

Формирование лазерного излучения для модификации материалов с ферритно-мартенситной структурой

С.П. Мурзин^а, Н.Л. Казанский^{а,б}, Герхард Лидль^в, Андреас Отто^в, Роберт Билак^в

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара Россия

^в Венский технический университет, Институт технологии производства и лазерной техники, 1060, Гетрайдемаркт, 9, Вена, Австрия

Аннотация

Осуществлено определение условий лазерного нагрева для тёплой формовки материалов с ферритно-мартенситной структурой. В качестве лазерного источника применялся волоконный лазер с максимальной выходной мощностью 1500 Вт. С помощью плоско-выпуклой линзы и аксикона излучение было преобразовано в световое пятно в виде эллиптического кольца. Исследование микроструктуры позволило выявить волокнистое строение металла, образовавшееся в процессе изготовления заготовки прокаткой. Место пластической деформации характеризуется значительным локальным уменьшением толщины профиля. Для устранения этого недостатка целесообразно использовать дифракционные оптические элементы, перераспределяющие плотность мощности лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерное воздействие; формирование излучения; дифракционный оптический элемент; структура; двухфазная сталь

1. Введение

Одной из наиболее специфических характеристик лазерного излучения является возможность концентрировать в сфокусированном пятне более высокую плотность энергии, чем у других тепловых источников. Поэтому лазерная обработка является одним из прогрессивных методов для улучшения физико-механических свойств материалов. Современное состояние достижений в области физических характеристик обработки лазерного луча представлены в различных статьях и монографиях [1-3]. В справочниках [4-6] подробно описано применение лазерных устройств в различных производственных технологиях. Показано, что такие важные характеристики металлических материалов, как прочность при растяжении, усталостная прочность и износостойкость являются структурно-чувствительным, т.е., могут управляться с помощью соответствующих изменений в структуре материалов при лазерном воздействии. Однако вопросы лазерной модификации металлических материалов рассматриваются, как правило, только с точки зрения их упрочнения, в результате теплового воздействия или деформации. Такой подход был оправдан ранее, когда цель состояла в том, чтобы увеличить прочность используемых конструкционных и функциональных материалов. В настоящее время в связи с развитием и более широким использованием высокопрочных материалов существуют проблемы, связанные с необходимостью разупрочнения их локальных участков, например, для выполнения операции формообразования. Лишь немногие работы посвящены исследованию процессов разупрочнения с контролируемыми изменениями в структуре этих материалов [7-10]. Даже термин «лазерный отжиг», который в более широком смысле означает изменение структуры твердых тел лазерным излучением различной длительности, в литературе, как правило, относится к импульсной ориентированной кристаллизации полупроводниковых структур лазерным излучением наносекундной длительности.

В настоящее время все большее применение находят высокопрочные двухфазные ферритно-мартенситные стали с контролируемым количеством мартенсита, которые имеют наиболее благоприятное сочетание прочности и пластичности по сравнению с другими низколегированными сталями. В то же время они обладают хорошей коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, слабоагрессивных средах (в слабых растворах солей, кислот) и обладают высокими механическими свойствами. Двухфазные ферритно-мартенситные структуры могут быть модифицированы с использованием различных комбинаций параметров нагрева и охлаждения. Преимущества одних режимов связаны с возможностью мартенситного упрочнения сталей с низким содержанием легирующих элементов или с получением более высокого упрочнения при старении материалов, а других - в более высокой комбинации прочности и пластичности, и т.д. Для реализации различных режимов обработки целесообразно использовать системы формирования лазерного излучения с контролируемым распределением плотности мощности. Цель данного исследования заключается в определении целесообразности формирования лазерного излучения для модификации материалов с ферритно-мартенситной структурой, в частности, их тёплой формовкой.

2. Исследуемый материал

Исследовалась двухфазная сталь DP1000. Химический состав материала представлен в Таблице 1.

