

УДК 539.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id-170

А.И. Веремейчик

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛЕЙ



Андрей Иванович Веремейчик,
Брестский государственный технический университет
Беларусь, Брест
Тел.: (162)32-1742, E-mail: vai_mrtm@bstu.by.

Аннотация

В работе проведено компьютерное моделирование лазерной закалки стальных образцов с использованием вычислительного комплекса *ANSYS Workbench*. Выполнен расчет температурного поля, индуцированного лазерным излучением. Исследовано влияние основных технологических параметров процесса обработки (радиус лазерного пятна, скорость движения пятна) на распределение полей температур в зоне термического влияния.

Ключевые слова: лазер, закалка, температурное поле, пятно, скорость.

Введение

Перспективным методом упрочнения поверхностного слоя деталей машин и механизмов является лазерная закалка, при которой источником нагрева является лазерное излучение. Лазерная закалка характеризуется локальным нагревом участка поверхности под воздействием излучения и последующим быстрым охлаждением этого поверхностного участка в результате отвода теплоты во внутренние слои металла. Сущность лазерной закалки заключается в превращении при быстром охлаждении градиентированной кристаллической решетки аустенита в объемно-центрированную кристаллическую решетку мартенсита [1, 2]. При этом важным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит от уровня и скорости нагрева и следующего

за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение [1–17].

Методы

Образцы из стали 40Х13 были подвергнуты обработке высокoэнергетической струей лазера в лаборатории плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета, в процессе которой производилась их закалка. Обработка проводилась с помощью волоконного иттербиевого лазера непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG (тип YLR-1) (рис. 1) [8–10]. В процессе обработки образцов мощность лазера составляла 1 кВт, радиус лазерного пятна составлял 0.35...3 мм, скорость его движения вдоль дорожки варьировалась от 100 до 20000 мм/мин.

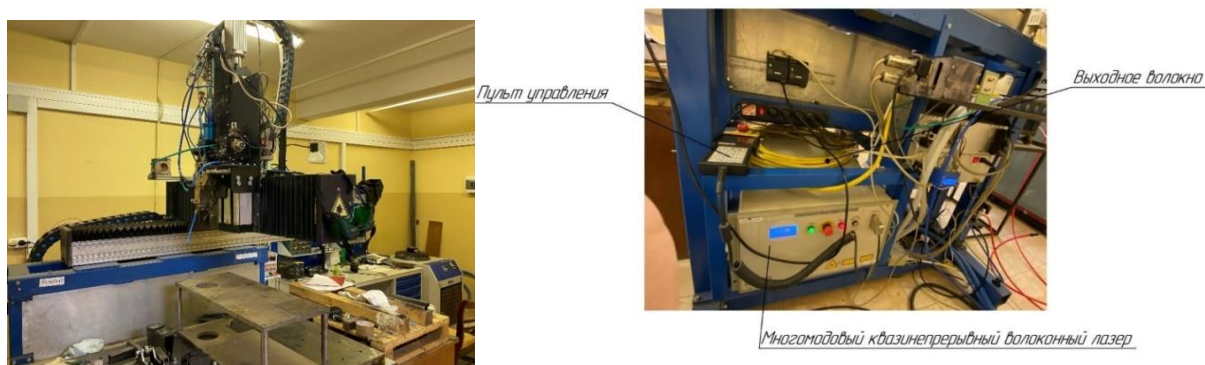


Рис. 1. Волоконный иттербиевый лазер непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG



Рис. 2. Схема обработки

Распределение температурных полей в образце при лазерном излучении определяется из уравнения Фурье:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = q_v,$$

где $C_v = C_p \cdot \rho$ – объемная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$; C_p – удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ – коэффициент

теплопроводности, $\frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$; q_v – объемная плотность теплового потока источника тепла, $\frac{Bm}{m^3}$.

