# Селективная модификация двухфазной стали DP 1000 лазерным воздействием с применением дифракционного оптического элемента

*С.П. Мурзин[1,2], М.В. Блохин[1]*

*[1]Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,*

*[2]Венский технический университет, Институт технологии производства и фотонных технологий, 1060, Австрия, г. Вена, Гетрайдемаркт, 9*

***Аннотация***

Выполнены экспериментальные исследования формирования пучка $CO_2$-лазерного излучения отражающим дифракционным оптическим элементом. Для увеличения апертуры исходного пучка применялся коллиматор, содержащий систему двух плоско-выпуклых сферических линз из ZnSe. Для фокального отрезка, формируемого дифракционным оптическим элементом, при использовании коллиматора, кроме увеличения в 1,3 раза длины, имело место уменьшение максимальной плотности мощности излучения в световом пятне. Определена возможность формирования лазерным воздействием в двухфазной стали, наряду с исходной структурой, структур полной закалки, неполной закалки и отжига. Формирование таких структур обусловлено характером распределения температурных полей и различием в скорости охлаждения по объёму зоны термического влияния.

*Ключевые слова*: лазерное воздействие, формирование лазерного пучка, дифракционный оптический элемент, коллиматор, сталь двухфазная, селективная модификация, структура.

*Цитирование*: **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.

## *Введение*

При лазерной обработке материалов обеспечивается локальный концентрированный подвод энергии сфокусированного излучения с высокой плотностью мощности, большей, чем при использовании практически любого другого теплового источника. Лазерное воздействие применяют не только для соединения или разделения материалов, но и для изменения их физико-механических свойств. Современное состояние и достижения в области физики обработки металлов и сплавов лазерным излучением представлено в различных статьях и монографиях [1–3]. В многочисленных справочниках [4–6] подробно описано применение лазерных устройств для реализации разнообразных производственных технологий. Известно, что многие важные характеристики металлических материалов являются структурно-чувствительными, то есть могут управляться путём изменения структур материалов в результате лазерной обработки. Однако большая часть работ в этом направлении посвящена упрочнению металлических сплавов. Такой подход оправдан в том случае, когда целью является повышение прочности материалов. В связи с разработкой и более широким использованием высокопрочных материалов появляются задачи, связанные с необходимостью их локального снижения твёрдости, например, для облегчения операций формовки [7–9]. Лишь немногие работы посвящены исследованиям процесса разупрочнения материалов путём контролируемого изменения структур [10–14]. Даже термин «лазерный отжиг», который в более широком смысле означает изменение структуры твёрдых тел под действием лазерного излучения различной длительности, в литературе обычно относят к импульсной кристаллизации полупроводниковых структур лазерным излучением наносекундной длительности.

В настоящее время находят применение высокопрочные двухфазные ферритно-мартенситные стали с контролируемым количеством мартенсита, которые среди низколегированных сталей имеют благоприятное сочетание прочности и пластичности. В то же время эти стали обладают хорошей коррозионной стойкостью и неплохими механическими свойствами. Двухфазные ферритно-мартенситные структуры предоставляют возможность их модифицирования, используя различные комбинации параметров нагрева и охлаждения. Преимущества одного режима могут быть связаны с возможностью мартенситного упрочнения сталей с низким содержанием легирующих элементов, а, например, других – в лучшем сочетании прочности и пластичности и т.д.

При этом лазерное излучение должно фокусироваться на поверхности обрабатываемого материала с возможностью достижения желательного распределения плотности мощности. Для формирования лазерного излучения разработаны различные оптические системы. Однако не сообщается о сочетании требуемого распределения плотности мощности лазерного излучения желательной формы и концентрации мощности лазерного излучения в зоне обработки с высокой надёжностью. Возможность создания светового пятна в виде рисунка или области с конкретным распределением плотности мощности лазерного излучения предоставляют дифракционные оптические элементы [15–18].

Целью работы является формирование в образце обрабатываемого материала, наряду с исходной ферритно-мартенситной структурой, структур полной закалки, неполной закалки и отжига путём лазерного воздействия с чётко определённым распределением плотности мощности излучения, что является важным этапом выявления и создания условий для контролируемой селективной модификации материалов. Для формирования лазерного излучения и точного дозирования подводимой энергии предполагается применение дифрационных оптических элементов. Исследование изменения структуры обрабатываемого материала планируется осуществить методом растровой электронной микроскопии.

