

Исследования в области обработки микрокомпонентов и микродеталей на обрабатывающих центрах

Проф. д-р инж. С. К. Къртунов¹, д-р инж. И. М. Диордица²
1. ТУ Габрово, България 2. НТУУ „КПИ” Киев, Украина

Аннотация: В статье указана классификация микрокомпонентов и микродеталей. Рассматриваются способы микрообработки: микроэлектроэрозионная обработка, микроультразвуковая обработка, лазерная обработка, струйная обработка, обработка резанием, алмазное микрорезание, объёмная микроэлектрохимическая обработка. Анализируется инструмент, используемый для микрообработки микродеталей и микрокомпонентов, станочное оборудование для микрообработки. Исследуются методы точности обработки для типовых микромеханических компонентов.

Ключевые слова: микрокомпонент, способы микрообработки, методы точности обработки

1. Введение

Микросистемные технологии рассматриваются сегодня как ключевые технологии с экономическим потенциалом, сравнимым с микроэлектроникой. Согласно результатам маркетинговых исследований, особенно активно эти технологии развиваются в США, Японии и Германии. В США, где сильно развита микроэлектроника, особенно развивается производство комплектующих на базе микросистем, в Германии большое развитие получили прикладные направления и микросистемные технологии, встраиваются в производственные процессы для удешевления конечного продукта и улучшения его потребительских свойств. В Японии миниатюризация всегда была приоритетным направлением в развитии производства, поэтому сегодня практически в каждой крупной японской компании есть научное подразделение, которое занимается проблемами микросистемных технологий в режиме свободного поиска. Исследования в области обработки микрокомпонентов и миниатюрных деталей проводились в болгарско-украинском проекте на МОН Р. Болгария N:9107-141/19.06.2006 г. „Изследване на типови микромеханични компоненти и избор на нови материали в технологичните процеси за изработването им”.

В последние пять лет рынок микродеталей и микрокомпонентов развивается наиболее динамично, демонстрируя завидные темпы роста: если в 2000 году его объем составлял порядка 30 млрд долл., то по прогнозу на 2008 год он достигнет 60 млрд долл., и это не предел [1]. Преимущества микротехнических изделий очевидны: повышенная функциональная точность, меньший вес детали или узла, обладающих при этом более высокими эксплуатационными возможностями. Тенденцией последних лет стало увеличение потребности не только в самих деталях, но и в составленных из нескольких таких деталей микрокомпонентах, располагаемых на или в более крупных деталях и узлах. Это обусловлено массовым переходом на модули, в которых функции нескольких деталей или подсистем не могут осуществляться посредством только одного узла, даже достаточно сложного.

Миниатюрные или микродетали из самых разных материалов – металлы, кремний, полимеры, керамика – давно и успешно применяют во многих отраслях промышленности. В связи с этим следует определить размеры деталей, получаемых при микрообработке. Обобщая мнения многих специалистов, можно считать, что таковыми являются детали с размерами менее 0,1 мм.

Наибольшее распространение микродетали и микрокомпоненты получили в медицинской и биомолекулярной технике и электронике. Очевидна потребность в подобных деталях и в медицине, где от их размеров (и размеров, изготовленных из таких деталей приборов, например кардиостимуляторов) нередко зависят возможность выполнения операций и время выздоровления пациентов. Авиационная промышленность тоже нуждается в миниатюрном крепеже, фитингах и датчиках, приборах для контроля потока воздуха и жидкости. В автомобилестроении вполне реально использование сверхмалых электродвигателей и исполнительных органов для систем безопасности, обеспечения удобства водителей и т. д. В сложных системах впрыска топлива и их элементах микродетали также находят свое место [2].

В целом микродетали и микроизделия можно классифицировать по следующим группам (табл. 1).

