

Лазерная обработка материалов с применением дифракционных оптических элементов

Х. Штигльбруннер

TU Wien

Vienna, Austria

christian.stiglbrunner@tuwien.ac.at

Аннотация — Эффективная реализация лазерной обработки материалов предполагает реализацию заранее заданного распределения плотности мощности лазерных пучков в выбранных областях на поверхности обрабатываемого материала. В данном исследовании рассматривается использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для лазерной обработки материалов и формирования наноструктур. Результаты подчеркивают эффективность лазерных технологий с регулируемым пространственным распределением мощности пучка в повышении прочности и износостойкости металлических материалов, а также прочности сварных соединений. Кроме того, рассматривается возможность управления морфологией наноструктур, используя пространственное перераспределение энергии лазерного излучения.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Эффективные методы лазерной обработки требуют точного воздействия на области материала с заранее заданным распределением плотности мощности излучения. Существующие рефракционные оптические системы ограничены в достижении такой точности, что стимулирует исследование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для более тонкого контроля. В отличие от рефракционных оптических элементов, ДОЭ предлагают современный подход к формированию лазерных пучков, обеспечивая конкретные модификации в целевых областях материала. Проведенные в работах [1-5] исследования внесли значительный вклад в решение прямых и обратных задач теории дифракции для расчета и моделирования оптических элементов, фокусирующих в различных фокальных областях. Исследования в области лазерной обработки материалов с акцентом на применении дифракционных оптических элементов (ДОЭ) продемонстрировали их значительный потенциал. Разработка и использование этих элементов стали эффективным средством решения различных задач лазерных технологий, таких как поверхностное легирование стали [6], лазерная маркировка [7] и выращивание оптического волокна [8].

Адаптируемость дифракционной оптики в лазерной обработке открывает возможности для достижения необходимых свойств материала в зоне термического влияния. Важным результатом является возможность более точного контроля над распределением мощности лазерного излучения, что способствует улучшению свойств обрабатываемых материалов [9]. Эффективность лазерных технологий с регулируемым пространственным распределением мощности была подтверждена разработкой технологий повышения прочности и износостойкости металлических материалов [10], а также прочности сварных соединений [11]. Кроме того, использование ДОЭ предоставляет возможность

управления морфологией наноструктур [12], используя пространственное перераспределение энергии лазерного излучения. Важно отметить, что применение ДОЭ в различных областях, таких как лазерная обработка, сварка, а также формирование пористых и оксидных наноструктур, продолжает быть актуальным направлением исследований.

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОЭ

Лазерная обработка с применением ДОЭ демонстрирует повышение точности передачи энергии и улучшение свойств материалов в различных областях применения. Разработан метод лазерного отжига для материалов, расширяющий возможности формообразования и повышающий точность изготовления конструкционных элементов [13]. Использование ДОЭ при сварке импульсным лазерным излучением позволяет повысить прочность сварных соединений. ДОЭ также применяются при двусторонней стыковой сварки композитных сэндвич-панелей в отсутствие деградации центрального полимерного слоя [14]. Лазерная обработка с использованием ДОЭ улучшает адгезионную прочность покрытий на конструкционных элементах. Разработан алгоритм лазерного спекания покрытий, содержащих интерметаллидные компоненты, с целью изготовления бездефектных изделий [15]. Использование ДОЭ в оптических системах обеспечивает формирование лазерного пятна с определенным распределением мощности и позволяет изменять его форму, открывая дополнительные возможности для управления свойствами обрабатываемых изделий.

Перераспределение плотности мощности теплового источника при реализации лазерных процессов тепловой формовки позволяет устранить локальное утонение листового материала. Для такого перераспределения используются ДОЭ, что улучшает процесс формовки, предоставляя возможность осуществить его без образования дефектов [16]. При воздействии лазерного излучения в образце двухфазной стали образуются области полного упрочнения, частичного упрочнения и отжига [17]. Формирование таких структур происходит в результате воздействия факторов, связанных с распределением температур нагрева в зоне термического влияния и различиями в скорости охлаждения. Применение ДОЭ при лазерной обработке позволяет формировать структуры в материале, повышая точность передачи энергии.

III. ДОЭ ДЛЯ СИНТЕЗА ПОРИСТЫХ И ОКСИДНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Фокусирующие ДОЭ могут применяться для формирования наноструктур в виде пористых и оксидно-металлических материалов. Импульсно-периодическое лазерное воздействие используется для синтеза нанопористых и композитных наноматериалов на основе

оксида цинка [18]. Синергия теплового воздействия и лазерно-индуцированных вибраций значительно увеличивает коэффициент диффузии в металлических материалах. Нестационарное напряженно-деформированное состояние, вызванное лазерно-индуцированными звуковыми волнами, усиливает процесс массопереноса в твердом состоянии. Если лазерное воздействие осуществляется в вакууме, то субмикро- и нанопористые структуры могут формироваться путем сублимации одного из компонентов сплава. При термическом окислении в атмосфере на подложке из медно-цинкового сплава Cu–Zn образуются квазиодномерные структуры – нанопроволоки оксида цинка ZnO, что сопровождается формированием пористости в приповерхностном слое. Использование ДОО позволяет адаптировать форму лазерного пучка, перераспределять энергию, обеспечивая управление морфологией наноструктур в зоне лазерного воздействия [19].

