

В.С. Коваленко

НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В ЯПОНИИ

*Киевский политехнический институт,
пр. Перемоги, 37, г. Киев, 252056, Украина*

1. Введение

Япония является ведущим производителем и экспортером современного оборудования для обработки материалов, значительно опережая при этом Германию, США, Италию и Швейцарию [1]. В последние десятилетия наряду с дальнейшим развитием и совершенствованием технологии и оборудования для реализации различных методов классической механической обработки все больший акцент делается на создании новейших высоких технологий и оборудования, основанных на самых последних достижениях физики, химии, биологии и других фундаментальных наук. В Украине и других постсоветских странах методы обработки, основанные на этих достижениях, до недавнего времени были объединены общим названием "Электрофизические и электрохимические методы обработки", что соответствовало общему зарубежному термину "Electromachining – электрообработка". С расширением номенклатуры методов обработки в указанных странах начал прививаться термин "Физико-технические методы" и "Специальные технологии обработки". На Западе, а также в Японии закрепились термины "Nontraditional (Nonconventional) Machining – нетрадиционная обработка". В этой области прикладной науки и технологии специалисты Японии добились очень существенных успехов, разработали ряд уникальных технологий и ставят перед собой дальнейшие амбициозные задачи на ближайшие годы. Вместе с тем наши японские коллеги постоянно отдают дань уважения и признательности основоположникам электротехнологии – нашим соотечественникам, супругам Б.Р. и Н.И. Лазаренко, которые еще в 1943 году открыли метод электрообработки материалов.

В данной статье предлагается анализ последних японских разработок в области лазерных, электроразрядных, электрохимических, биологических и других методов обработки материалов.

2. Лазерная обработка

Этот вид обработки развивается особенно динамично. В стране имеется Национальная программа, согласно которой, в частности, предусмотрено создание в 2001–2002 годах АИГ лазеров с диодной накачкой мощностью излучения до 10 кВт.

В настоящее время на заводах фирмы Мицубиси Электрик (Mitsubishi Electric) в Нагоя серийно выпускаются технологические системы для сварки материалов АИГ лазерами с диодной накачкой мощностью 1 кВт. На этих же заводах выпускаются технологические системы для сварки, раскроя материалов и упрочнения деталей излучением CO₂ лазеров мощностью 1–5 кВт с годовой программой выпуска 300 шт. Эти системы пользуются устойчивым спросом, как в Японии, так и за ее пределами. Основными потребителями этого оборудования для выполнения операций раскроя материалов являются автомобильная промышленность (24%), малые предприятия машиностроительного профиля (14%), электротехническая промышленность (12%), общее машиностроение (12%), индустрия конструкционных материалов (11%) и др. Основным потребителем для выполнения операций сварки является автомобильная промышленность (62%).

Для обработки серий микроотверстий микронных диаметров с производительностью до 700 отв./с в элементах интегральных микросхем микропроцессоров на этих же заводах выпускается специальная установка ML605GTX на базе CO₂ лазера, пользующаяся в настоящее время повышенным спросом.

Фирма Фанук (Fanuc) разработала оборудование на базе CO₂ лазера мощностью 3,5 кВт, оснащенное цифровым сервоприводом с линейными двигателями, для сверхскоростной резки материала. На этом оборудовании вырезка отверстий (путем трепанации) диаметром 10 мм в стальном листе толщиной 1 мм может производиться со скоростью до 500 отв/мин при расстоянии между осями отверстий 25,4 мм. Такая скорость резки значительно превышает производительность вырубки отверстий пуансоном на револьверном автомате. Лазерная лаборатория этой фирмы (руководитель – вице-президент компании, Др. Норико Карубе) имеет амбициозные планы по дальнейшему увеличению производительности вырезных операций при использовании "летающей оптики", лазеров на АИГ с диодной накачкой и волоконной оптикой.

Уникальные исследования по применению ультрафиолетового лазерного излучения для суперфинишной обработки поверхности проводятся в лаборатории проф. Е. Намба (университет Чубу). Эти исследования базируются на огромном накопленном опыте создания методов суперфинишной обработки оптических поверхностей и ответственных элементов оптоэлектроники абразивными нанопорошками, а также монокристаллическим алмазным инструментом. Лаборатория занимается разработкой технологии суперфинишной обработки ответственных деталей рентгеновского телескопа, создаваемого в соответствии с Национальным проектом, для поиска новых галактик и изучения высокоэнергетических астрофизических явлений. Лазерная поверхностная обработка позволяет управлять параметрами микрорельефа (вернее, нанорельефа!) поверхности в пределах от нескольких нанометров до долей нанометра! Так, при суперфинишной лазерной обработке поверхностей монокристалла кремния съем материала составляет 0,32 Å за импульс [2]. Таких уровней точности управления качеством поверхности путем прецизионного удаления материала при обработке никакими другими методами пока достигнуть не удалось.

