатом проведенных теоретических исследований и расчетов послужила методика оптимизации режимных параметров алмазного микроточения крупногабаритных поверхностей, которая предусматривает оптимальное управление частотой вращения шпинделя и скоростью подачи инструмента при его движении по поверхности заготовки с учетом ограничения по величине шероховатости обработки. В этом случае расчетные значения погрешности обработки могут корректироваться пьезоприводом резцовой головки в режиме реального времени. На рис. 6 приведены графики, характеризующие погрешность обработки плоской поверхности в зависимости от непрерывном характере обработки (резец перемещается от периферии к центру). Величина d_{st} характеризует расчетную величину погрешности без коррекции, x_{pp} – ход пьезопривода с дискретностью 0,04 мкм, $d_{stк}$ – остаточную погрешность. Как следует из приведенных графиков, расчетная величина погрешности без коррекции при оптимальном управлении режимами обработки достигает 800 нм и может быть уменьшена до значений, равных величине дискретности пьезопривода.

Для случая обработки асферической поверхности основное перемещение пьезопривода резцовой головки вызвано требуемым движением формообразования, а величина этого перемещения равна соответствующим отклонениям асферической поверхности от базовой сферы. Например, при обработке внеосевого параболоида максимальная величина хода пьезопривода

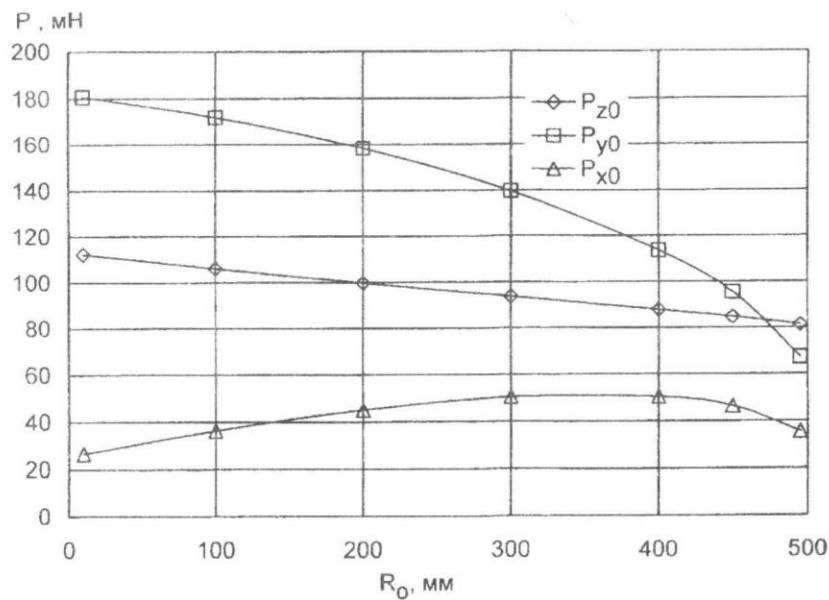
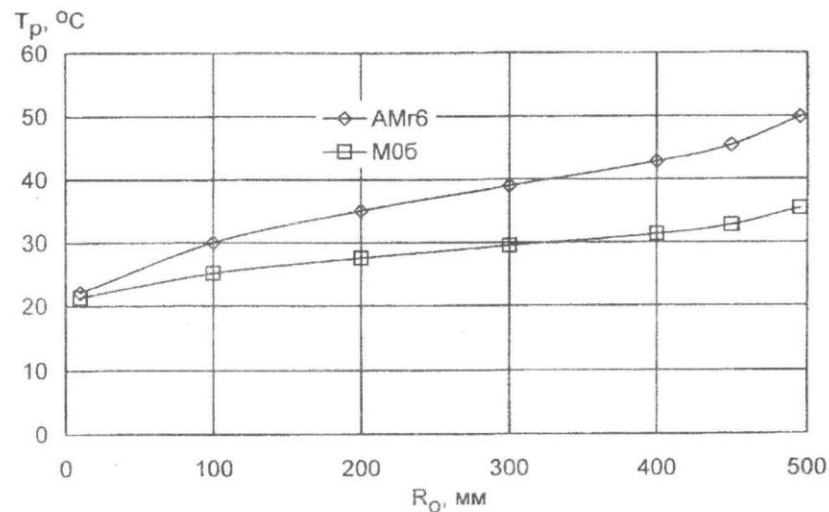


Рис. 4. Влияние текущего радиуса заготовки на температуру резания и составляющие силы