Таблица 1. Классификация микрокомпонентов и микродеталей

Группа изделий	Основной принцип действия						Примеры использования
	физический	химический	оптический	биомедицинский	механический	электромагнитный	
Средства реализации информационных технологий/ компьютеры					+	+	Магнитные подшипники
Датчики	+	+	+	+	+	+	Гироскопы, акселераторы, микронасосы, микросистемы для комплексного анализа
Исполнительные механизмы и приводы					+	+	Магнитные приводы, пьезоэлектрические и микродвигатели, электростатический привод
Средства оптической связи			+				Голографические блоки памяти, линзы, микрооптические переключатели, оптические схемы
Дисплеи			+		+	+	Микрозеркала, дисплейные устройства
Детали электронных приборов						+	Сопла струйных принтеров, цветные принтеры, слуховые аппараты, микродетали на платах
Медицинское оборудование и изделия		+		+			Имплантаты, хирургические инструменты
Часы					+	+	Зубчатые колеса, микротрансмиссии
Пресс-формы					+		Медицинские инструменты и приборы

2. Способы микрообработки

Выделяются следующие способы микрообработки: обработка резанием со снятием стружки (механическая и абразивная, алмазное микрорезание); нетрадиционная обработка (электроэрозионная, лазерная, ультразвуковая, струйная); литье и прессование в прессформе, объемная электрохимическая обработка и ряд других, рассмотренные подробно в [3]. Выбор конкретного способа определяется материалом детали и требуемыми от нее геометрическими параметрами [4]. Основные технологии, применяемые в микрообработке, показаны в табл. 2.

В научном центре института (г. Атланта, США) обработка миниатюрных деталей выполняется всухую, поскольку одна капля смазочно-охлаждающей жидкости в 100 раз больше, чем диаметр используемого инструмента. Такая капля может просто «затопить» операцию. Проблемой является также изготовление станины для микростанка. Если ее обрабатывать на традиционном обрабатывающем центре, она будет отражать отклонения по прямолинейности и перпендикулярности центра, поэтому в институте осуществляется повышение точности обрабатывающего центра с помощью специальной процедуры калибрования и регистрации погрешностей для ввода необходимых коррекций.

Расширение применения деталей с микроструктурированной поверхностью, особенно из пластмасс, требует совершенствования изготовления соответствующих литейных форм. Среди известных способов изготовления таких форм наиболее перспективным является микрорезание инструментом из монокристаллических алмазов. Пока такой инструмент используется только для обработки цветных металлов. Между тем уже известны монокристаллические алмазы, изготовителем которых является фирма Мёвпег, пригодные и для обработки сталей, причем их стойкость может достигать 70 -120 ч.

Таблица 2. Современные технологии, применяемые в микрообработке

Параметры	Резание инструментами с геометрически определенной режущей кромкой		Шлифование	Электроэрозионная обработка		Обработка методом пластической деформации		Лазерная обработка	Струйная обработка	Ультразвуковая обработка
	алмазными	твердосплавными		вырезка	прошивка	обработка давлением	формование			
Преимущества	Возможность получения трехмерных поверхностей, высокая геометрическая гибкость		Высокое качество поверхности и высокая точность геометрической формы	Возможность обработки очень твердых материалов		Экономически эффективное изготовление крупных партий, большое разнообразие обрабатываемых материалов, особенно полимеров		Возможность обработки очень твердых материалов	Возможность изготовления без заусенцев очень мелких деталей из различных материалов	Малые усилия резания и возможность обработки множества полостей
Недостатки	Следы обработки на поверхности, трудности изготовления очень малых отверстий и внутренних структур		Трудности получения очень малых внутренних элементов и невозможность получения отверстий	Не очень высокое качество получаемой поверхности, малая производительность		Изготовление только инструментов и прессформ		Образование заусенцев и аплов на поверхности деталей, недостаточное высокое качество поверхности	Высокие эксплуатационные расходы	Малая производительность
Обрабатываемые материалы	Никелевые сплавы, латунь, алюминий, пластмассы, стекло	Сталь, керамика, графит	Керамика, твердые сплавы, стекло	Металлы и керамика		Металлы	Полимеры (металлические порошки)	Металлы, керамика, стекло, полимеры, полупроводники	Практически любые	Стекло, керамика, кремний, графит