В лаборатории проф. Е. Намба ведутся также интересные исследования по изучению возможностей использования лазерного излучения для формирования сложнопрофильных изделий из листового материала путем создания направленных термодетформаций. При необходимости изготовления единичных деталей или небольшой партии деталей разработанная технология позволяет отказаться от дорогостоящих специальных штампов и прессового оборудования. Проф. Намба предложил это необычное применение лазерного излучения еще в 1987 году для формирования металлических деталей [3], и сейчас это направление развивается в Великобритании, США, других странах, и, в частности, в ряде исследовательских центров Японии. Так, в лаборатории нетрадиционной обработки материалов Университета Окаямы проф. Е. Уно изучает возможности термического деформирования пластмасс при создании сложнопрофильных изделий.

В лаборатории проф. Уно также изучается процесс качественной микрорезки материалов импульсным излучением АИГ лазера. В сотрудничестве с НИИ лазерной техники и технологии Киевского политехнического института здесь проводятся сравнительные исследования процесса прецизионной резки пластин монокристаллического кремния для элементов солнечных батарей электроразрядным и лазерным методами [4].

Уникальные исследования механизма лазерной сварки мощным излучением CO₂ лазера в условиях глубинного проплавления материала проводятся в исследовательском институте сварки (Joint and Welding Research Institute) Осацкого университета. Здесь изучение процесса проплавления производится в динамике с помощью рентгеновской и оптической камер с высоким разрешением. Для большей визуализации турбулентных потоков в расплав вводятся частицы тугоплавкого металла – вольфрама. Полученные результаты позволяют понять сложные процессы, происходящие в зоне воздействия высококонцентрированных тепловых потоков, определить оптимальные условия лазерной обработки [5].

Значительных успехов в этом институте добились также в области высококачественной лазерной сварки алюминия и алюминиевых сплавов излучением CO₂ лазеров и лазеров на АИГ.

В институте создана установка для комбинированного процесса напыления материала с помощью плазмы низкого давления и излучения CO₂ лазера, что позволяет существенно повысить адгезионные характеристики нанесенного на матрицу материала.

Ряд интересных исследований по сварке, нанесению покрытий, упрочнению и наплавке материалов проводится с использованием широкой гаммы уникального высокоэнергетического оборудования – плазменной установки гибридного типа мощностью 100 кВт, гиротронной системы

для спекания материалов мощностью 10 кВт и частотой 28 ГГц, электроразрядной установки для точечной сварки с током разряда до 5000 А, электроннолучевой установки сверхвысокого напряжения (600 кВ, 300 кВт), мощного СО₂ лазера (15 кВт), матричного полупроводникового лазера с мощностью излучения до 100 Вт, эксимерного лазера для модификации поверхности материала, энергетической установки импульсного излучения миллиметрового диапазона (60 ГГц, 200 кВт), ионнолучевой установки для обработки композиционных материалов и др.

Перспективные разработки в области лазерной технологии выполняются в исследовательском институте фотонной техники (R&D Institute for Photonics Engineering Manufacturing, Science and Technology Center, Tokyo). Помимо создания мощного твердотельного лазера с диодной накачкой, а также твердотельного лазера с перестраиваемой частотой здесь разрабатывается компактный лазер, активной средой которого является оптическое волокно, свернутое в плотную спираль, а накачка осуществляется с помощью матрицы диодных лазеров. Эти лазеры предназначены как для традиционных технологических применений, так и для новых технологий лазерной обработки материалов.

В этом же институте развивается совершенно новое направление изготовления микрооптоэлектронных устройств – прямое печатание микро-композитных электронных плат (direct-printed micro-composite circuits). При этом создаются сверхмалые частицы определенных материалов с заданными свойствами, которые затем имплантируются в плату в соответствии с программой.

Во всех указанных разработках следует особо подчеркнуть стремление создать встроенную мониторинговую систему для обеспечения заданных параметров процесса и достижения наивысшего качества лазерной обработки.

