

Моделирование температурных полей в стали DP1000 при лазерной обработке с использованием дифракционных оптических элементов

Р. Биела¹, С.П. Мурзин^{1,2}, Г. Лидль¹, А. Отто¹, Н.Л. Казанский^{2,3}

¹Венский технический университет, Институт технологии производства и фотонных технологий, Гетрайдемаркт 9, Вена, Австрия, 1060

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

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

Аннотация. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с их уникальными свойствами позволяют формировать predetermined профиль интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости. Использование ДОЭ в технологиях лазерной обработки материалов открывает новые возможности для управления свойствами и эксплуатационными характеристиками обрабатываемых деталей. Сформированный с помощью ДОЭ профиль интенсивности излучения представлен в виде аналитического выражения, используемого для задания поверхностного теплового источника при моделировании тепловых процессов в стали DP1000. Проведены экспериментальные исследования образцов при лазерном нагреве. Результаты моделирования хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Предложенная расчетная модель, основанная на точном определении тепловыделения, является промежуточным шагом к конечной цели - прогнозированию структурных изменений в зоне лазерного воздействия.

1. Введение

Двухфазные (DP) стали, характеризующиеся наличием ферритной и мартенситной фазы и обладающие повышенной прочностью и хорошей формруемостью находят применение в автомобильной промышленности [1-3]. Данный материал при нагреве приобретает специфические свойства. Поэтому, особенно актуальны исследования изменений структуры и свойств двухфазных сталей в процессе сварки и термообработки. Например, в работе [4] исследована структура отпуска мартенсита в двухфазной стали путем испытаний на твердость вдавливанием в подкритической области зоны термического влияния в материале после контактной точечной сварки с кратковременным нагревом. В работе [5] изучалось влияние мощности лазерного излучения на механические характеристики формируемых точечных сварных швов в двухфазных сталях. В работе [6] исследовались микроструктура, свойства при растяжении и характеристики упрочнения двухфазной стали после газовой вольфрамовой дуговой сварки. Однако существует мало работ, описывающих соответствие между характеристиками температурного цикла и свойствами двухфазных сталей в зоне термического влияния.

Высокой прочностью обладает холоднокатаная сталь Docol DP1000, производимая Swedish Steel AB (SSAB). Прочность на разрыв такой стали достигает 1000 МПа, а относительное удлинение – превышает 7 % [7]. Поэтому данная сталь обладает большим потенциалом для использования в автомобильной промышленности. Химический состав стали DP1000 представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав стали DP1000, макс. вес. % (не более).

Хим. элем.	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb-Ti	Cr-Mo	B	Cu
Макс. вес. %	0,18	0,8	1,8	0,02	0,01	0,014- 1,0	0,1	1,4	0,005	0,2

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с их уникальными свойствами позволяют формировать predetermined профиль интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости [8-11]. Использование ДОЭ в технологиях лазерной обработки материалов открывает новые возможности для управления свойствами и эксплуатационными характеристиками обрабатываемых деталей [12-14]. Целесообразно изучить влияние распределения интенсивности лазерного излучения, формируемого ДОЭ, на тепловые процессы в обрабатываемом образце из стали DP1000. В дальнейшем это может служить основой для моделирования и прогнозирования изменений микроструктуры и свойств, вызванных таким нагревом материала. Особое внимание необходимо уделить точному определению и параметрическому заданию функции распределения плотности мощности с помощью полиномиального уравнения, позволяющего независимо от используемых в модели параметров сетки задавать тепловой источник.

В качестве инструмента моделирования использовалось программное обеспечение ANSYS Multiphysics R19.1 со встроенным языком программирования APDL (ANSYS Parametric Design language). Результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными.

