

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

УДК 681.7.069.24: 621.81-023.5

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТРЕХМЕРНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ (3×3×0,6 м) СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2009 г. А. Г. Верхогляд; В. И. Проць; М. Ф. Ступак, канд. физ.-мат. наук;
Ю. В. Чугуй, доктор техн. наук

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Разработана, создана и исследована лазерная технологическая система LSP-2000 (*Laser System Processor-2000*) для формирования заданного поверхностного профиля произвольной топологии на криволинейных поверхностях, а также прецизионной лазерной обработки крупногабаритных объемных изделий. В данной системе реализованы не только режимы обработки (резка, сварка, абляция), но и измерение реальной геометрии трехмерных объектов с произвольной формой поверхности. Приведены краткое описание основных технических решений и экспериментальные результаты апробирования системы LSP-2000. Погрешность измерения в старт-стопном режиме не превышает 2 мкм, погрешность обработки при движении исполнительного элемента по произвольному непрерывному контуру не более 20 мкм. Рабочая скорость при микропрофилировании поверхности превышала 9 м/мин. Время непрерывной работы в автоматическом режиме достигало более 15 часов в диапазоне температур от +18 до +30 °C.

Ключевые слова: лазерная технологическая система, лазерная обработка объемных изделий, резка, сварка, абляция, измерение геометрии трехмерных объектов.

Коды OCIS: 120.4610, 220.4610, 120.3180

Поступила в редакцию 25.05.2009

Введение

Лазерные технологии обработки деталей и изделий получили широкое применение [1–3], особенно (с использованием систем с числовым программным управлением (ЧПУ)) при обработке деталей по произвольному контуру.

Для решения целого ряда задач точного машиностроения требуется лазерная обработка большеразмерных деталей сложной формы, причем погрешность позиционирования лазерного луча не должна превышать 10 мкм. Такие задачи возникают, например, при создании большеразмерных прочных антенн с заданной диаграммой направленности, когда необходимо производить микропрофилирование заранее сформированной поверхности (в общем случае поверхность имеет произвольную топологию) из углепластика с нанесенной на нее тонкой металлической пленкой. Эта технология требует прецизионной аппаратуры для удаления металлической пленки в соот-

ветствии с рассчитанной конфигурацией. При решении этой задачи наиболее целесообразным является использование многокоординатного лазерного комплекса, оснащенного мощным импульсным лазером [4] с системой позиционирования исполнительного элемента, обеспечивающей соответствующую точность.

В качестве примера можно привести лазерную установку швейцарской фирмы “LASER WORK AG” [5]. Примененные в ней технические решения делают эту установку по своим параметрам одной из самых совершенных на сегодняшний день. Однако системы позиционирования и управления данной установки не позволяют проводить обработку трехмерных (3D) объектов с произвольной формой поверхности. Более того, неопределенность позиционирования исполнительного элемента составляет 50 мкм и выше.

Авторами статьи разработана и создана лазерная система LSP-2000 [6], удовлетворяющая приведенным выше требованиям. В ходе экс-

периментальных исследований к настоящему времени в данной системе реализованы не только режимы обработки (резка, сварка, абляция), но и обмер реальной геометрии трехмерных объектов с произвольной формой поверхности.

В данной работе приведено краткое описание основных технических решений и экспериментальные результаты апробирования системы LSP-2000 при выполняемых ею технологических операциях – резке, сварке, микропрофилировании поверхности с использованием процесса абляции и измерении геометрии трехмерного изделия.

Используя процесс абляции, система имеет возможность испарять тонкие пленки металла, нанесенные на поверхность диэлектрика, и тем самым формировать антенны с заданной диаграммой направленности и заданным вектором поляризации радиоволны. Размер обрабатываемых изделий – до $3000 \times 3000 \times 600$ мм при характерном размере единичного элемента микропрофиля не более $0,5 \times 0,5$ мм и отклонении положения синтезированного элемента от заданного менее 20 мкм в любой точке обрабатываемой поверхности. Изделие максимального размера обрабатывается не более чем за 24 рабочих часа. Управление системой осуществляется блок ЧПУ.