Представляют значительный интерес исследования, проводимые в центре промышленных технологий префектуры Окаяма (Industrial Technology Center of Okayama Prefecture) по использованию излучения эксимерного лазера для микрообработки деталей. В частности, разработана технология профильного "лазерного точения" цилиндрических микрозаготовок ультрафиолетовым излучением эксимерного лазера на KrF. С помощью маски, установленной на пути лазерного излучения, последнее формируется в виде специфического "фасонного режущего инструмента" для удаления материала с вращающейся заготовки. В качестве заготовки используется графитовый стержень диаметром 0,5 мм. Этим способом изготавливаются сложнопрофильные графитовые электроды-инструменты для микроэлектроразрядной обработки материалов.

3. Электроразрядная обработка

Без преувеличения можно сказать, что в настоящее время Япония все с большим правом может претендовать на роль мирового лидера в разработке и использовании различных методов электроразрядной обработки материалов. Исследования в этом направлении проводятся практически во всех крупнейших университетах страны, а разработкой технологии и оборудования занято большое количество авторитетных фирм.

Один из крупнейших научных и производственных центров в области электроразрядной обработки фирма Содик (Sodick) выпускает широкую гамму копировально-прошивочных станков, станков для контурной вырезки проволочным электродом, обрабатывающих центров для изготовления сложнопрофильных графитовых электродов для копировально-прошивочных работ и пр. При этом используется многолетний опыт компании по созданию сложных штампов и пресс-форм, различных элементов штамповой оснастки.

Для повышения точности и производительности выпускаемого оборудования компания заменила традиционные системы приводов линейными двигателями, что позволило упростить приводной механизм, значительно снизить уровень вибраций и шума при осуществлении перемещений узлов, повысить скорости и ускорения этих перемещений. Это в свою очередь позволяет обеспечить более высокий уровень автоматизации оборудования в целом.

Другим нововведением компании является использование керамических шпинделей и направляющих, что значительно снижает вес узлов, уменьшает их инерционность. Применение керамических шариковых подшипников минимизирует термические деформации, снижая нагрузку на подшипник при высокоскоростном вращении практически до нуля, а это позволяет обеспечивать высокую жесткость шпинделя в широком диапазоне скоростей вращения. В итоге обеспечивается стабильная динамическая точность и надежность обеспечения заданных размерных параметров обработки.

Из выпускаемого оборудования особый интерес представляют станки для прецизионной прошивки отверстий. В частности, на станке K1C отверстие диаметром 0,3–3,0 мм в твердом сплаве

толщиной 20 мм прошивается за 20 с. Для получения качественных отверстий применяются трубчатые электроды из композита CuW, которые при обработке твердых сплавов обеспечивают минимальный износ.

Исследователи лаборатории нетрадиционных методов обработки университета Окаямы использовали трубчатый электрод для получения глубоких отверстий (200 мм) в монокристалле кремния. Обработка таких отверстий ведется со скоростью 1 мм/с, время обработки составляет 200 с. Эта же технология используется для обработки сложнопрофильных отверстий (О-, Н-, Х-образной формы) в фильерах для получения объемного синтетического волокна. В лаборатории также разработана технология электроразрядной обработки проволочным электродом для прецизионного разделения на тонкие пластины монокристаллов кремния [6].

В Токийском университете сельского хозяйства и технологии (Tokyo University of Agriculture and Technology) в лаборатории доктора М. Кунейды с помощью трубчатого электрода в межэлектродный промежуток подается не диэлектрическая жидкость, а воздух или кислород под высоким давлением (0,5 мПа). Этим обеспечивается практически нулевой износ электрода-инструмента, интенсифицируется удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка и повышается производительность съема материала [7].

В этой же лаборатории разработана оригинальная методика моделирования и экспериментального определения пространственного распределения электрических разрядов между электродами при обработке с выводом визуальной информации на монитор. Методика позволяет изучать процесс электроэрозии в динамике и предотвращать условия его дестабилизации [8].

Оригинальная технология электроразрядной обработки изделий из титановых сплавов разработана в Технологическом исследовательском институте префектуры Осаки. При этом использован эффект изменения цвета поверхности титанового сплава в результате химико-термических реакций при электроразрядной обработке. Таким образом, одновременно с размерной обработкой детали достигается изменение цвета ее поверхности (от красного до фиолетового) в зависимости от заданных режимов обработки. Образующийся оксидный слой также обладает износостойкими свойствами.

По-прежнему одним из ведущих производителей электроэрозионного оборудования в Японии и в мире является компания Мицубиси Электрик. Здесь наряду с широкой гаммой проволочных вырезных станков выпускаются крупные копировально-прошивочные станки с максимальным весом электрода-инструмента до 150 кг и максимальным весом заготовки до 2000 кг. На заводах компании в Нагое разработана технология электроразрядного поверхностного легирования деталей на копировально-прошивочных станках. Создаваемые по этой технологии слои карбидов и нитридов титана способствуют значительному повышению износостойкости ответственных изделий машиностроения.