Рассмотрим задачу нагрева движущимся тепловым источником (лазерным пучком) мощностью P радиуса r . Учитывая, что в общем случае теплофизические характеристики материала являются функциями температуры, координат и времени, дифференциальное уравнение теплопроводности (1) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + v \rho C_p \text{grad} T - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = q_v, \quad (2)$$

Граничные условия задаются конвекцией с воздухом и тепловым излучением, описываемым законом Стефана–Больцмана:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_0 - T) + \varepsilon \sigma(T_0^4 - T^4), \quad (3)$$

где v – скорость движения источника тепла, $\frac{m}{c}$; T_0 – температура окружающей среды, $^\circ C$; ε – излучательная способность поверхности; α – коэффициент конвекции, $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Для моделирования распространения температуры вглубь детали при лазерной закалке создан макрос для *ANSYS Mechanical* на языке программирования *APDL*, в котором задаются характеристики температурной нагрузки, скорость движения источника нагрева, координаты его начального положения, время движения и др. В соответствии со скоростью движения лазера к узлам конечно-элементной модели вдоль режущего лезвия пошагово прикладывалась температурная нагрузка. В *APDL*-макросе для учета тепловой нагрузки использовалась зависимость:

$$q = A q_H \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0 - vt)^2}{r_H^2} \right], \quad (4)$$

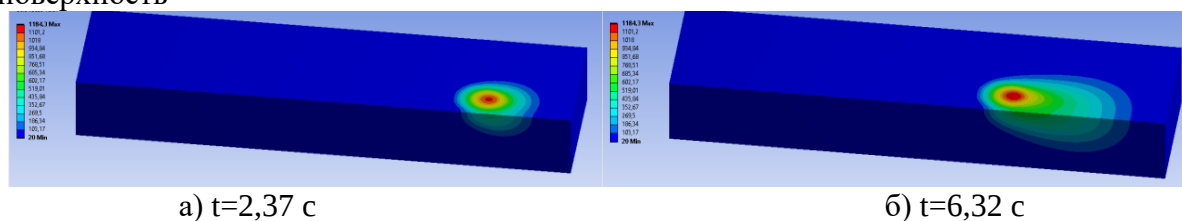
где $q_H = \frac{P}{\pi r_H^2}$ – плотность теплового потока на поверхности, $\frac{Bm}{m^2}$; r_H – радиус пятна нагрева, m ; x, y – координаты центра пятна нагрева, m ; x_0, y_0 – начальные координаты центра пятна нагрева, m ; v – скорость движения источника тепла, m/c ; A – поглощательная способность материала, зависящая от свойств материала, состояния поверхности, температуры и длины волны. Начальная температура принималась равной $20^\circ C$, эффективная мощность лазера $P = 1 \text{ кВт}$.

На поверхностях модели задавалась конвекция с различными коэффициентами $\alpha = (5-30) \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$. Численный эксперимент проводился при радиусах пятна нагрева 0,35–15 мм и скоростях движения источника нагрева $v=600-20000$ мм/мин. Теплофизические характеристики материала задавались зависящими от температуры в соответствии с [2].

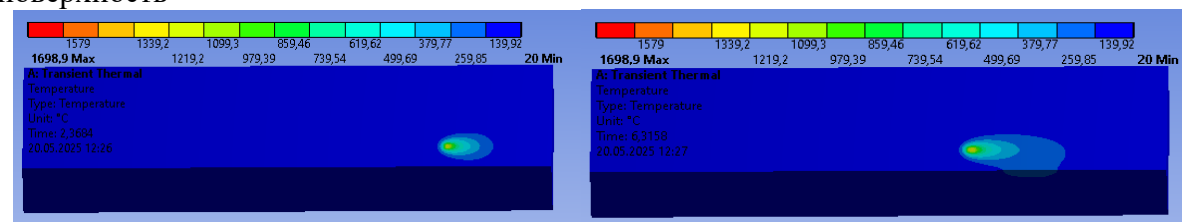
Результаты

В результате теоретических исследований модели в широком диапазоне параметров было получено решение задачи нестационарной теплопроводности. Некоторые результаты численного расчета температур приведены на рис. 3–6.

