

## О влиянии лазерной обработки на структуру материалов на металлической основе

Лущик П.Е., Рафальский И.В., Девойно О.Г., Руленков А.Д.  
Белорусский национальный технический университет

Изменение структуры материала при лазерной обработке (ЛО) определяется особенностями процессов тепловыделения и теплопередачи в зоне высокоэнергетического воздействия материала. По данным работы [1], при ЛО обеспечивается генерация контролируемых квантов энергии до  $30 \text{ Дж/см}^2$  мощностью  $10^4\text{--}10^7 \text{ Вт/см}^2$ , с точным временным и пространственным распределением высокоэнергетического воздействия в виде коротких импульсов ( $10^{-3}\text{--}10^{-12} \text{ с}$ ) или в виде непрерывного воздействия. Процесс характеризуется чрезвычайно высокой скоростью нагрева и охлаждения ( $10^4\text{--}10^{11} \text{ К/с}$ ), с очень высоким температурным градиентом ( $10^6\text{--}10^8 \text{ К/м}$ ) и сверхбыстрой скоростью повторного затвердевания после плавления материала (до  $30 \text{ м/с}$ ).

В зависимости от параметров ЛО и вида применяемых материалов (мощности, диаметра/профиля луча, времени воздействия импульса, химического, фазового состава и физических свойств материалов, таких как отражательная способность, коэффициент поглощения, теплопроводность, температура плавления и плотность) реализуется локальный нагрев материала, который либо не сопровождается его плавлением или испарением (твердофазные процессы ЛО), либо сопровождается его плавлением (жидкофазные процессы ЛО), либо приводит к его испарению (газофазные процессы ЛО).

Основные способы ЛО материалов подразделяются на процессы изменения формы изделий (гибка, резание и т. д.), соединения (сварка, пайка и т. д.) и поверхностную лазерную обработку (очистка, закалка, отжиг, легирование и др.) [1-4]. Установлено, что к рассматриваемым материалам, с которыми может проводиться ЛО, относятся как металлические, так и керамические, полимерные, полупроводниковые материалы и их различные комбинации [1-12].

Систематизация данных о влиянии методов ЛО на структуру подложки в зоне высокоэнергетического воздействия позволяет сделать вывод, что их применение обеспечивает возможность управления структурообразованием материалов на металлической основе по следующим основным направлениям:

1. Изменение топографии и макрорельефа поверхности: формирование сетчатых рельефных паттернов (в том числе для получения сотовых структур).
2. Изменение морфологии и микрорельефа поверхности: формирование регулярных ячеистых структур, в том числе для повышения адгезионной прочности соединений разнородных материалов при получении гибридных композитов на металлической основе.
3. Изменение микроструктуры поверхности металлических материалов (закалка, отжиг, аморфизация поверхностных слоев).
4. Изменение микроструктуры, химического и фазового состава поверхностного слоя (процессы лазерного легирования, плакирования, осаждения).

Лазерное структурирование поверхности, при котором создается требуемая топография и макрорельеф в настоящее время, как правило, реализуется методом прямой термической абляции, при которой облучаемый материал удаляется путем испарения [5]. Контролируя расположение импульсов ЛО, формируется заданная, в том числе сотовая структура макрорельефа, с определенной шероховатостью поверхности (зависит от параметров ЛО).

Изменение морфологии и микрорельефа поверхности с использованием методов лазерной абляции является перспективным подходом улучшения адгезии и обеспечения механического сцепления между соединениями разнородных материалов при создании гибридных ма-

териалов, таких как металлопластиковые ламинаты (FML) и облегченные стальные конструкции, армированные полимерными материалами [6]. Благодаря сочетанию таких свойств металлов и сплавов, как ударопрочность при высоких свойствах жесткости, низкому весу и высокой удельной прочности полимерных композиционных материалов, гибридные металлополимерные материалы являются остро востребованными в конструкциях современных транспортных средств.

Изменение микроструктуры поверхности металлических материалов при ЛО основаны на механизмах плавления и быстрого затвердевания (самозакалки) поверхностных слоев, что вызывает изменения, измельчение зерна и, как следствие, повышение физико-механических свойств поверхности (твердость, износостойкость, коррозионная стойкость). Например, в Fe-C сплавах при ЛО высокой интенсивности обеспечивается нагрев поверхностного слоя до области аустенизации, не изменяя при этом температуру в объеме всего изделия. Последующее самозакалывание вследствие большого температурного градиента и высокой скорости охлаждения обеспечивает фазовый переход из аустенита в мартенсит без необходимости традиционной закалки [7-9]. Таким образом, ЛО обеспечивает получение износостойкой поверхности с требуемым уровнем физико-механических свойств внутренней области железоуглеродистых сплавов, в том числе чугунов [10], что может быть использовано для изготовления тяжело нагруженных деталей машин, таких как шестерни, распределительные валы, валы картеров редукторов, гильзы цилиндров и др.

