

Расчет тепловых процессов при лазерной обработке двухфазной стали с использованием элемента дифракционной компьютерной оптики

С.П. Мурзин^{1,2}, А.Ю. Тисарев¹, М.В. Блохин¹

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

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования формирования CO₂-лазерного излучения отражающим дифракционным оптическим элементом. Получена формула, которая описывает распределение плотности мощности в форме уравнения для источника теплоты прямоугольной формы. Выполнен расчёт с использованием вычислительного кластера «Сергей Королёв» тепловых процессов при лазерном воздействии с учётом изменения коэффициента поглощения поверхности обрабатываемого материала. Для определения температурных полей, имеющих место при лазерной обработке двухфазной стали DP 1000, использовалась программа вычислительной газодинамики CFX версии 15.0. Выявлено, что при выбранном режиме обработки и значении интегральной величине поглощения покрытия равном 0,5 максимальная температура на лицевой поверхности превышает температуру ликвидуса обрабатываемого листового материала, а на обратной стороне находится в диапазоне белого каления.

1. Введение

Эффективность функционирования технической системы определяется ее свойствами и степенью полноты их использования при эксплуатации [1]. Повышение безопасности транспортного средства, как сложной технической системы [2, 3], включает в себя комплекс конструктивных и эксплуатационных мероприятий, снижающих вероятность дорожно-транспортных происшествий и тяжесть их последствий. При проектировании кузова современного автомобиля, являющегося существенным элементом системы пассивной безопасности [4, 5], применяется общий принцип, который заключается в том, чтобы при столкновении салон автомобиля остался бы максимально неповрежденным, в то время как передняя и задняя части были бы способны деформироваться, поглощая энергию. Перспективно чередование локальных участков упрочнённого и разупрочнённого материала.

В настоящее время все большее применение находят двухфазные ферритно-мартенситные стали, которые имеют высокую прочность на разрыв из-за относительно твердой мартенситной фазы и низкий начальный предел текучести из-за относительно мягкой ферритной фазы [6-8]. Двухфазные стали характеризуются структурно-чувствительными свойствами и могут быть модифицированы с использованием различных комбинаций параметров нагрева и охлаждения.

При этом их свойства могут также существенно изменяться в результате упрочнения при проведении формообразующих операций. Прогрессивным направлением является выявление и создание условий для регулируемой селективной модификации материалов с ферритной-мартенситной структурой лазерным воздействием с контролируемым распределением плотности мощности излучения. Ключевым компонентом является формирование излучения и точное дозирование подачи энергии. Значительно сократить количество экспериментальных исследований при отработке режимов технологических процессов позволяет эффективное моделирование результатов лазерного воздействия на основе создаваемого и совершенствуемого программного обеспечения.

Возможность создания светового пятна в виде рисунка или области с конкретным распределением плотности мощности лазерного излучения предоставляют дифракционные оптические элементы [9-12]. Такие оптические элементы позволяют обеспечить одновременное сочетание таких свойств, как высокая надежность, концентрация всей энергии лазерного излучения в зоне воздействия заданной формы и создание требуемого распределения плотности мощности. Созданные оптические элементы предоставляют возможность сформировать заранее заданный профиль интенсивности излучения в фокальной плоскости при осуществлении выбранного на этапе их расчета преобразование лазерной энергии. Дополнительное перераспределение мощности излучения к краям светового пятна возможно осуществить за счет увеличения доли энергии, отраженной периферийными зонами дифракционного оптического элемента, например, путем увеличения диаметра фокусируемого пучка [13-16].

В работе [17] выполнены экспериментальные исследования формирования CO_2 -лазерного излучения отражающим дифракционным оптическим элементом. Обосновано применение дифракционных оптических элементов для формирования лазерного излучения и точного дозирования подводимой энергии. Показано, что термическое воздействие можно регулировать при изменении параметров пучка лазерного излучения и условий обработки. 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. Целью настоящей работы является осуществление расчета с использованием вычислительного кластера «Сергей Королёв» тепловых процессов при лазерной обработке с применением элемента дифракционной компьютерной оптики двухфазной стали DP 1000 с учётом изменения коэффициента поглощения путём подбора значения интегральной величины поглощения поверхности.