поверхность



поверхность



продольное сечение

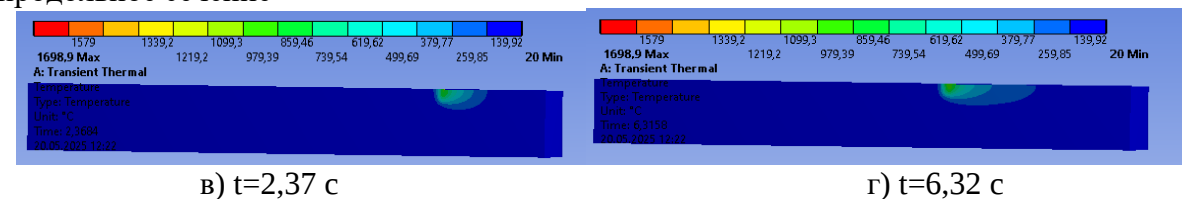


Рис.3. Характерное распределение температурного поля ($^\circ C$) на поверхности модели и в продольном сечении вдоль ось движения пятна в различные моменты времени при $v=600$ мм/мин; а, б – $r_H = 2$ мм, в, г – $r_H = 1$ мм

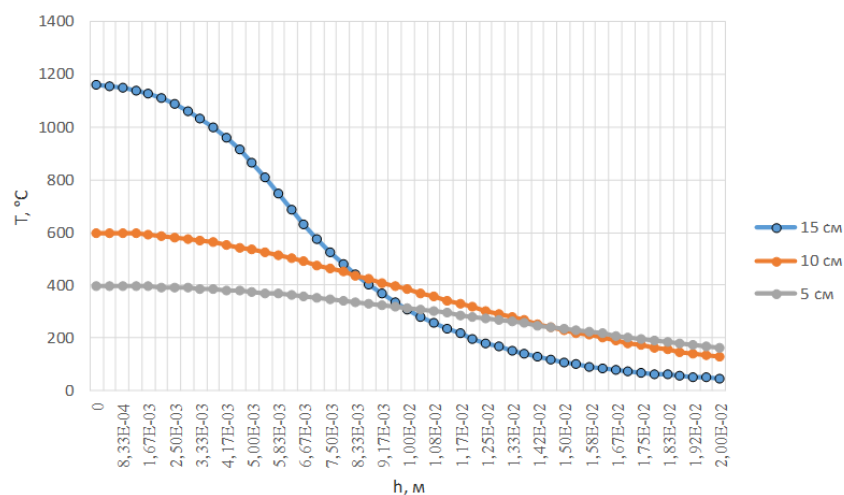


Рис. 4. Зависимость температуры от глубины в точках с различными координатами в момент времени $t=15$ с, $v=600$ мм/мин, $r_H = 2$ мм

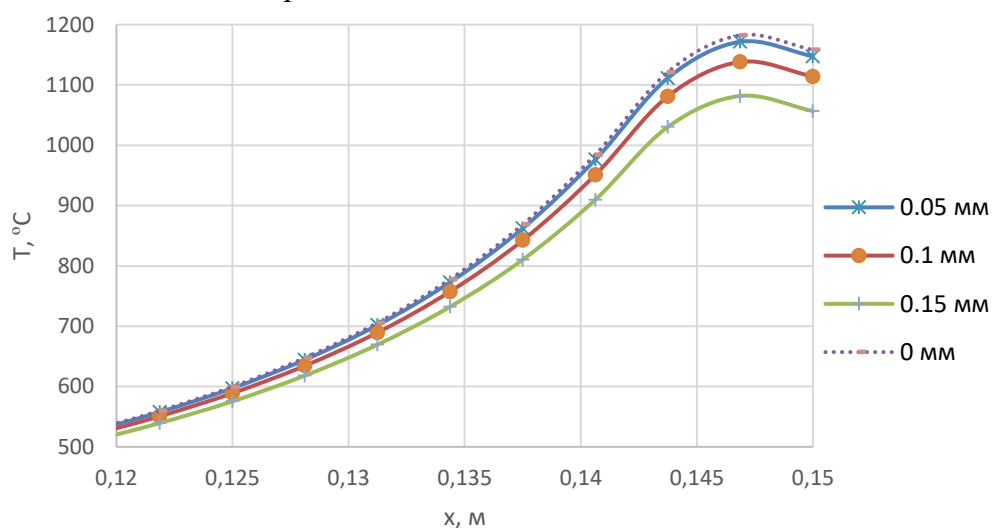


Рис. 5. Зависимость температуры от координаты вдоль траектории движения центра пятна нагрева на различных расстояниях от поверхности обработки, $v=600$ мм/мин, $r_H = 2$ мм