Параметры	Резание инструментами с геометрически определенной режущей кромкой		Шлифование	Электроэрозионная обработка		Обработка методом пластической деформации		Лазерная обработка	Струйная обработка	Ультразвуковая обработка
	алмазными	твердосплавными		вырезка	прошивка	обработка давлением	формование			
Продольные размеры обрабатываемых деталей, мкм	10-1000		10-2000	20-50	20-40	0,2-50	0,2-115	0,3-50	0,6-40	3,0-30
Возможность получения требуемых геометрических параметров	Хорошая	Достаточная	Достаточная	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая			Удовлетворительная	
Достижимая шероховатость, Ra, мкм	0,01	0,3	0,1-0,02	0,04-0,06	0,2-0,3	Нет сведений	Менее 0,05	Не хуже 0,1	0,08-0,1	0,1-0,15
Эксплуатационные качества	Хорошие		Достаточно высокие	Удовлетворительные		Хорошие		Достаточные	Достаточные	Удовлетворительные
Области применения	Пресс-формы и сложные детали		Сложные детали	Пресс-формы и сложные детали		Мелкие и крупные серии		Медицина и биология	Сложные детали в различных отраслях	

2.1. Объёмная микроэлектрохимическая обработка

Микроэлектрохимическая обработка объёмных микроструктур с использованием ультракоротких разрядов длительностью всего десятые доли наносекунды. В качестве электролита использовали серную кислоту, а в качестве объекта обработки – объёмные микроструктуры из коррозионно-стойкой стали. Для повышения производительности применяли несколько электродов, которые одновременно обрабатывали несколько микроструктур. Известно, что при электроэрозионной обработке износ электродов незначителен, поэтому в качестве электродов использовали микропроволоку. Используя электроды из платиновой проволоки диаметром 10 мкм, в пластинах размерами 15 x 15 мм из быстрорежущей стали формировали различные объёмные контуры. Так как ток высокочастотного генератора очень мал, то плотность тока увеличивали, уменьшая зазор между электродом и обрабатываемой поверхностью до нескольких сотых микрометра.

Нанопозиционирование с применением оптической системы контроля перемещения микрообразца с детектором положения. Разработан микрощуп для контроля точности позиционирования удовлетворяющий жёстким требованиям, предъявляемым к нанокоординатным измерительным машинам, предназначенным для измерения микродеталей с точностью менее 50 нм в пределах рабочей зоны со стороной куба 10 мм. Рассматриваются динамические свойства и контроль точности позиционирования модернизированной системы с микрощупом, использующей оптическую ловушку в виде сферического щупа диаметром 8,0 мкм. Сферический

щуп принудительно вибрирует с высокой частотой и амплитудой около сотых долей нанометра, определяемых на основании данных контроля давления светового луча. Вновь разработанная оптическая система с детектором положения обеспечивает возможность дискретного измерения бокового смещения, амплитуды вибрации и запаздывания по фазе. Динамические свойства вибрирующего сферического щупа определяли с целью выявления принципа работы оптически смещаемого микрощупа. Экспериментальные результаты подтверждают, что улучшенная система с микрощупом может обеспечить контроль нанопозиционирования в боковом направлении.

2.2. Инструмент используемый для микрообработки микродеталей и микрокомпонентов

- Микрофрезы для микрообработки

К микрообработке резанием относят резание в диапазоне от 2 мм до 1 мкм и менее. В этом случае диаметр инструментов с геометрически определенными режущими кромками находится в пределах от 0,1 мм до 2 мм. Подобные микроинструменты, как правило, изготавливают из ультратонкозернистого вольфрамового или кобальтового твёрдого сплава (размер зёрен 0,2 – 0,5 мкм), получаемого методами порошковой металлургии. Микрофрезы фирмы Paul Horn предназначенные для обработки мелких деталей в различных отраслях промышленности, включая и станкостроение [2].

