

Рис. 4. Влияние относительного количества пластифицированного ПВХ на гибкость ППЛ:

◊ — 40 % ДОФ; □ — 60 % ДОФ; Δ — 80 % ДОФ

массы металлического порошка (назначали, исходя из результатов предыдущих опытов).

Для представления характера изменений технологических свойств в зависимости от количества полимера и соотношений пластификатора, провели двухфакторный эксперимент. Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и рис. 4.

Необходимую прочность ППЛ выбирают, исходя из возможностей ее приварки, транспортировки и хранения. Технологические свойства ППЛ

также могут определяться областью ее применения: в производстве или для лабораторных исследований. В ходе работы выяснилось, что прочность ленты больше 1 МПа является достаточной для дальнейшего применения.

Оптимальное количество полимера и пластификатора при заданных технологических свойствах ППЛ можно найти графически или с помощью систем уравнений, представляющих собой функции кривых, найденных с помощью стандартных программ по статистике.

По результатам проведенных экспериментов сделали вывод, что лучшими технологическими свойствами обладает ППЛ с ПВБ. Лента с ПВБ имеет временное сопротивление на разрыв при одинаковом содержании полимерного связующего на 0,6–2,8 МПа больше (с увеличением связующего разность растет) и радиус хрупкого разрушения в 1,2–3,8 раза меньше по сравнению с лучшими ППЛ с ПВХ.

Список литературы

1. Кац Г. С., Милевски Д. В. Наполнители для полимерных композиционных материалов. М.: Химия, 1981. 736 с.
2. Агафонов А. Ю. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой твердосплавных покрытий. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Балашиха, 1990.
3. Создать и освоить в производстве установку для восстановления гильз контактной приваркой ленты и порошковых твердых сплавов / Отчет о НИР. М.: ВНПО "Ремдеталь". ГР № 01830010674. 1985. 112 с.

УДК 621.941.1

Сверхточная токарная обработка крупногабаритных поверхностей

С. В. ГРУБЫЙ

В состав лазерных резонаторов и фокусирующих систем входят металлооптические элементы, к которым в соответствии с их назначением предъявляют требования: отклонения формы в десятки доли микрометра, средней арифметической высоты неровностей профиля менее 10 нм, высокой отражательной способности.

В последние десятилетия развивается метод алмазного микроотечения (АМТ) — метод автоматизированной обработки поверхностей металлооптики алмазным монокристаллическим инструментом на специальных сверхточных станках.

Положительный опыт разработки и использования таких сверхточных станков имеется в развитых зарубежных странах и в России [1, 2].

К основным преимуществам АМТ можно отнести повышенное качество обработанной поверхности, а также высокую производительность обработки крупногабаритных и асферических поверхностей. Преимущества АМТ реализуются на специальных сверхточных станках мод. МО1805, САТ1815, МК6516 и др., где обработку осуществляют резцами, оснащенными природными монокристаллами алмазов [3, 4]. Опыт по-

казывает, что финишную обработку крупногабаритной поверхности методом алмазного микроточения можно выполнить за несколько часов, в то время как методом химико-механического полирования свободным абразивом на эту операцию могут уйти десятки или даже сотни часов.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана проводят исследования, направленные на разработку технологических рекомендаций и анализ перспектив сверхточной лезвийной обработки крупногабаритных поверхностей металлооптики. В частности, определены рациональные режимы и условия, обеспечивающие наименьшую погрешность обработки, изучено качество поверхностного слоя, исследована работоспособность природных монокристаллических резцов.