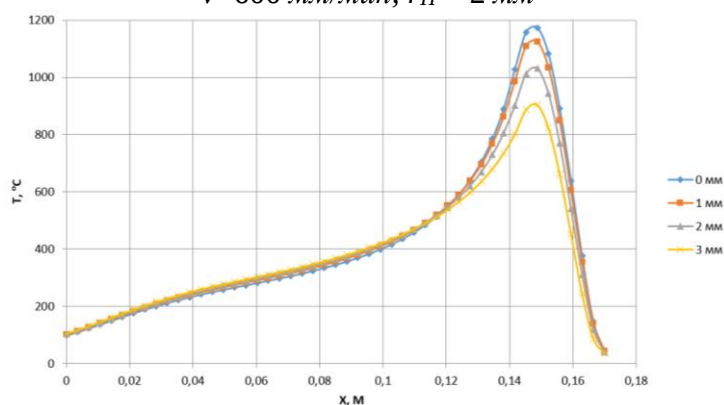


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры на поверхности от координаты для различных линий, параллельных траектории движения центра пятна при $t=15$ с, $v=600$ мм/мин, $r_H = 2$ мм

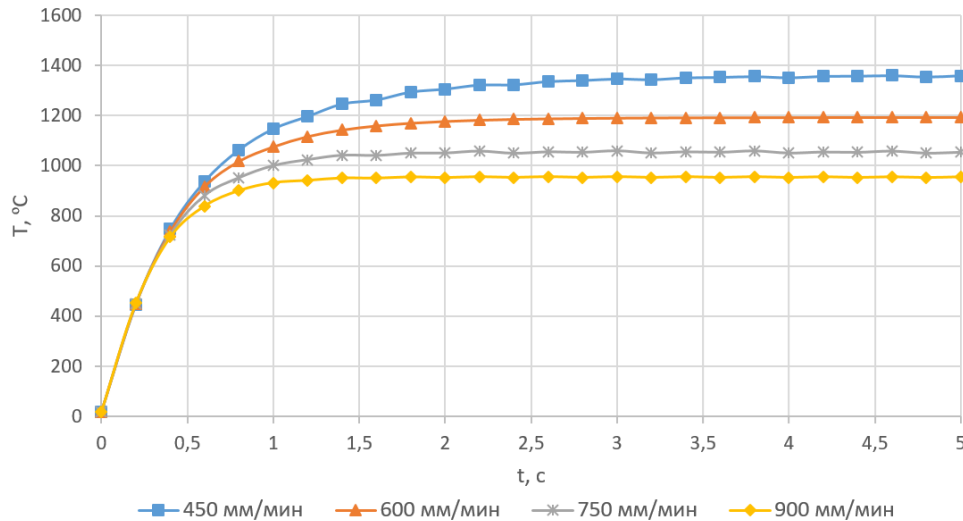


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры на поверхности от времени для различных скоростей движения пятна нагрева, $r_H = 2 \text{ мм}$

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, а также с использованием разработанной программы на языке *FORTRAN*, позволяющей исследовать температурное поле в зоне термического влияния при действии движущегося нормально-кругового источника тепла. При составлении программы принято, что изменение структуры материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, поэтому в качестве объекта теплового нагружения рассматривается полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи теплопроводности и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла. Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами x_0 , y_0 , z_0 , температурное поле в любой точке тела в заданный момент времени описывается выражением

$$T(r, t) = \frac{Q}{8\lambda\sqrt{a}(\pi t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (5)$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, Дж; $a = \lambda/(C_p \rho)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с; $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки с координатами x , y , z , м. В формуле (5) T представляет собой приращение температуры над ее исходным уровнем [15].

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (5) в пределах этой поверхности S :

$$T_S(r,t) = \int \left(\int T(r,t) ds \right) d\xi, \quad (6)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi = 0$.