Технология поверхностной модификации материала при электроразрядной обработке в другом варианте предложена в Лаборатории нетрадиционных методов обработки проф. Е. Уно (Университет Окаяма). Согласно предложенной технологии для формирования карбидов титана электроразрядная обработка ведется титановым электродом, а в диэлектрическую среду (керосин) добавляется порошковый углерод, что позволяет значительно увеличить толщину легированного слоя (до 25–30 мкм) и повысить износостойкость обработанной поверхности.

В Японии широко развита сеть специализированных предприятий, которые используют электроразрядное и другие типы нетрадиционного оборудования для изготовления штампов, пресс-форм, сложнопрофильных деталей аэрокосмической техники и т.п. по заказу различных отраслей промышленности. Одним из крупнейших предприятий такого типа является компания Ходен Сеймитсу Како (Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co, Ltd), которая имеет более 200 единиц электроразрядного оборудования, а также широкий спектр специальных установок для реализации методов нетрадиционной обработки материалов-лазерной, электрохимической, плазменной, газотермической и др.

Компания изготавливает штампы, пресс-формы, отдельные сложные детали для автомобильной, электронной, электротехнической и аэрокосмической промышленности, она имеет определенные успехи в модернизации электроразрядного оборудования, разрабатывает свой собственный программный продукт для повышения эффективности используемых технологий. В частности, специалисты этой компании разработали станок для вырезки проволочным электродом сложнопрофильного пера лопатки турбины длиной до 1000 мм.

Япония добилась огромных успехов в области микротехники и микротехнологии и успешно осваивает диапазон наноразмеров в технике и технологии. Учитывая важность и приоритетность для

страны развития данного научного и технологического направления, правительством утвержден грандиозный Национальный проект по разработке микротехники и микротехнологии. В рамках этого проекта в декабре 1999 г. в Токио состоялась выставка микростанков для обработки и сборки супермалых деталей и узлов. Такие детали и узлы необходимы для создания микро- и наноприборов, суперкомпактных механизмов, например, микронасосов для перекачки крови при локальной блокаде кровеносных сосудов, нанороботов для перемещения внутрикровеносных сосудов при выполнении уникальных операций и пр.

Представленные на этой выставке образцы оборудования поражают воображение. Так, габаритные размеры фрезерного станка составляют 119 x 119 x 102 мм. Мощность станка 56 Вт, диаметр концевой фрезы – 3 мм.

Размеры токарного станка 32 x 25 x 30,5 мм при весе 100 г и мощности 1,5 Вт. Минимальный диаметр заготовки 0,06 мм, а обеспечиваемая шероховатость обработанной поверхности 1,5 мкм.

Пресс для штамповки листовых заготовок при габаритах 111 x 66 x 170 и мощности 100 Вт развивает усилие 3 кН. Размеры штампа при этом равны 30 x 40 x 52 мм.

Представленный антропоморфный робот имеет высоту 100 мм, мощность привода 45 Вт и может манипулировать деталями размерами до 20 мкм.

Сборочный автомат-манипулятор, выполненный в виде цилиндрического узла диаметром 48 мм и длиной 65 мм, обеспечивает сборку деталей размерами 100 x 100 x 30 мкм с точностью 1 мкм.

В рамках указанного национального проекта фирмой Фанук разработан наноробот типа Fanuc ROBOPANO Ui для изготовления микро и наноизделий. Иллюстрацией возможностей данного робота может служить изготовленная с его помощью полость штампа диаметром 1 мм с детальным изображением человеческого лица или дифракционная решетка с шагом штрихов 1 мкм.

Хорошим примером уникальных возможностей электротехнологии при изготовлении микро- и нанодеталей является изготовленный фирмой Мацусита Электрик Индастриал (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.) уникальный микроэлектроразрядный станок MG-ED71. С его помощью удается изготовить ультрамалые отверстия диаметром 5 мкм в нержавеющей стали толщиной 10 мкм, микрощели шириной 5 мкм длиной до 150 мкм в нержавеющей стали толщиной 20 мкм и пр. Другой станок MG-ED51 разработан для получения электродов сверхмалых диаметров путем использования технологии электроразрядного микрошлифования заготовки проволочным электродом. Указанные станки разработаны на основе результатов исследований проф. Т. Масузава (Токийский университет). В лаборатории проф. Масузава также создана технология электроразрядного изготовления полости штампа для получения кузова микроавтомобиля длиной 13 мкм! Эта разработка была продемонстрирована на 48 Генеральной Ассамблее СИРПа в Афинах в 1998 г.

