

Танович Любодраг, д.н., проф.
Белградский университет, Сербия

Исследования в области развития нового поколения металлообрабатывающих станков

В работе представлен обзор исследований в области развития нового поколения металлообрабатывающих станков для изготовления высокоточных изделий с размерами в несколько микрометров из различных материалов. Представлены несколько новых, недавно созданных микро-машин, имеющих возможности изготовления продукции широкой гаммы.

Рассмотрены 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, которые проводятся на Машиностроительном факультете Белградского университета (Сербия).

Ключевые слова: миниатюризация; микро-резание; металлообрабатывающие станки; процессы; инструменты.

Введение. Микро-производство подразумевает создание продуктов с размерами от несколько микрометров до нескольких миллиметров высокой точности размеров из различных материалов [1]. Все началось в конце восьмидесятых годов с появлением Микро-электро-механических систем (MEMS). Миниатюрные компоненты, которые характеризуются точными размерами, заданной формой и дизайном, нашли широкое использование в областях обороны, медицины, биотехнологии, телекоммуникаций и энергетики. В настоящее время, во всем мире, как в научно-исследовательских учреждениях, так и в промышленности имеется большой интерес к области микро-производства [3, 9]. 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 рисунку 1 показаны примеры микро-продуктов, а на рисунку 2 – промышленные микро-производственные системы.

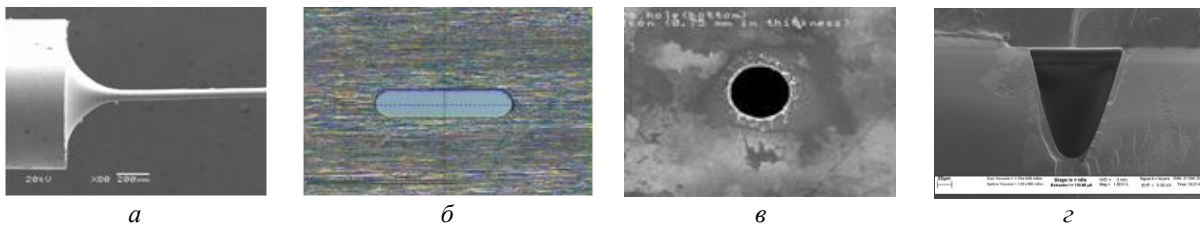


Рис. 1. Вал диаметром 30 мкм [5] (а), паз шириной 100 мкм (б), отверстие диаметром 50 мкм [5] (в), канал шириной 70 мкм [3] (г)



Рис. 2. Промышленные микро-машины: а – лазерная система; б – микро-EDM машина [3]; в – стенд для микро-сверления [8]

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

У миниатюризации есть все возможности стать ведущей технологией XXI-ого века, что обосновано следующими фактами:

© Любодраг Танович, 2017

- промышленно развитые страны привлекают в эту область исследовательские институты с финансированием более миллиарда \$, с тенденцией экспоненциального вклада в будущем;
- производство миниатюрных инженерных систем и устройств с микро- и наноразмерами станет доминирующим экономическим фактором развития в ближайшей перспективе;
- промышленность и образовательные учреждения готовятся к эволюции в будущем существующих производственных процессов на ориентированные физико-химико-биологические технологии;
- странам, которые не будут смогут перевести свою перерабатывающую промышленность и систему образования от традиционных подходов к ориентированным миниатюризованным процессам и продукции, не удастся использовать экономическую прибыль от этой революции в ближайшей перспективе.

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

- субтрактивные процессы подразумевают: микро-механическую обработку (точение, сверление, фрезерование, шлифование), микро-электроэрозионную обработку (EDM), микро-химическую обработку (ECM), микро-лазерную обработку (FIB);
- примерами аддитивных процессов являются селективное лазерное спекание (SLS), стереолитография (SLA) и использование 3D-принтеров;
- форминг-процессы – микро-прокатка, микро-литье, микро-разбрызгивание, микро-выдавливание и т.д.;
- гибридные процессы подразумевают объединение двух или более микро-конвенциональных процессов в целях эффективной обработки твердых материалов или улучшения показателей обработки и точности изделий.

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.

Применительно к процессу микро-обработки существует два направления.