### *Экспериментальные исследования перераспределения мощности лазерного излучения, формируемого дифракционным оптическим элементом*

Применение схемы нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в установленный перпендикулярно, под углом или параллельно траектории движения заготовки отрезок, позволяет реализовать технологические возможности лазерной термической обработки [19, 20]. Воздействие лазерного излучения на обрабатываемый материал осуществляют в зависимости от заданной формы зоны обработки и требуемого распределения плотности мощности излучения. Неоднородное распределение плотности мощности излучения по длине отрезка с её максимумом в центре приводит, например, к снижению уровня пластических деформаций листовой заготовки и, следовательно, к уменьшению её коробления в процессе обработки. В этом случае в составе оптической системы транспортировки и формирования излучения в качестве фокусирующего целесообразно использовать дифракционный оптический элемент, выполненный в виде отражающей излучение пластины с микрорельефной структурой поверхности, определяемой в зависимости от формы зоны обработки, распределения, плотности мощности лазерного излучения и его длины волны, форма рабочей поверхности которой определяется формулой, представленной в работах [21, 22]. Увеличение длины фокального отрезка такого оптического элемента и некоторое перераспределение энергии к периферии светового пятна могут быть осуществлены при увеличении диаметра фокусируемого пучка [23–25].

Экспериментальные исследования формирования излучения с помощью отражающего дифракционного оптического элемента выполнялись с использованием $CO_2$-лазерного технологического оборудования «BY-STAR 2512» с излучателем BTL 1800, имеющего в режиме генерации $TEM_{01}$-моды поперечное сечение пучка в виде эллипса с величинами малой и большой осей 19 мм и 20 мм соответственно. Мощность излучения составляла 950 Вт. Измерение распределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента проводилось измерителем мощности ИМО2Н, перемещающимся в системе координат, перпендикулярной оси пучка, и снабжённым квадратной диафрагмой размером $0{,}1 \times 0{,}1$ мм. Максимальная плотность мощности излучения имела место в центральной зоне поперечного сечения пучка и составила 9 Вт/мм$^2$. Для увеличения апертуры исходного пучка применялся коллиматор, содержащий систему двух плоско-выпуклых сферических линз из ZnSe с радиусами кривизны 0,08 м и 0,176 м. Применение описанного коллиматора позволило увеличить апертуру пучка в 1,25 раза. Поперечное сечение пучка также представляло собой эллипс, при этом величины малой и большой осей увеличились на 25 %, а максимальная плотность мощности излучения уменьшилась в 1,55 раза до значения 5,8 Вт/мм$^2$. На рис. 1 представлены распределения плотности мощности вдоль малых осей эллипса до и после коллимирующего объектива.

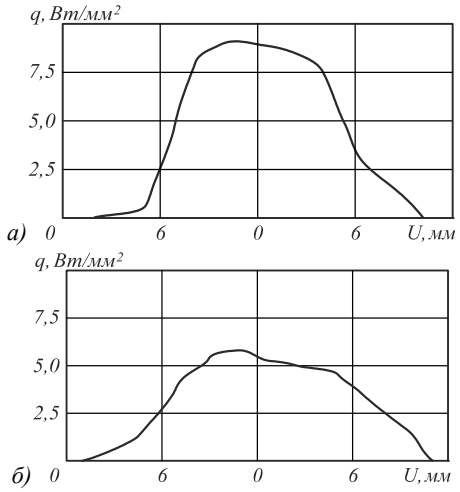



*Рис. 1. Распределения плотности мощности вдоль малых осей эллипса до (а) и после коллимирующего объектива (б)*

Использование коллиматора позволяет перенести долю энергии от центра дифракционного оптического элемента на его периферийные зоны, которые перераспределяют излучение на края светового пятна и рассчитаны для работы в условиях экспоненциально малой плотности мощности. Поэтому, кроме увеличения в 1,3 раза длины фокального отрезка, имело место некоторое повышение плотности мощности излучения на краях сфокусированного светового пятна. Максимальная плотность мощности излучения в световом пятне без использования коллимирующего устройства имела значение 350 Вт/мм$^2$, а при использовании коллимирующего устройства уменьшилась до значения 265 Вт/мм$^2$, что составило 75 % от исходной. На рис. 2 представлены результаты экспериментального определения распределения плотности мощности излучения в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента.

