

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Микро-производство подразумевает создание продуктов с размерами от несколько микрометров до нескольких миллиметров высокой точности размеров из различных материалов. В настоящее время, во всем мире, как в научно-исследовательских учреждениях, так и в промышленности имеется большой интерес к области микро-производства. Сегодня микро-производство интенсивно развивается как ответ на повышающийся спрос на миниатюрную продукцию, изготавливаемую часто в небольших количествах, может иметь сложную форму с особыми требованиями по качеству поверхности. На рис. 1 показаны примеры микро-продуктов, а на рис. 2 – промышленные микро- производственные системы.

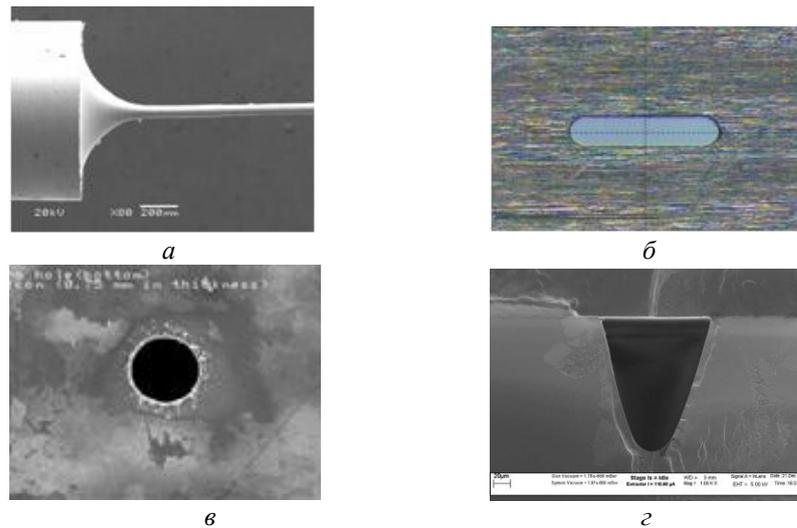


Рис. 1. Вал диаметром 30 мкм (а), паз шириной 100 мкм (б), отверстие диаметром 50 мкм (в), канал шириной 70 мкм (г)

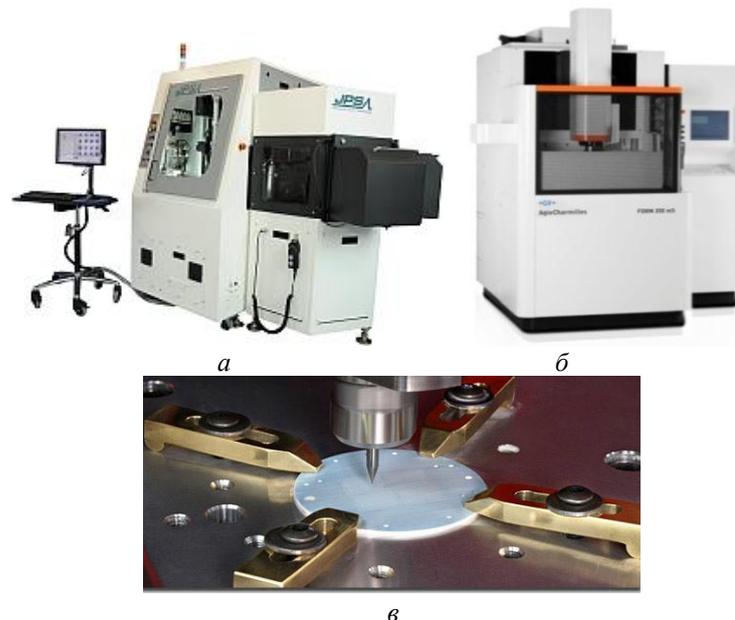


Рис. 2. Промышленные микромашины: а – лазерная система;  
б – микро-EDM машина; в – стенд для микро-сверления

Особым случаем миниатюризации являются дигитальные компьютеры, размеры которых в последние 50 лет уменьшились в  $10^6$  раз.