Общая кинематическая схема АМТ плоской торцевой поверхности на станке САТ1815 представлена на рис. 1, где планшайба с закрепленной заготовкой вращается вокруг центра O_d (главное движение резания) и вся шпиндельная группа перемещается по базовой плоскости гранитной станины вокруг центра O_c с радиусом R_c (вспомогательное движение подачи). В этом случае вершина резца t перемещается по поверхности заготовки от периферии к центру, снимая припуск глубиной t и подачей So . Радиус поверх-

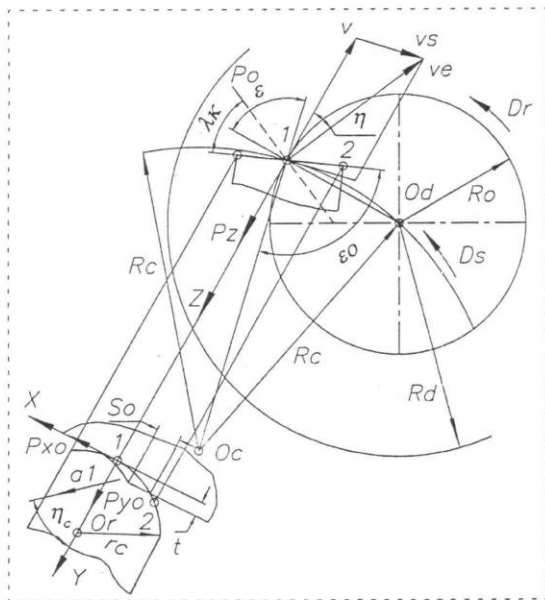


Рис. 1. Кинематическая схема алмазного микроточения на станке САТ1815

1. Геометрические параметры и подача в зависимости от текущего радиуса обработки

R_o , мм	So , мкм/об	λ_k , °	η_c , °
750	6,52	37,1	39,7
500	7,15	26,1	28,7
250	7,50	15,9	18,5
200	7,54	13,9	16,5
100	7,59	10,0	12,6
50	7,61	8,0	10,6
10	7,61	6,4	9,0
1	7,61	6,1	8,7
0,01	7,61	13,0	15,6

ности заготовки R_d может достигать 750 мм или быть меньше, текущий радиус R_o отвечает положению вершины резца, радиус R_c является кинематическим параметром станка, режущая кромка резца в плоскости XU описана радиусом r_c . Вектор a_1 и угол η_c задают направление схода стружки по передней поверхности.

Скорость резания, скорость подачи, результирующая скорость, соответственно, мм/мин, равны

$$v = 2\pi R_o \omega; v_s = \pi R_c v_c / 3; v_e = [v^2 + v_s^2 + 2v v_s R_o / 2R_c]^{0,5}, \quad (1)$$

где ω — частота вращения, 1/мин; v_c — скорость подачи, °/с. На станке частота вращения шпинделя контролируется электронным тахометром, а скорость секундной подачи — индуктивным датчиком.

Угол ϵ_0 является конструктивным параметром станка и равен 96°, кинематический угол наклона кромки изменяется в зависимости от текущего радиуса и определяется из выражений

$$\lambda_k = \eta + \epsilon_0 - \epsilon, \quad \epsilon = \arccos[R_o / (2R_c)], \quad \eta = \arcsin(v_s / v_e \sin \epsilon), \quad (2)$$

где величина подачи составит

$$So = v_s \sin \epsilon \cdot 1000 / \omega. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены значения подачи, угла наклона кромки и угла схода стружки в зависимости от текущего радиуса при АМТ глубиной 7 мкм, частоте вращения 150 мин⁻¹, скорости $v_c = 0,0018$ °/с (приведенные данные справедливы для любого обрабатываемого материала). Расчеты показывают, что в этих условиях ширина срезаемого слоя составляет 204,9 мкм, эффе-

тивная толщина — 0,27 мкм. Таким образом, алмазное микроточение — это процесс микрообработки сечений срезаемого слоя, а переменный характер режимных параметров и углов оказывает влияние на силы, температуру и погрешность обработки.

На операциях АМТ используют резцы, оснащенные природными монокристаллическими алмазами, исходное алмазное сырье по ТУ 47-2-73: алмазы группы VII подгруппы "в" и группы XXVI подгрупп "а" и "б" исходной массой 0,31—0,85 карата. На рис. 2 показан резец конструкции ИР361, изготовленный на Томилинском заводе алмазного инструмента, который применяли на сферотокарных станках мод. МК6516 (разработки МСПО "Красный пролетарий").