Первое рассматривает процесс в целом:

- микро-обработка является совокупностью всех процессов, реализующихся на элементах микро/мезо-размеров в изделий в диапазоне от 100 мкм до 10 мм;
- микро-обработка характеризуется особыми требованиями к производству высокоточных изделий, сложных геометрических форм из широкой гаммы материалов в определенном пределе размеров;
- микро-обработка подразумевает использование специальных инструментов (микро-инструменты диаметром 50–500 мкм), сопровождается образованием стружки малой толщины (от субмикронной до нескольких микрометров) и выполняется при частоте вращения детали или инструмента (50К–200К мин⁻¹).
- основным отличием между макро- и микро-резанием является преобладание скольжения и царапания в контактной зоне над скалыванием, что требует обязательного учета микро-структурных эффектов.

Второе связано с рассмотрением микро-обработки с позиции размеров стружки:

- микро-размерная стружка: обработка с конвенциональными режимы, толщина стружки (> 10 мкм) больше радиуса округления режущей кромки, в процессе обработки преобладает скалывание. Микро-структурные эффекты не рассматриваются;
- микро/мезоразмерная стружка: обработка характеризуется преобладанием царапания, трения, упругих и пластических деформаций, радиус округления режущей кромки по величине близок к толщине стружки (от сибмикро – до несколько микрометров);

- наноразмерная стружка: это определение обычно связано с ультраточной обработкой алмазными инструментами, имеющими возможность заточки с очень малым радиусом округления режущей кромки. Толщина стружки – в пределах нанометра.

В настоящее время в мире делаются большие усилия по исследованию и созданию машин микро/мезо-размеров. На рисунке 3 показаны прототипы машин, разработанных Northwestern University (NU), которые представляет собою полностью 3-осевые микро/мезо-обрабатывающие центры с ЧПУ, обеспечивающие субмикронную точность обработки [2, 6].

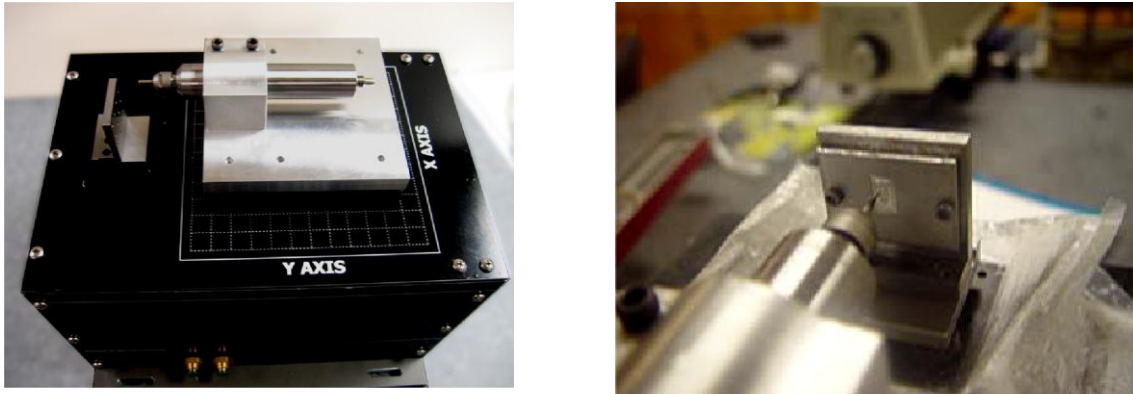


Рис. 3. Машини микро/мезо-размеров: рабочая зона $25 \times 25 \times 25$ мм, подача 700 мм/с, скорость вращения инструмента $120 \text{K} \text{ мин}^{-1}$

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.

В качестве примера приведем характеристики некоторых машин:

- Mori seikitm SL25B500 – металлообрабатывающий станок, мощность 31 кВт, рабочая зона $112 \lltimes 60 \gg$, масса 9250 кгс;
- Microlution 363-S, микро-машина, мощность 2 кВт, рабочая зона $24 \lltimes 30 \gg$, масса 700 кгс.

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

По независимым оценкам, в настоящее время в США используются около 10 млн. станков и эксперты считают, что 25 % из них можно заменить более маленькими.

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 ≥ 5 мкм [12] (рисунку 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.

С научно-технической точки зрения, при реализации микро-EDM процессов потребитель сталкивается с большим количеством неясностей, на которые исследовательские организации должны дать ответ. В их число входит и фундаментальное пояснение механизма съема материала.