Изменения микроструктуры, химического и фазового состава поверхностного слоя реализуются в методах лазерного легирования (плакирования, осаждения), в которых совмещаются процессы плавления и взаимодействия материалов подложки и легирующих добавок (с целью повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной долговечности поверхностного слоя [1, 11]). Такие процессы включают плавление материала в зоне высокоэнергетического воздействия, перемешивание и быстрое затвердевание поверхностного слоя с соосажденными легирующими добавками [11]. Материал покрытия может быть предварительно нанесен одним из способов, таких как электроосаждение, плазменное напыление или физическое/химическое осаждение из паровой фазы, либо может быть введен в виде порошка или смеси порошков при лазерной обработке. ЛО в указанных процессах приводит к кратковременному расплавлению легирующих компонентов и части нижележащей подложки, быстрому массопереносу за счет диффузии и конвекции в локальной зоне плавления и быстрому затвердеванию с образованием легированной зоны материала.

Процессы, направленные на изменение микроструктуры, химического и фазового состава поверхностного слоя, с использованием методов ЛО, в настоящее время применяют для поверхностного легирования материалов на металлической основе (в том числе сплавов на основе Al, Mg и др.), для продления срока службы изделий, подвергающихся тяжелым условиям износа, окисления, коррозии [11, 12].

Установлено, что высокоэнергетическое воздействие, в зависимости от параметров ЛО и состава материалов в зоне обработки, обеспечивает упрочнение поверхности как металлическими, так и керамическими материалами, с возможностью образования интерметаллических, неметаллических, метастабильных и, в некоторых случаях, аморфных фаз [1, 11, 12]. Стеклообразное состояние и аморфизация поверхности исследованных металлических систем (на основе железа, хрома, ниобия и др.) обеспечивается подавлением кристаллизации за счет сверхвысокой скоростью закалки ( $10^{10}$ - $10^{13}$  К/с) при лазерной обработке поверхности.

## Литература

1. Dutta Majumdar, J. Laser processing of materials / J. Dutta Majumdar, I. Manna // Sadhana, 2003. – Vol. 28, Parts 3&4. – pp. 495–562.
2. Hirmaz, M.S. Fundamental Aspects of Surface Engineering: A Review / Maha S. Hirmaz // International Journal of Science and Research (IJSR), 2020. –Vol. 9, Iss.6. – pp. 18–22.

3. Hirmaz, M.S. Laser Cleaning of Metal Surfaces: A Review / Maha S. Hirmaz // International Journal of Scientific & Engineering Research, 2019. – Vol. 10, Iss.7. – pp. 1065–1073.
4. Lisiecki, A. Development of Laser Welding and Surface Treatment of Metals / A. Lisiecki // Materials, 2022. – Vol. 15, No. 1765. – 8 p.
5. Shan-Ting Hsu. Applications of surface structuring with lasers / Shan-Ting Hsu, Hongliang Wang, Gen Satoh, Y. Lawrence Yao // ICALEO Congress Proceedings, 2011. – pp. 1095–1104.
6. Voswinkel, D. Time efficient laser modification of steel surfaces for advanced bonding in hybrid materials / D. Voswinkel, D. Kloidt, O. Grydin, M. Schaper // Production Engineering, 2021. – Vol. 15, pp. 263–270.
7. Dinesh Babu, P. Laser surface hardening: a review / P. Dinesh Babu, K.R. Balasubramanian // Int. J. Surface Science and Engineering, 2011. – Vol. 5, No. 2/3. – pp. 131–151.
8. Santoshkumar V. Wagh. Experimental investigation and effects of laser hardening process parameters on microhardness of En24 steel / Santoshkumar V. Wagh, Dhananjay V. Bhatt, Jyoti V. Menghani [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 814, Iss. 012003. – 7 p.
9. Lagarinhos, J. N. The influence of surface finishing on laser heat treatments of a tool steel / J. N. Lagarinhos, S. Santos, G. Miranda [et al.] // Procedia CIRP, 2022. – Vol. 108. – pp. 839–844.
10. Catalan, N. Surface Laser Treatment of Cast Irons: A Review / N. Catalan, E. Ramos-Moore, A. Boccardo, D. Celentano // Metals, 2022. – Vol. 12, No. 562. – 28 p.
11. Woldetinsay G. Jiru. Laser Surface Alloying of Copper, Manganese, and Magnesium with Pure Aluminum Substrate / Woldetinsay G. Jiru, M. Ravi Sankar, Uday S. Dixit // Journal of Materials Engineering and Performance, 2016. – Vol. 25 (3). – pp. 1172–1181.
12. Ashish Singh. Laser Surface Engineering of Magnesium Alloys: A Review / Ashish Singh, Sandip P. Harimkar // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM), 2012. – Vol. 64, No. 6. – pp. 716–733.