Для обработки крупногабаритных поверхностей на станке мод. САТ1815 (разработка СКТБ ИСМ АН Украины) были изготовлены специальные резцы, оснащенные кристаллами природных алмазов в форме октаэдра и ромбододекаэдра плотной структуры, прозрачные или полупрозрачные, без трещин и дефектов в рабочей части. Доводку режущей кромки выполняли специальным приспособлением на чугунном диске пастой АСМ 1/0, качество доводки контролировали при увеличении 1000 на отсутствие сколов, выкрашиваний и др. дефектов. Геометрические параметры режущей части резцов составили: передний угол 0—3°, задний угол 11—13°, радиус при вершине 2—3,5 мм.

При обработке в качестве СОТС использовали спиртовоздушную смесь, подачу в зону резания со стороны передней поверхности с расходом спирта 100—130 мл/ч. По результатам технологических исследований установлено, что средняя стойкость резцов при непрерывном характере обработки (поверхность типа сплошного диска) составляет 191,1 км. Технологическим критерием затупления был выход параметров качества поверхности за пределы допустимого.

Интенсивность изнашивания задней поверхности в направлении скорости резания может быть представлена выражением

$$I_t = dh_z/dL = 2,2554 \cdot 10^{-10} L^{-0,463}, \quad (4)$$

где L — путь резания, км.

Тогда скорость изнашивания составит расчетную величину

$$Int = I_{tv}, \text{ мм/мин}, \quad (5)$$

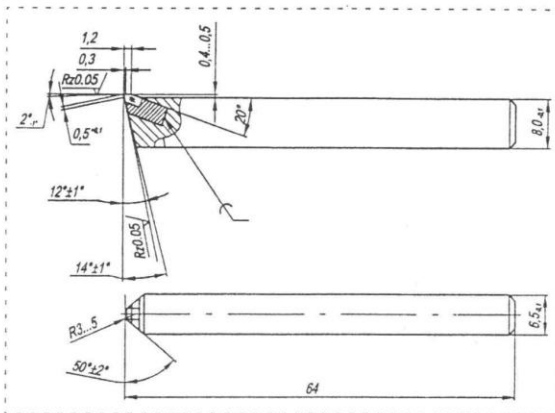


Рис. 2. Резец алмазный проходной

а выражения (4), (5) могут быть использованы в алгоритмах оптимизации режимов обработки.

В случае прерывистого характера обработки интенсивность и скорость изнашивания следует умножить на поправочный коэффициент 2,74; повышение интенсивности 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 [3]. Разработаны рекомендации по отбору и аттестации природных алмазов. Электронно-микроскопические исследования передней поверхности кристаллов после использования резцов выявили наличие локальных сколов в виде раковин вблизи режущей кромки. При этом развитие фрагментарного разрушения наблюдается как на передней, так и на задней поверхностях.

Для кристаллов с неоднородным внутренним строением необходимо оптимальное расположение неоднородных областей и недопустимо наличие макродефектов и протяженных дефектов в рабочей части кристалла.

Оценка состояния качества поверхностного слоя заготовок, обработанных методом АМТ, показывает, что при оптимальном составе и структуре обрабатываемого материала из меди или алюминиевого сплава и рациональных режимах обработки могут быть достигнуты значения параметров шероховатости поверхности: $R_{\max} = 17,3$ нм; $R_q = 5$ нм; $R_a = 4$ нм [5].

Для этих поверхностей характерна также высокая отражательная способность. В ИК-облас-

$K_d = 2,74$

ти спектра (длина волны 10,6 мкм) лазерного излучения отражательная способность оптических поверхностей после АМТ практически соответствует отражательной способности полированных поверхностей. Так, для сплава АМгб коэффициент зеркального отражения составляет 97,4–97,6 %, для меди М0б — 98,7÷98,9 %. Отражательную способность поверхностей можно улучшить последующим нанесением отражающего покрытия.