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 (рисунку 5). Эта технология реализуется без изготовления инструмента требуемой формы и позволяет достигнуть лучшие свойства материала в сравнении с традиционной формовкой.

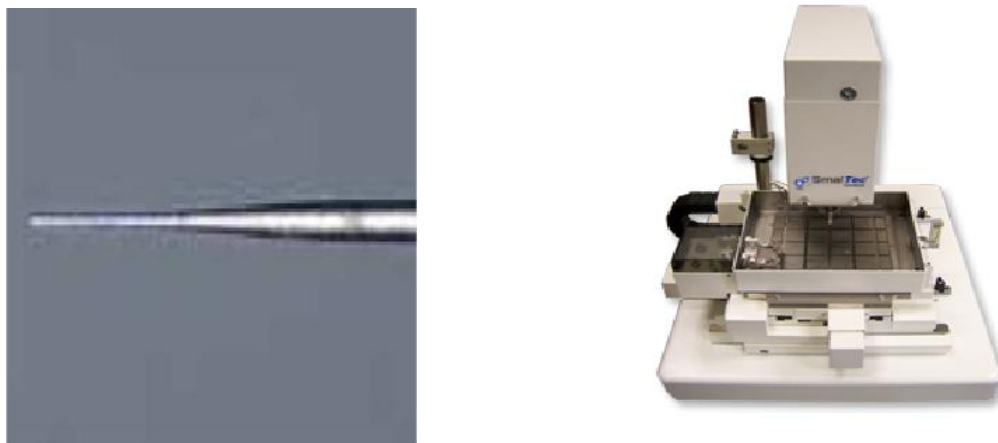


Рис. 4. Микрослот, обработанный в микро-EDM-процессе [11] (а), и коммерчески доступная гибридная микро-ЭДМ-машина [15] (б)

Инструмент может быть изготовлен в виде круглого формирующего элемента или в качестве инструмента может быть использована струя воды под высоким давлением. Круглый формирующий элемент позволяет лучше контролировать точность изделия, но связанная с его конструкцией инкрементальная глубина сдвига оказывает влияние на точность формы изделия. С помощью струи воды при высоком давлении достигается лучшая точность изделия, но имеет место проблема, связанная с контролированием давления воды и геометрических параметров струи.

Первые исследования в области микро-IF были проведены Saotome и Okamoto [13], которые разработали ЧПУ-машину для формовки алюминиевой фольги толщины 10 мкм.

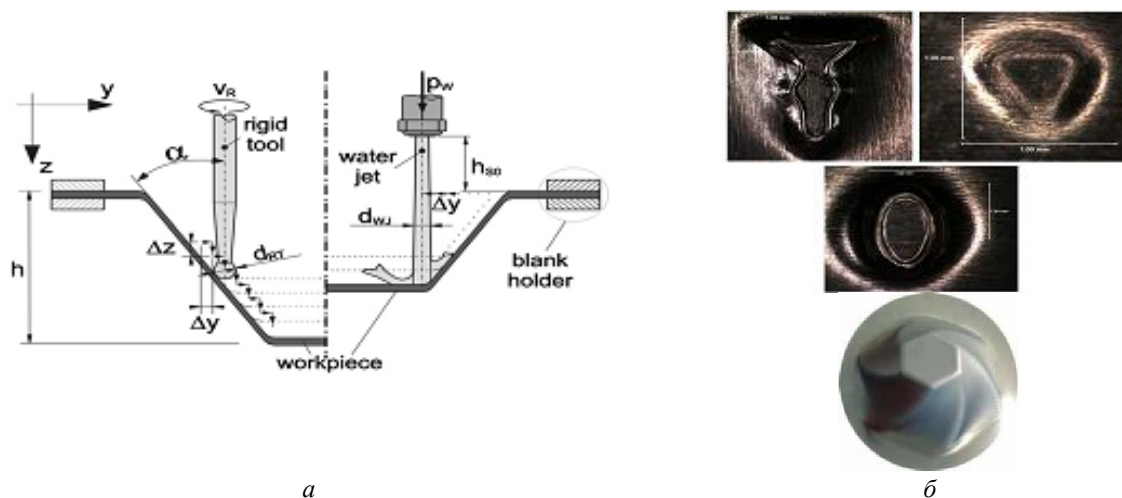


Рис. 5. Схема инкрементного формования односточечным жестким инструментом (слева) и водяной струей (справа) [14] (а), детали, образованные IF на трехкоординатной машине с ЧПУ Mori-seiki (б)

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 (рисунку 6). Главная проблема, возникающая при реализации микро-штамповки, связана с размерными эффектами. Факторы вроде микроструктуры, поверхностных характеристик изделия и инструмента, во многом обуславливают трение в контактной зоне и необходимость использования смазок, в частности на основе TiN, CrN, MoS₂.