2. Определение распределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости элемента дифракционной компьютерной оптики

Для формирования луча использовался отражающий дифракционный оптический элемент, формирующий излучение в световое пятно в виде отрезка прямой линии в фокальной плоскости и имеющий следующие параметры: $L_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$ м; $r = 0,7R$; $f = 0,2241$ м; $R = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м, где L_0 – принятая при расчете длина фокального отрезка; f – фокусное расстояние оптического элемента; R – максимальный радиус фокусируемого луча; r – параметр фокусируемого луча гауссовского распределения плотности мощности, в котором плотность мощности на расстоянии r от центра уменьшается в e раз по сравнению с плотностью мощности в центре.

Экспериментальное определение распределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости элемента дифракционной компьютерной оптики осуществлялось с использованием CO_2 -лазера «BYSTAR 2512» с излучателем ВТЛ 1800, имеющего в режиме генерации TEM_{01} -моды поперечное сечение пучка в виде эллипса [17]. Мощность излучения составляла 600 Вт. Измерение распределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента проводилось калориметрическим измерителем мощности. На рисунке 1 представлено экспериментально определенное распределение плотности мощности излучения вдоль оси Ox в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента при мощности излучения $Q = 600$ Вт.

Представим $q(x, y)$ в виде уравнения:

$$q(x, y) = q_0 (a_n \bar{x}^{-n} + a_{n-1} \bar{x}^{-(n-1)} + \dots + a_2 \bar{x}^{-2} + a_1 \bar{x}^{-1} + a_0) \cdot (b_m \bar{y}^{-2m} + b_{m-1} \bar{y}^{-2(m-1)} + \dots + b_2 \bar{y}^{-4} + b_1 \bar{y}^{-2} + b_0) \quad (1)$$

где q_0 – плотность мощности в центре теплового источника; $\bar{x} = x/(10^{-3}\text{м})$; $\bar{y} = y/(10^{-3}\text{м})$ – безразмерные координаты; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_0$; $b_m, b_{m-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$ – коэффициенты полиномов (степенных многочленов), где n и m целые числа.

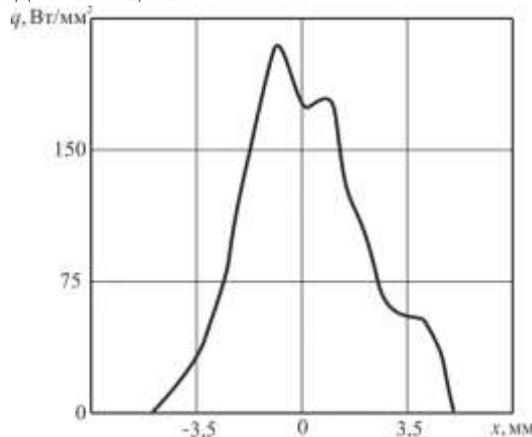


Рисунок 1. Распределение интенсивности вдоль оси Ox [17] в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента при мощности излучения $Q = 600$ Вт.

Для представленного на рисунке 1 распределения плотности мощности излучения в программе Matlab определены значения коэффициентов уравнения (1): $n = 13$; $m = 2$; $a_{13} = 3,57 \cdot 10^{-10}$; $a_{12} = -2,08 \cdot 10^{-7}$; $a_{11} = 6,61 \cdot 10^{-8}$; $a_{10} = 1,68 \cdot 10^{-5}$; $a_9 = -6,91 \cdot 10^{-6}$; $a_8 = -5,17 \cdot 10^{-4}$; $a_7 = 2,32 \cdot 10^{-4}$; $a_6 = 7,33 \cdot 10^{-3}$; $a_5 = -3,87 \cdot 10^{-3}$; $a_4 = -4,22 \cdot 10^{-2}$; $a_3 = 35,01 \cdot 10^{-3}$; $a_2 = 12,96$; $a_1 = 0,12$; $a_0 = 1$; $b_2 = 15,13$; $b_1 = -7,2412$; $b_0 = 1$; $q_0 = 1,7597 \cdot 10^8$ Вт/м².