Таблица 1. Химический состав двухфазной стали DP1000

Химический элемент	C	Si	Mn	P	S
Макс. массовая доля, %	0,18	0,8	1,8	0,02	0,01
Химический элемент	Al	Nb-Ti	Cr-Mo	B	Cu
Макс. массовая доля, %	0,015...1,0	0,1	1,4	0,005	0,2

3. Результаты исследования и обсуждение

В качестве лазерного источника применялся волоконный лазер YLR-1500 с максимальной выходной мощностью 1500 Вт [12]. Для нагрева перед формовкой излучение с помощью плоско-выпуклой линзы и аксикона было преобразовано в световое пятно в виде эллиптического кольца, которое проектировалось на поверхность объекта под углом 45°. Серийно выпускаемая плоско-выпуклая линза применялась в составе оптической схемы лазерной обрабатывающей системы. Внешние границы светового пятна в виде кольца определялись максимальным и минимальным размерами 38 мм и 26,7 мм, а сдвинутые на 0,76 мм внутренние границы – размерами 15,2 мм и 10,7 мм. Экспериментальные исследования были реализованы на гибочном прессе с серво приводом TruBend 7018 максимальным усилием 180 кН. Мощность лазерного излучения составляла 1500 Вт, варьировалось время нагрева. После нагрева штамповый инструмент перемещался с усилием 100 кН и скоростью 10 мм/с.

Анализ микроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа МЕТАМ-ЛВ с увеличением до 200 крат. Исследование микроструктуры позволило выявить волокнистое строение металла, образовавшееся в процессе изготовления заготовки прокаткой. На рис. 1 представлена область лазерного воздействия после тёплой формовки образца из стали DP1000 толщиной 1,5 мм.

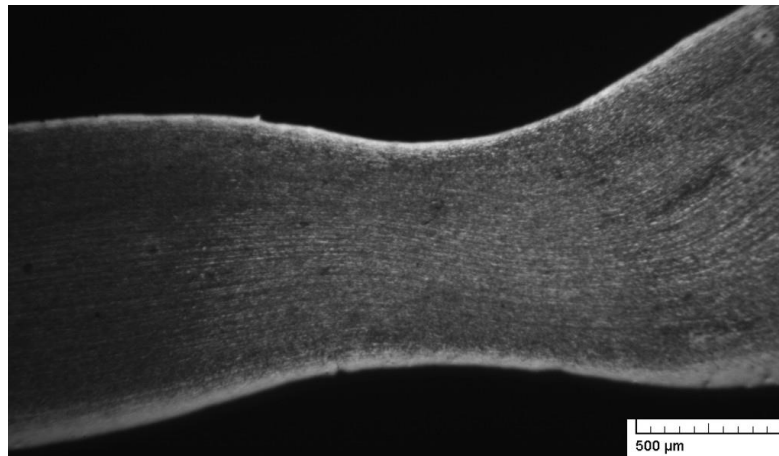


Рис. 1. Зона термического влияния после тёплой формовки образца из стали DP1000 толщиной 1,5 мм.

Исследование микроструктуры и фазового строения образцов проводилось также на электронном растровом сканирующем микроскопе TESCAN Vega SB. Этот микроскоп имеет вольфрамовый катод с термоэлектронной эмиссией, четырехлинзовую электронную оптику Wide Field Optics с использованием промежуточной линзы для оптимизации формы и размера пучка. Разрешение в режиме высокого вакуума составляло 3,0 нм при напряжении 30 кВ. Определено, что утонение в зоне лазерного воздействия максимально, причем толщина материала уменьшается до 0,8 мм (Рис. 2). Но также утонение наблюдается за пределами этой зоны, деформация происходит здесь при значительно меньшей температуре и поэтому не так интенсивна. Микроструктура представляет собой чередующиеся слои феррита и мартенсита вытянутые в направлении главной деформации. Между зерен наблюдаются включения сульфидов разной величины вытянутые в направлении прокатки. Место пластической деформации характеризуется местным уменьшением толщины профиля, при этом нарушения сплошности металла и образования микротрещин не наблюдается.

Определение химического состава фаз осуществлялось с помощью энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа INCAx-act. Элементный анализ металлического материала проводили методом электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА), который позволяет исследовать наличие, содержание и распределение элементов. Результаты анализа элементного состава стали DP1000 после тёплой формовки с лазерным нагревом представлены на рис. 3. Элементный состав образца показал повышенное содержание марганца и кремния, что соответствует отечественной марке стали 09Г2С.