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) (рисунку 7) [4, 10]. Главная проблема, возникающая при реализации микро-экструзии, так же связана с размерными эффектами.

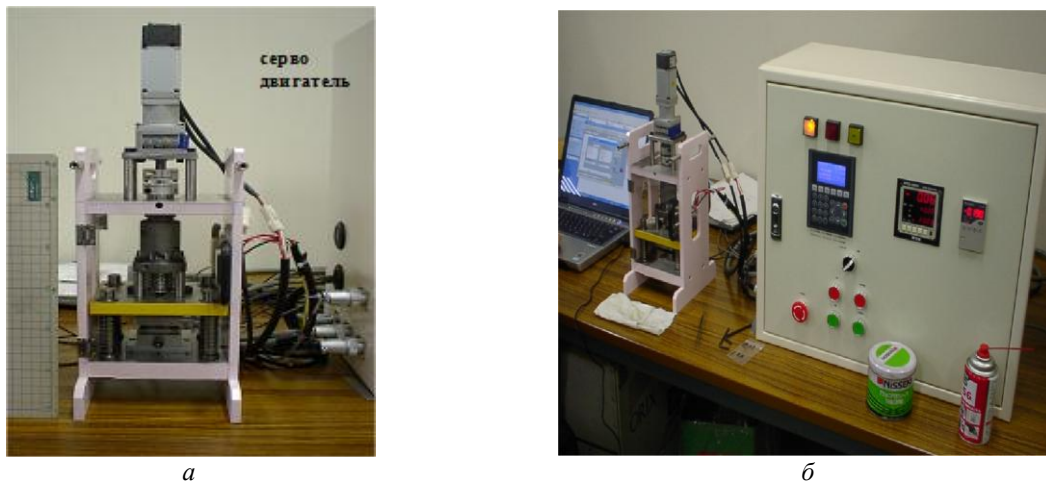


Рис. 6. Микропресс (а) и микро-штамповка (б) (Nagoya Institute of Technology)

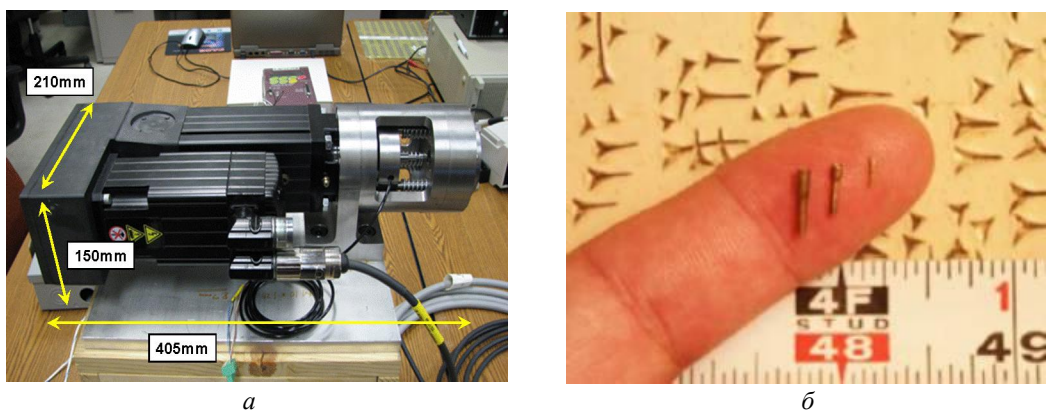


Рис. 7. Машина для микроэкструзии (а), типичные экструдированные компоненты (б)

Кроме рассмотренных выше, в настоящее время в промышленности нашли широкое применение обрабатывающие системы на основе Ultra-short Laser Micro-machining Process, Micro-rolling, Micro-stereo lithography и Water Jet Guided Laser Material Processing.

