

Изучение структуры двухфазной стали после лазерной термообработки с использованием движущихся распределённых поверхностных тепловых источников

С.П. Мурзин^{1,2}, Н.Л. Казанский^{1,3}, Г. Лидль², Р. Биелак², А.А. Мельников¹, С. Осипов²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Венский технический университет, Институт технологии производства и фотонных технологий, Гетрайдемаркт 9, Вена, Австрия, 1060

³Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. Двухфазные стали характеризуются структурно-чувствительными свойствами и могут быть модифицированы с использованием различных комбинаций параметров нагрева и охлаждения. Методом растровой электронной микроскопии изучены структура двухфазной стали в поперечных сечениях зон термического воздействия после лазерной термообработки с использованием движущихся распределённых поверхностных тепловых источников. В результате лазерной обработки в стали образуется структура, свойства которых определяются исходной структурой, временем лазерного воздействия, температурой нагрева, а также скоростями нагрева и охлаждения металлического материала. Термическое воздействие можно регулировать в широких пределах при изменении параметров пучка лазерного излучения и условий обработки. Это предоставляет возможность получить заданную структуру обрабатываемого материала и требуемые свойства.

1. Введение

Улучшение технических характеристик узлов и агрегатов различных механизмов и машин обусловлено качеством основных деталей, которое в значительной степени определяется комплексом физико-механических свойств используемых конструкционных материалов. Как правило, основными материалами, используемыми для изготовления конструкционных элементов являются стали и сплавы, в том числе материалы с высокой удельной прочностью в заданном диапазоне рабочих температур. Известно, что такие важнейшие характеристики металлов и сплавов как, например, прочность, пластичность, усталостная выносливость и износостойкость являются структурно-чувствительными, т.е., могут управляться с помощью соответствующих изменений структуры материала [1-3]. Проблема улучшения физических и механических свойств материалов путем управления их структурой является до настоящего времени большой фундаментальной проблемой физической металлургии и материаловедения. Одним из возможных путей решения этой проблемы является улучшение существующих способов модификации и применение прогрессивных методов обработки материалов, таких как лазерная лучевая обработка [4,5].

Всё большее применение в настоящее время находят двухфазные стали, в которых островки мартенситная фаза диспергирована в мягкой ферритной матрице. Сталь DP1000 имеет высокую прочность на разрыв из-за относительно твёрдой мартенситной фазы и невысокий начальный предел текучести, обусловленный ферритной фазой [6-8]. Фаза феррита с более низкой прочностью является непрерывной, что придает этой стали необходимую для различных применений пластичность. Поэтому данная двухфазная сталь находят применение в автомобильной промышленности для улучшения характеристик при столкновениях и снижения веса. Существенным становится формирование научного задела для совершенствования процессов не только лазерной сварки, но и термообработки такой стали.

Улучшение эксплуатационных свойств деталей, прошедших лазерную обработку во многом определяется способностью оптической системы перераспределять энергию по поверхности заготовки с заданной интенсивностью. Излучение, предоставляемое существующими CO₂-генераторами, не обеспечивает высокой степени концентрации энергии и характера распределения плотности мощности, требуемых для соответствующей технологии. Высокое качество лазерной обработки деталей достигается только при использовании соответствующих систем преобразования параметров излучения, позволяющих осуществить необходимое температурное воздействие. Применение лазерных технологий обуславливает тщательный выбор оптических систем транспортировки и формирования излучения. Дифракционные оптические элементы позволяют обеспечить одновременное сочетание таких свойств, как высокая надёжность, концентрация всей энергии лазерного излучения в зоне воздействия заданной формы и создание требуемого распределения плотности мощности [9-12]. Такие оптические элементы решают задачу создания заданного распределения плотности мощности излучения в фокальной плоскости и успешно применяются для формирования лазерного излучения с точным дозированием подводимой энергии [13-16].

Целью настоящей работы является изучение структуры двухфазной стали после лазерной термообработки с использованием движущихся распределённых поверхностных тепловых источников, формируемых с помощью дифракционных оптических элементов, и определение возможности создания лазерным воздействием в листовой двухфазной стали локальных зон обработки с перекристаллизацией на всю толщину листа.