В случае движения с постоянной скоростью v вдоль оси Ox источника с нормально-круговым распределением интенсивности исходящего потока выражение (2) примет вид [15]:

$$T(x,y,z,t) = \left[2P \exp\left(-\frac{vx}{a}\right) \left(c\gamma(4\pi a)^{3/2} \right) \right] \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \times \\ \times \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a} \right] d\xi. \quad (7)$$

Для экспериментального определения температурного поля на поверхности материала в зоне действия лазерного луча применялся компьютеризированный высокотемпературный трехзональный тепловизор ИТ-3СМ.

На рис. 8 приведен типичный график теоретических и экспериментальных значений температур на поверхности образца.

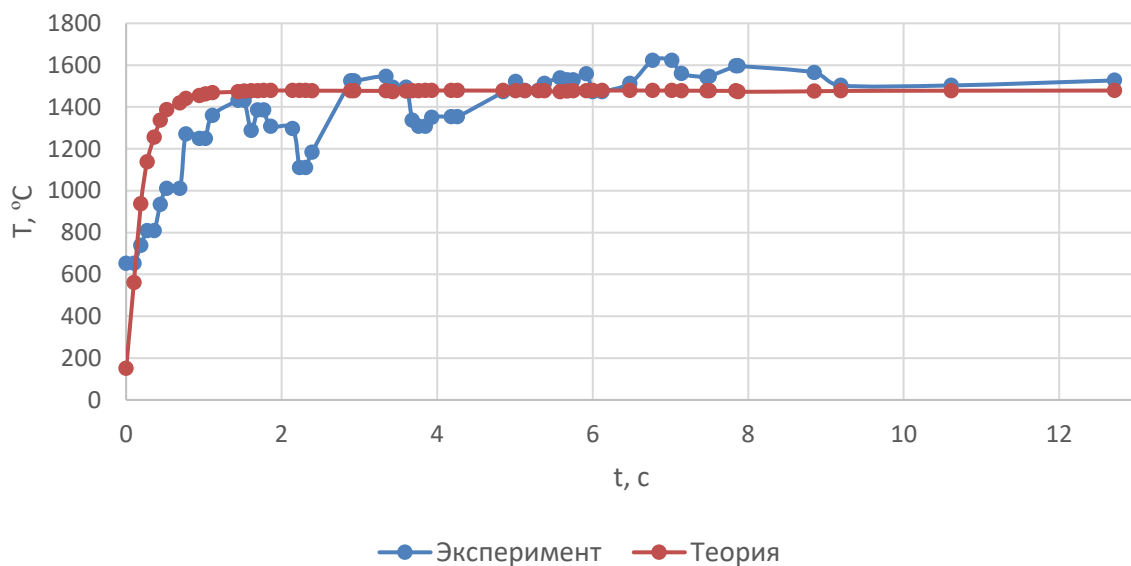


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры от времени на поверхности образца, $v=600$ мм/мин, $r_H = 1,5$ мм

Обсуждение

Проведено компьютерное моделирование лазерной закалки стальных образцов. Выполнен расчет индуцированного лазерным излучением температурного поля в зоне термического влияния. Исследовано влияние основных технологических параметров процесса обработки на

распределение полей температур в зоне теплового воздействия лазерного луча.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение.

Заключение

Следует отметить, что число зон теплового нагружения можно увеличить, что позволит рассматривать температурные поля, соответствующие одновременной работе нескольких источников энергии. Не представляет принципиальной сложности задать в расчетах какую-либо криволинейную или прерывистую траекторию движения пятна нагрева. Подобные задачи могут оказаться полезными с практической точки зрения.