Структура системы

Прецизионная обработка большеразмерных 3D-объектов требует обеспечения точной сборки, юстировки тяжелых и крупногабаритных элементов конструкции системы, а также долговременной стабильности положения юстируемых узлов в условиях больших динамических нагрузок и в широком диапазоне температур. Необходимо свести к минимуму механический износ движущихся частей, обеспечить быстрый переход от одного вида обработки изделия к другому и создать эквивалентные условия обработки его в любой точке 3D-поверхности за счет поддержания постоянного размера пятна сфокусированного на нее лазерного излучения.

Указанные выше требования удалось удовлетворить за счет разработки и использования ряда нестандартных конструкторских и инженерных решений (см. в конце данного раздела), обеспечивших работу системы с заданной точностью, без заклинивания портала и других механических частей в широком диапазоне температур ($+18^{\circ}\text{--}+30^{\circ}\text{C}$). Применение двух различных лазеров позволило реализовать операции рез-

ки, сварки и микропрофилирования. Резка и сварка осуществляются серийным отечественным лазером МЛТИ-500, абляция – специально разработанным для этой задачи лазером [7] со следующими параметрами:

Длина волны излучения	– 0,532 мкм (вторая гармоника),
Режим работы	– импульсно-периодический,
Частота повторения импульсов	– 300 Гц,
Длительность единичного импульса	– 10 нс,
Средняя мощность излучения	– 10 Вт,
Модовый состав излучения	основная мода ТЕМ ₀₀ .

Структурная схема LSP-2000 представлена на рис. 1, а общий вид системы показан на рис. 2. Как видно из структурной схемы, LSP-2000 представляет собой пятикоординатную роботизированную лазерную систему. Из пяти задаваемых координат координаты X , Y , Z – декартовы, вдоль которых осуществляются линейные перемещения, а θ и Φ являются аналогами соответствующих координат в сферической системе и задают направления вращения исполнительного элемента (рис. 1). Движение по всем этим координатам рассчитывается. Кроме того, имеется еще одна нерасчетная координата – U . Она задает положение второго конца портала в направлении X и фактически определяет перекос портала. Задача блока управления заключается в минимизации перекосов, возникающих в процессе работы, что крайне важно для обеспечения высоких технологических характеристик системы.

Можно выделить следующие части системы: 3-х координатный стол портального типа с направляющими, рабочую головку, блок ЧПУ с собственным программным обеспечением, компьютер для подготовки данных, главный (*host*) компьютер и два технологических лазера.

Направляющие представляют собой прецизионные шлифованные бруски из гранита длиной 3,5 м, они жестко закреплены на основании и по ним осуществляется движение по X -координате. Для этого к каждой гранитной направляющей прикреплены магнитная дорога и оптическая линейка.

Салазки выполняют движение по двум гранитным направляющим. Каждая салазка имеет бегунок оптической линейки и линейный синхронный двигатель, что позволяет знать ее