### *Формирование в двухфазной стали структур закалки и отжига лазерным воздействием*

Основным этапом выявления и создания условий для контролируемой селективной модификации ма-

териалов с ферритно-мартенситной структурой путём лазерного воздействия с чётко определённым распределением плотности мощности излучения является определение возможности формирования в образце обрабатываемого материала различных зон: от полной закалки до отжига. Для формирования лазерного пучка и точного дозирования подводимой энергии применялся дифракционный оптический элемент. В качестве поглощающего использовалось термостойкое антикоррозионное покрытие толщиной около 30 мкм, наносимое распылителем из суспензии пигментов и наполнителей в растворе полифенилсилоксановой смолы, модифицированной сополимером бутилметакрилата и метакриловой кислоты с целевыми добавками.

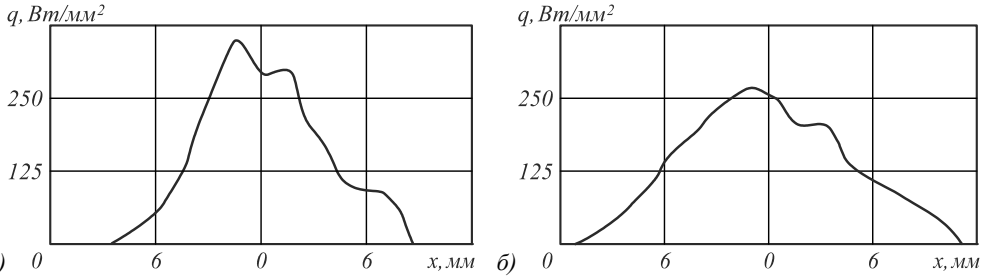



*Рис. 2. Результаты экспериментального определения распределения плотности мощности излучения в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента без использования (а) и при использовании (б) коллимирующего объектива*

Исследование микроструктуры образцов проводилось с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN. Лазерная обработка приводит к существенным изменениям в структуре обрабатываемого материала. Металлографические исследования шлифов, изготовленных в поперечном сечении зоны лазерного воздействия двухфазной стали DP 1000, показали, что при обработке без оплавления поверхности зона термического влияния состоит их нескольких слоёв, структура каждого из которых в различной степени отличается от исходной (рис. 3). Материал, находящийся вне зоны термического влияния, имеет исходную структуру. Известно, что в состоянии поставки в стали DP 1000 островки мартенсита диспергированы в ферритной матрице, что приводит к большей прочности при достаточной пластичности и вязкости. Вследствие зарождения и роста аустенита, а также дальнейшего образования мартенсита на границах зёрен при охлаждении, зерна феррита имеют вырожденную морфологию. Наиболее твёрдый слой пониженной травимости представляет собой мартенсит. Непосредственно рядом с ним расположена область неполной закалки, имеющая структуру из мартенсита и феррита.

Третий слой – зона отжига. При лазерном воздействии на двухфазную сталь в этом слое имеет место понижение микротвердости. Температура в зоне отжига не превышала, но приближалась к температуре, при которой при нагревании начинает формироваться аустенит (точка фазового перехода AC1). Вследствие образования феррита и отпущенного мартенсита в этой зоне произошло размягчение материала. Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурных полей и различием в скорости охлаждения по объему зоны термического влияния. Таким образом, определена возможность формирования в образце обрабатываемого материала, наряду с исходной структурой, структур полной закалки, неполной закалки и отжига.

### *Заключение*

В настоящей работе определена возможность формирования лазерным воздействием в двухфазной стали, наряду с исходной структурой, структур полной закалки, неполной закалки и отжига, что является важным этапом выявления и создания условий для контролируемой селективной модификации материалов. Показано, что термическое воздействие можно регулировать при изменении параметров пучка лазерного излучения и условий обработки. Обосновано применение дифракционных оптических элементов для формирования лазерного излучения и точного дозирования подводимой энергии. Выполнены экспериментальные исследования формирования $CO_2$-лазерного излучения отражающим дифракционным оптическим элементом. Максимальная плотность мощности излучения исходного пучка имела место в центральной зоне его поперечного сечения. Для увеличения апертуры исходного пучка применялся коллиматор, содержащий систему двух плоско-выпуклых сферических линз из ZnSe. Для фокального отрезка, формируемого дифракционным оптическим элементом, при использовании коллиматора, кроме увеличения в 1,3 раза длины, имело место повышение плотности мощности излучения на краях сфокусированного светового пятна. Это предоставляет возможность получить заданную структуру обрабатываемого материала и требуемые свойства.