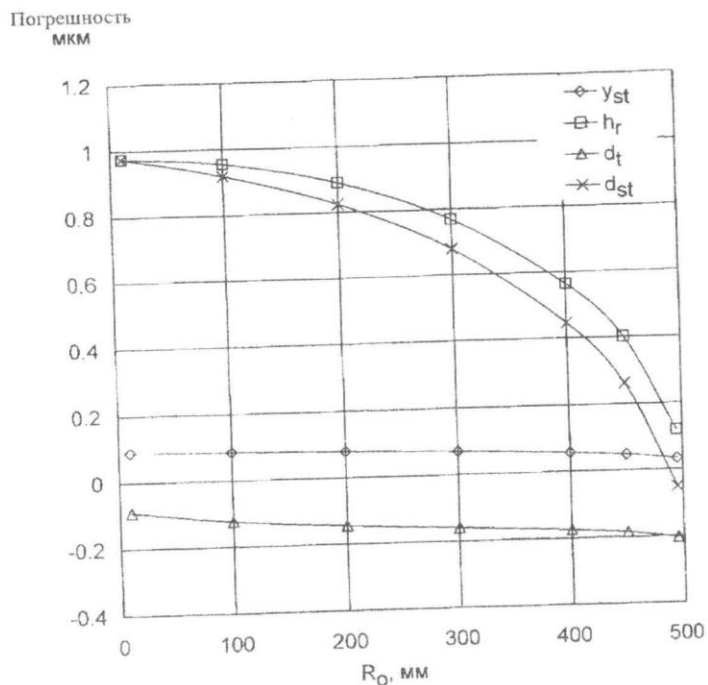


Рис. 5. Составляющие погрешности обработки поверхности диаметром 1000 мм на стационарном режиме

вода при кинематическом движении резца по поверхности базовой сферы и без коррекции погрешности d_{asf} составила 9900 нм (рис. 7). Величина d_{jmax} является расчетной величиной погрешности без коррекции с учетом динамического характера врезания и выхода инструмента при прерывистом характере обработки. Тогда суммарный ход пьезопривода x_{pp} должен учитывать перемещение как для формообразования, так и для коррекции погрешности, а остаточная погрешность обработки d_{asfk} составляет малую величину.

Так как активные средства контроля погрешности обработки непосредственно на станке в режиме реального времени отсутствуют, расчетная методика является единственным эффективным инструментом по повышению точности обработки протяженных металлооптических поверхностей.

Проведенные исследования и практический опыт применения метода АМТ подтвердили его перспективность и эффективность в части финишной обработки крупногабаритных поверхностей металлооптики, либо как промежуточной обработки с последующим полированием поверхности. Развитие метода предусматривает разработку теоретических основ процесса

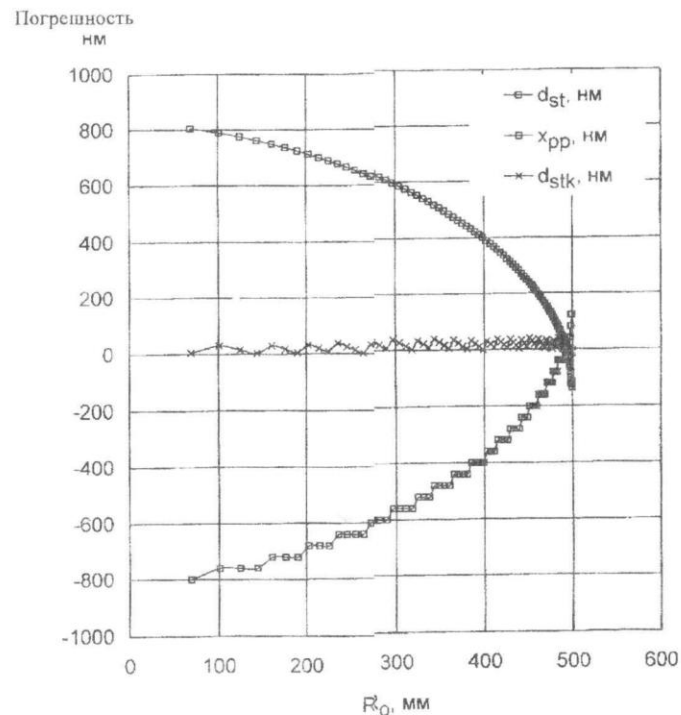


Рис. 6. Коррекция погрешности обработки медной поверхности диаметром 1000 мм при оптимальном управлении режимами с ограничением по шероховатости $R_{max} < 40$ нм

и технологии обработки протяженных поверхностей цилиндрического типа и нетрадиционных форм, и в части практической реализации возможно только при условии продолжения работ по созданию сверхточных станков нового поколения.

Литература

1. Добровольский Г.Г., Жоголев Д.А. Расчет угла сдвига и усадки стружки при алмазном микроточении. // Сверхтвердые материалы. 1985. №5. С. 44-49.
2. Добровольский Г.Г., Дятлов Ю.А. Точность формы изделий при алмазном микроточении. // Сверхтвердые материалы. 1990. №4. С. 58-62.
3. Грубый С.В. Развитие метода алмазного микроточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики. // Технология металлов. 1999. №5. С. 26-30.
4. Грубый С.В., Милов И.В. Технологические особенности алмазного микрото-

Совершенствование инструментального обеспечения предприятия

Крупные машиностроительные предприятия, имеющие государственные заказы, уже в конце 80-х – начале 90-х гг. были поставлены перед необходимостью создания автоматизированных систем управления производством, в которые в качестве подсистем должны были входить АСУ инструментального хозяйства. Уже в то время стало ясно, что инженеры-системотехники не могут решить задачу построения комплексных систем инструментального обеспечения предприятия без участия инженеров-технологов, инструментальщиков.