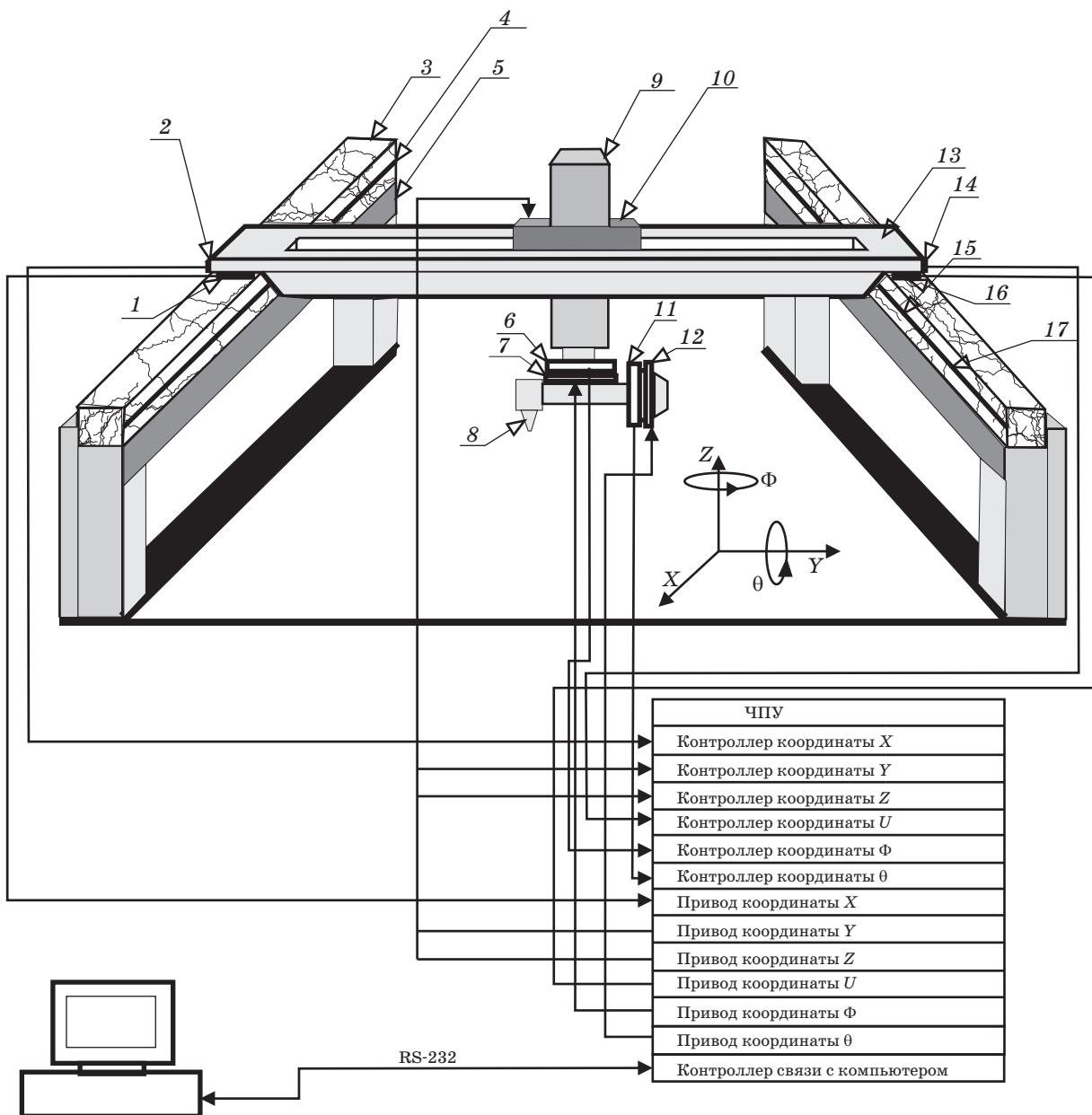


Рис. 1. Структурная схема LSP-2000. 1 – салазки с линейным двигателем координаты X, 2 – датчик перемещений вдоль координаты X, 3 – гранитная направляющая координаты X, 4 – статор линейного двигателя координаты X, 5 – основание, 6 – датчик поворота вокруг вертикальной оси (координата Φ блока ЧПУ), 7 – двигатель поворота вокруг вертикальной оси, 8 – лазерная головка, 9 – перемещаемая вдоль координаты Z пиноль для размещения технологических лазеров, 10 – каретка с размещенными в ней двигателями и датчиками перемещений по координатам Y и Z, 11 – датчик поворота вокруг оси, лежащей в горизонтальной плоскости (координата θ блока ЧПУ), 12 – двигатель поворота вокруг оси, лежащей в горизонтальной плоскости, 13 – портал, 14 – датчик перемещения вдоль координаты U, 15 – статор линейного двигателя координаты U, 16 – салазки с линейным двигателем координаты U.