Одним из перспективных направлений совершенствования обрабатывающей техники являются и машины (станки) с параллельной кинематикой, исследованиям которых уделяется значительное внимание на кафедре производственных процессов в машиностроении Машиностроительного факультета Белградского университета.

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 году. Это были первые работы в данной области в Сербии и согласно долгосрочной программе их целью было создание нового поколения отечественных металлообрабатывающих станков и роботов. Программой предусматривались теоретические исследования в области синтеза новых механизмов, кинематики, динамики, методов калибровки, компенсации и управления, а также прикладные исследования, связанные с разработкой проекта, строительством, испытанием, применением и созданием программных продуктов для металлообрабатывающих станков и роботов с параллельной кинематикой.

На рис. 8 показана первая версия прототипа, разработанного совместно с компанией ЛЮЛА Систем АД Белград в 2004 году. Сотрудничество по этой программе продолжается до сих пор с ЛЮЛА Институтом из Белграда. Результаты совместных работ, помимо эффективных управляемых алгоритмов, позволили развить новые подходы к формированию алгоритмов для калибровки и компенсации.

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 рисунку 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 недвижущейся плите, момент которой переносится с помощью двух карданных шарниров и телескопического вала или с помощью актуатора на внутренней стороне платформы.



Рис. 8. Версия промышленного прототипа «ЛОЛА пн101_4»



Рис. 9. ДЕЛЬТА-механизм с поворачивающимися шарнирами



С точки зрения кинематических возможностей ДЕЛЬТА-робот можно считать SCARA-роботом, с тем отличием, что у первого отношение грузоподъемность/масса и скорость больше.

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.

С использованием изготовленных прототипов выполнены исследования геометрической точности изделий, точности позиционирования изделий и инструмента, статической жесткости системы. Достижимая точность изделий проверялась на пробных деталях, спроектированных именно для этих испытаний. Их целью было:

- проверка использованных моделей для анализа статической жесткости и ожидаемой точности обработки;
- проверка кинематических моделей для верификации системы управления машин со сложной кинематикой;
- установление моделей для калибровки и компенсации;
- эксплуатационные испытания разработанных прототипов при обработке пробных деталей и составление динамико-энергетического баланса созданных обрабатывающих систем.

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.

Список использованной литературы:

1. Micromanufacturing: International Assessment of Research and Development / K.F. Ehmman, D.Bourell, M.L. Culpepper and others. – Springer, 2007.
2. Machining Process Modeling: A Review / K.F. Ehmman, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, I.Lazoglu // J. of Manufact. Sci. and Eng. – 1997. – Vol. 119. – Pp. 655–663.
3. Canadian Manufacturing. – 2012. – Access mode : www.canadianmanufacturing.com.
4. Microforming: Experimental Investigation of the Extrusion Process for Micropins and its Numerical Simulation Using RKEM / J.Cao, N. Krishnan, Z.Wang and other // J. of Manufact. Sci. and Eng. – 2004. – Vol. 126. – Pp. 642–652.
5. Direct-write laser micromachining and universal surface modification of PMMA for device development / J.Y. Cheng, C.W. Wei, K.H. Hsu, T.H. Young // Sens. and Act. B : Chem. – 2004. – Vol. 99. – Pp. 186–196.
6. Dornfeld D. Recent Advances in Mechanical Micromachining / D.Dornfeld, S.Min, Y.Takeuchi // CIRP Ann. Series : Manufact. Technol. – 2006. – Vol. 55. – Pp. 745–768.