С использованием результатов исследований на основе данных по техническим характеристикам лазера, теплофизическим и механическим свойствам обрабатываемого материала и их прогнозируемым после теплового воздействия структурным параметрам могут быть назначены конкретные режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов. Результаты теплового анализа могут использоваться при проведении статического анализа (определении напряженно-деформированного состояния) модели в качестве внешней нагрузки. Кроме того, полученные результаты нестационарного температурного анализа могут быть использованы для определения оптимальных режимов работы и лазера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
- [2] Веремейчик, А.И., Нерода, М.В. Моделирование процесса лазерной закалки в ANSYS Workbench // Актуальные вопросы машиноведения. – 2021. – Вып. 10. – С. 22–26.
- [3] Rezayat, M.; Karamimoghadam, M.; Moradi, M.; Casalino, G.; Roa Rovira, J.J.; Mateo, A. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels. *Metals* 2023, 13, 1268. <https://doi.org/10.3390/met13071268>.
- [4] Веремейчик, А.И., Холодарь, Б.Г. Исследование температурного поля при лазерном упрочнении сталей // Механики XXI века. – № 24. – 2025. – С. 301–309.
- [5] Морозов, Е.А. Исследование влияния параметров лазерной термической обработки на структуру и свойства порошковых сталей :

- диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.06 / Морозов Евгений Александрович; [Место защиты: ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет]. – Пермь, 2019. – 110 с. : ил.
- [6] Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Solomonov K.N., Snitko S.A., Chicheneva O.N. Investigation of changes in temperature of pressing tool during laser processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(2):155–160. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-155-16>
 - [7] Evgrafov, A., Khisamov, A., Egorova, O. Experience of modernization of the curriculum TMM in St. Petersburg state polytechnical university. *Mechanisms and Machine Science*, 2014, 19, pp. 239–247.
 - [8] Девойно, О.Г. Жарский В.В., Пилипчук А.П. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>.
 - [9] Orazi L. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2010. V. 256 (6). P.1913–1919. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.10.037>
 - [10] Закалка крупногабаритных деталей с использованием сканирующего излучения оптоволоконного лазера с программным изменением мощности / О. Г. Девойно [и др.] // *Фотоника*. – Т. 13. – № 6. – 2019. – С. 524-530. DOI: 10.22184/1993-7296.
 - [11] Elena Naprimerova, Igor Yachikov, Yuliya Latfulina, Marina Samodurova, Evgeny Trofimov, Sergey Lezhnev, Sergey Efremov, Evgeniy Panin. Mathematical Modelling of Non-stationary Thermal State of the Processed Metal During Its Laser Hardening // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 60, 1, 2025, 121–129.
 - [12] Моделирование температурных полей в стали DP1000 при лазерной обработке с использованием дифракционных оптических элементов / Р. Биелак, С. П. Мурзин, Г. Лидль, А. Отто, Н. Л. Казанский // *Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : сб. тр. по материалам VI Междунар. конф. и молодеж. шк. (г. Самара, 26-29 мая) : в 4 т. - Тек / М-во науки и образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), Ин-т систем обраб. изобр. РАН - фил. ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН. – 2020. – Т. 1. – С. 385-392.*
 - [13] Ishkinyaev, E.D., Khriptovich, E.V., Voronov, V.D. et al. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser Processing. *Phys. Atom. Nuclei* 85, 2092–2098 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063778822100210>
 - [14] Ишкиняев Э.Д., Хриптович Е.В., Воронов В.Д., Петровский В.Н., Шиганов И.Н. Определение размеров зоны упрочнения по

температурным полям в процессе лазерной обработки. Ядерная физика и инжиниринг. 2023;14(3):289-295. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050190>.

- [15] Веремейчик, А.И., Холодарь, Б.Г. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-318-330>.
- [16] Bailey N.S., Tan W., Shin Y.C. // Surf. Coat. Technol. 2009. V. 203 (14). P. 2003–2012. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.039>.

A.I.Verameichyk

SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD DURING LASER HARDENING OF STEELS

Brest State Technical University, Belarus

Abstract

The paper presents a computer simulation of laser hardening of steel samples using the *ANSYS Workbench* computing system. The calculation of the temperature field induced by laser radiation is performed. The influence of the main technological parameters of the processing process (radiation power, laser spot radius, spot speed) on the distribution of temperature fields in the zone of thermal influence is investigated.

Key words: laser, quenching, temperature field, spot, velocity.

REFERENCES

- [1] Grigor'yanc, A.G., SHiganov, I.N., Misyurov, A.I. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki. – M. : MGTU im. N.E. Bauman, 2006. – 664 s. (rus.)
- [2] Veremejchik, A.I., Neroda, M.V. Modelirovanie processa lazernoj zakalki v ANSYS Workbench // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – 2021. – Vyp. 10. – S. 22–26. (rus.)
- [3] Rezayat, M.; Karamimoghadam, M.; Moradi, M.; Casalino, G.; Roa Rovira, J.J.; Mateo, A. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels. *Metals* 2023, 13, 1268. <https://doi.org/10.3390/met13071268>.