Поскольку формовка – это процесс, происходящий только за счет утонения материала для снижения локального утонения желательнее охватить как можно большую зону обработки, в том числе в центральной части детали. Таким образом возможно достигнуть снижения максимального утонения. Можно рекомендовать нагрев однородным круговым (цилиндрическим) тепловым источником с равномерной интенсивностью. Осуществлено моделирование процесса тёплой формовки с лазерным нагревом излучением с цилиндрическим профилем диаметром 31,2 мм, проектируемым на поверхность объекта под углом 45°. Принималась такая же величина поглощенной энергии, как и в случае светового пятна в виде эллиптического кольца. Определено, что перераспределение плотности мощности

теплового источника позволит выполнять тёплую формовку с лазерным нагревом без описанных дефектов. Целесообразно осуществить равномерный нагрев зоны обработки до температуры, близкой к критическим точкам фазового перехода, с минимальной длительностью нагрева и выдержки при пиковой температуре во избежание разупрочнения. На рис. 4 представлено распределение плотности мощности излучения для равномерного нагрева эллиптической области, размеры которой определяются максимальным и минимальным размерами A_1 и B_2 . Уменьшение времени нагрева достигается при большей мощности излучения, в этом случае отношение q_{max}/q_0 целесообразно увеличивать.



Рис. 2. Утонение в зоне термического влияния.

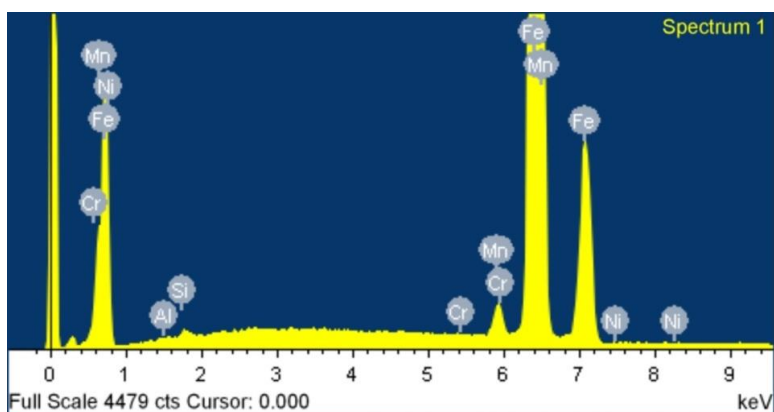


Рис. 3. Результаты анализа элементного состава стали DP1000 после тёплой формовки с лазерным нагревом.

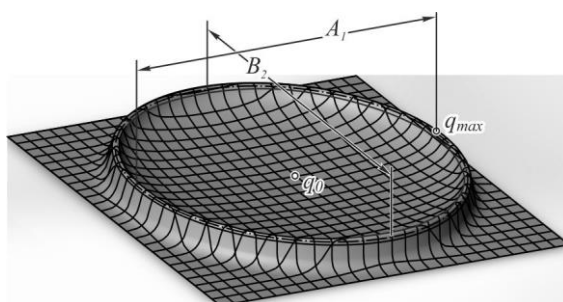


Рис. 4. Распределение плотности мощности излучения для равномерного нагрева эллиптической области.

Для реализации подобных технологических процессов необходимо использовать специальную оптику. Требуется более точное локальное дозирование энергии лазерного излучения в зоне термического влияния с возможностью перераспределения плотности мощности. Такое перераспределение может быть получено с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [13-17]. ДОЭ могут быть использованы для создания требуемого распределения плотности мощности лазерного излучения [18-21]. В этом случае целесообразно использовать новые подходы, которые могут принимать во внимание специфику создания предварительно заданного теплового потока через поверхность объекта.

4. Заключение

Двухфазные стали являются структурно чувствительными материалами. Осуществлено определение условий лазерного нагрева для тёплой формовки материалов с ферритно-мартенситной структурой. В качестве лазерного источника применялся волоконный лазер YLR-1500 с максимальной выходной мощностью 1500 Вт. Экспериментальные исследования были реализованы на гибочном прессе с серво приводом TruBend 7018. Исследование микроструктуры позволило выявить волокнистое строение металла, образовавшееся в процессе изготовления заготовки прокаткой. Определено, что утонение в зоне лазерного воздействия максимально, причем толщина материала уменьшается до 0,8 мм. Но также утонение наблюдается за пределами этой зоны, деформация происходит здесь при значительно меньшей температуре и поэтому не так интенсивна. Микроструктура представляет собой чередующиеся слои феррита и мартенсита вытянутые в направлении главной деформации.

