

А. Д. КОЧЕТОВ, А. А. ПЕТРОВ

## ЛАЗЕРНАЯ ГИБКА ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Проанализирован процесс лазерной гибки тонколистовых изделий. Экспериментально показано, что угол изгиба может быть изменен в широких пределах в зависимости от режима лазерной обработки.

*Ключевые слова:* лазерное формообразование, твердотельный лазер.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению процесса лазерной гибки тонколистовых изделий под действием излучения твердотельного лазера. В работе использовался импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер (средняя мощность до 200 Вт, длительность импульса 0,1—10 мс). Для формирования траектории облучения был использован программируемый шестикоординатный робот Motoman SSF-2000 (рис. 1). В качестве образцов были использованы стальные пластины толщиной от 0,3 до 1,1 мм.



Рис. 1

**Актуальность работы.** Бесконтактное изменение формы детали, вызванное лазерным воздействием, может быть использовано для решения различных задач приборо- и машиностроения. В частности, при формовке деталей различной формы лазерные технологии позволяют в некоторых случаях заменить процесс штамповки и получать необходимую форму детали непосредственно с помощью лазерного облучения [1]. При разработке юстировочных узлов для регулировки положения микрооптических, волоконных, микромеханических и других деталей использование лазера может существенно упростить конструкцию и автоматизировать процесс юстировки [2]. Управляемое деформирование под действием лазерного излучения может быть использовано также при создании микродвигателей для микромеханических систем и решении ряда других задач [1]. Основными достоинствами лазерного формообразования являются бесконтактность, локальность и возможность автоматизации процесса.

**Описание работы.** Рассмотрим кратко механизм возникновения деформаций (пластического формообразования) под действием температурных напряжений. При локальном нагревании некоторой области материала в результате неравномерного теплового расширения в нем возникают термоупругие напряжения. Если напряжения достигают предела текучести, то они приводят к появлению пластических деформаций. По окончании импульса, при остывании среды, деформированная область не принимает исходных размеров и остается в сжатом (по сравнению с исходным) состоянии.

На рис. 2 представлены основные виды деформации вызванные локальным лазерным прогреванием [3].

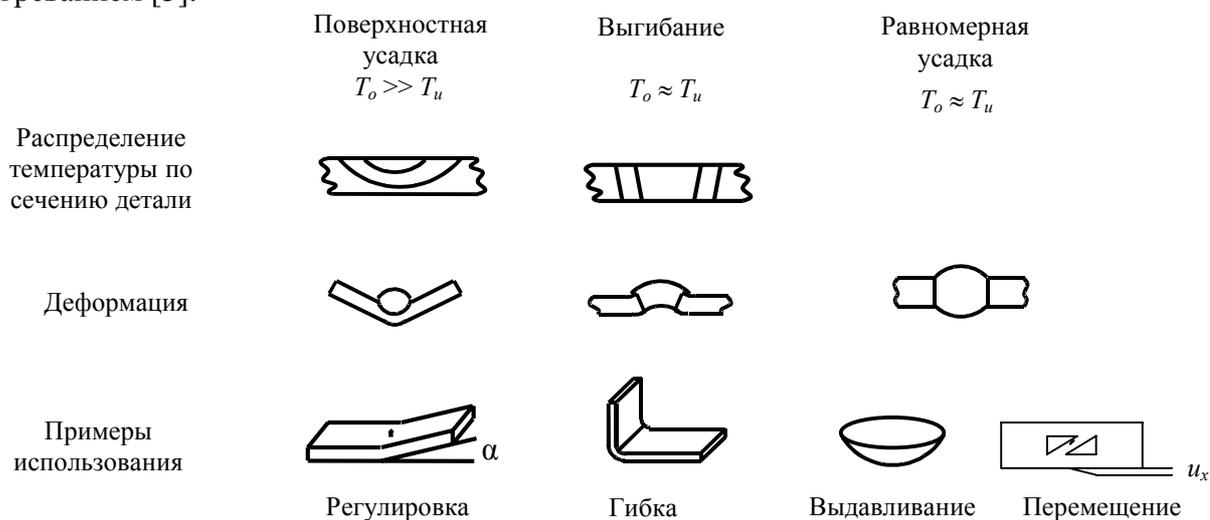


Рис. 2

В зависимости от глубины прогретого слоя деформирование материала протекает по-разному. При локальном нагреве поверхностного слоя, когда температура поверхности детали много больше температуры обратной стороны,  $T_o \gg T_u$ , тепловое поле приводит к неравномерному тепловому расширению и деформированию преимущественно поверхностных слоев. Этот механизм изгиба получил название поверхностной усадки (near-surface upsetting) [4].