4. Электрохимическая обработка

В последние годы научно-техническая политика в области развития методов электрохимической обработки претерпевает серьезную трансформацию. Жесткие законодательные ограничения в области экологии, которые в последнее время особенно ужесточились в промышленно развитых странах, существенно повлияли на интенсивное развитие размерной электрохимической обработки в Японии. Связано это с определенной сложностью утилизации больших количеств отходов мощных электрохимических станков. В то же время в разработке электрохимических технологий, не влекущих за собой экологических проблем, японские ученые продолжают глубокие научные исследования.

Одна из таких разработок (Токийский университет сельского хозяйства и технологии, лаборатория доктора Кунейды) посвящена изучению возможностей повышения усталостной прочности контактных поверхностей дорожек качения шариковых подшипников с помощью струйной электрохимической обработки [9]. В этом случае на контактной поверхности в определенном порядке создаются пятна электрохимического воздействия диаметром 200–230 мкм глубиной до 5–6 мкм, то есть достигается заданная топография поверхности, обеспечивающая надежное удержание смазывающей пленки в условиях значительных динамических нагрузок. Альтернативные способы получения заданного микрорельефа (механический, электроразрядный, лазерный и др.) обычно вызывают изменения термонапряженного состояния на обработанной поверхности, что несколько снижает усталостную прочность и износостойкость обработанной поверхности. При электрохимическом же растворении материала электрода-анода дефектного слоя не наблюдается. Таким образом, получаемый заданный микрорельеф в виде регулярных "карманов" для удержания смазки на контактной поверхности и одновременное отсутствие остаточных напряжений после обработки

позволяют существенно повысить усталостную прочность дорожек качения подшипников и повысить надежность самих подшипниковых узлов.

Другая разработка лаборатории доктора Кунейды использует противоположный эффект химической реакции электролиза – электрохимическое осаждение материала на электроде-катоде. В этом случае с помощью электролитической струи, подаваемой из сопла с большим давлением (57 кПа), реализуется процесс быстрого прототипирования (Rapid Prototyping), то есть выращивание трехмерного объекта путем электрохимического осаждения (наращивания) слоя материала по определенной программе [10]. В зависимости от режимов обработки, вида электролита, условий сканирования сопла со струей электролита толщина осажденного слоя может составлять от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Таким образом, процесс после определенной доработки может рассматриваться как новый эффективный метод микросинтеза изделий (пока сравнительно малых размеров) из различных металлических материалов.

Одним из направлений, в котором продолжается научный поиск совершенствования электрохимической обработки, является абразивно-электрохимическая обработка. В уже упоминавшейся лаборатории нетрадиционной обработки материалов проф. Уно процесс суперфинишного абразивного шлифования и хонингования интенсифицируется за счет процесса электролиза, что позволяет повысить как производительность, так и качество обработки трудно обрабатываемых материалов. В ряде лабораторий разрабатывается процесс правки абразивных кругов на металлической связке с помощью реакции электролиза.

5. Ультразвуковая обработка

Особый акцент в развитии ультразвукового метода делается на достижении минимального управляемого съема при обработке хрупких, твердых токонепроводящих материалов типа стекла, кварца, сапфира, керамики, кремния и т.п. Получение полостей малых размеров в таких материалах обычной ультразвуковой обработкой затруднено из-за сложностей изготовления и эксплуатации ультразвукового инструмента с микроразмерами. Поэтому отверстия диаметром менее 100 мкм обработать ультразвуковым методом практически не удавалось.

Японскими исследователями из Института прикладной науки Токийского университета (Institute of Industrial Science, University of Tokyo), предложена технология обработки микроотверстий диаметром 20 мкм в кремнии с помощью вращающегося ультразвукового инструмента [11]. Дальнейшее уменьшение диаметра прошиваемых отверстий ограничено значительным эксцентриситетом при вращении массивного концентратора с инструментом (4 мкм).

Этими же исследователями разработана другая технология, при которой ультразвуковые колебания возбуждаются не в инструменте, а сообщаются обрабатываемой заготовке [12]. Заготовка закрепляется на ультразвуковом концентраторе, а вращающийся инструмент подается на заготовку. При этом эксцентриситет при вращении инструмента составляет менее 0,5 мкм.

Разработанная технология использовалась при обработке отверстий диаметром 5 мкм в кварце и кремнии. Диаметр инструмента составлял 4 мкм, материал инструмента – карбид вольфрама.