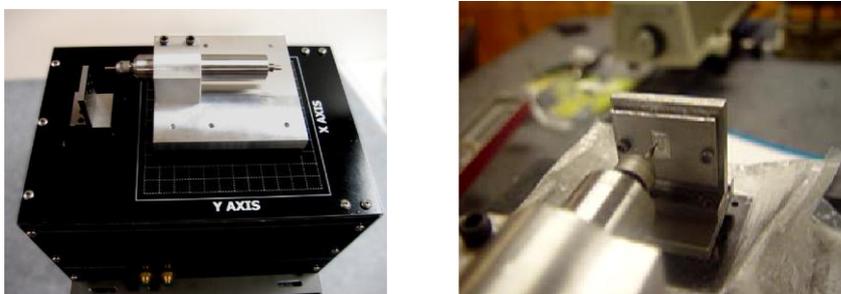
Многие виды промышленности требуют изготовления миниатюрных компонентов, что сопровождается снижением потребления энергии и затрат материалов, используемых в производстве, упрощением

обрабатывающих систем, увеличением скоростей, чувствительности и селективности систем, необходимостью использования в технологиях новых эффектов и т.п.

**Микро-обработка и системы для микро-обработки.** Микро-производственные процессы могут быть разделены в четыре главные категории: субтрактивные, аддитивные, форминг и гибридные.

*Механические микро-обрабатывающие процессы*, в основном, модифицированные или простые конвенциональные макро-механические обрабатывающие процессы, не связанные с размерами изделий. Процессы характеризуются хорошей геометрической взаимосвязью между инструментом и обрабатываемой поверхностью. Это подразумевает использование инструмента с малым радиусом округления режущей кромки. Одним из доминирующих факторов при микро-резании является отношение глубины резания и радиуса округления режущей кромки, связанное с так называемым эффектом минимальной толщины стружки. С ним связана предельная глубина резания, ниже которой стружка не образуется. Механика процесса резания значительно отличается от случая макро-обработки, так как в рассматриваемом случае доминирующим является механизм царапания по отношению к классическому скалыванию. Специфика данного процесса требуют включения в рассмотрение зернистой структуры материала и всех возможных источников дефектов в нем, приводящих к нестабильности процесса обработки.

В настоящее время в мире делаются большие усилия по исследованию и созданию машин микро/мезо-размеров. На рис. 3 показаны прототипы машин, разработанных Northwestern University (NU), которые представляет собою полностью 3-осевые микро/мезо-обрабатывающие центры с ЧПУ, обеспечивающие субмикронную точность обработки.



*Рис. 3. Машини микро/мезо-размеров: рабочая зона 25×25×25 мм, подача 700 мм/с, скорость вращения инструмента 120 К·мин<sup>-1</sup>*

На вопрос – что обусловило направление развития микро-машин, ответ вероятно можно найти в необходимости изготовления новых микро-изделий, которые можно производить на таких машинах с большой экономией энергии и сбережением окружающей среды. Необходимо указать на проблемы, присутствующие у таких машин: сложность в управлении по осям, большая подвижная масса, значительные ускорения, необходимость ультрабольших чисел оборотов шпинделя, неточность микро-инструментов и низкая точность изготавливаемых изделий. Отмеченные проблемы могут быть частично решены несколькими способами: уменьшением передвигаемых масс, развитием алгоритмов управления, созданием контрольной стратегии достижения требуемой топографии поверхности, введением активной компенсации в обрабатывающие системы и т.д.

Размеры микро-машин составляют не более 100×100×100 мм. Экономия электроэнергии при их использовании ~ 80 кВт/день (машины средней мощности ~ 12 кВт, машины меньшей величины ~ 2 кВт).