Минисверла с покрытием Miracle, выпускаемые фирмой Mitsubishi Carbide для прецизионного сверления диаметров 0,1 ...2,0 мм с градацией 0,01 мм и диаметров 2,0 ...3,0 мм с градацией 0,05 мм, а также сверла типа MINI-MZ, начиная с диаметра 1,0 мм. Эти сверла имеют каналы для подачи СОЖ.

- Твердосплавные микросверла

Сверла Spirec Micro фирмы Sphinx Werkzeuge AG имеют специальную геометрию, диаметр 0,05... 1,50 мм с градацией 0,01 мм. Они предназначены для сверления отверстий в сталях, чугунах и цветных металлах и сплавах. Длина сверл диаметром 0,05 мм составляет 2...6 диаметров. Они характеризуются высокой надежностью и стойкостью.

3. Исследование возникновения векторного характера погрешности на станках

Исследование этого вопроса доказало, что, например, образцовый элемент L_3 расположенный в рабочем пространстве оборудования и при измерении в его системе координат с помощью той же системы отсчета даст размер L_B , который будет отличаться от образца. В общем случае всегда будет выполняться неравенство $L_3 \neq L_B$ (Рис. 1). При этом L_B следует воспринимать как нестандартную меру измерения которая принадлежит станку. Перемещение образцового элемента в рабочем пространстве будет давать соответствующую погрешность измерения которые, снова таки, в общем случае будут колебаться, напри мер, как случайная величина с нормальным законом распределения, то есть S (рис. 1). Если рассмотреть этот процесс в двух координатах, то движение при измерении и итоговую погрешность можно представить как сумму векторов движений:

$$\vec{L}_3 = \vec{L}_g^+ + \Delta L^+ \quad \text{и} \quad \vec{L}_3 = \vec{L}_g^- + \Delta L^- \quad (1)$$

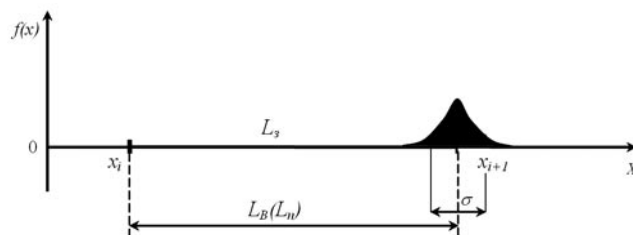


Рис. 1. Розсeивание размеров L_B в зависимости от расположения образцовой меры на столе

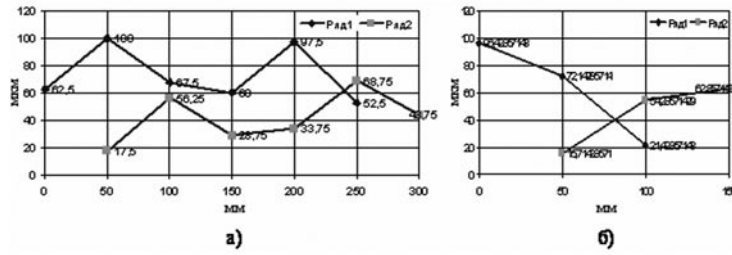


Рис. 2. Результаты исследования точности полученные на фрезерном столе в координатах X (а), Y (б)

Исследования доказали, что векторная сумма при прямом и обратном движении не адекватна, то есть она не является зеркальным отображением друг друга (Рис 2.), тоже самое имеет посредственное подтверждение и в [4]. Объяснение здесь может быть только одно: технологическое оборудование имеет нагрузки при противоположных направлениях движения и как следствие разную величину износа рабочих частей. Особенно важным явлением при этом является неодинаковая точность вдоль всей длины по координатам, которая усиливается со временем работы станка. Вектор погрешности при этом может иметь описание как эллипсоидальная зависимость в координатах XY. В частных случаях эллипс может менять местами свою большую и малую ось, а также упрощаться (рис. 3):

$$\Delta L = \frac{\Delta y^2}{\Delta x + \sqrt{\Delta x^2 - \Delta y^2} \times \cos \varphi} \text{ при } 1 > \Delta x^2 - \Delta y^2 \geq 0, \tag{2}$$

где Δx и Δy – среднестатистические размера от образцовой L_j , j – угол вектора погрешности $\overline{\Delta L^+}$ или $\overline{\Delta L^-}$ от вектора $\overline{L_j}$.