2. Результаты и обсуждение

В этой работе использовалась непрерывно отожженная холоднокатаная стальная пластина DP1000 толщиной 1,5 мм, содержание углерода в которой составляет не более 0,18 % [17]. Изучался процесс обработки лазерным воздействием образцов из листового материала DP1000 размером 45 × 125 мм². При проведении исследований в качестве лазерного источника применялся CO₂-лазер “Oerlikon OPL 2000” с максимальной выходной мощностью 2000 Вт. Позиционирование образцов выполнялось с помощью управляемого системой сервоприводов координатного устройства 1000 × 2000 мм. Для снижения теплоотвода от образца в месте зажима устанавливались четыре керамические пластины толщиной 3 мм. Повышение поглощения CO₂-лазерного излучения осуществлялось нанесением термостойкого покрытия толщиной до 30 мкм из суспензии пигментов и наполнителей в растворе модифицированной полифенилсилоксановой смолы с добавками. Для перераспределения плотности мощности лазерного излучения использовался дифракционный оптический элемент. Распределения плотности мощности излучения в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента представлено в работе [18]. Обработка проводилась со скоростью 100 мм/мин, мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне 400...600 Вт. Схема процесса обработки с изображением температурного поля в зоне термического влияния и распределение плотности мощности лазерного излучения в световом пятне представлены на рисунке 1. Температура в зоне термического влияния представлена в цветовой палитре RGB. Красной стрелкой показано направление движения светового пятна по поверхности листового материала. Морфология стали DP1000 после лазерного воздействия изучалась с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN Vega SB.

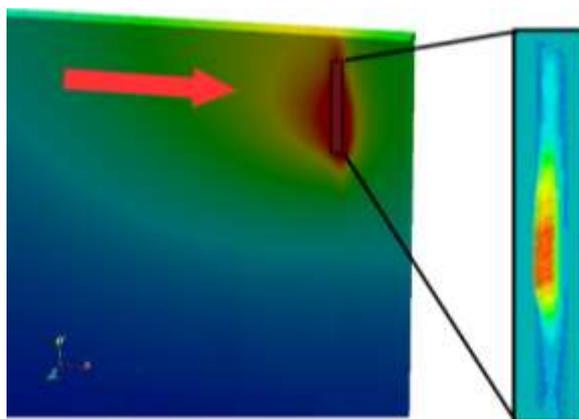


Рисунок 1. Схема процесса обработки и изображение температурного поля в зоне термического влияния (слева), а также распределение плотности мощности лазерного излучения в световом пятне при обработке (справа).

Металлографические исследования изготовленных в поперечном сечении зоны лазерного воздействия двухфазной стали DP1000 шлифов показали, что микроструктура исходного материала представляет собой вытянутые в направлении прокатки зерна со средним размером около 5 мкм, образующие характерную строчечную структуру. Микроструктура представлена на рисунке 2. Сталь состоит из феррита и мартенситных островков, которые соединяясь между собой образуя сеть. В результате лазерной обработки в сталях образуются структуры, свойства которых определяются исходной структурой, временем лазерного воздействия, температурой нагрева, а также скоростями нагрева и охлаждения металлического материала. В области зоны термического влияния в непосредственной близости к исходной структуре происходит выделение карбидов из мартенсита двухфазной стали (рисунок 3).

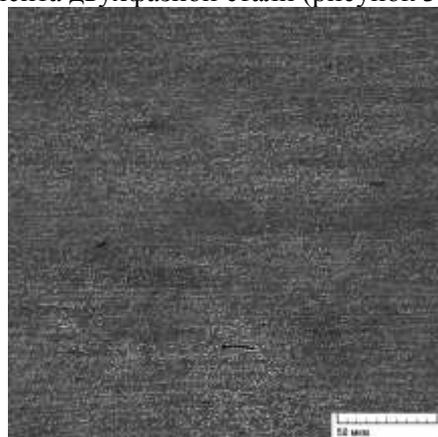


Рисунок 2. Микроструктура исходного материала стали DP1000.

Карбиды в основном распределены вдоль границ зерен исходных мартенситных блоков и выделяются в виде частиц или полос. При этом отдельные зоны в стали представляют собой механическую смесь феррита и карбидов, которая проявляет характеристики сорбита. Вследствие выделения карбидов при образовании феррита, средний размер зерна уменьшается на 10...20 % по сравнению с исходной структурой (рисунок 4). Происходящие в материале процессы отпуска приводят к снижению твердости. Темно-серые объёмные части (матрица) представляют собой феррит, светло-серые выступающие части – распределённый по островкам мартенсит, белые части – выделения карбидов.