7. Huang Wang Y.J. Prediction of Forming Limit in Single Point Incremental Forming With the Ductile Fracture Criterion / Y.J. Wang Huang, J.Cao, M.Li // ASME Conf. Proc. – 2007. – Vol. 2007. – Pp. 929–934.
8. I.Riff Company. – 2012. – Access mode : www.riff-co.com.
9. Katz Z. Analysis of Micro-scale EDM Process / Z.Katz, C.J.Tibbles // The Int. J. of Advanc. Manufact. Technol. – 2005. – Vol. 25. – Pp. 923–928.
10. Krishnan N. Study of the Size Effects on Friction Conditions in Microextrusion. Part I : Microextrusion Experiments and Analysis / N.Krishnan, J.Cao, K.Dohda // J. of Manufact. Sci. and Eng. – 2007. – Vol. 129. – Pp. 669–676.
11. A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro-EDM / H.S. Lim, Y.S. Wong, M.Rahman, M.K. Edwin Lee // J. of Mat. Proces. Technol. – 2003. – Vol. 140. – Pp. 318–325.
12. Micro-EDM-Recent Developments and Research Issues / D.T. Pham, S.S. Dimov, S.Bigot and other // J. of Mat. Proces. Technol. – 2004. – Vol. 149. – Pp. 50–57.
13. Saotome Y. An in-situ incremental microforming system for three-dimensional shell structures of foil materials / Y.Saotome, T.Okamoto // J. of Mat. Proces. Technol. – 2001. – Vol. 113. – Pp. 636.
14. Wallrabe H.D.U. RibCon: micromolded easy-assembly multifiber connector for single- and multimode applications / H.D.U. Wallrabe, G.Friedsam, Th.Hanemann // Proc. of SPIE. – 2001. – Vol. 4408. – Pp. 478–485.
15. Smalltec. – 2012. – Access mode : www.smalltec.com.

References:

1. Ehmann, K.F., Bourell, D., Culpepper, M.L. and others (2007), *Micromanufacturing: International Assessment of Research and Development*, Springer.
2. Ehmann, K.F., Kapoor, S.G., DeVor, R.E. and Lazoglu, I. (1997), «Machining Process Modeling: A Review», *J. of Manufact. Sci. and Eng.*, Vol. 119, pp. 655–663.
3. «Canadian Manufacturing» (2012), available at: www.canadianmanufacturing.com
4. Cao, J., Krishnan, N., Wang, Z. and others (2004), «Microforming: Experimental Investigation of the Extrusion Process for Micropins and its Numerical Simulation Using RKEM», *J. of Manufact. Sci. and Eng.*, Vol. 126, pp. 642–652.
5. Cheng, J.Y., Wei, C.W., Hsu, K.H. and Young, T.H. (2004), «Direct-write laser micromachining and universal surface modification of PMMA for device development», *Sens. and Act. B: Chem.*, Vol. 99, pp. 186–196.
6. Dornfeld, D., Min, S. and Takeuchi, Y. (2006), «Recent Advances in Mechanical Micromachining», *CIRP Ann, Series Manufact. Technol.*, Vol. 55, pp. 745–768.
7. Huang Wang, Y.J., Cao, J. and Li, M. (2007), «Prediction of Forming Limit in Single Point Incremental Forming With the Ductile Fracture Criterion», *ASME Conf. Proc.*, Vol. 2007, pp. 929–934.
8. «I. Riff Company» (2012), available at: www.riff-co.com
9. Katz, Z. and Tibbles, C.J. (2005), «Analysis of Micro-scale EDM Process», *The Int. J. of Advanced Manufact. Technol.*, Vol. 25, pp. 923–928.
10. Krishnan, N., Cao, J. and Dohda, K. (2007), «Study of the Size Effects on Friction Conditions in Microextrusion», Part I «Microextrusion Experiments and Analysis», *J. of Manufact. Sci. and Eng.*, Vol. 129, pp. 669–676.
11. Lim, H.S., Wong, Y.S., Rahman, M. and Edwin Lee, M.K. (2003), «A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro-EDM», *J. of Mat. Proces. Technol.*, Vol. 140, pp. 318–325.
12. Pham, D.T., Dimov, S.S., Bigot, S. and others (2004), «Micro-EDM-Recent Developments and Research Issues», *J. of Mat. Proces. Technol.*, Vol. 149, pp. 50–57.
13. Saotome, Y. and Okamoto, T. (2001), «An in-situ incremental microforming system for three-dimensional shell structures of foil materials», *J. of Mat. Proces. Technol.*, Vol. 113, 636 p.
14. Wallrabe, H.D.U., Friedsam, G., Hanemann, Th. and others (2001), «RibCon: micromolded easy-assembly multifiber connector for single- and multimode applications», *Proceedings of SPIE*, Vol. 4408, pp. 478–485.
15. «Smalltec» (2012), available at: www.smalltec.com

Танович Любодраг – доктор наук, профессор, заместитель декана машиностроительного факультета Белградского университета, Сербия.

Научные интересы:

- производственные технологии;
- технологическое оборудование;
- абразивная обработка керамических композитов и камня.

E-mail: ltanovic@mas.bg.ac.rs.

Статья поступила в редакцию 01.10.2017.