Если использовать закон нормального распределения для случайной величины по координатам, то:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta x^2}{2}}, f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta y^2}{2}}; \tag{3}$$

где $\Delta x = 3\sigma_x$, $\Delta y = 3\sigma_y$.

То получаем:

$$\Delta L = \frac{3\sigma_y}{\sigma_x + \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \times \cos \varphi} \tag{4}$$

На рисунке (рис. 3.) видно, что выполнить комплексное движение шупа по двум координатам X и Y, например, с точек D или B приведет к неправильной реализации геометрической фигуры типа «квадрат» в пространстве станка. Схождение векторов $\overline{L_x^-}$ и $\overline{L_y^+}$ практически невозможно. Так, например, контурная обработка или движение по линии ABCDA (рис. 3.) всегда будет приводить к появлению вектора погрешности $\overline{\Delta L_\Sigma}$, который будет следствием влияния замкнутой векторов:

$$\overline{\Delta L_\Sigma} = \overline{L_y^+} + \overline{L_x^+} + \overline{L_y^-} + \overline{L_x^-}. \tag{5}$$

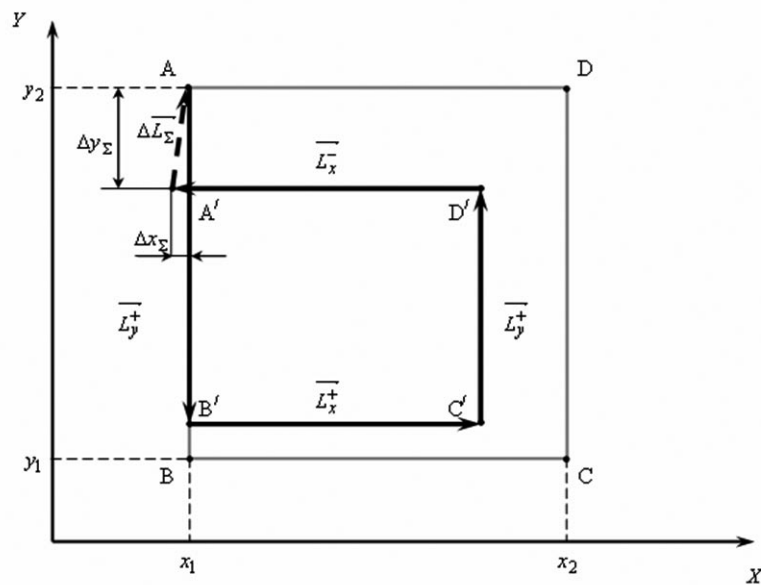
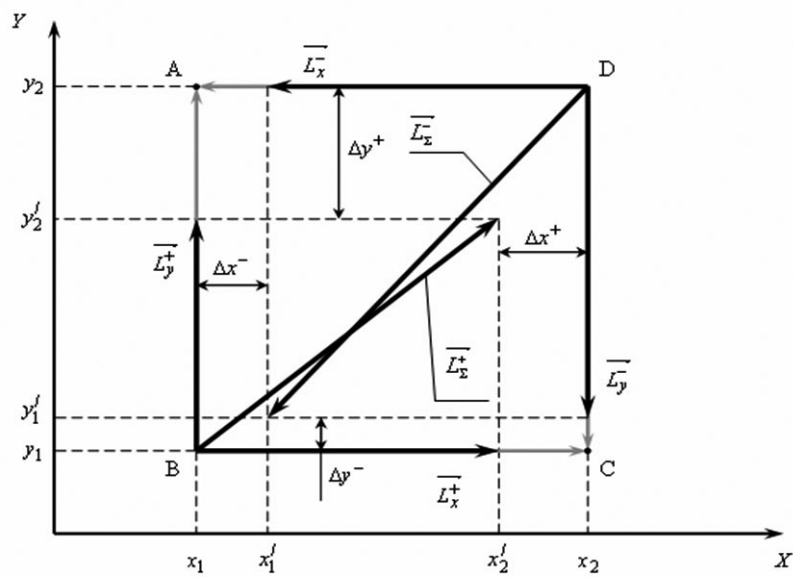
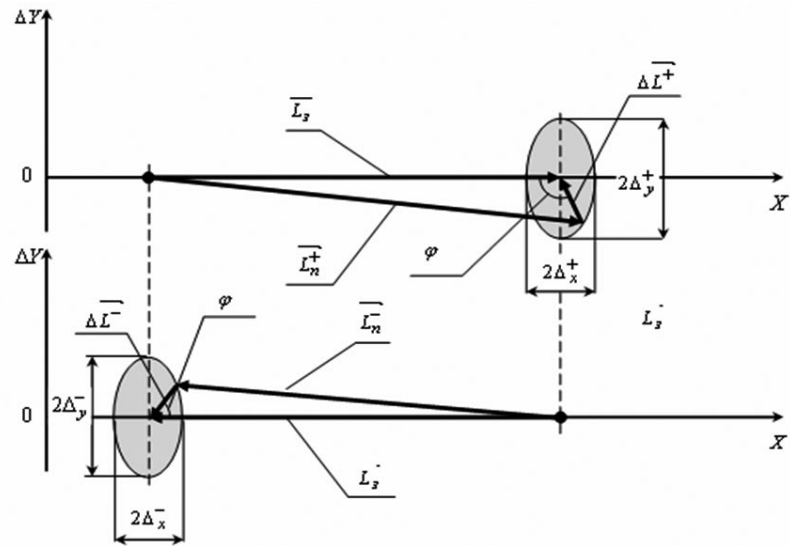