Если во время действия лазерного излучения деталь прогревается равномерно по толщине ( $T_o \approx T_u$ ), тепловое расширение и последующая деформация происходят по всему поперечному сечению детали. В этом случае результатом лазерного воздействия является уменьшение линейных размеров (см. рис. 2), или равномерная усадка (uniform upsetting) [4]. При аналогичном распределении температуры деформирование более тонких пластин происходит иначе, хотя также с уменьшением линейных размеров, по механизму выгибания (buckling) [3].

Технология лазерного формообразования достаточно хорошо известна в мире и активно разрабатывается [1, 5, 6], в России первые публикации по этой теме появились в начале 2000-х гг. [7]. В данной работе исследовался механизм деформирования на основе поверхностной усадки, который приводил к изгибу детали. Угол изгиба измерялся методом оптического рычага. Для регистрации малых перемещений образца в результате деформации под действием лазерного излучения использовалось излучение зондирующего полупроводникового лазера. Измерения проводились следующим образом: на образце закреплялось легкое зеркало или использовалась полированная поверхность образца. Луч полупроводникового лазера, отражаясь от зеркала, падал на экран со шкалой, по измеренному отклонению луча на экране вычислялся угол наклона пластины.

В рамках настоящей работы перемещение лазерного луча по поверхности проводилось как по прямолинейным, так и по сложным траекториям, которые реализовывались с помощью роботизированного комплекса. Лазер работал в импульсном режиме. Движения робота

задавались таким образом, чтобы лазерный луч проходил на 2—3 см за край детали, чтобы избежать перегрева пластины в фазах разгона и торможения.

Активная среда.....	Nd:YAG
Длина волны, мкм.....	1,064
Частота следования импульсов, Гц.....	1—50
Максимальная средняя мощность, Вт.....	200
Длительность импульса, мс.....	0,2—7
Диаметр пятна на образце, мм.....	1

На рис. 3 приведена стальная пластинка с изгибом по дуге.



Рис. 3

Одна из основных задач настоящей работы — выявление закономерностей изгиба при изменении условий эксперимента. В результате серии экспериментов были получены зависимости углов изгиба от числа проходов и длительности импульса и определены режимы лазерной гибки, которые могут быть использованы в последующих исследованиях, направленных на получение упругих деформаций. Были выбраны критерии оптимального режима лазерного формообразования: отсутствие повреждений и следов плавления поверхности, а также линейная зависимость результирующего угла от числа проходов.

На рис. 4 приведена зависимость угла изгиба стальной пластины от числа проходов  $n$  ( $1$  — толщина пластины 0,3,  $2$  — 1,1 мм; скорость сканирования  $V_{ск} = 2,5$  мм/с,  $f = 20$  Гц,  $\tau = 2$  мс); на рис. 5 — зависимость угла изгиба титановой пластины от числа проходов ( $V_{ск} = 2,5$  мм/с,  $f = 20$  Гц,  $\tau = 3,5$  мс).