положение (координаты X и U), и управлять перемещением салазок. Движение каждой салазки по направляющей осуществляется при ее всплытии на аэростатических опорах.

Портал выполнен в виде клепаной объемной конструкции из алюминиевого сплава и переме-

щается салазками по координате X. Важно, что перемещение по X-координате осуществляется двумя двигателями, каждый из которых имеет свою линейку, что вызвано большими габаритами портала и требованием высокой точности его перемещения. Движение по Y-координате за-

дается расположеннымми внутри портала гранитными брусками меньшего размера, а привод осуществляется линейным двигателем по магнитной дороге, расположенной на одном из них. Портал обеспечивает перемещение исполнительного элемента в поле 3000×2000 мм. Конструкция его механических узлов обеспечивает статическую точность позиционирования исполнительного элемента не хуже 1 мкм. При расчете конструкции портала было заложено требование, чтобы все виды его динамических деформаций (прогиб, скручивание, перекосы и проч.) во всем диапазоне возможных рабочих ускорений не приводили к неконтролируемому смещению исполнительного элемента более чем на 10 мкм.

Перемещение исполнительного элемента по X , Y и Z -координатам происходит синхронно с перемещениями лазера. Это позволило отказаться от сложного оптического тракта, догостоящей габаритной оптики и поддерживать постоянный размер рабочего пятна на поверхности обрабатываемой детали во всем рабочем объеме. Вертикальное перемещение пиноли, рас-

положенной внутри каретки и представляющей собой короб с закрепленным в нем излучателем лазера, обеспечивается шарико-винтовой передачей с приводом от двигателя марки ДБМ. Точность перемещения обеспечивается оптической линейкой. Конструктивно оказалось удобней сделать бегунок неподвижным, а линейку – движущейся.

Рабочая головка (рис. 2) содержит оптические элементы для формирования пространственного распределения лазерного излучения и передачи его к поверхности детали.

Необходимость обеспечения нормального (к поверхности детали) падения луча реализуется поворотом головки в азимутальной плоскости (угол поворота от 0 до 360°) и наклоном исполнительного элемента (лазерного резака) от вертикального положения до горизонтального (полярный угол меняется от 0 до 90°). Для поворотов направления лазерного луча на 90° в оптическом тракте используются зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием. Оптические элементы и их расположение раз-