Рис. 3. Поле рассеивания векторных диаграмм в зависимости от измерения, отклонения векторного идеального квадрата и векторной ошибки $\overline{\Delta L}_{\Sigma}$ при контурной обработке инструмента

Для устранения этого явления вводится термин зонной точности станка через понятие градиента. В таком случае это предоставит возможность ограничивать координаты объема, где точность позиционирования будет учитываться через векторные градиенты точности.

Заключение

Проведенные исследования математических моделей для прецизионной обработки микротехнических изделий из новых материалов и созданная методика и алгоритмы для моделирования погрешности обработки, с целью их компенсации с помощью компьютерного управления показывает, что в следствие роста необходимости обеспечения высокой точности, одновременно связанной со снижением себестоимости, возникает необходимость в промышленном оборудовании и возможность компенсации геометрических погрешностей, которая регистрируется измерительной техникой в режиме реального времени. Разработана конструкция средств для координатной привязки поля погрешностей и инструмента к системе координат станка и методика учета погрешностей при выполнении работ на станке. Разработано и испытано в производственных условиях методика учета погрешности позиционирования на станке. Предложено методика которая позволила уменьшить среднее отклонение полученных размеров от 60-150мкм.

Литература

1. Къртунов С., Състояние и тенденции в развитието на водещите технологии за изделия от микро- и нанотехниката, Габрово, 35 години катедра "МУ" на ТУ Габрово, 2003
2. Къртунов С., Тодорова В., Микросистемна техника, Габрово, УИ "В. Априлов", 2002
3. Kartunov S., Mechanische Mikrofertigungsverfahren – Übersicht, Besonderheiten, Auswahl, Anwendungen, Beispiele, Potentiale, Entwicklung, 47. Ilmenau, Internationalen Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau 23.-26. September 2002, стр. 234, ISSN 0943-7207
4. Остафьев В.А., Диордица И.Н., Исследование точности обработки микромеханических компонентов, Киев, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", 2007, УДК681.326.75