Для ультрафиолетовой области спектра (длина волны 0,3 мкм) характерен разброс значений отражения, вызванный анизотропией свойств поверхности, причем значение диффузной составляющей может достигнуть более 4 %. В этом случае операцию АМТ целесообразно дополнить последующей операцией полирования. Эффект

достигается за счет значительного сокращения суммарной трудоемкости обработки.

Учитывая уникальные результаты по качеству поверхностного слоя после АМТ, представляет интерес оценить возможность метода по точности обработки. С этой целью составлена расчетная модель сил и температур резания, выполнен анализ деформаций технологической системы, термических деформаций инструмента, суммарной погрешности обработки.

Составляющие силы резания изменяются при движении резца от периферии к центру вращения заготовки, причем значительно возрастает радиальная составляющая P_{y0} вследствие изнашивания резца — рис. 3, а. Глубина резания оказывает существенное влияние на силы резания, поэтому чистовой проход должен иметь припуск не более 4–6 мкм (см. рис. 3, б). Следует обратить внимание на чрезвычайно малую величину сил резания при АМТ, которые изменяются в пределах от десятых до сотых долей Ньютона.

Расчетная оценка коэффициента трения по задней грани алмазного резца показывает, что его величина составляет, как правило, менее 0,1.

Низкие значения сил резания и коэффициента трения определяют малую тепловую напряженность зоны резания. Так, температура резания (усредненная температура по передней и задней контактными площадкам, сложенная с температурой окружающей среды 20 °С) даже для периферийной точки поверхности диаметром 1000 мм не превышает 50–55 °С. На рис. 4, а показаны кривые изменения температуры резания при движении резца от периферии до центра вращения детали при обработке меди и алюминиевого сплава. Обработка титанового сплава и инвара сопровождаются ростом сил и температур даже в начальный период резания при нулевом износе резца (см. рис. 4, б). Вместе с тем значительно увеличивается скорость изнашивания и выражение (4) не справедливо, что накладывает серьезные ограничения на возможности метода АМТ по сверхточной обработке поверхностей из этих материалов.

При анализе погрешностей обработки учтены следующие составляющие:

— деформации технологической системы под действием радиальной составляющей силы $Y_{st} = P_{y0}/j$, где j — жесткость технологической системы;

— hr — радиальный износ резца;

— dt — термическая деформация (удлинение) резца.

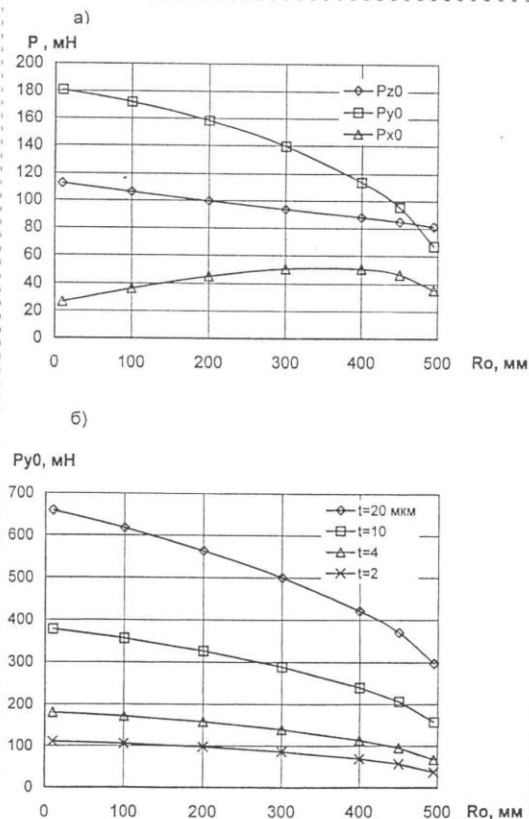


Рис. 3. Влияние текущего радиуса R_0 на силы резания (а) и P_{y0} для различных глубин резания (б)