Учитывая, что коэффициент износа инструмента из карбида вольфрама составляет 0,5, исследователи предложили в качестве материала инструмента для ультразвуковой прошивки микроотверстий использовать металлоалмазный композит, что позволило снизить коэффициент износа до 0,01. Благодаря наличию металлической связки для профилирования алмазосодержащего инструмента возможно использование процесса электроразрядного микрошлифования проволочным электродом (WEDG – Wire Electro Discharge Grinding) [13].

6. Биообработка

Очень необычный метод биологической размерной обработки металлических материалов разрабатывается в лаборатории нетрадиционной обработки проф. Е. Уно. В качестве предпосылок для развития этого метода в лаборатории именно Университета Окаямы можно назвать тот факт, что этот университет был создан в XIX веке на базе известной в Японии медицинской школы. Кроме того, в университете традиционно сильны научные школы химии, биологии, а в последнее время – генной инженерии, геномики.

Суть предложенного метода заключается в использовании для сверхлокального разрушения материала особого вида бактерий, способных "перерабатывать" или "есть" металл. В природе существует целый класс организмов – литотрофы (lithotrophs), которые непосредственно из воздуха потребляют двуокись углерода как источник углерода для питания. Как подкласс среди литотрофов

различают хемолитотрофы, которые в качестве источника энергии используют энергию окисления неорганического вещества (например, железа, серы). К хемолитотрофам относятся микроорганизмы (бактерии) типа тиобациллус феррооксидант (*Thiobacillus ferrooxidans*) и тиобациллус тиооксидант (*Thiobacillus thiooxidans*). Так, например бактерия тиобациллус феррооксидант может получить энергию при окислении двухвалентного железа. Эта бактерия имеет очень малые размеры – диаметр около 0,5 мкм, длина 1 мкм, что является большим преимуществом при микрообработке (нано-обработке), так как объемы удаляемого материала будут очень малыми. Другим преимуществом такого вида обработки является полное отсутствие дефектного слоя или зоны термического влияния после выполнения процесса.

К настоящему времени известно семь типов бактерии тиобациллус феррооксидант, которые зарегистрированы в Американской коллекции типов культур (American Type Culture Collection – ATCC). Из них четыре типа исследованы как пригодные для размерной обработки материалов – ATCC 13598, ATCC 13661, ATCC 33020. Эти бактерии живут в специфических условиях подземных рудных вод и хорошо сохраняются в концентрированных растворах кислот при pH меньше 3 [14].

При обработке поверхность материала, не подлежащая обработке, изолируется путем нанесения маски на поверхность фотолитографическим способом. При экспериментальных исследованиях обнаружено влияние различных факторов на производительность процесса (съем материала) [15]. Прежде всего, съем материала (оцениваемый по глубине обработанной полости) линейно зависит от времени обработки. Так, удельный съем при обработке чистого железа составляет 14 мкм/ч. При тех же условиях удельный съем меди составляет 20 мкм/ч.

Для интенсификации процесса образец (изделие) вместе с биологическим раствором бактерий целесообразно периодически встряхивать. Этим обеспечивается периодическое возобновление контактов "незадействованных" бактерий с обрабатываемым материалом. Вне зависимости от обрабатываемого материала оптимальная скорость встряхивания составляет 160 циклов в минуту.

Удельный съем зависит также от температуры биологической среды. Оптимальная температура среды при использовании бактерий ATCC 13598 для обработки чистого железа составляет 40°C, для обработки меди – 30°C.

Обнаружено также влияние электрического поля на процесс биообработки. Интенсивность съема можно повысить вдвое приложением электрического постоянного тока напряжением 0,5 В и силой тока 0,01 А к заготовке и вспомогательному электроду.

Помимо использования бактерий для обработки металлов в лаборатории проф. Е. Уно также изучается технология размерной обработки пластических материалов с помощью микроорганизмов [16].

Предложенный новый метод микрообработки делает лишь первые шаги, но уже сейчас видны уникальные возможности его дальнейшего использования при изготовлении микро- и наноприборов и устройств. Поэтому ряд других научных лабораторий и групп подключились к исследованиям в этом направлении (Okayama University of Science, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture, Joining and Welding Research Institute of Osaka University, Technology Research Center of Osaka Prefecture и др.).