Получим выражение, описывающее распределение плотности мощности $q(x, y)$ в виде уравнения для прямоугольного теплового источника при мощности излучения $Q = 600$ Вт:

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

при $q_0 = 1,7597 \cdot 10^8$ Вт/м²; $x \in [-4,875 \text{ мм}; 4,875 \text{ мм}]$; $y \in [-0,625 \text{ мм}; 0,625 \text{ мм}]$.

3. Построение математической модели тепловых процессов лазерной обработки двухфазной стали с применением ДОЭ

Поглощение энергии лазерного излучения зависит от различных факторов, одними из которых являются исходная шероховатость обрабатываемой поверхности, температура поверхности и длина волны лазерного излучения. Коэффициент поглощения в зависимости от состояния поверхности может изменяться на величину порядка десятков процентов. В этом случае при проведении расчетов тепловых процессов одним из возможных решений может быть использование фактической температуры объекта для повторного вычисления коэффициента

поглощения и поглощенной энергии излучения, которая должна использоваться в качестве поверхностного теплового источника на каждой последующей итерации. Известно, что металлические материалы обладают высоким коэффициентом отражения излучения CO₂-лазеров. Поэтому использовалось поглощающее покрытие, в качестве которого было выбрано термостойкое антикоррозионное покрытие толщиной около 30 мкм, нанесенное распылителем из суспензии пигментов и наполнителей в растворе полифенилсилоксановой смолы, модифицированной сополимером бутилметакрилата и метакриловой кислоты с целевыми добавками.

Расчет проведен с использованием вычислительного кластера «Сергей Королев», система которого построена на базе линейки оборудования IBM BladeCenter с использованием HS22 блейд-серверов и обеспечивает пиковую производительность 30 триллионов операций с плавающей точкой в секунду (30 ТФлопс). Для определения температурных полей, имеющих место при лазерной обработке двухфазной стали DP 1000, использовалась программа вычислительной газодинамики CFX версии 15.0. Построена конечно-объемная модель задачи нагрева листового материала толщиной до 3 мм движущимся распределённым поверхностным тепловым источником в виде установленного перпендикулярно траектории движения отрезка прямой линии. В расчётной модели тепловое действие поглощенного лазерного излучения может быть задано либо массивом 39×5 точечных источников с шагом 0,25 мм, либо в виде уравнения (2) для прямоугольного теплового источника. Целью расчёта тепловых процессов являлось определение режимов лазерной обработки. Для моделирования охлаждения за счёт радиационного и конвективного теплообмена построена модель воздушной области. Определялось температурное поле в поперечном и продольном сечениях зоны термического влияния технологического объекта. Для определения температурного поля в обрабатываемом материале использовались расчетные модели: модель турбулентности - SST, модель термогравитационной конвекции - Buoyancy model, модель теплопереноса за счёт излучения - Discrete Transfer (Surface to Surface), модель теплообмена - Total Energy.

Построена математическая модель, которая представляет собой сопряжённую теплогидравлическую модель, описывающую две области: область пластины и окружающей её воздушной среды. Теплопроводность и удельная теплоёмкость металлического материала заданы в табличном виде в интервале температур до 1200°C. Физические свойства воздушной среды также определены в зависимости от температуры. Сетка конечных объёмов воздушной области выполнена с разрешением в области пограничного слоя таким образом, чтобы значения \bar{u} составляли не более 1. Фактор роста выбран 1,2 при количестве слоёв 24. Количество элементов – 15,3 млн. Сетка конечных элементов пластины выполнена регулярной с шагом разбиения 0,15 мм и 10 элементами по толщине. Количество элементов – 2,5 млн. В качестве начальных условий принято, что давление воздушной среды и температура на внешней границе обрабатываемого объекта соответствуют стандартным атмосферным условиям. Расчёт проводился для скорости обработки 100 мм/мин. При решении задачи теплопроводности толщина поглощающего покрытия не учитывалась. Принималось допущение, что поглощающее покрытие влияет только на коэффициент поглощения поверхности материала.