Воздействие на поверхности материалов, содержащих медь ультракоротких лазерных импульсов, приводит к образованию периодических наноструктур. Установлено, что эти структуры обладают способностью разлагать падающий свет на его спектральные составляющие [20]. Лазерное текстурирование поверхностей материалов приводит к улучшению трибологических свойств, что проявляется в снижении коэффициента трения [21]. В этом контексте исследуются методы модификации поверхности газодинамического уплотнения из керамики на основе карбида кремния [22]. Для повышения качества лазерного структурирования прогрессивным является применение оптических систем дифракционной компьютерной оптики.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана целесообразность применения дифракционных оптических элементов в лазерной обработке металлических материалов и формировании наноструктур. Использование дифракционной оптики для создания лазерных пучков позволяет обеспечить необходимую температуру для обработки и формирования структур материалов, что позволяет улучшить их характеристики. Эффективность лазерных технологий с регулируемым пространственным перераспределением мощности излучения подтверждена результатами исследований, демонстрирующими повышение прочности и износостойкости металлических материалов, а также прочности сварных соединений. Отмечены перспективы применения ДОО для создания пористых и оксидных наноструктур на поверхности металлических материалов, открывающие новые возможности. Исследования, направленные на управление морфологией наноструктур, используя пространственное перераспределение лазерного излучения представляют интерес для будущих лазерных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Soifer, V.A. Computer design of diffractive optics / V.A. Soifer // Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., UK, 2012. – 896 p.
- [2] Golub, M.A. Focusing light into a specified volume by computer-synthesized holograms / M.A. Golub, S.B. Karpeev, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Sov. Tech. Phys. Lett. – 1981. – Vol. 7(5). – P. 264–266.
- [3] Golub, M.A. Diffraction calculation for an optical element which focuses into a ring / M. A. Golub, N. L. Kazanskiy, I. N. Sisakyan, V. A. Soifer, S. I. Kharitonov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1987. – Vol.6. – P. 7–14.
- [4] Golub, M.A. Computational experiment with plane optical elements / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1988. – Vol. 1. – P. 70–82.
- [5] Sisakyan, I.N. Computer optics: achievements and problems / I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Computer Optics. – 1989. – Vol. 1(1). – P. 3–12.
- [6] Sisakyan, I.N. Technological capabilities of focusators in laser-induced material processing // I.N. Sisakyan, V.P. Shorin, V.A. Soifer, V.I. Mordasov, V.V. Popov // Computer Optics. – 1990. – Vol. 2(1). – P. 85–88.
- [7] Doskolovich, L.L. Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // Opt. Lasers Eng. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 311–322.
- [8] Bufetova, G.A. Neodymium-doped graded-index single-crystal fibre lasers / G.A. Bufetova, V.V. Kashin, D.A. Nikolaev, S.Ya. Rusanov, V.F. Seregin, V.B. Tsvetkov, I.A. Shcherbakov, A.A. Yakovlev // Quantum Electron. 2006. – Vol. 36(7). – P. 616–619.
- [9] Kazanskiy, N.L. Formation of the required energy action at the laser treatment of materials with using radiation focusators / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, S.Yu. Klochkov // Computer Optics. – 2005. – Vol. 28. – P. 89–93.
- [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). – Art. No. 963.
- [11] Murzin, S.P. Formation of a non-detachable welded titanium-aluminium compound by laser action / S.P. Murzin, "IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 302(1). – Art. No. 012072.
- [12] 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). – Art. No. 5575.
- [13] Murzin, S.P. Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // Laser Eng. – 2016. – Vol. 33(1–3). – P. 67–76.
- [14] 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). – Art. No. 256.
- [15] Murzin, S.P. Formation of structures in materials by laser treatment to enhance the performance characteristics of aircraft engine parts / S.P. Murzin // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(3). – P. 353–359.
- [16] Bielak, R. Simulation of forming processes with local heating of dual phase steels with use of laser beam shaping systems / R. Bielak, F. Bammer, A. Otto, C. Stiglbrunner, C. Colasse, S.P. Murzin // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 659–667.
- [17] Murzin, S.P. Selective modification of dual phase steel DP 1000 by laser action using diffractive optical element / S.P. Murzin, M.V. Blokhin // Computer Optics. – 2019. – Vol. 43(5). – P. 773–779.
- [18] Murzin, S.P. Laser irradiation for enhancing mass transfer in the solid phase of metallic materials / S.P. Murzin // Metals. – 2021. – Vol. 11(9). – Art. No. 1359.
- [19] 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). – Art. No. 5575.
- [20] Murzin, S.P. Pulse-periodic laser action to create an ordered heterogeneous structure based on copper and zinc oxides / S.P. Murzin, S.A. Afanasiev, M.V. Blokhin // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1096(1). – Art. No. 012139.
- [21] Murzin, S.P. Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings / S.P. Murzin, V.B. Balyakin // Opt. Laser. Technol. – 2017. – Vol. 88. – P. 96–98.
- [22] 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 // Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11(24). – Art. No. 11906.