Поскольку формовка – это процесс, происходящий только за счет утонения материала для снижения локального утонения желательнее охватить как можно большую зону обработки, в том числе в центральной части детали. Таким образом возможно достигнуть снижения максимального утонения. Осуществлено моделирование процесса тёплой формовки с лазерным нагревом. Перераспределение плотности мощности теплового источника позволит выполнять тёплую формовку с лазерным нагревом без описанных дефектов. Для реализации таких технологических процессов необходимо использовать специальную оптику. ДОО могут быть использованы для создания требуемого распределения плотности мощности лазерного излучения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57815X0131.

Литература

- [1] Kannatey-Asibu, E. Jr. Principles of laser materials processing / E. Kannatey-Asibu Jr. – Hoboken, New Jersey, US: John Wiley & Sons, 2009. – 860 p.
- [2] Ion, J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application / J.C. Ion – Amsterdam/Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p.
- [3] Schaaf, P. Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments / edited by P. Schaaf – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 231 p.
- [4] Ready, J.F., Farson DF. LIA handbook of laser materials processing / J.F. Ready, D.F. Farson.; edited by J.F. Ready – Orlando, US: Laser Institute of America, 2001. – 715 p.
- [5] Dahotre, N.B. Laser fabrication and machining of materials / N.B. Dahotre, S.P. Harimkar – New York, US: Springer Science + Business Media, 2008. – 558 p.
- [6] Steen, W.M. Laser material processing / W.M. Steen, J. Mazumder (4th ed) – London, UK: Springer, 2010. – 558 p.
- [7] Bergmann, H.W. Short term annealing by laser treatment / H.W. Bergmann // Proc. SPIE – 1987. – Vol. 801. – P. 296-301.
- [8] Minamida, K. Surface annealing of steel wires for automotive tires by CO₂ laser with cone shaped focusing mirror / K. Minamida, M. Kido, A. Ishibashi, S. Mogami, S. Sasaki // Proceedings of the Laser Materials Processing Conference (ICALEO '90) – Bellingham, US, 1990. – P. 460-468.
- [9] US Patent 7,063,755. Nolan S.R. Method for Laser Annealing. Pub. June 20 2006.
- [10] Murzin, S.P. Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // Laser. Eng. – 2016. – Vol. 33(1-3). – P. 67-76.
- [11] Wu-rong, W. The limit drawing ratio and formability prediction of advanced high strength dual-phase steels / W. Wu-rong, H. Chang-wei, Z. Zhong-hua, W. Xi-cheng // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32(6). – P. 3320-3327.
- [12] 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.
- [13] Doskolovich, L.L. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // J. Mod. Optic. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1423-1433.
- [14] Soifer, V.A. Computer Design of Diffractive Optics / V. Soifer – UK, USA, India, Russia: Ed., Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.
- [15] Kharitonov, S.I. Solving the inverse problem of focusing laser radiation in a plane region using geometrical optics / S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(4). – P. 439-450.
- [16] Khonina, S.N. Levelling the focal spot intensity of the focused Gaussian beam / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // J. Mod. Optic. – 2000. – Vol. 47(5). – P. 883-904.
- [17] Doskolovich, L.L. Focusators into a ring / L.L. Doskolovich, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, I.V. Nikolsky, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // Opt. Quant. Electron. – 1993. – Vol. 25(11). – P. 801-814.
- [18] Murzin, S.P. A study of vibration characteristics and determination of the conditions of nanopores formation in metallic materials during laser action / S.P. Murzin, E.V. Shakhmatov, A.A. Igolkin, L.F. Musaakhunova // Procedia Engineering – 2016. – Vol. 106. – P. 266-271.
- [19] Murzin, S.P. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // Opt. Laser Technol. – 2015. – Vol. 72. – P. 48-52.
- [20] Murzin, S.P. The research of intensification's expedients for nanoporous structures formation in metal materials by the selective laser sublimation of alloy's components / S.P. Murzin // Computer Optics. – 2011. – Vol. 35(2). – P. 175-179.
- [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.