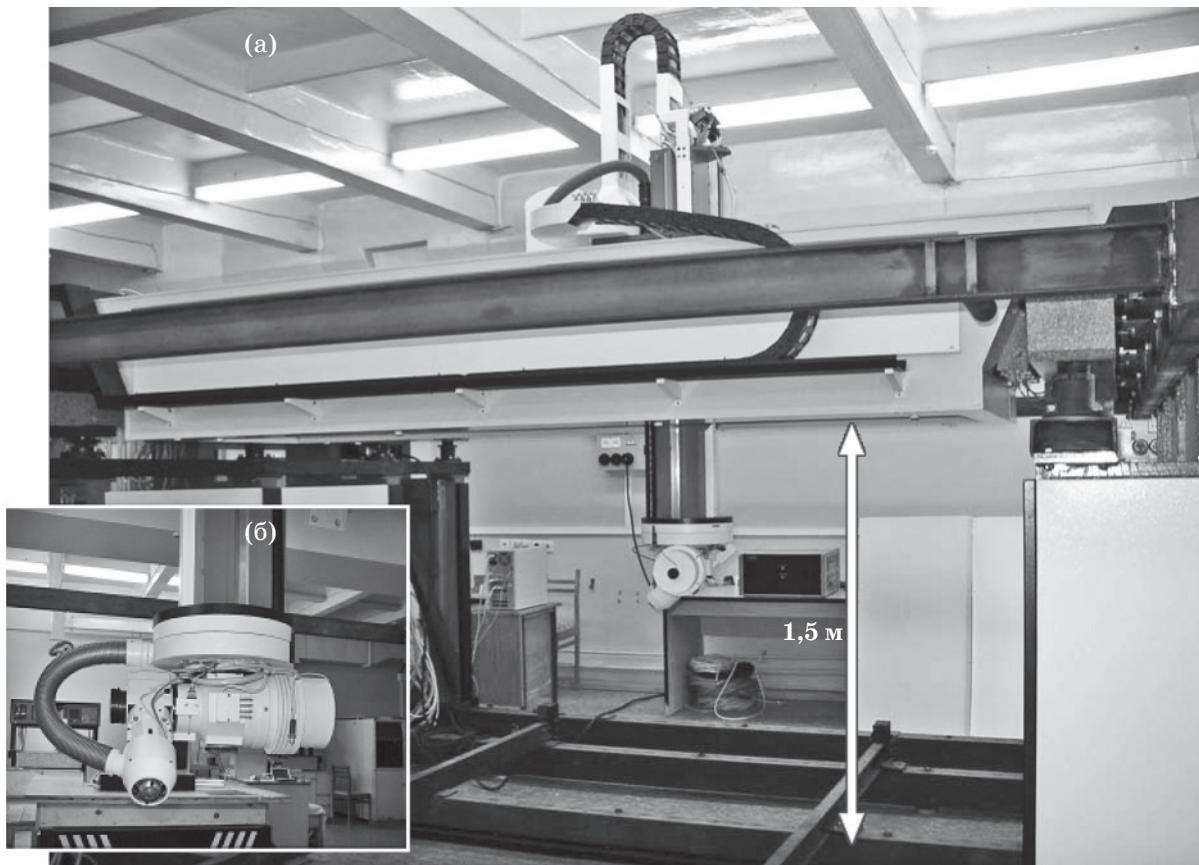


Рис. 2. Общий вид системы LSP-2000 (а) и крупным планом – рабочая головка (б). Стрелкой показано расстояние от нижней части портала до плоскости рабочего стола – 1,5 м.

личны для режима резки, сварки и для режима аблации. К особенностям оптической схемы, используемой при микропрофилировании поверхности, следует отнести наличие в ней двух элементов – гомогенизатора и дифракционного оптического элемента для плавного ослабления интенсивности лазерного излучения.

Управление всей системой осуществляется главный (*host*) компьютер. С помощью созданного оригинального программного обеспечения производится:

обработка и подготовка данных для работы всего комплекса, в том числе, ввод чертежа обрабатываемой детали, привязка реального местоположения детали к графическому чертежу,

построение формы обрабатываемой поверхности по координатам вводимых точек, построение траектории движения исполнительного элемента, разбиение на элементарные перемещения по каждой координате,

графическое отображение на экране обрабатываемой поверхности и местоположения исполнительного элемента на ней, отображение меню пользователя [8].

Блок ЧПУ (РУХ-5,0w) является заказным и изготовлен предпрятием СП “Рухсервомотор” (Минск, Белоруссия). Число геометрических координат, подлежащих расчету, равно пяти (координаты X , Y , Z , θ и Φ), а число управляемых координат – шести. Как указывалось выше, имеется координата U , определяющая перекос портала, т. е. отставание или опережение ведомого двигателя на второй гранитной направляющей относительно двигателя на первой. Помимо управления перемещениями исполнительного элемента блок ЧПУ опрашивает концевые датчики, установленные на всех направляющих, управляет включением-выключением лазера и позволяет менять частоту его работы. Блок обеспечивает согласованное движение по всем 6-ти координатам так, чтобы перемещение точки фокусировки лазерного луча происходило плавно и по рассчитанной кривой. Конструктивно он состоит из собственного компьютера и двух блоков электроники: собственно блока ЧПУ и силового блока, содержащего приводы линейных двигателей.