2. Моделирование температурного поля при лазерном воздействии на поверхность стали DP1000

Для моделирования применялся метод конечных элементов (FEM), который является наиболее широко используемым методом для решения задач инженерных и математических моделей. Типичные области FEM, представляющие интерес, включают традиционные области структурного анализа, теплообмена и т.д. Среди доступных программ на основе FEM была выбрана ANSYS Multiphysics R19.1. Для повышения точности результатов и сокращения времени проведения расчётов моделировалась только часть образца, подвергаемая нагреву. Количество элементов при расчёте было уменьшено созданием так называемой «полубесконечной» границы, при этом вместо полного объёма образца (125 мм × 45 мм × 1,5 мм) моделировался уменьшенный объём (60 мм × 45 мм × 1,5 мм). Учитывая возможность проведения термообработки образцов по различным траекториям использование симметричной модели было признано нецелесообразно. Для моделирования тепловой задачи применялся трехмерный термический элемент Solid 70. Была создана регулярная сетка с размером элемента, ширина и длина которого составляла 1 мм, а толщина – 0,5 мм, таким образом общее количество элементов типа Solid 70 составило 166050, а соответствующих узлов – 223288.

Использовались допущения:

- начальная температура имела значение 20°C;
- моделировался уменьшенный объём образца (60 мм × 45 мм × 1,5 мм), для чего была создана так называемая «полубесконечная» граница;
- все остальные границы рассматривались как свободно охлаждаемые воздухом, для поверхностных элементов определялся соответствующий теплоотвод;
- материал в этом исследовании считался изотропным, а его свойства – зависящими от температуры;

- удельная теплота плавления материала и движение расплава в жидкой фазе не учитывались, так как образующийся на обрабатываемой поверхности расплав составлял незначительный объём.

В работе [15] получено выражение, описывающее распределение плотности мощности лазерного излучения $q(x, y)$, формируемого ДОО в виде уравнения для прямоугольного теплового источника. При мощности излучения $Q = 900$ Вт уравнение принимает вид:

$$q(x, y) = q_0 \cdot \left(3,57 \cdot 10^{-10} \cdot \bar{x}^{-13} - 2,08 \cdot 10^{-7} \cdot \bar{x}^{-12} + 6,61 \cdot 10^{-8} \cdot \bar{x}^{-11} + 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{x}^{-10} - 6,91 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{x}^{-9} - 5,17 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{x}^{-8} + 2,32 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{x}^{-7} + 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}^{-6} - 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}^{-5} - 4,22 \cdot 10^{-2} \cdot \bar{x}^{-4} + 35,01 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}^{-3} - 12,96 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}^{-2} - 0,12 \cdot \bar{x} + 1 \right) \cdot \left(15,13 \cdot \bar{y}^{-4} - 7,24 \cdot \bar{y}^{-2} + 1 \right) \left[\text{Вт/м}^2 \right] \quad (1)$$

где $q_0 = 2,6504 \cdot 10^8$ Вт/м² – плотность мощности в центре теплового источника; $\bar{x} = x / (10^{-3} \text{ м})$; $\bar{y} = y / (10^{-3} \text{ м})$ – безразмерные координаты, $x \in [-4,875 \text{ мм}; 4,875 \text{ мм}]$; $y \in [-0,625 \text{ мм}; 0,625 \text{ мм}]$.

Функция (1) была задана в качестве параметрической подпрограммы, являющейся внешней и расширяющей возможности программирования, позволяя передать числовые параметры из основной программы в подпрограмму. Параметрический подход, используемый в Ansys Multiphysics, основан на возможностях программирования APDL (язык параметрического проектирования Ansys). При осуществлении расчетов 2D-массив, описывающий функцию (1) состоял из 15 столбцов и 124 строк (рисунок 2). Каждая ячейка соответствовала точке на поверхности образца с координатами x и y , которые сохранялись в виде одномерного массива. Распределение плотности мощности теплового источника в этом исследовании принималось постоянным, не зависящим от времени. При расчете предполагалось, что тепловой источник движется с постоянной скоростью в системе координат, связанной со стационарным обрабатываемым объектом.

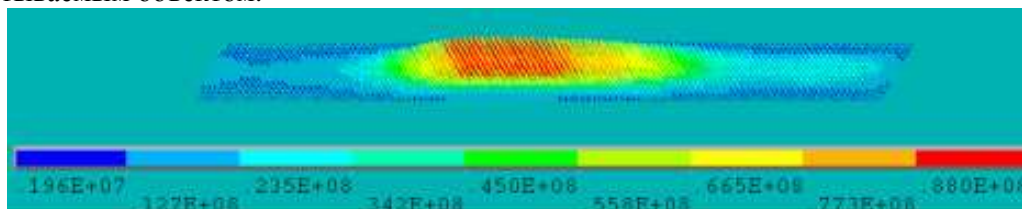


Рисунок 1. Распределение плотности мощности лазерного излучения в программном обеспечении ANSYS (аксонометрическая проекция).