В слоях материала, расположенных ближе к поверхности и подвергаемых более интенсивному тепловому воздействию, имеет место начало превращения мартенсита в аустенит. Микроструктура

представлена на рисунке 5. При этом зона сосуществования аустенита и феррита имеет место только при нагреве выше температуры начала формирования аустенита.

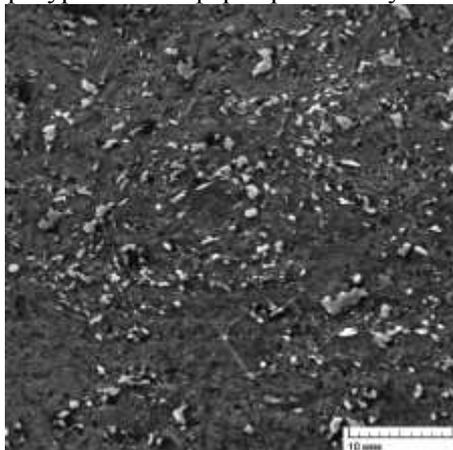


Рисунок 4. Выделение карбидов и образование феррита.

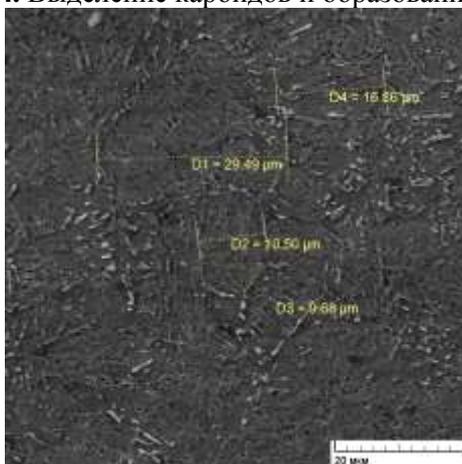


Рисунок 5. Микроструктура области зоны термического влияния двухфазной стали после перекристаллизации.

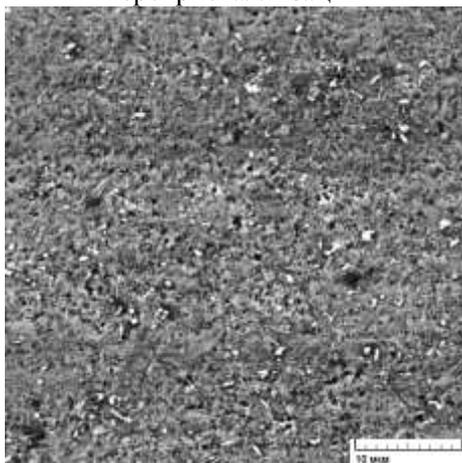


Рисунок 6. Распределение карбидов в трооститной структуре стали.

При охлаждении аустенит превращается в феррит, бейнит и мартенсит, при этом соотношение фаз будет отличаться от исходного состояния. Кроме того, в структуре может присутствовать нетрансформированный остаточный аустенит, который вместе с мартенситом образует смешанную структуру мартенсит-аустенит. Твёрдость этого слоя материала ещё ниже, чем в зоне отпуска. Сохраняется волокнистая строчечная микроструктура с выделением карбидных (цементитных)

частиц вдоль направления прокатки (рисунок 6). При повышении температуры нагрева происходит фазовое изменение, имеет место перекристаллизация зерна. Строчечная структура стали DP1000 исчезает.

Под воздействием высокой температуры частицы карбидной фазы растворяются, а затем при охлаждении выделяются хаотично равномерно по всему объёму нагретого металла. Так как при выбранных режимах обработки время выдержки при высокой температуре достаточно непродолжительное, зерна образующегося аустенита не претерпевают значительного укрупнения. В результате высокотемпературного нагрева происходит перекристаллизация с образованием трооститной микроструктуры стали и сохраняются относительно чёткие границы исходных зерен аустенита. Размер зерна увеличивается до 10...30 мкм.