Погрешность позиционирования исполнительного элемента системы определяется погрешностью изготовления и юстировки механических узлов (люфты между подвижными элементами, механические гистерезисы, непрямолинейность направляющих и др.), а также собственной погрешностью датчиков переме-

щений по каждой координате. В качестве датчиков перемещений используются стандартные оптоэлектронные линейки. Систематическая погрешность этих датчиков измерялась с помощью интерферометра и в программное обеспечение комплекса вносились соответствующие корректировки. Датчики круговых перемещений тестировались на специальном стенде перед установкой.

Для устранения механических люфтов в системе применен ряд оригинальных инженерных решений. Так, при выставлении гранитных направляющих использовались специально разработанные клиновые опоры, позволяющие осуществлять плавное перемещение деталей массой более 500 кг с дискретой менее 1 мкм и с полным отсутствием эффекта разъёстрировки при больших динамических нагрузках. Специально разработанный на основе установленных перпендикулярно ленточных струн узел крепления салазок к порталу обеспечивает фактическое устранение люфтов (примерно до 5 мкм). Эти решения позволили исключить заклинивание портала в широком диапазоне температур.

Для устранения люфтов в вертикальном направлении дополнительно к силе тяжести, которая прижимает детали друг к другу, функционирует узел магнитного замыкания. Сила взаимодействия магнитов в несколько раз превышает силу тяжести.

Режим измерений и экспериментальные результаты испытаний системы

Опция “режим измерений” в большинстве случаев работы лазерной технологической системы является необходимой. При обработке изделий с произвольной формой поверхности необходимо знать положение изделия на рабочем столе и его ориентацию в пространстве. Для этого чаще всего использовался набор “контрольных точек” или “контрольных меток”. На стадии изготовления заготовки изделия на ее поверхности специальным образом подготавливались N отмеченных точек ($N > 3$, количество точек зависело от сложности поверхности обрабатываемого изделия). Эти точки также помечались на чертеже для обработки изделия, подготовленном в пакете “AutoCad”. Перед началом обработки изделия в программе управления системой устанавливался режим “поиск контрольных точек”. Затем оператором вручную исполнительный элемент системы устанавливался в контрольную точку № 1. Установка исполнительного элемента в

точку производилась либо с использованием видеокамеры системы (конструктивно рабочий объектив системы одновременно являлся объективом видеокамеры), либо по результатам совмещения пятна рабочего лазерного излучения с контрольной точкой. Погрешность совмещения не превышала нескольких микрометров. После установления трех контрольных точек определялась правильность нахождения положения заготовки изделия путем выхода в оставшиеся контрольные точки. Если погрешность выхода в указанные контрольные точки была в допустимых пределах, то начиналась обработка поверхности.

Если же погрешности превышали заданные пределы, то в программе активировался “режим измерений”. Чаще всего необходимость обмера изделий была вызвана тем, что обрабатываемые заготовки представляли собой тонкостенные (толщина стенок не превышала 3 мм) конструкции сложной формы с габаритами порядка 2000–3000 мм, и при установке их на рабочий стол происходила некоторая деформация этих заготовок, но поверхность изделия была близка к заданной. В данном режиме по командам оператора находились реальные координаты некоторого множества точек поверхности и путем интерполяции восстанавливалась ее реальная форма, пересчитывались и изменялись чертежи на обработку, а затем начиналась обработка.

Программное обеспечение системы допускало установку на исполнительный элемент бесконтактного датчика поверхности и тогда имелась возможность автоматического обмера изделий произвольной формы. Этот режим при реальной работе системы не использовался ввиду высокой стоимости и уникальности обрабатываемых заготовок. Испытания такого режима производились на тестовых образцах, отклонение восстановленной формы изделий (сфера и цилиндр) от реальной не превышало 10 мкм.