Выполненные с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN металлографические исследования шлифов, изготовленных в поперечном сечении зоны лазерного воздействия при обработке без оплавления поверхности двухфазной стали DP 1000, показали, что лазерная обработка приводит к существенным изменениям в структуре обрабатываемого материала.

Выявлено, что зона термического влияния состоит их нескольких слоев, структура каждого из которых в

различной степени отличается от исходной: полной закалки, неполной закалки и отжига. Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурных полей и различием в скорости охлаждения по объему зоны термического влияния. При этом локальное снижение твердости высокопрочной стали необходимо для обеспечения выполнимости, например, операции штамповки. Локальные области заготовок из листового металла могут быть подвергнуты отжигу с использованием процесса локального нагрева, когда непрерывное лазерное излучение фокусируется на поверхности с движением светового пятна по заранее определенной траектории, которая обуславливается последующим процессом штамповки. Предопределенная конфигурация зоны обработки не может быть получена обычными методами локального нагрева, кроме лазерного, поскольку они не обеспечивают высокую плотность энергии. В продолжение работы для выявления возможностей обработки зон заданной конфигурации планируется осуществление моделирования тепловых процессов и экспериментальные исследования. При этом также целесообразно использовать дифракционные оптические элементы.

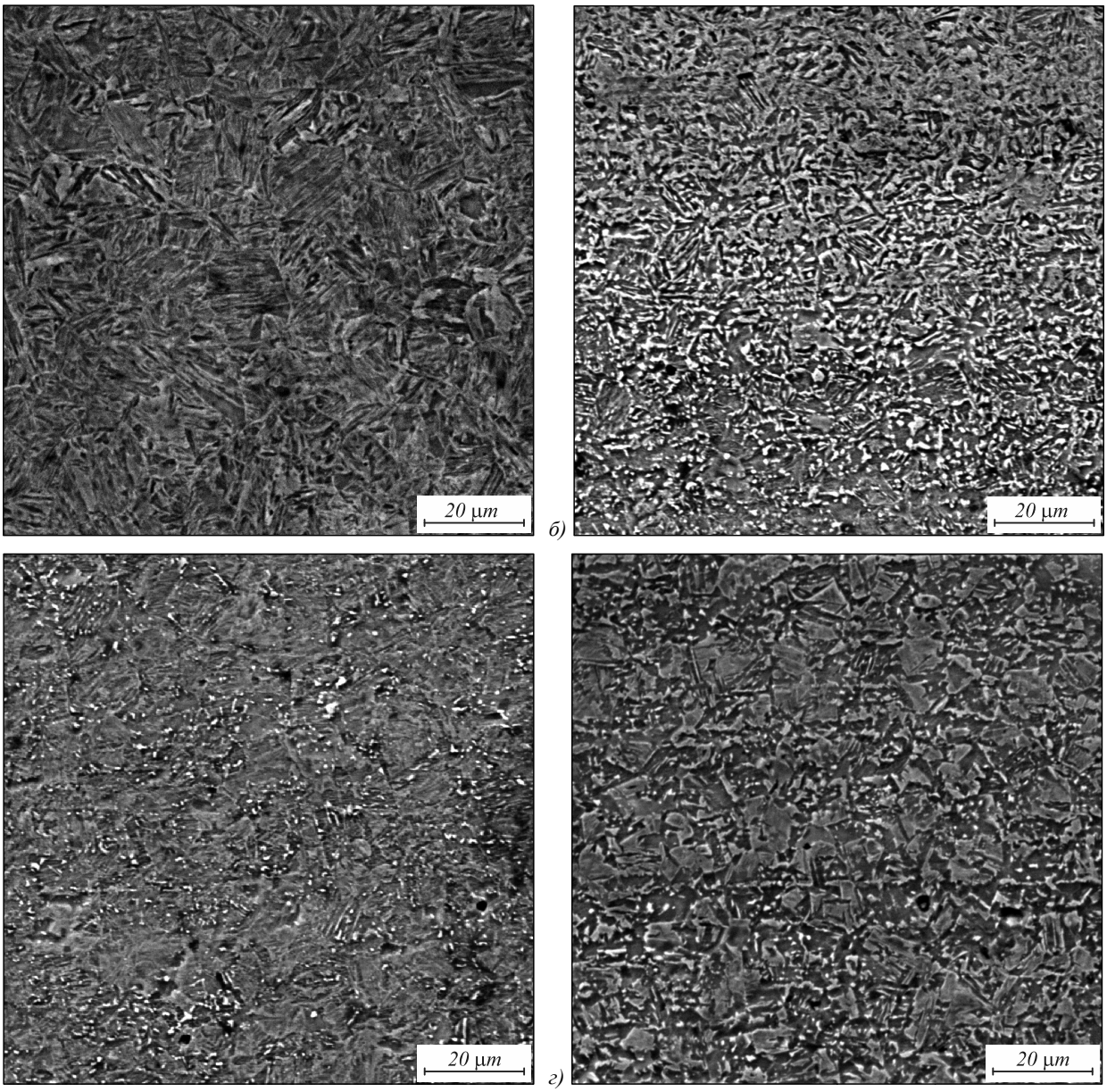



*Рис. 3. Структуры зоны термического влияния при обработке без оплавления поверхности стали DP 1000: закаленная (а), области неполной закалки (б), зоны отжига (в), исходная (г)*

Важным предполагаемым применением полученного результата являются системы пассивной безопасности современного автомобиля. При проектировании кузова в автомобилестроении выработался общий принцип, который заключается в том, чтобы при столкновении салон автомобиля остался максимально неповрежденным, в то время как передняя и задняя части были бы способны деформироваться, поглощая энергию. Для того чтобы силовая конструкция кузова могла соответствовать предъявляемым требованиям,

в ней используются высокопрочные стали. С целью наиболее эффективного погашения кинетической энергии от удара обеспечивают пластическую деформацию передней и задней части автомобиля путем продольного складывания. Для этого перспективно чередование локальных участков упрочненного и разупрочненного материала.

### *Благодарности*

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

### *Литература*

1. **Kannatey-Asibu, E. Jr.** Principles of laser materials processing / E. Kannatey-Asibu Jr. – Hoboken, New Jersey, US: John Wiley & Sons, 2009. – 820 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 / P. Schaaf. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 231 p.
4. **Ready, J.F.** LIA handbook of laser materials processing / J.F. Ready, D.F. Farson; ed. 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 // Proceedings of SPIE. – 1987. – Vol. 801. – P. 296-301. – DOI: 10.1117/12.941256.
8. **Minamida, K.** Surface annealing of steel wires for automotive tires by $CO_2$ laser with cone shaped focusing mirror / K. Minamida, M. Kido, A. Ishibashi, S. Mogami, S. Sasaki // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. – 1990. – Vol. 71. – P. 460-468. – DOI: 10.2351/1.5058389.