7. Факторы, стимулирующие развитие нетрадиционных методов обработки в Японии

а) Главным фактором, определяющим эффективное и очень интенсивное развитие высоких технологий в Японии и прежде всего нетрадиционных методов обработки материалов, является понимание на уровне общественного сознания, структур бизнеса, правительства и парламента, определяющего значение развития научно-технических исследований, инженерного образования как приоритетных направлений в закреплении лидирующих позиций страны среди других промышленно развитых стран мира. Практически каждый член общества осознает, что страна, не имеющая источников энергии, сырья, располагающая только 7% собственной территории, пригодной для использования (остальное – горы), расположенная в зоне повышенной сейсмоопасности (до 380 землетрясений в год), имеющая практически самую высокую в мире плотность населения, геополитически расположенная отнюдь не в самом лучшем месте Земли, может выжить в современной острой конкурентной борьбе в мире и, более того, быть одним из лидеров этого мира только за счет производства и экспорта наукоемкой продукции, разработки высокоэффективной техники и технологии;

б) Первый из названных факторов влечет за собой и соответствующие акценты в бюджете страны – на науку, образование, культуру госбюджет предусматривает основные объемы расходов (только на поддержку технологических инноваций в бюджете 1999 г. предусматривалось 120,6 миллиардов йен или один миллиард долларов, а в бюджете на 2000 г. эти ассигнования увеличены до

500 миллиардов йен, или 5 миллиардов долларов [17]). Огромная финансовая поддержка оказывается образованию и развитию научных исследований со стороны частного капитала;

в) В обществе социальный статус ученого, профессора, исследователя, лектора, учителя поддерживается очень высоко. Только в Японии существует особая форма уважительного обращения к ученому, очень уважаемому учителю – Сенсей (наряду с существованием принятых и в других странах различных почетных званий, наград, орденов, премий и т.п.);

г) Органами местного самоуправления, представителями бизнеса при поддержке государства практически во всех префектурах созданы Центры высокоэффективных технологий или Промышленные технологические центры, Технопарки (Advanced Material Processing Institute Kinki, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture, Joining and Welding Research Institute of Osaka University, Institute of Laser Science of University of Electro-Communications, R&D Institute for Photonics Engineering, Institute of Laser Technology, Industrial Technology Institute of Yamaguchi Prefecture и др.), которые оснащены самым современным технологическим оборудованием, а также уникальными приборами и установками для оценки различных параметров технологических процессов. Студенты и профессора университетов могут пользоваться возможностями таких центров бесплатно, работники частных предприятий могут проводить исследования за умеренную плату. Главная цель центров – оказать профессиональную помощь в разработке новейшей техники и технологии, стимулировать наиболее быстрое воплощение новых идей и разработок в конкретный экспортный продукт;

д) Практически во всех крупных университетах страны в составе всех крупнейших промышленных компаний созданы и эффективно работают лаборатории, отделы высоких технологий, подразделения, занимающиеся разработкой нетрадиционных методов обработки материалов;

е) В стране создана целая сеть региональных общественных профессиональных ассоциаций, обществ новейших нетрадиционных технологий (Society of Electromachining Engineers, High Temperature Society, Japan Society of Precision Engineering, Laser Technology Society и др.), способствующих объединению усилий на решении актуальных проблем новых технологий, обмену информацией, обеспечивающих связь между разработчиками и потребителями новейшей техники и технологии;

ж) Япония активно и даже в определенной мере агрессивно проводит политику научно-технической экспансии. Ее специалисты очень широко представлены в различных международных профессиональных научно-технических ассоциациях и сообществах. В составе самой престижной организации в мире в области машиностроения – Международного института машиностроения – СИРПа (International Institute for Production Engineering Research) представительство Японии составляет 41 членов и 18 ассоциированных членов. Председателем научно-технического комитета СИРПа по электротехнологии (STC "E") является профессор Т. Масузава (Токийский университет). Большое количество японских ученых входит в состав Лазерного института Америки (LIA), Международного института инженеров электронщиков и электротехников (IEEE), Международного общества оптической техники (SPIE), Американского общества инженеров-механиков (ASME) и других международных профессиональных организаций.

От 5 до 15% научных докладов на крупнейших международных конгрессах и симпозиумах по новейшим технологиям (Генеральная Ассамблея СИРПа, ISEM – Международный симпозиум по электрообработке материалов, LAMP – Международная конференция по применению лазеров для обработки материалов, ICALEO – Международная конференция по применению лазеров и оптоэлектроники и др.) представлено обычно японскими учеными.

8. Выводы

1. Разработка нетрадиционных методов обработки материалов является приоритетным направлением в развитии науки и технологии Японии.

2. Для Японии как страны, не располагающей источниками сырья и энергии, но обладающей мощным интеллектуальным и промышленным потенциалом, развитие новейших технологий является единственным средством реализации высокоэффективной экспортно-ориентированной экономики.