В реальных условиях, при выгорании связующих веществ покрытия имеет место существенное снижение коэффициента поглощения, которое в зависимости от интенсивности лазерного излучения может быть либо скачкообразным, либо постепенным. Учёт изменения коэффициента поглощения осуществлялся путём подбора значения интегральной величины поглощения. Тепловой расчёт проводился в нестационарной постановке для значений интегральной величины поглощения покрытия: 0,4, 0,5 и 0,6. В работе было принято допущение, что описание теплообмена для области материала, претерпевающего фазовые превращения, происходит при значении коэффициента теплопроводности, соответствующему твёрдой фазе материала, хотя обычно для материалов теплопроводность при изменении агрегатного состояния может изменяться достаточно сильно и скачкообразно. Расчётная схема представлена на рисунке 2.

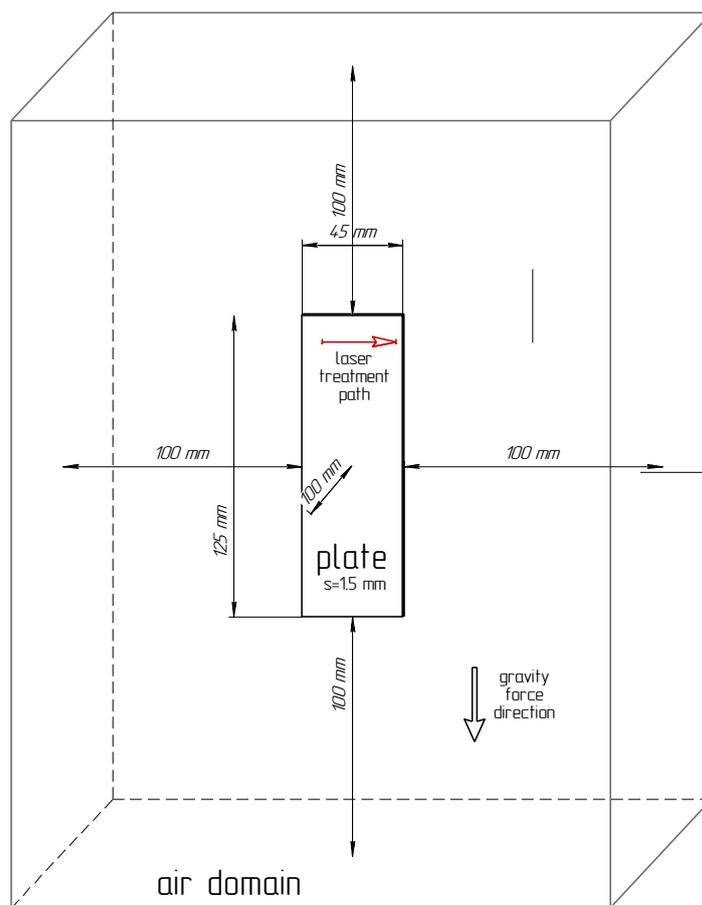


Рисунок 2. Расчётная схема.