При необходимости имелась возможность измерения на поверхности изделия некоторых дополнительных параметров: положение некоторой точки в пространстве относительно других, измерение пространственной длины некоторого отрезка, измерение локального радиуса кривизны поверхности и проч. При проведении этих измерений в режиме старт-стопного перемещения исполнительного элемента отклонение также не превышало 10 мкм по всему рабочему полю, что обусловлено малыми абсолютными погрешностями системы позиционирования исполнительного элемента. На рис. 3 приведены

результаты проверки погрешностей перемещения исполнительного элемента вдоль различных координат.

Из рис. 3. следует, что максимальное отклонение D по X - Y -координатам не превышает 4–6 мкм на всем поле перемещений 3000×2000 мм, а по Z -координате – 1 мкм в диапазоне перемещения 600 мм.

Повторяемость (отклонение исполнительного элемента при многократном выходе в заданную точку) была лучше 1 мкм. Относительная погрешность позиционирования исполнительного элемента (проверялась как замыкание пространственной кривой сложной формы при работе всех 5 координат комплекса) была также менее 1 мкм.

Результаты исследований погрешности перемещения исполнительного элемента по различным координатам представлены в таблице. Эта погрешность определялась с помощью лазерного интерферометрического преобразователя перемещений [9], собственная погрешность которого была менее 0,1 мкм.

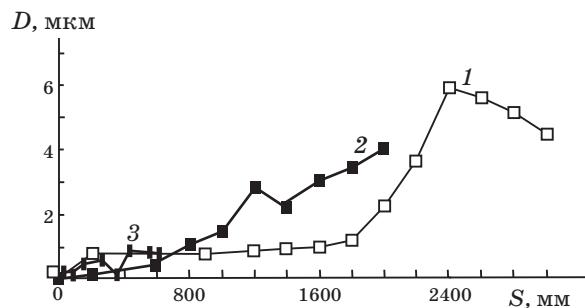


Рис. 3. Экспериментальные данные отклонений D действительного положения исполнительного элемента от заданного по различным координатам в зависимости от перемещения S . 1 – X -координата, 2 – Y -координата, 3 – Z -координата.

Результаты исследований погрешности перемещения исполнительного элемента по различным координатам

Направление перемещения	Неопределенность позиционирования
Вдоль координаты X	≤ 6 мкм
Вдоль координаты Y	≤ 6 мкм
Вдоль координаты Z	≤ 2 мкм
Поворот вокруг вертикали	≤ 1 мкм на дуге радиусом 250 мм
Поворот вокруг горизонтали	≤ 1 мкм на дуге радиусом 250 мм

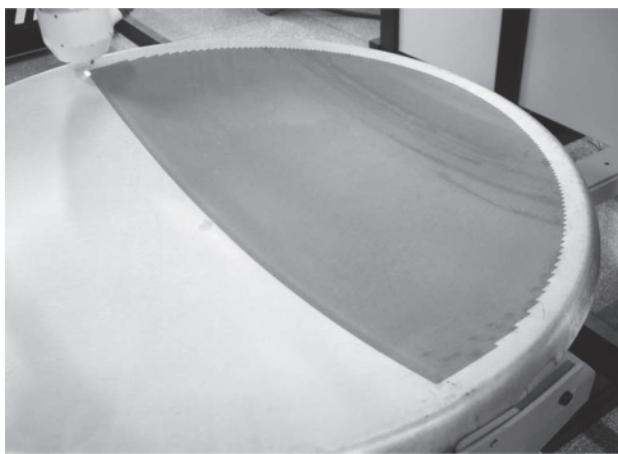


Рис. 4. Микропрофилирование трехмерной поверхности методом абляции.

В ходе испытаний системы осуществлялась резка различных металлов, в том числе нержающей стали и титана толщиной 6 мм. Резка производилась по сложному контуру при произвольной форме поверхности. Было выявлено, что отклонения получаемого контура шва от заданной траектории не превышали 10 мкм.