3. Японскими исследователями особое внимание уделяется созданию новых типов лазеров для промышленного использования и разработки новейших технологий на их основе.

4. Уникальные результаты достигнуты в области микро- и нанобработки с помощью лазерного, электроразрядного, электрохимического и ультразвукового методов.

5. Разработан уникальный метод размерной микрообработки металлических материалов с помощью бактерий, что открывает новые возможности в миниатюризации создаваемых приборов и устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gerhard Schweitzer*. Technology in Switzerland – on the Way to Intelligent Machine, CIRP Internal Documents and Reports, General Assembly, Montreux, Switzerland, 1999. P. 9–16.
2. *Yoshiharu Namba, Liming He*. An Investigation of a Unit-Machined Shape for the Three-Dimensional Micromachining of Silicon Surfaces with a Pulsed Ultraviolet Laser, Int. J. Japan Soc. Pres. Eng. Vol. 32. № 1. 1998. P. 13–18.
3. *Namba Y.* Laser forming of Metals and Alloys, Proceedings of LAMP'87, May, 1987, Osaka, Japan, P. 601–606.
4. *V.S.Kovalenko*. Research report "Material Processing with Laser Beam", JSPS, Okayama University, Dec.25, 1999.
5. *Akira Matsunawa, Naoki Seto, Jong-Do Kim, Masami Mizutani, Seiji Katayama*. Dynamics of Keyhole and Molten Pool in High Power CO₂ Laser Welding, Proceedings of SPIE International Conference "High-Power Lasers in Manufacturing, 1–5 November 1999.
6. *Akira Okada, Yoshiyuki Uno, Yasuhiro Okamoto*. A New Slicing Method of Monocrystalline Silicon Ingot by Wire/EDM, Proc. of the 12th Internat. Symposium on Electro-Machining, 1998. P. 417–424.
7. *Masanori Kunieda, Masahiro Yoshida*. Electrical Discharge Machining in Gas, Annals of the CIRP, Vol. 46/1, 1997. P. 143–146.
8. *Hiroyuki Kojima, Tetsuya Yoshida, Masanori Kunieda*. Detection of Spark Location in EDM Sinking, Int. J. Japan.Soc. Prec. Eng. Vol. 25. № 2. 1991. P. 100–101.
9. *Masanori Kunieda, Masahiro Yoshida, Yoshinobu Akatmatsu*. Influence of Micro Indents Formed by Electro-Chemical Jet Machining on Rolling Bearing Fatigue Life, PED-Vol.64, AMSE, Manufacturing Science and Engineering, Editor: K.F. Ehamann, Book. № H00861. 1993. P. 693–699.
10. *Masanori Kunieda, Ritsu Katoh, Yasushi Mori*. Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition Using Electrolyte Jet, Annals of the CIRP. Vol. 47/1. 1998. P. 161–164.
11. *Egashira K., Masuzawa T., Fugino M., Sun X.* Application of USM to Micromachining by On-the-machine Tool Fabrication, Intern. J. of Electrical Machining, № 2. 1997. P. 31–36.
12. *Kai Egashira, Takahisa Masuzawa*. Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration, Annals of the CIRP. Vol.48/1. 1999. P. 131–134.
13. *Masuzawa T., Fujino M., Kobayashi K., Suzuki T.* Wire Electro-Discharge Grinding For Micromachining, Annals of the CIRP. Vol. 34/1. 1985. P. 431–434.
14. American Type Culture Collection, Catalog of Bacteria and Bacteriophages, 17th ed., 1989.
15. *Yoshiyuki Uno, Toshiaki Kaneda, Seiichi Yokomizo*. Fundamental Study on Biomachining (Machining of Metals by *Thiobacillus Ferrooxidans*), JSME International Journal, Ser. C. Vol.39. № 4. 1996. P. 837–842.
16. *Toshiaki Kaneeda, Seiich Yokomizo, Yoshiuki Uno*. Microremoval Process of Plastic by Microorganism, Proc. of the 3rd International Conference on Ecomaterials, p. 41–44.
17. Cabinet OKs Y85 trillion budget, The Japan Times, Saturday, Dec.25, 1999.

Поступила 03.03.2000

Summary

In article the last achievements of the Japanese developers in the field of laser, electrodischarge, electrochemical, ultrasonic, biological and other nontraditional methods of material machining are considered. Some developments in the field of micro- and nano-technology are shown, the data on a number of the national programs are given, some features of organization of scientific researches at universities and firms of Japan working in the field of development of nontraditional technologies are considered. The article is based on the authors experience of work in Japan as a Visiting Professor of Okayama University in 1999.