Расчет теплоотдачи от поверхности в модели проводился с учетом комбинированного коэффициента теплоотдачи, представленного в таблице 2, с учётом коэффициентов конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой при нормальных условиях. На рисунке 2 представлены результаты расчета тепловых процессов при обработке двухфазной стали DP1000 лазерным излучением мощностью 600 Вт со скоростью обработки 100 мм / мин, которые демонстрируют изменение температуры на поверхности нагрева при использовании дифракционного оптического элемента. Определены термические циклы нагрева и охлаждения трех точек на обратной поверхности образца на расстояниях 5 мм; 15 мм; 25 мм от начала траектории обработки. Полученные с использованием программы ANSYS Multiphysics R19.1 данные были обработаны для представления в графической форме в программе LibreOffice Calc. На рисунке 3 показано температурное поле на различных расстояниях от начала траектории обработки.

Результаты расчета показывают, что в момент времени обработки 3 с на лицевой поверхности образца имело место начало процесса локального оплавления. Максимальная температура на обратной поверхности возрастает при увеличении времени обработки от 3 с до 15 с в диапазоне (700...1400)°С. Изображения на рисунке 4 получены в открытом графическом

пакете для визуализации ParaView с использованием цветовой палитры RGB. Известно, что спектр теплового излучения зависит от температуры, поэтому наблюдая цвета каления можно визуальнo оценить температуру поверхности образца [15]. Нами разработан конвертер для преобразования полученных при моделировании в программном обеспечении ANSYS данных в формат, совместимый с программой для трёхмерного моделирования, обработки изображений и прикладной визуализации Visualization Toolkit (VTK) и читаемый в пакете для визуализации ParaView. При использовании разработанного конвертера данных, изображения температурных полей на поверхности исследуемых объектов возможно представить с использованием цветовой палитры, которая соответствует цветам каления стали. На рисунке 6 представлены изображения температурного поля на поверхности пластины, полученные в графическом кросс-платформенном пакете для визуализации ParaView с использованием цветовой палитры RGB и цветовой палитры, которая соответствует цветам каления стали.

Таблица 2. Значения комбинированного коэффициента теплоотдачи H_{comb} с учётом коэффициентов конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой.

T [°C]	20	400	800	1200	1500
H_{comb} [Вт м ⁻² К ⁻¹]	13,4	30,7	78,3	172	331,45

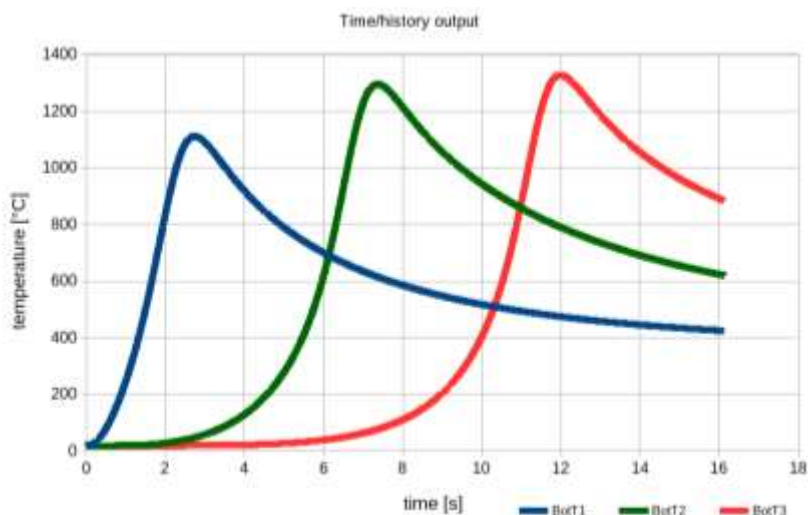


Рисунок 2. Термические циклы нагрева и охлаждения трех точек на обратной поверхности образца на расстояниях 5 мм; 15 мм; 25 мм от начала траектории обработки.