С помощью лазера для абляции (рис. 4) производилось микропрофилирование 3D-поверхности испарением никелевых пленок толщиной до 10 мкм с обрабатываемых изделий. Результаты микропрофилирования также продемонстрировали, что отступления получаемого контура профиля от заданной траектории не превышали 10 мкм.

Заключение

Для прецизионной обработки большеразмерных изделий с произвольной формой поверхности разработана и создана многофункциональная лазерная технологическая система LSP-2000, работающая в автоматическом режиме и обеспечивающая выполнение следующих технологических операций: резка, сварка и лазерная абляция. Для выполнения этих операций система оснащена двумя технологическими лазерами. Ее испытания и последующее практическое применение продемонстрировали следующие технические характеристики:

Размер обрабатываемых деталей, мм	3000×3000×600
Погрешность обработки, мкм, не более	±10

Скорость обработки м/мин	6
Форма обрабатываемых деталей	произвольная
Обрабатываемые материалы:	сталь, алюминий, титан, никель и др.

Применение оригинальных конструкторских и инженерных решений обеспечило работу системы с заданной точностью, без заклинивания портала и других механических частей в широком диапазоне температур. Использование воздушных подшипников в основных приводах системы позволило предотвратить ее механический износ.

Результаты тестирования показали, что созданная лазерная технологическая система позволяет производить прецизионную обработку (микропрофилирование) поверхности тел произвольной формы. Уникальная совокупность достигнутых технических параметров, а также возможности, заложенные в системе, позволяют на базе LSP-2000 создать полноценную автоматическую контрольно-измерительную машину с неопределенностью результатов измерений не более 5 мкм в любой точке рабочего объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Introduction to Industrial Laser Material Processing // Booklet. ROFIN SINAR Laser GmbH. 1998. № 3. 180 р.
2. Игнатов А.Г., Суздалев И.В. Состояние и перспективы применения лазерного технологического оборудования // Судостроительная промышленность. Серия "СВАРКА". 1989. В. 7. С. 3–18.
3. Отчет по НИР. Исследование технологии лазерной резки и сварки металлов и сплавов. Моделирование применения высококонцентрированных источников энергии в перспективных технологических процессах постройки морских судов // СПб.: ЦНИИ ТС, 1999. Т. 1. 172 с. Т. 2. 77 с.
4. Горный С.Г., Петров М.И., Соловьев В.Д., Турчин Г.А. Специфика поверхностной обработки металла сериями лазерных импульсов наносекундной длительности // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 10. С. 929–932.
5. Майер Б.Е., Фуррер А.М. Трехмерная лазерная резка // МЕТАЛЛООБРАБОТКА'89. Оборудование, приспособления и инструменты для металлообрабатывающей промышленности. Высококачественная технология из Швейцарии. Munchen: Carl Hanser Verlag, 1989. S. 100–105.
6. Базин В.С., Верхогляд А.Г., Выхристюк И.А., Касторский Л.Б., Кирьянов В.П., Кокарев С.А., Проць В.И., Сысоев Е.В. Многофункциональная прецизионная лазерная технологическая система для обработки большеразмерных деталей произвольной топологии // Автометрия. 2005. Т. 41. № 6. С. 107–114.

7. Верхогляд А.Г. Оптический тракт лазерного комплекса для прецизионного микропрофилирования крупногабаритных изделий произвольной формы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 4. С. 58–63.
8. Выхристюк И.А., Сысоев Е.В., Поташников А.К., Кокарев С.А. Математическая модель управления лазерным технологическим комплексом // Автометрия. 2005. Т. 41. № 6. С. 32–39.
9. Веденников В.М., Кирьянов В.П., Лебедев Г.А. Применение лазерного интерферометра для контроля и юстировки измерительных систем тяжелых станков // Станки и инструмент. 1978. № 4. С. 21–23.