- [4] Veremejchik, A.I., Holodar', B.G. Issledovanie temperaturnogo polya pri lazernom uprochnenii stalej // Mekhaniki XXI veku. – № 24. – 2025. – S. 301–309. (rus.)
- [5] Morozov, E.A. Issledovanie vliyaniya parametrov lazernoj termicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva poroshkovyh stalej : dissertaciya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.16.06 / Morozov Evgenij Aleksandrovich; [Mesto zashchity: FGBOU VO Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet]. – Perm', 2019. – 110 s. : il. (rus.)
- [6] Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Solomonov K.N., Snitko S.A., Chicheneva O.N. Investigation of changes in temperature of pressing tool during laser processing. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2024;67(2):155–160. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-155-16>
- [7] Evgrafov, A., Khisamov, A., Egorova, O. Experience of modernization of the curriculum TMM in St. Petersburg state polytechnical university. Mechanisms and Machine Science, 2014, 19, pp. 239–247.
- [8] Devojno, O.G. ZHarskij V.V., Pilipchuk A.P. Modelirovanie poverhnostnoj zakalki s ispol'zovaniem skaniruyushchego optovolokonnoho lazera // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2018. – T. 63, № 4. – S. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>. (rus.)
- [9] Orazi L. et al. // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256 (6). P.1913–1919. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.10.037>
- [10] Zakalka krupnogabaritnyh detalej s ispol'zovaniem skaniruyushchego izlucheniya optovolokonnoho lazera s programmym izmeneniem moshchnosti / O. G. Devojno [i dr.] // Fotonika. – T. 13. – № 6. – 2019. – S. 524-530. DOI: 10.22184/1993-7296. (rus.)
- [11] Elena Naprimerova, Igor Yachikov, Yuliya Latfulina, Marina Samodurova, Evgeny Trofimov, Sergey Lezhnev, Sergey Efremov, Evgeniy Panin. Mathematical Modelling of Non-stationary Thermal State of the Processed Metal During Its Laser Hardening // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 60, 1, 2025, 121–129.
- [12] Modelirovanie temperaturnyh polej v stali DP1000 pri lazernoj obrabotke s ispol'zovaniem difrakcionnyh opticheskikh elementov / R. Bielak, S. P. Murzin, G. Lidl', A. Otto, N. L. Kazanskij // Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2020) : sb. tr. po materialam VI Mezhdunar. konf. i molodezh. shk. (g. Samara, 26-29 maya) : v 4 t. - Tek / M-vo nauki i obrazovaniya Ros. Federacii, Samar. nac. issled. un-t im. S. P. Koroleva (Samar. un-t), In-t sistem obrab. izobr. RAN - fil. FNIC "Kristallografiya i fotonika" RAN. – 2020. – T. 1. – S. 385-392. (rus.)
- [13] Ishkinyaev, E.D., Khriptovich, E.V., Voronov, V.D. et al. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser

- Processing. Phys. Atom. Nuclei 85, 2092–2098 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1063778822100210>
- [14] Ishkinyaev E.D., Hriptovich E.V., Voronov V.D., Petrovskij V.N., SHiganov I.N. Opredelenie razmerov zony uprochneniya po temperaturnym polyam v processe lazernoj obrabotki. YAdernaya fizika i inzhiniring. 2023;14(3):289-295.
<https://doi.org/10.56304/S2079562922050190>. (rus.)
- [15] Veremejchik, A.I. Holodar', B.G. Modelirovanie teplovyh processov v poluprostranstve pri nagreve dvizhushchimsya istochnikom s ravnomernoraspredelennym teplovym potokom // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2023. – T. 68, № 4. – S. 318–330. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-318-330>.
- [16] Bailey N.S., Tan W., Shin Y.C. // Surf. Coat. Technol. 2009. V. 203 (14). P. 2003–2012. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.039>.