3. Экспериментальные исследования с использованием CO₂-лазера

При выполнении экспериментальных исследований использовался CO₂-лазер “Oerlikon OPL 2000” с максимальной выходной мощностью 2 кВт. Для позиционирования образца использовался координатный стол размером 2000 × 1000 мм, управляемый системой сервоприводов. Для снижения теплоотвода в месте контакта с зажимным приспособлением обрабатываемый образец был помещён в фиксирующий зажим между четырёх керамических пластин толщиной 3 мм. Распределение интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости ДОО определялось с использованием стандартного измерителя мощности. Для проведения исследований использовались образцы из материала DP1000 длиной 125 мм, шириной 45 мм и толщиной 1,5 мм. С целью повышения коэффициента поглощения CO₂-лазерного излучения в качестве поглощающего применялось термостойкое антикоррозионное покрытие толщиной около 30 мкм. Данное покрытие наносилось распылителем из суспензии пигментов и наполнителей в растворе модифицированной полифенилсилоксановой смолы с добавками.

Для визуализации температурного поля на обратной стороне исследуемой пластины использовалась видеокамера Canon EOS 200D. Осуществлялась регистрации цветов каления или цветов свечения раскалённого до температуры более 550°C материала в процессе обработки.

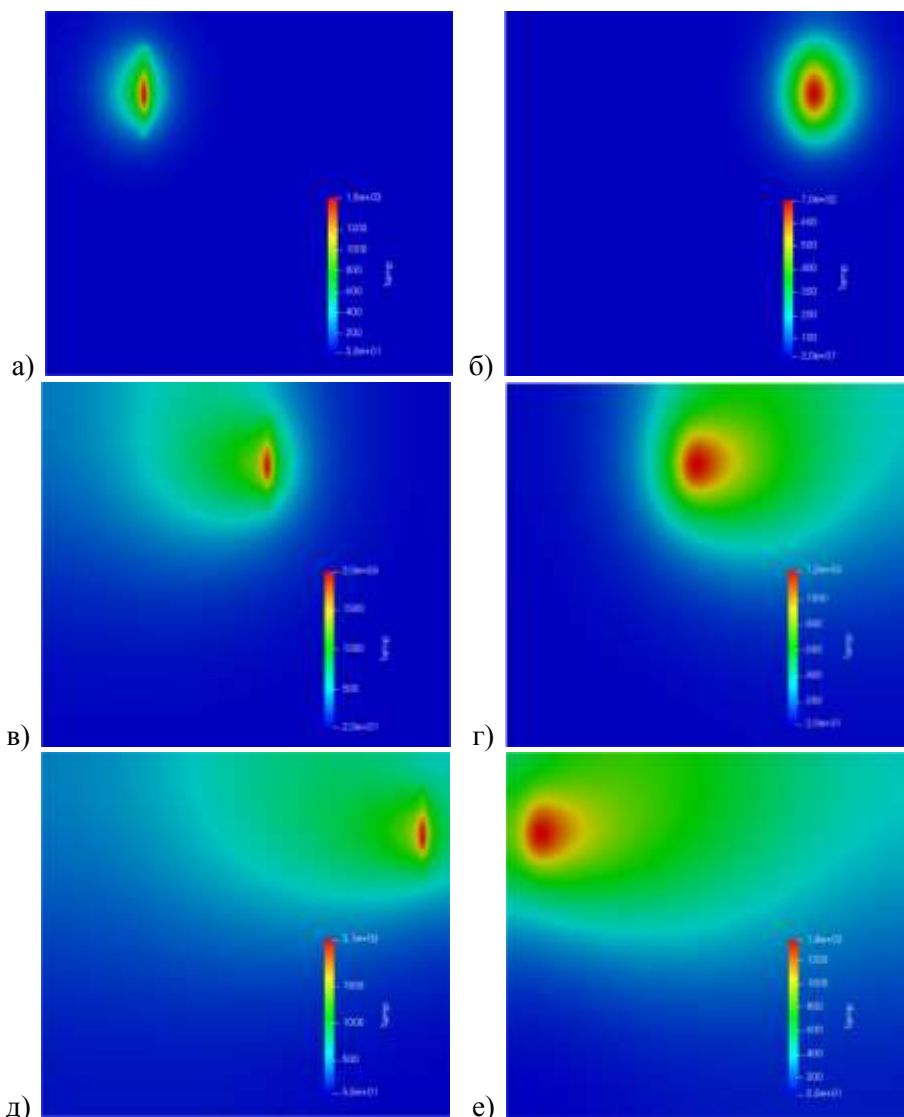


Рисунок 3. Температурное поле: на расстоянии 5 мм от начала траектории обработки для времени обработки 3 с на лицевой (а) и обратной поверхности образца (б); на расстоянии 15 мм от начала траектории обработки для времени обработки 9 с на лицевой (в) и обратной поверхности образца (г); на расстоянии 25 мм от начала траектории обработки для времени обработки 15 с на лицевой (е) и обратной поверхности образца (ж).

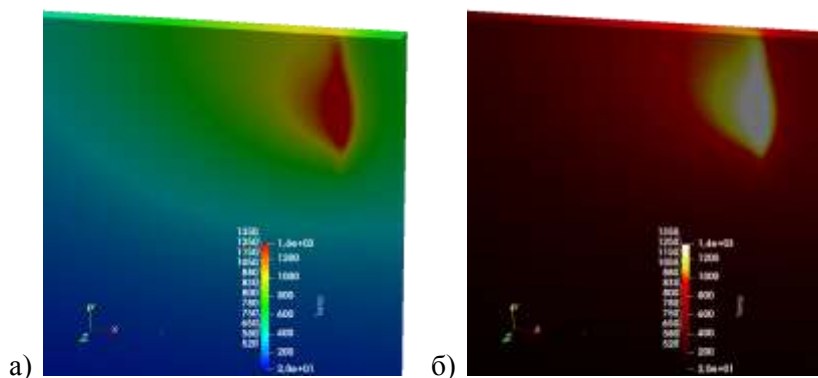


Рисунок 4. Изображения температурного поля на поверхности пластины, полученные в графическом пакете ParaView с использованием цветовой палитры RGB (а) и цветовой палитры, соответствующей цветам калиения стали (б).

