

Лазерные технологии обработки материалов и формирование наноструктур с применением дифракционных оптических элементов

В.А. Данилов

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН Москва, Россия
viktordanilov@bk.ru

Аннотация—Осуществление процессов лазерной обработки материалов обуславливает необходимость формирования требуемого воздействия на выбранные участки с заранее заданным распределением плотности мощности излучения. Рассмотрены возможности применения компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов для лазерной обработки металлических материалов и формирования наноструктур. Использование дифракционной оптики для формирования лазерного излучения позволяет получить заданные свойства обрабатываемых материалов. Представлены результаты, подтверждающие эффективность применения лазерных технологий с регулируемым пространственным распределением мощности излучения для увеличения прочности и износостойкости конструктивных элементов, а также прочности сварных соединений. Описаны возможности управления морфологией синтезируемых структур путем пространственного перераспределения лазерного облучения.

Ключевые слова— компьютерно-синтезированные дифракционные оптические элементы, лазерные технологии, обработка материалов, формирование наноструктур.

1. ВВЕДЕНИЕ

Реализация и целенаправленное использование выбранного метода лазерной обработки, как правило, требует воздействия на выбранные участки материала излучения с заранее заданным распределением плотности мощности. До сих пор практические решения с использованием различных оптических систем удовлетворяют этому требованию лишь в определенной степени, оставляя большой диапазон возможностей не использованным. В принципе, может быть рассчитана любая поверхность оптического элемента, способная сфокусировать лазерный луч требуемым образом, но это не означает, что такая поверхность может быть изготовлена. Использование оптических элементов с формой поверхностями, не соответствующими расчетной, приводит к возникновению различного рода дефектов при лазерной обработке. Поэтому этот метод имеет ограничения для управления специфическими модификациями или изменениями в ограниченных областях материала. Эту проблему частично решают тем, что не используют материалы, которые более чувствительно реагируют на тепловые изменения. Однако такой подход неэффективен, и возможности лазерной обработки используются не полностью. Вместо применения оптических элементов, специально не согласованных с поставленной задачей, более современный подход использует дифракционные

оптические элементы (ДОЭ) для более точного управления распределением плотности мощности лазерного луча.

2. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР

Одни из первых научных исследований, касающиеся основ применения компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов для лазерной обработки были проведены в работах [1, 2]. На основе использования методов решения обратной задачи теплопроводности был разработан алгоритм расчета распределения плотности мощности лазерного луча для создания желаемого теплового эффекта в материалах. Продемонстрировано улучшение параметров температурного поля в хромоникельмолибденовой стали при лазерной термообработке. Предложенный подход позволяет не только достичь более равномерного температурного режима по ширине зоны термического влияния, но и увеличить ширину целевых изотерм температурного поля. Показано, что в оптических системах целесообразно использовать компоненты, позволяющие изменять во времени форму лазерного луча и распределение интенсивности излучения [3]. Это возможно осуществить за счет изменения пространственного положения дифракционного элемента – фокусатора излучения. Особенностью является то, что оптический элемент, выполненный в виде отражающей пластины и преобразующий излучение в отрезок прямой линии, устанавливается с возможностью вращения вокруг центральной нормали к его поверхности.

Разработан метод лазерного отжига листовых материалов из алюминий-магниевого и низколегируемых титановых сплавов [4-6], применение которого открыло возможности для расширения возможностей формообразующих операций данных материалов и повышения точности изготовления конструктивных элементов. В работах [7, 8] показано, что сварка импульсным лазерным излучением с перераспределением энергии и плотности мощности позволяет повысить прочность сварных соединений. Лазерная обработка с использованием дифракционных оптических элементов позволила повысить адгезионную прочность покрытий, наносимых на конструктивные элементы [9]. Инновационным аспектом является применение компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов для формирования пучка, что позволило повысить точность передачи энергии на поверхности материалов, в том числе на поверхности деталей сложной формы [10]. Новые технические решения для формирования пучка

обуславливают необходимость точного моделирования тепловых процессов, инициируемых лазерным воздействием [11].

Перспективным направлением применения компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов является формирование наноструктур пористых и оксиднометаллических материалов [12]. Обеспечение средств управления морфологией наноструктур на локальных участках зоны лазерного воздействия является проблемой, которая может быть решена путем адаптации формы лазерного пучка, а также перераспределения энергии и плотности мощности [13-15]. В этом отношении использование компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов является эффективным средством решения этой проблемы.