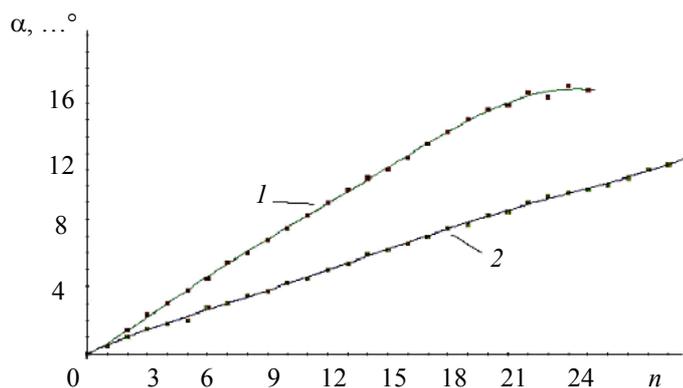


Рис. 4

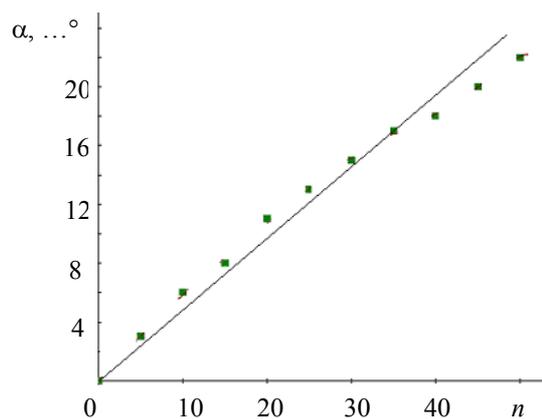


Рис. 5

Погрешность измерения угла составила около 0,5 градуса. Из представленных графиков видно, что при оптимальных режимах лазерного воздействия зависимости близки к линейным, что наиболее удобно при построении технологических процессов. В качестве материалов в работе были использованы сталь марки 12X17, титан ВТ1-00, латунь Л70. Наилучшие результаты были получены на стали 12X17, на латунных образцах угол изгиба не фиксировался, что связано с недостаточным температурным градиентом, возникающим при исследо-

ванных режимах обработки. Увеличение мощности падающего излучения приводило к абляции и повреждению поверхности.

**Заключение.** В работе представлены результаты лазерной гибки тонколистовых деталей из различных материалов при разных режимах облучения. Результаты сравнивались с ранее полученными [2], можно сделать следующие выводы:

— для тонких пластин (глубина прогреваемого слоя порядка толщины пластины) нелинейность изменения угла изгиба значительно сильнее проявляется, чем для толстых (глубина прогреваемого слоя много меньше толщины пластины). Это связано с меньшим различием значений температуры на поверхности и обратной стороне детали. Нелинейность может быть уменьшена путем уменьшения длительности импульса;

— возможен изгиб детали по криволинейной траектории (по дуге), причем при изменении траектории основные зависимости сохраняются;

— толщина пластины является важным параметром при изгибе, так как ограничивает плотность мощности порогом испарения (плавления), что приводит к повреждению поверхности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры ЛТиЭП. Особую благодарность авторы выражают В. П. Вейко за обсуждение результатов, интерес к работе.

Работа поддержана грантом РФФИ № 10-02-00208-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paunoiu V., Squeo E. A., Quadrini F., Gheorghies C., Nicoara D. Laser Bending of Stainless Steel Sheet Metals // Intern. J. Mat. Forming. 2008. Vol. 1, Suppl. 1. P. 1371—1374.
2. Laser Forming of Thin Metal Components for 2D and 3D Applications Using a High Beam Quality, Low Power Nd:YAG Laser and Rapid Scanning Optics // Intern. Workshop on Thermal Forming. Bremen, 2005.
3. Muller B. Virtual Engineering helps to get laser adjustment industrially accepted // 1<sup>st</sup> Intern. Symp. on Laser Precision Microfabrication. Proc. SPIE. 2000. Vol. 4088. P. 164—167.
4. Hoving W. Laser adjustment, a novel technique to obtain fast, sub-micron accuracy in mass production // Second Intern. Symp. on Laser Precision Microfabrication. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4426.
5. Vollertsen F., Geiger M. Laserstrahljustieren mechatronischer Komponenten. Laser – Von der Wissenschaft zur Anwendung // Strahltechnik. Bremen: BIAS Verlag, 1997. Bd 10. S. 309—320.
6. Vollertsen F. An analytical model for laser bending // Lasers in Engineering. 1994. Vol. 2. P. 261—276.
7. Петров А. А., Вейко В. П. Пространственное позиционирование микродеталей с помощью лазерного излучения // Микросистемная техника. 2002. № 7. С. 23—27.

#### Сведения об авторах

- Андрей Дмитриевич Кочетов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;  
E-mail: user32-dll@mail.ru
- Андрей Анатольевич Петров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;  
E-mail: petrovandrey79@inbox.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.