Для повышения точности определения температур на обратной стороне пластины размещались три термопары диаметром 0,254 мм. Использовались хромель-алюмелевые термопары (тип К) общего назначения с рабочим диапазоном от -200°C до $+1350^{\circ}\text{C}$ (от -330°F до $+2460^{\circ}\text{F}$). Термопары были последовательно приварены на расстояниях 5 мм; 15 мм; 25 мм от начала траектории обработки. Прямые измерения с помощью термопар показали результаты аналогичные тем, которые были получены при анализе изображений. На рисунке 5 представлены температурное поле на расстоянии 33 мм от начала траектории обработки для времени обработки 19,8 с на обратной поверхности образца, полученное в результате расчета (цветовая палитра, соответствующая цветам каления стали) и с помощью видеокамеры Canon EOS 20 при проведении экспериментальных использований.

4. Заключение

Осуществлено моделирование температурного поля при лазерной обработке поверхности стали DP1000 с использованием дифракционных оптических элементов. Сформированный с помощью ДОЭ профиль интенсивности излучения представлен в виде аналитического выражения, используемого для задания поверхностного теплового источника.

Для моделирования применялся метод конечных элементов (FEM), который является наиболее широко используемым методом для решения задач инженерных и математических моделей. Среди доступных программ на основе FEM была выбрана ANSYS Multiphysics R19.1.

Разработан конвертер для преобразования полученных при моделировании в программном обеспечении ANSYS данных, при использовании которого изображения температурных полей на поверхности исследуемых объектов возможно представить с использованием цветовой палитры, которая соответствует цветам каления стали.

Выполнены экспериментальные исследования образцов при лазерном нагреве с использованием CO_2 -лазера. Для повышения коэффициента поглощения излучения в качестве поглощающего применялось термостойкое антикоррозионное покрытие толщиной около 30 мкм, полученное из суспензии пигментов и наполнителей в растворе модифицированной полифенилсилоксановой смолы. Результаты моделирования хорошо коррелируют с экспериментальными данными.

Предложенная расчетная модель, основанная на точном определении тепловыделения, является промежуточным шагом к конечной цели, которой является прогнозирование структурных изменений в зоне лазерного воздействия.