Благодаря полученным на кафедре МТ2 результатам научных исследований в области определения рациональных режимов резания, надежности режущего инструмента, САПР режущего инструмента, специалисты кафедры МТ-2 были привлечены к выполнению комплекса научно-исследовательских работ для АО «Завод им. В.А. Дегтярева», ПО «КАМАЗ», «Ковровский экскаваторный завод» и др. Целью НИР явилось сокращение сроков технологической подготовки производства и запуска новых изделий с использованием автоматизированных систем инструментального обеспечения промышленных предприятий, повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки научно обоснованных технологических процессов упрочнения режущих инструментов, в том числе с применением высококонцентрированных источников энергии.

Динамичный характер машиностроительного производства обуславливает необходимость применения системного подхода к эксплуатации инструмента (рис. 1).

К настоящему времени на кафедре МТ2 создано и разработано методическое, информационное, математическое и программное обеспечение определения норм расхода и потребности производства в инструменте.

Существуют три основных метода определения расхода инструмента: «статистический от достигнутого» по результатам последнего планового периода, операционный и метод оснащенности станка. Операционный метод и метод оснащенности станка весьма трудоемки; они требуют обработки вручную тысяч и десятков тысяч единиц информации даже на небольших производственных участках. Например, для расчета потребности в инструменте операционным методом для производственного участка №3 цеха №25 первого производства ПО «ЗИД» необходимо обработать вручную 1200 единиц информации (массовое производство). Решение этой же задачи методом оснащенности станка для участка №4 штампово-инструментального цеха Кузнечного завода КАМАЗа (мелкосерийное производство) требует обработки 42000 единиц информации. На кафедре была раз-

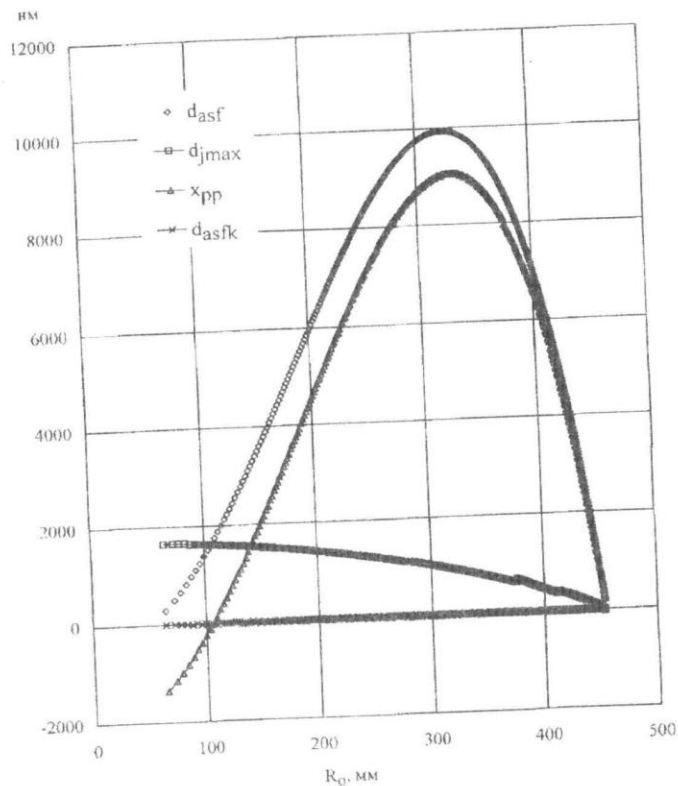


Рис. 7. Коррекция погрешности при оптимальном управлении режимами обработки внеосевой параболической алюминиевой поверхности с ограничением по шероховатости $R_{max} < 40$ нм

чения крупногабаритных прецизионных поверхностей. // Вестник машиностроения. 1995. №6. С. 37-40.

5. Грубый С.В. Выбор условий алмазного микроточения крупногабаритных поверхностей. // Вестник машиностроения. 1994. №11. С. 40-43.

6. Грубый С.В., Муратова Н.И. Повышение эффективности прецизионной обработки резцами, оснащенными природными алмазами. // Известия вузов. Машиностроение. 1990. №9. С. 107-111.

7. Грубый С.В., Татьяна Н.А. Исследование и применение кристаллов природных алмазов и резцов повышенной износостойкостью. // Вестник машиностроения. 1997. №4. С. 19-23.

8. Грубый С.В., Боговцева Л.П., В.А. Костеев В.А. Исследования состояния прецизионных поверхностей, обработанных методом алмазного микроточения. // Вестник машиностроения. 1996. №7. С. 19-24.