*Микро-EDM процессы* – это безконтактные процессы, основанные на возникновении дуги или искры между электродами (инструментом и деталью), благодаря которым возникает частичный местный нагрев и плавление обрабатываемого материала. Имеются варианты микро-EDM с использованием электродов и проволоки, которые позволяют изготавливать детали размерами  $\geq 5$  мкм (рис. 4). Несмотря на то, что электроды изнашиваются с меньшей скоростью, чем скорость снятия материала изделия, существует проблема, связанная с потерей точности, что требует развития и использования стратегии компенсации износа электрода. Вторая, более крупная проблема, относится к повреждению обработанной поверхности за счет теплового воздействия и относительного слабого представления о протекающих явлениях на микро- уровне.



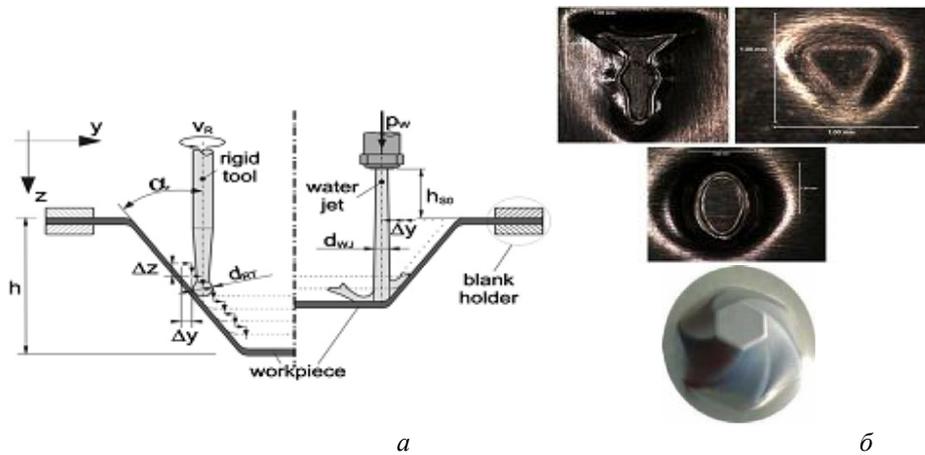
а



б

Рис. 4. Микрослот, обработанный в микро-EDM-процессе (а), и коммерчески доступная гибридная микро-ЭДМ-машина (б)

Микро-инкрементальная формовка (IF) - техника формовки металлического листа, выполняемая движущимся универсальным инструментом – формирующим элементом, который перемещается по заранее определенной орбите, приводя до частичной деформации листа к требуемой форме (рис. 5). Эта технология реализуется без изготовления инструмента требуемой формы и позволяет достигнуть лучших свойства материала в сравнении с традиционной формовкой.



а

б

Рис. 5. Схема инкрементного формования одноточечным жестким инструментом (слева) и водяной струей (правым) (а), детали, образованные IF на трехкоординатной машине с ЧПУ Mori-seiki (б)

Первые исследования в области микро-IF были проведены Saotome и Okamoto, которые разработали ЧПУ-машину для формовки алюминиевой фольги толщины 10 мкм.

Микро-штамповка – высокопроизводительный процесс с большой степенью использования материала. Он является идеальным для массового производства микроструктурных компонентов с размерами < 1 мм (микро-контакты). Микроштамповка является простым вариантом штамповки, которая выполняется на машине, включающей привод и инструмент (рис. 6).



а



б

Рис. 6. Микропресс (а) и микро-штамповка (б) (Nagoya Institute of Technology)

Микро-экструзия – высокопроизводительный процесс с большой степенью использования материала. Он, как и микро-штамповка, является идеальным для массового производства микроструктурных компонентов размеров < 1 мм (микро-контакты) (рис. 7).