9. **U.S. Patent 7,063,755 C22F 1/04, 148/565.** Method for laser annealing / S.R. Nolan, filed of August 20, 2003, published of June 20, 2006.
10. **Neugebauer, R.** Local laser heat treatment of ultra high strength steels to improve formability / R. Neugebauer, S. Scheffler, R. Poprawe, A. Weisheit // Production Engineering. – 2009. – Vol. 3, Issues 4-5. – P. 347-351. – DOI: 10.1007/s11740-009-0186-9.
11. **Murzin, S.P.** Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 33, Issues 1-3. – P. 67-76.
12. **Zarini, S.** Formability enhancement of Al 6060 sheets through fiber laser heat treatment / S. Zarini, E. Mostaed, M. Vedani, B. Previtali // International Journal of Material Forming. – 2017. – Vol. 10, Issue 5. – P. 741-751. – DOI: 10.1007/s12289-016-1316-5.
13. **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, Issue 1. – 012070. – DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012070.
14. **Niehuesbernd, J.** Impact of the heating rate on the annealing behavior and resulting mechanical properties of UFG HSLA steel / J. Niehuesbernd, E. Bruder, C. Müller // Materials Science and Engineering A. – 2018. – Vol. 711. – P. 325-333. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.018.
15. **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.
16. **Kazanskiy, N.L.** Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment / N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // Optik. – 1994. – Vol. 96, Issue 4. – P. 158-162.
17. **Doskolovich, L.L.** Diffractive optical elements for laser processing / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, G.V. Usplenjev // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1983. – P. 647-648.
18. **Golub, M.A.** Diffraction calculation for an optical element which focuses into a ring / M.A. Golub, N.L. Kazanskii, N.I. Sisakyan, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // Optoelectronics, Instrumentation, and Data Processing. – 1987. – Vol. 6. – P. 7-14.
19. **Казанский, Н.Л.** Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, С.Ю. Клочков // Компьютерная оптика. – 2005. – № 28. – С. 89-93.
20. **Мурзин, С.П.** Исследования температурных полей в конструкционной стали при воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 3. – С. 59-62.
21. **Murzin, S.P.** Determination the allowable error to adjustment of a diffractive optical element and the accuracy demanded to set the parameters of the focused beam / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – 103420S. – DOI: 10.1117/12.2270705.
22. **Murzin, S.P.** Laser beam shaping with purposefully changing of spatial power distribution / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – 107740Q. – DOI: 10.1117/12.2317480.
23. **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. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-353-359.
24. **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.
25. **Murzin, S.P.** Algorithm for calculation of the power density distribution of the laser beam to create a desired thermal effect on technological objects / S.P. Murzin, R. Bielak, G. Liedl // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 679-684. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-679-684.