При реализации режимов с оплавлением поверхности как результат закалки стали в приповерхностном слое толщиной 5...10 мкм наблюдается микроструктура мартенсита, представленная на рисунке 7. Формирование описанных структур металла в зоне термического влияния при лазерной обработке обуславливается различием циклов нагрева и охлаждения.

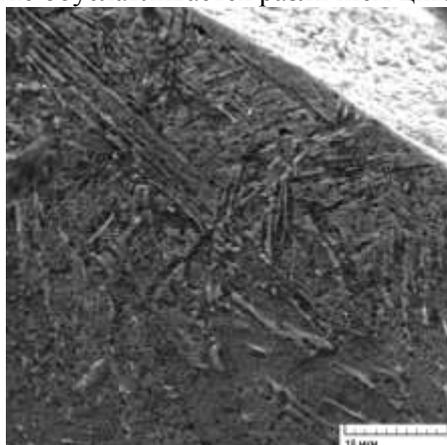


Рисунок 7. Микроструктура мартенсита в приповерхностном слое.

Таким образом, на примере стали DP1000 показано, что двухфазные стали, характеризующиеся структурно-чувствительными свойствами, могут быть модифицированы с использованием различных комбинаций параметров нагрева и охлаждения. Так как термическое воздействие можно регулировать в широких пределах при изменении параметров пучка лазерного излучения и условий обработки, то существует возможность получить заданную структуру обрабатываемого материала и требуемые свойства. Замедленный теплоотвод будет иметь место при использовании более тонких пластин. Выравнивание температурных полей во избежание более интенсивного нагрева центральной зоны и равномерную обработку материала возможно осуществить при перераспределении энергии излучения к краям лазерного пятна. Для повышения времени выдержки при температуре нагрева целесообразно использовать расфокусированное излучение. В этом случае вместо поглощающего покрытия, во избежание его выгорания, возможно применение оксидных слоёв.

Одним из направлений может являться глубокое оксидирование обрабатываемой поверхности перед проведением лазерной обработки. Полученный оксидный слой будет не только использоваться в качестве поглощающего покрытия для CO_2 -лазерного излучения, то есть в дальнем инфракрасном диапазоне, но и обеспечит более высокую коррозионную стойкость, а также и износостойкость изделий. Научная проблема состоит в снижении трещинообразования этого слоя при лазерной обработке, особенностью которой являются высокие градиенты температур при нагреве и охлаждении материала. Использование CO_2 -лазеров с более высоким качеством излучения, в том числе с близким к гауссовскому распределением плотности мощности, позволит создать предпосылки для формирования более точного, чётко определенного и локализованного лазерного воздействия, что предоставит возможность снизить или устранить трещинообразование оксидного слоя. Основным вопросом

является формирование лазерного пучка и точное дозирование подачи энергии в обрабатываемый материал.

3. Заключение

Методом растровой электронной микроскопии изучена структура двухфазной стали после лазерной термообработки с использованием движущихся распределённых поверхностных тепловых источников, формируемых с помощью дифракционных оптических элементов. В результате лазерной обработки в сталях образуются структуры, свойства которых определяются исходной структурой, временем лазерного воздействия, температурой нагрева, а также скоростями нагрева и охлаждения металлического материала.

Определены возможности создания лазерным воздействием в листовой двухфазной стали локальных зон обработки с перекристаллизацией на всю толщину листа. Термическое воздействие можно регулировать в широких пределах при изменении параметров пучка лазерного излучения и условий обработки. Это предоставляет возможность получить заданную структуру обрабатываемого материала и требуемые свойства.

4. Благодарности

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-58-14001. Австрийский научный фонд (FWF): номер проекта I 3920.

Авторы выражают благодарность за полезные советы и предоставленный материал по двухфазной стали DP 1000 г-ну Юкке Силтанену, специалисту Joining & Thermal Cutting at the SSAB Knowledge Service Center, SSAB Group, Швеция.