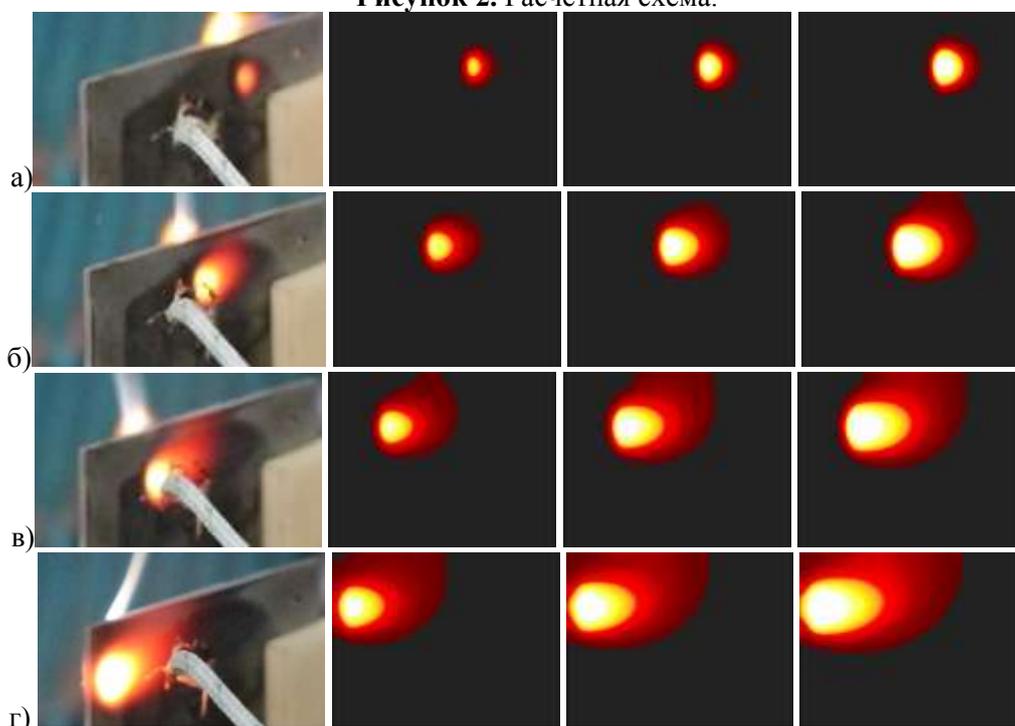


Рисунок 3. Распределение температур на обратной стороне обрабатываемой пластины из стали DP 1000 толщиной 1,5 мм в соответствии с таблицей цветов калиения стали в момент времени от начала обработки: 5 сек (а), 10 сек (б), 15 сек (в), 20 сек (г). Значение интегральной величины поглощения покрытия составляет: 0,4, 0,5 и 0,6 (слева направо).

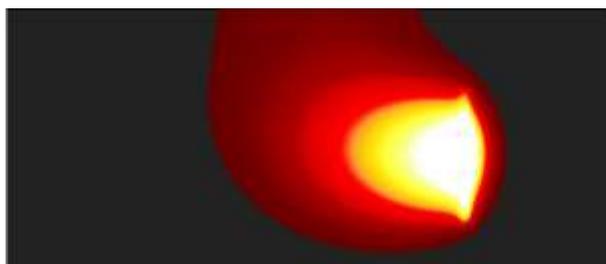


Рисунок 4. Распределение температуры на лицевой стороне обрабатываемого материала для момента времени 15 секунд от начала обработки при значении интегральной величины поглощения поверхности 0,5.

Полученные результаты расчёта температур на обратной стороне обрабатываемой пластины из стали DP 1000 толщиной 1,5 мм представлены на рисунке 3 в соответствии с таблицей цветов каления стали в диапазоне температур 550–1300 °С. Сравнение результатов расчёта и экспериментальных исследований, представленных на рисунке 3, позволяет определить значение интегральной величины поглощения, которое составляет 0,5. При всех рассматриваемых значениях величины поглощения в момент времени 15 секунд от начала обработки на обратной стороне пластины температура достигает величины выше 1300 °С, что соответствует белому цвету каления. Максимальная температура на лицевой поверхности пластины выше температуры солидуса, которая для двухфазной стали DP 1000 составляет 1741°С. Ширина оплавленной зоны на обрабатываемой поверхности для момента времени 15 секунд от начала обработки составляла 5,8 мм при значении интегральной величины поглощения поверхности 0,5, что хорошо коррелирует с результатами экспериментальных исследований. Распределение температур в цветах каления на лицевой стороне обрабатываемого материала представлено на рисунке 4.