### *Сведения об авторах*

**Мурзин Сергей Петрович**, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет, коротко – Самарский университет) по специальности «Авиационные двигатели». Доктор технических наук (2005 год), работает профессором

кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского университета. Руководитель научно-образовательного центра лазерных систем и технологий. В 2018 – 2019 годах – приглашенный исследователь в Институте технологии производства и фотонных технологий Венского технического университета, Австрия. С.П. Мурзин – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий, лазерной физики и оптики. В списке научных работ С.П. Мурзина более 120 статей, 2 монографии, 20 авторских свидетельств и патентов.
E-mail: *murzin@ssau.ru* .

**Блохин Максим Витальевич**, 1995 года рождения. В 2019 году окончил магистратуру Самарского национального исследовательского университета (коротко – Самарский университет). Аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского университета. М.В. Блохин – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий. В списке его научных работ 11 статей и 2 патента.
E-mail: *m.v.blokhin@yandex.ru* .

*ГРНТИ: 29.33.47*
*Поступила в редакцию 20 августа 2019 г. Окончательный вариант – 10 сентября 2019 г.*

# Selective modification of dual phase steel DP 1000 by laser action using diffractive optical element

*S.P. Murzin[1,2], M.V. Blokhin[1]*
*[1]Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34,*
*[2]TU Wien, Institute of Production Engineering and Photonic Technologies, 1060, Vienna, Austria, Getreidemarkt 9*

***Abstract***

Experimental studies of shaping a $CO_2$ laser beam with a reflective diffractive optical element have been performed. To increase the aperture of the initial beam, we used a collimator containing a system of two plane-convex spherical ZnSe lenses. For the focal line formed with the diffractive optical element in combination with the collimator, in addition to a 1.3-fold increase in the length, a decrease in the maximum beam power density was found to occur in the laser spot. It was demonstrated that under the laser action it is possible to generate in a two-phase steel sample regions of full hardening, selective hardening, and annealing, alongside the initial structure. The formation of such structures is due to the distribution pattern of temperature fields and a difference in the cooling rate across the volume of the heat affected zone.

*Keywords*: laser action, beam shaping, diffractive optical element, collimator, dual-phase steel, selective modification, structure.

*Citation*: Murzin SP, Blokhin MV. Selective modification of dual phase steel DP 1000 by laser action using diffractive optical element. Computer Optics 2019; 43(5): 773-779. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-773-779.

*Acknowledgements*: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, (Project No. 18-58-14001). Austrian Science Fund (FWF): Project number I 3920.