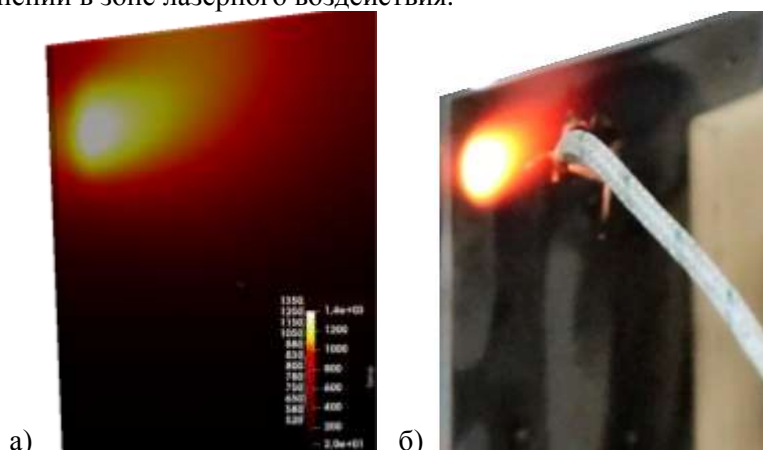


Рисунок 5. Температурное поле на расстоянии 33 мм от начала траектории обработки для времени обработки 19,8 с на обратной поверхности образца, полученное в результате расчета (а) и с помощью видеокамеры Canon EOS 20 при проведении экспериментальных использований (б).

5. 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.

6. Литература

- [1] Ahn, Y.-N. Analysis of laser weldments for dual-phase and martensitic steel sheets for automotive applications / Y.-N. Ahn, M. Kang, C. Kim // Defect Diffus. Forum – 2014. – Vol. 353. – P. 8-12. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.353.8.
- [2] Wei, C. Improving formability of laser welded automotive dual phase steels with local cooling / C. Wei, J. Zhang, S. Yang, L. Sun, W. Tao, F. Wu, W. Xia // Sci. Technol. Weld. Joi. – 2015. – Vol. 20(2). – P. 145-154. DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000263.
- [3] 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. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-659-667.
- [4] Baltazar Hernandez, V.H. Nanoindentation and microstructure analysis of resistance spot welded dual phase steel / V.H. Baltazar Hernandez, S.K. Panda, M.L. Kuntz, Y. Zhou // Mater. Lett. – 2010. – Vol. 64(2). – P. 207-210. DOI: 10.1016/j.matlet.2009.10.040.
- [5] Kundu, J. Effect of the laser power on the mechanical performance of the laser spot welds in dual phase steels / J. Kundu, T. Ray, A. Kundu, M. Shome // J. Mater. Process. Tech. – 2019. – Vol. 267. – P. 114-123. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.12.014.
- [6] Ashrafi, H. Microstructure, tensile properties and work hardening behavior of GTA-welded dual-phase steels / H. Ashrafi, M. Shamanian, R. Emadi, N. Saeidi // J. Mater. Eng. Perform. – 2017. – Vol. 26(3). – P. 1414-1423. DOI: 10.1007/s11665-017-2544-7.
- [7] Mechanical properties of heat treated steel, Technical Report N1.97BC.07.0178, SSAB, 2012.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] 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.
- [13] 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.
- [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. 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.

Modeling of temperature fields in DP1000 steel during laser treatment using diffractive optical elements

R. Bielak¹, S.P. Murzin^{1,2}, G. Liedl¹, A. Otto¹, N.L. Kazanskiy^{2,3}

¹TU Wien, Institute of Production Engineering and Photonic Technologies, Getreidemarkt 9, Vienna, Austria, 1060

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

³Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 4430011

Abstract. Diffractive optical elements (DOEs) with their unique properties allow to form a predetermined beam intensity profile in the focal plane. The use of DOEs in laser material processing technologies reveals new possibilities for controlling the properties and operational characteristics of processed parts. The beam intensity profile formed by DOE is presented in the form of an analytical expression that used to set a surface heat source for modeling thermal processes in DP1000 steel. Experimental studies of samples under laser heating were performed. Simulation output results correlate well with the experimental data. The proposed simulation model, based on a precise heat input definition, is an intermediate step to the final goal, which is the prediction of structural changes in the zone of laser beam irradiation.