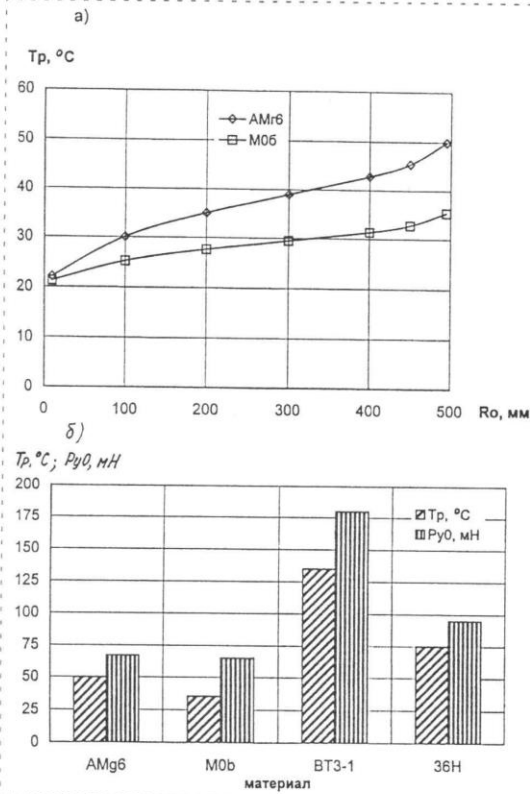


Рис. 4. Температуры и силы резания при АМТ различных материалов:

а — влияние текущего радиуса на температуру резания; б — температура и радиальная составляющая силы (текущий радиус 495 мм, частота вращения 150 мин^{-1} , скорость подачи $1,37 \text{ мм/мин}$, нулевой износ реза)

На рис. 5, а приведены графики составляющих и общей погрешности обработки dst в зависимости от текущего радиуса при обработке поверхности диаметром 1000 мм, а на рис. 5, б — графики общей погрешности при различных значениях жесткости технологической системы. Установлено преобладающее влияние радиального износа и термического удлинения реза на погрешность обработки. Так, с увеличением жесткости до значения 20 Н/мкм и более деформация технологической системы практически не оказывает влияния на общую погрешность обработки.

На основании графиков рис. 5 и проведенного анализа отмечена возможность достижения высокой точности обработки крупногабаритных поверхностей методом АМТ (в приведенном

примере расчетная погрешность обработки составила менее 1,0 мкм). Намечены пути по снижению погрешности обработки:

- разработка методики оптимизации и выбора режимов (частоты вращения шпинделя и скорости подачи) для уменьшения радиального износа инструмента;

- использование кристаллов повышенного качества и каратности, повышение износостойкости алмазных резцов;

- коррекция погрешности обработки на чистовом проходе пьезоприводом резцовой головки (по направлению нормали к обработанной поверхности) по расчетным координатам.

Выбор режимов следует проводить с учетом ограничений, накладываемых увеличением шероховатости и ухудшением качества поверхностного слоя с ростом скорости подачи. Но, следует

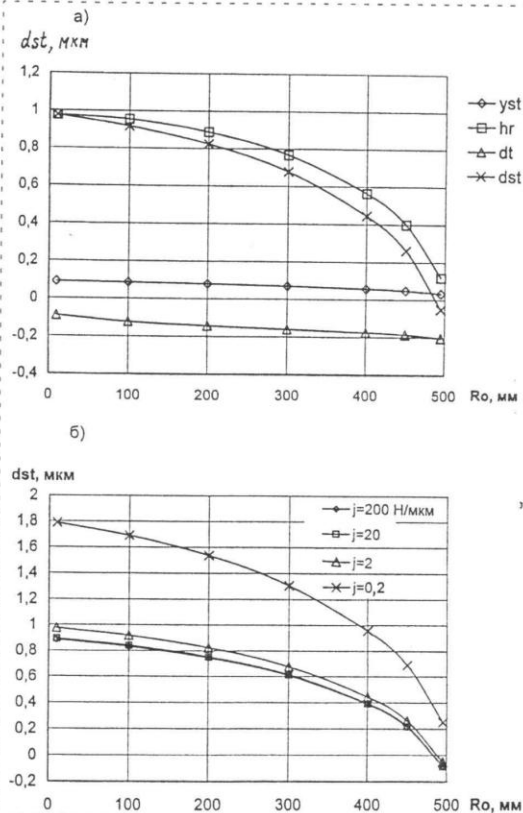


Рис. 5. Влияние текущего радиуса на погрешность обработки:

а — составляющие погрешности (жесткость $j = 2 \text{ Н/мкм}$); б — при различной жесткости технологической системы

2. Характеристики обработки поверхности оптического класса

Скорость подачи, v_s , мм/мин	Подача S_0 , мкм/об	Путь резания L , км	Погрешность обработки dst , мкм	Шероховатость R_{\max} , нм
2,28	14,3—15,2	51,6	0,659	48,8
1,37	8,6—9,1	86,0	0,894	37,4
0,76	4,8—5,1	154,7	1,26	27,6

учитывать, что уменьшение скорости подачи приводит к значительному увеличению пути резания, износа резца, основного технологического времени. Характеристики обработки поверхности диаметром 1000 мм оптического класса ($R_{\max} < 50$ нм) даны в табл. 2 (частота вращения 150 1/мин, глубина 4 мкм, жесткость 20 Н/мкм).

Проведенные исследования и практический опыт применения метода АМТ подтвердили его перспективность и эффективность либо для финишной обработки крупногабаритных поверх-

ностей металлооптики, либо для промежуточной обработки с последующим полированием поверхности. Развитие метода возможно только при условии продолжения работ по созданию сверхточных станков нового поколения.

Список литературы

1. Грубый С. В., Миллов И. В. Технологические особенности алмазного микрооточения крупногабаритных прецизионных поверхностей // Вестник машиностроения. 1995. № 6. С. 37—40.
2. Грубый С. В. Развитие метода алмазного микрооточения на сверхточных станках для обработки отражающих поверхностей металлооптики // Технология металлов. 1999. № 5. С. 26—30.
3. Грубый С. В., Татьяна Н. А. Исследование и применение кристаллов природных алмазов и резцов повышенной износостойкости // Вестник машиностроения. 1997. № 4. С. 19—23.
4. Грубый С. В., Муратова Н. И. Повышение эффективности прецизионной обработки резцами, оснащенными природными алмазами // Изв. вузов. Машиностроение. 1990. № 9. С. 107—112.
5. Грубый С. В., Боговцева Л. П., Костеев В. А. Исследования состояния прецизионных поверхностей, обработанных методом алмазного микрооточения // Вестник машиностроения. 1996. № 7. С. 19—24.

УДК 621.9

Проволочные инструменты для автоматизированного производства

А. И. СОЛОВЬЕВ, Ш. И. ДЖАФАРОВА

В отделочно-зачистной обработке проволочные инструменты (ПИ) достаточно широко распространены и предназначены для удаления ликвидов [1], появляющихся как в процессе получения заготовок, так и изготовления, транспортирования, хранения и эксплуатации деталей и машин. При наличии ликвидов на поверхностях заготовок снижается точность их установки в приспособлении перед последующей механической обработкой. На автоматических операциях контроля присутствие ликвидов может внести значительные погрешности вплоть до невозможности использования контрольно-измерительной машины.

Обрабатываемые поверхности характеризуются большим перепадом неровностей, размеров заусенцев и других ликвидов, а также значительным разбросом их технологических и физико-механических свойств. Это предъявляет особые требования к используемому инструменту по компенсации нестабильности процесса зачистки.

Для решения данной проблемы при удалении заусенцев используют проволочные инструменты специальных конструкций [2, 3, 4]. Данные регулируемые ПИ способны изменять интенсивность режущего и ударного действий в процессе обработки в зависимости от состояния обрабатываемой поверхности посредством изменения конструктивно-технологических параметров инструмента (натяг i , свободный вылет проволочек l , плотность укладки проволочек — рис. 1, θ). Плотность укладки проволочек оценивается коэффициентом заполнения пространства проволочными элементами с диаметром d , представляющего собой отношение суммарной площади поперечных сечений проволочных элементов к площади F , занимаемой ими на соответствующей цилиндрической поверхности

$$Kn = \frac{\pi \sum d^2}{4F}$$