4. Заключение

Выполнены экспериментальные исследования формирования CO₂-лазерного излучения отражающим дифракционным оптическим элементом. Получена формула, которая описывает распределение плотности мощности в форме уравнения для источника теплоты прямоугольной формы. Выполнен расчёт с использованием вычислительного кластера «Сергей Королёв» тепловых процессов при лазерном воздействии на двухфазную сталь DP 1000 с учётом изменения коэффициента поглощения поверхности обрабатываемого материала.

Для определения температурных полей, имеющих место при лазерной обработке двухфазной стали, использовалась программа вычислительной газодинамики CFX версии 15.0. Использовались расчетные модели: модель турбулентности - SST, модель термогравитационной конвекции - Buoyancy model, модель теплопереноса за счёт излучения - Discrete Transfer (Surface to Surface), модель теплообмена - Total Energy. Выявлено, что при выбранном режиме обработки и степени поглощения покрытия 0,5 максимальная температура на лицевой поверхности превышает температуру ликвидуса обрабатываемого листового материала, а на обратной стороне находится в диапазоне температуры белого каления.

Показано, что температура может в значительной степени влиять на протекание процессов в обрабатываемых материалах. Данные подходы к построению модели тепловых процессов также могут быть использованы при реализации возможности формирования наноструктур металлических материалов при лазерном воздействии.

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] Алиев, Т.И. Основы проектирования систем – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 120 с.
- [2] Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
- [3] Александровская, Л.Н. Надежность и безопасность структурно-сложных систем: учеб. пособие для вузов / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов, Н.Н. Патраков, А.М. Шолом – М.: Логос, 2008. – 248 с.
- [4] Schilling, R. Numerical analysis of new material applications for passive safety / R. Schilling, M. Paas, H. Lanzerath, J. Wesemann // VDI Berichte – 2000. – Vol. 1559. – P. 299-324.
- [5] Sapragonas, J. Research into elements of the multifunctional deformation zones of a car body / J. Sapragonas, D. Juodvalkis, R. Makaras, R. Kersys // Mechanika – 2013. – Vol. 19(2). – P. 191-196. DOI: 10.5755/j01.mech.19.2.4170.
- [6] Al-Abbasi, F.M. Characterizing DP-steels using micromechanical modeling of cells / F.M. Al-Abbasi, J.A. Nemes // Comput. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 39(2). – P. 402-415. DOI: 10.1016/j.commatsci.2006.07.003.
- [7] Amirmaleki, M. 3D micromechanical modeling of dual phase steels using the representative volume element method / M. Amirmaleki, J. Samei, D.E. Green, I. van Riemsdijk, L. Stewart // Mech. Mater. – 2016. – Vol. 101. – P. 27-39. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.07.011.
- [8] Huang, T.T. Strain-hardening behaviors of dual phase steels with microstructure features / T.T. Huang, R.B. Gou, W.J. Dan, W.G. Zhang // Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater. – 2016. – Vol. 672. – P. 88-97. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.066.
- [9] Dосколович, Л.Л. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Dосколович, N.L. Kazansky, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // J. Mod. Optic. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1423-1433. DOI: 10.1080/09500349608232815.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

Calculation of thermal processes during laser treatment of dual phase steel using element of diffractive computer optics

S.P. Murzin^{1,2}, A.Yu. Tisarev¹, M.V. Blokhin¹

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

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

Abstract. Experimental studies of the formation of CO₂ laser beam by a reflective diffractive optical element have been performed. A formula is obtained that describes the distribution of power density in the form of an equation for a rectangular-shape heat source. Calculation of thermal processes under laser action was made, taking into account changes in the absorption coefficient of the surface of the processed material using the computer cluster “Sergey Korolev”. To determine temperature fields that occur during laser treatment of the dual phase steel DP 1000, the CFX version 15.0 computational gas dynamics program was used. It was revealed that for the selected processing mode and the integrated value of coating absorption of 0.5, the maximum temperature on the front surface exceeds the liquidus temperature for the processed sheet material, and on the back side is in the range of white heat.