Для дальнейших исследований в этой области интерес представляют и другие процессы, например, лазерная обработка для снижения коэффициента трения керамики из карбида кремния [16, 17], лазерная сварка металлополимерных сэндвич-панелей [18] и селективная модификация двухфазных сталей [19, 20].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана эффективность и целесообразность применения компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов для лазерной обработки металлических материалов и формирования наноструктур. Использование дифракционной оптики для формирования лазерного излучения позволяет повысить физико-механические характеристики конструкционных и функциональных материалов при создании температурного поля в технологических объектах, обеспечивающего требуемые свойства обрабатываемых материалов. Представлены результаты, подтверждающие эффективность применения лазерных технологий с регулируемым пространственным распределением мощности излучения для увеличения прочности и износостойкости конструктивных элементов, а также прочности сварных соединений. Определены возможности управления морфологией синтезируемых структур путем пространственного перераспределения лазерного облучения. Лазерные технологии обработки материалов и формирование наноструктур с применением дифракционных оптических элементов находят применение. Новые процессы представляют интерес для дальнейших исследований в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Досколович, Л.Л. Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2002. – № 23. – С. 40-43.
- [2] Казанский, Н.Л. Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, С.Ю. Ключков // Компьютерная оптика. – 2005. – № 28. – С. 89-93.
- [3] Danilov, V.A. Device for laser treatment of an object / V.A. Danilov, V.V. Popov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakian, D.M. Sagatelian, V.A. Soifer, E.V. Sisakian, L.P. Naumidi, Ju.K. Danileiko, Ju.D. Terekhin, V.S. Akopian, S.P. Murzin, V.P. Shorin, V.I. Mordasov // US Patent 5103073 of April 7, 1992.
- [4] Мурзин, С.П. Повышение эффективности лазерной обработки материалов при использовании элементов компьютерной оптики / С.П. Мурзин // Перспективные материалы. – 2003. – № 2. – С. 74-78.
- [5] Murzin, S.P. Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 33(1-3). – P. 67-76.
- [6] Murzin, S.P. Softening of low-alloyed titanium billets with laser annealing / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 302(1). – P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012070.
- [7] Мурзин, С.П. Создание плотных бездефектных сварных соединений сплавов на никелевой основе импульсным лазерным воздействием / С.П. Мурзин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6. – С. 181-185.
- [8] Мурзин, С.П. Лазерная сварка разнородных металлических материалов с использованием дифракционных оптических элементов / С.П. Мурзин, Г. Лидль // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 848-855. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-848-855.
- [9] Мурзин, С.П. Формирование структур материалов лазерным воздействием для повышения эксплуатационных свойств деталей в авиадвигателестроении // С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 353-359. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-353-359.
- [10] Murzin, S.P. Analysis of the advantages of laser processing of aerospace materials using diffractive optics / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy, C. Stiglbrunner // Metals. – 2021. – Vol. 11(6). – P. 963. DOI: 10.3390/met11060963.
- [11] Murzin, S.P. Development of technologies of laser material processing with use of diffractive optics / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy, C. Stiglbrunner // Proceedings of 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – 2021. – P. 9649136. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649136.
- [12] Казанский, Н.Л. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 481-486.
- [13] Murzin, S.P. Arrays formation of zinc oxide nano-objects with varying morphology for sensor applications / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // Sensors. – 2020. – Vol. 20(19). – P. 1-19. DOI: 10.3390/s20195575.
- [14] Murzin, S.P. Laser irradiation for enhancing mass transfer in the solid phase of metallic materials / S.P. Murzin // Metals. – 2021. – Vol. 11(9). – P. 1359. DOI: 10.3390/met11091359.
- [15] Murzin, S.P. Study of the formation of zinc oxide nanowires on brass surface after pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – P. 335-343. DOI: 10.1007/978-3-030-90421-0_28.
- [16] Murzin, S.P. Reduction of the friction coefficient of silicon carbide ceramics by ultraviolet nanosecond laser treatment / S.P. Murzin, V.B. Balyakin, C. Gachot, S.A. Fomchenkov, M.V. Blokhin, N.L. Kazanskiy // Proceedings of 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – 2021. – P. 9649435. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649435.
- [17] Murzin, S.P. Ultraviolet nanosecond laser treatment to reduce the friction coefficient of silicon carbide ceramics / S.P. Murzin, V.B. Balyakin, C. Gachot, S.A. Fomchenkov, M.V. Blokhin, N.L. Kazanskiy // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11(24). – P. 11906. DOI: 10.3390/app112411906.
- [18] Murzin, S.P. Laser welding of metal-polymer-metal sandwich panels / S.P. Murzin, H. Palkowski, A.A. Melnikov, M.V. Blokhin // Metals. – 2022. – Vol. 12(2). – P. 256. DOI: 10.3390/met12020256.
- [19] Murzin, S.P. Laser beam shaping for modification of materials with ferritic-martensitic structure / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy, G. Liedl, A. Otto, R. Bielak // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 164-168. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.592.
- [20] Мурзин, С.П. Селективная модификация двухфазной стали DP 1000 лазерным воздействием с применением дифракционного оптического элемента / С.П. Мурзин, М.В. Блохин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 773-779. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-773-779.