***References***

[1] Kannatey-Asibu E Jr. Principles of laser materials processing. Hoboken, New Jersey, US: John Wiley & Sons; 2009.
[2] Ion JC. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Amsterdam, Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann; 2005.
[3] Schaaf P. Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2010.
[4] Ready JF, ed, Farson DF. LIA handbook of laser materials processing. Orlando, US: Laser Institute of America; 2001.
[5] Dahotre NB, Harimkar SP. Laser fabrication and machining of materials. New York, US: Springer Science + Business Media; 2008.
[6] Steen WM, Mazumder J. Laser material processing. 4th ed. London, UK: Springer; 2010.
[7] Bergmann HW. Short term annealing by laser treatment Proc SPIE 1987; 801: 296-301. DOI: 10.1117/12.941256.
[8] Minamida K, Kido M, Ishibashi A, Mogami S, Sasaki S. Surface annealing of steel wires for automo-tive tires by $CO_2$ laser with cone shaped focusing mirror. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. 1990; 71: 460-468. DOI: 10.2351/1.5058389.
[9] Nolan SR. Method for laser annealing. U.S. Patent 7,063,755 of June 20, 2006.
[10] Neugebauer R, Scheffler S, Poprawe R, Weisheit A. Local laser heat treatment of ultra high strength steels to improve formability. Prod Eng 2009; 3(4-5): 347-351. DOI: 10.1007/s11740-009-0186-9.
[11] Murzin SP. Local laser annealing for aluminium alloy parts Laser Eng 2016; 33(1-3): 67-76.
[12] Zarini S, Mostaed E, Vedani M, Previtali B. Formability enhancement of Al 6060 sheets through fiber laser heat treatment. Int J Mater Form 2017; 10(5): 741-751. DOI: 10.1007/s12289-016-1316-5.
[13] Murzin SP, Kazanskiy NL. Softening of low-alloyed titanium billets with laser annealing. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2018; 302(1): 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012070.
[14] Niehuesbernd J, Bruder E, Müller C. Impact of the heating rate on the annealing behavior and resulting mechanical properties of UFG HSLA steel. Mater Sci Eng A 2018; 711: 325-333. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.018.

[15] Kazanskiy NL, Uspleniev GV, Volkov AV. Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot. Proc SPIE 2001; 4316: 193-199. DOI: 10.1117/12.407678.
[16] Kazanskiy NL, Soifer VA. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment. Optik 1994; 96(4): 158-162.
[17] Doskolovich LL, Golub MA, Kazanskiy NL, Soifer VA, Usplenjev GV. Diffractive optical elements for laser processing. Proc SPIE 1993; 1983: 647-648.
[18] Golub MA, Kazanskii NL, Sisakyan NI, Soifer VA, Kharitonov SI. Diffraction calculation for an optical element which focuses into a ring. Optoelectron Instrum Data Process 1987; 6: 7-14.
[19] Kazanskiy NL, Murzin SP, Klochkov SYu. Formation of the required energy action at the laser treatment of materials with using radiation focusators [In Russian]. Computer Optics 2005; 28: 89-93.
[20] Murzin SP, Osetrov EL. Studies of temperature fields in structural steel by laser beam action formed by focusators [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(3): 59-62.
[21] Murzin SP, Kazanskiy NL. Determination the allowable error to adjustment of a diffractive optical element and the accuracy demanded to set the parameters of the focused beam. Proc SPIE 2017; 10342: 103420S. DOI: 10.1117/12.2270705.
[22] Murzin SP, Kazanskiy NL. Laser beam shaping with purposefully changing of spatial power distribution. Proc SPIE 2018; 10774: 107740Q. DOI: 10.1117/12.2317480.
[23] Murzin SP. Formation of structures in materials by laser treatment to enhance the performance characteristics of aircraft engine parts. Computer Optics 2016; 40(3): 353-359. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-353-359.
[24] Murzin SP, Kazanskiy NL, Liedl G, Otto A, Bielak R. Laser beam shaping for modification of materials with ferritic-martensitic structure. Procedia Eng 2017; 201: 164-168. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.592.
[25] Murzin SP, Bielak R, Liedl G. Algorithm for calculation of the power density distribution of the laser beam to create a desired thermal effect on technological objects. Computer Optics 2016; 40(5): 679-684. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-679-684.

### *Author's information*

**Serguei Petrovich Murzin** (b. 1963) graduated (1986) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara National Research University, short – Samara University) majoring in Aircraft Engines. He received his Doctor in Technics (2005) degree from Samara National Research University. He is holding the position of a professor in Samara University at Automatic Systems of Power Plants department. He is the head of the Research & Education Center of Laser Systems and Technologies. In 2018-2019, he is the visiting researcher at the Institute of Production Engineering and Photonic Technologies in the TU Wien, Vienna, Austria. He is a specialist in laser technology and nanotechnology, laser physics and optics. He is a coauthor of over 120 scientific papers, two monographs, and 20 inventions and patents. E-mail: *murzin@ssau.ru* .

**Maksim Vitalievich Blokhin** (b. 1995) graduated (2019) from master's studies of Samara National Research University (short – Samara University). He is a aspirant in Samara University at Automatic Systems of Power Plants department. He is a specialist in laser technology and nanotechnology. He is a coauthor 11 scientific papers and two patents. E-mail: *m.v.blokhin@yandex.ru* .

*Received August 20, 2019. The final version – September 10, 2019.*