5. Литература

- [1] Deng, Y.G. Effect of heating rate during continuous annealing on microstructure and mechanical properties of high-strength dual-phase steel / Y.G. Deng, Y. Li, H. Di, R.D.K. Misra // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2019. – Vol. 28(8). – P. 4556-4564. DOI: 10.1007/s11665-019-04253-2.
- [2] Kong, Z. Effects of continuous annealing process parameters on the microstructure and mechanical properties of dual phase steel / Z. Kong, J. Zhang, H. Li, N. Kong // *Steel Res. Int.* – 2018. – Vol. 89(8). – P. 1800034. DOI: 10.1002/srin.201800034.
- [3] Evin, E. The prediction of the mechanical properties for dual-phase high strength steel grades based on microstructure characteristics / E. Evin, J. Kepič, K. Buriková, M. Tomáš // *Metals* – 2018. – Vol. 8(4). – P. 242. DOI: 10.3390/met8040242.
- [4] Lapouge, P. Laser heat treatment of martensitic steel and dual-phase steel with high martensite content / P. Lapouge, J. Dirrenberger, F. Coste, M. Schneider // *Mater. Sci. Eng. A* – 2019. – Vol. 752. – P. 128-135. DOI: 10.1016/j.msea.2019.03.016.
- [5] Asadi, M. Local laser heat treatment in dual-phase steels / M. Asadi, G. Frommeyer, A. Aghajani, I. Timokhina, H. Palkowski // *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci.* – 2012. – Vol. 43(4). – P. 1244-1258. DOI: 10.1007/s11661-011-0943-1.
- [6] Hug, E. Temperature and stress state influence on void evolution in a high-strength dual-phase steel / E. Hug, M. Martinez, J. Chottin // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2015. – Vol. 626. – P. 286-295. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.053.
- [7] Radwanski, K. Structure and mechanical properties of dual-phase steel following heat treatment simulations reproducing a continuous annealing line / K. Radwanski, R. Kuziak, R. Rozmus // *Arch. Civ. Mech. Eng.* – 2019. – Vol. 19(2). – P. 453-468. DOI: 10.1016/j.acme.2018.12.006.
- [8] Ashrafi, H. Influence of heat treatment schedule on the tensile properties and wear behavior of dual phase steels / H. Ashrafi, S. Sadeghzade, R. Emadi, M. Shamanian // *Steel Res. Int.* – 2017. – Vol. 88(4). – P. 1600213. DOI: 10.1002/srin.201600213.
- [9] Kazanskiy, N.L. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment / N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Optik*. – 1994. – Vol. 96(4). – P. 158-162.

- [10] 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. DOI: 10.1080/09500349608232815.
- [11] Kazanskiy, N.L. Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot / N.L. Kazanskiy, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov // *Proceedings of SPIE.* – 2001. – Vol. 4316. – P. 193-199. DOI: 10.1117/12.407678.
- [12] Харитонов, С.И. Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в плоские области в рамках геометрической оптики / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 439-450. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-439-450.
- [13] Мурзин, С.П. Определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов // *Компьютерная оптика.* – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 392-396. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-392-396.
- [14] Murzin, S.P. Influence of conditions of the samples fixation on the intensity of the nanoporous structure formation in the metallic material by laser action with thermocycling / S.P. Murzin, A.N. Kryuchkov // *Procedia Engineering.* – 2015. – Vol. 106. – P. 272-276. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.035.
- [15] Мурзин, С.П. Формирование структур материалов лазерным воздействием для повышения эксплуатационных свойств деталей в авиадвигателестроении // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 353-359. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-353-359.
- [16] 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. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.09.007.
- [17] Mechanical properties of heat treated steel, Technical Report N1.97BC.07.0178, SSAB, 2012.
- [18] 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.

Study of structure of dual phase steel after laser heat treatment using moving distributed surface heat sources

S.P. Murzin^{1,2}, N.L. Kazanskiy^{1,3}, G. Liedl², R. Bielak², A.A. Melnikov¹, S. Osipov²

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²TU Wien, Institute of Production Engineering and Photonic Technologies, Getreidemarkt 9, Vienna, Austria, 1060

³Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. Dual phase steels are characterized by structurally sensitive properties and can be modified using various combinations of heating and cooling parameters. Using scanning electron microscopy, a structure of a dual phase steel in cross sections of heat-affected zones after a laser heat treatment using moving distributed surface heat sources were studied. As a result of the laser treatment, structures in the steel are formed whose properties are determined by the initial structure, a laser exposure time, a heating temperature, and also rates of heating and cooling of the metal material. The thermal effect can be controlled within wide limits by changing parameters of the laser beam and processing conditions. This provides the opportunity to obtain a given structure of the processed material and required properties.