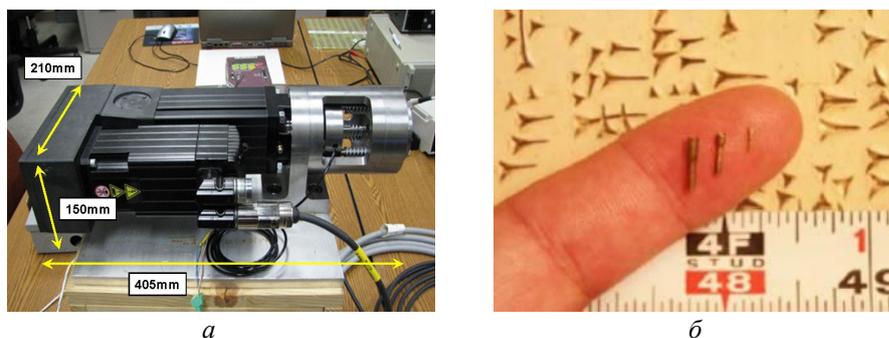


Рис. 7. Машина для микроэкструзии (а), типичные экструдированные компоненты (б)

**Машины с параллельной кинематикой.** Из-за специфических особенностей параллельных механизмов и машин на их основе, исследования в данной области и дальше интенсивно продолжаются и развиваются на высоком уровне с кооперацией возможностей университетов, исследовательских институтов и промышленности. Эти исследования связаны с синтезом новых механизмов, моделированием, управлением, разработкой проектов, разработкой и использованием металлообрабатывающих станков и роботов. Исследования в Белградском университете начались 1996 г. Это были первые работы в данной области в Сербии и согласно долгосрочной программе их целью было создание нового поколения отечественных металлообрабатывающих станков и роботов.



Рис. 8. Версия промышленного прототипа «ЛОЛА пн101\_4»

На рис. 8 показана первая версия прототипа, разработанного совместно с компанией ЛОЛА Систем АД Белград в 2004 г. Сотрудничество по этой программе продолжается до сих пор с ЛОЛА Институтом из Белграда.

Параллельный робот «ДЕЛЬТА» разработан на основе положения о том, что нет необходимости в использовании двигателя, мощностью несколько кВт для манипуляции частями машины массой несколько грамм. Оригинальная схема робота показан на рис. 9. Такая, на первый взгляд комплексная структура механизмов с большой частью сегментов, обеспечивает движущейся плите три степени свободы. Четвертая степень свободы, то есть ориентация, обеспечивается с помощью актуатора на неподвижной плите, момент которой переносится с помощью двух карданных шарниров и телескопического вала или с помощью актуатора на внутренней стороне платформы.

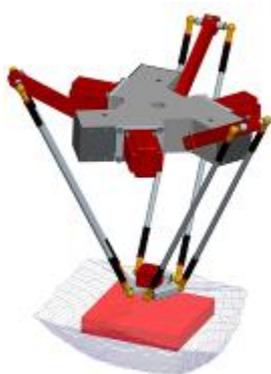


Рис. 9. ДЕЛЬТА-механизм с поворачивающимися шарнирами

Реализация проекта по созданию ДЕЛЬТА-робота базируется на большом комплексе исследований сложных кинематических моделей, разработанных с учетом минимального количества параметров, что делает его более эффективным в отношении существующих подходов, не только в части управления, но и в части эффективных алгоритмов для калибровки и компенсации, совершенствование которых продолжается и с настоящее время.

**Вывод.** Благодаря актуальному тренду миниатюризации в настоящее время имеет место интенсивный спрос на энергетически эффективные миниатюрные компоненты. В данной работе представлены некоторые направления исследований развития новых методов обработки и микро-машин для обработки широкой гаммы деталей из металлов, полимеров, керамики и пр. Обрабатывающие системы нового поколения – основа развития производственных технологий во всех отраслях промышленности. На Машиностроительном факультете Белградского университета проводятся исследования в области металлообрабатывающих станков и роботов нового поколения с параллельной кинематикой, создания

обрабатывающих систем для многоосевой обработки, совершенствования и применения управляемых систем, испытания обрабатывающих систем в производственных условиях.