

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL FIELDS AND THERMAL CYCLE DURING PULSED LASER TREATMENT OF METALS AND ALLOY

Elena Andreevna Tyapunova^a, Arsentiy Andreevich Vasilev^b, Roman Sergeevich Esipov^c, Rais Kalimullovich Davletkulov^d, Aleksandr Vladislavovich Asylbaev^e

Ufa State Aviation Technical University, K. Marx str. 12, Ufa, 450008, Russia

^a roza.smitt@mail.ru, ^b arsentiy.vasilev.00@mail.ru, ^c esromles@mail.ru, ^d davletkulov.rk@ugatu.su, ^e alexander.aslb@gmail.com

ABSTRACT

The determination and prediction of temperature changes in the heat-affected zone during laser processing of metals and alloys in real time is a relevant and complicated task attracting being in the focus of researchers all over the world. The article presents a two-dimensional computer model of thermal fields and thermal cycle during laser heating of the surface of metals and alloys in the COM-SOL Multiphysics® software environment. The simulation was carried out by the finite element method. A 4×4×1.5 mm steel plate was considered as a virtual sample. For the improved prediction of the temperature field and thermal cycle of the calculation model, various boundary conditions and thermophysical properties of the material (density, thermal conductivity and heat capacity, depending on temperature in the range of 20–1500 °C (up to the steel melting temperature) were used. These conditions simulate laser nitriding in the medium atmospheric pressure nitrogen. As a result, a computer model that allows one to obtain and analyze thermal cycles and thermal fields when the surface is heated by a pulsed laser beam has been developed. Our model allows one to determine the optimal processing parameters (pulse power, pulse repetition rate, etc.) from the point of view of thermal impact.

KEYWORDS

Laser treatment; laser nitriding; modeling; thermal field; thermal cycle.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Елена Андреевна Тяпунова^a, Арсентий Андреевич Васильев^b, Роман Сергеевич Есипов^c, Раис Калимуллович Давлеткулов^d, Александр Владиславович Асылбаев^e

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

^a roza.smitt@mail.ru, ^b arsentiy.vasilev.00@mail.ru, ^c esromles@mail.ru, ^d davletkulov.rk@ugatu.su, ^e alexander.aslb@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В настоящее время определение и прогнозирование изменения температуры в зоне теплового воздействия при лазерной обработке металлов и сплавов в режиме реального времени яв-

ляется трудно достижимой задачей. В статье представлена двумерная компьютерная модель тепловых полей и термического цикла при лазерном нагреве поверхности металлов и сплавов в программной среде COMSOL Multiphysics®. Моделирование проводилось методом конечных элементов. В качестве виртуального образца принималась пластина $4 \times 4 \times 1,5$ мм, а материалом являлась сталь. Для более точного прогнозирования температурного поля и термического цикла расчетной модели использовались различные граничные условия и теплофизические свойства материала (плотность, коэффициент теплопроводности и теплоемкости, зависящие от температуры в диапазоне 20–1500 °С (до температуры плавления стали). Данные условия имитируют лазерное азотирование в среде азота атмосферного давления. В результате разработана компьютерная модель, позволяющая получать и анализировать термические циклы и тепловые поля при нагреве поверхности импульсным лазерным лучом. Данная модель позволяет определять оптимальные параметры обработки (мощность импульса, частота следования импульса и т.д.) с точки зрения теплового воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Лазерная обработка; лазерное азотирование; моделирование; тепловое поле.

Введение

В современном производстве изготовление деталей машин и механизмов, работающих в условиях поверхностного износа и удовлетворяющих высоким требованиям надежности, долговечности и безопасности эксплуатации, невозможно без применения упрочняющих технологий.

В настоящее время упрочнение поверхности металлов и сплавов осуществляется с помощью различных видов термической и химико-термической обработки (ХТО). Одним из развивающихся методов повышения физико-механических свойств является лазерная химико-термическая обработка (ЛХТО), позволяющая проводить локальную обработку поверхности деталей [1–8]. Известно, что в термических упрочняющих методах определяющими технологическими параметрами являются: температура нагрева, длительность выдержки и охлаждения. При изменении во времени данных факторов возникает понятие о термическом цикле. Известно, что при импульсной ЛХТО формируется относительно малая объемная зона теплового воздействия (10^{-10} м³) при высоких температурах нагрева (>1500 °С) и при малой длительности импульса (<0,5 мс) [7–12]. В результате этого измерение, контроль и исследование терми-

ческого цикла в режиме реального времени экспериментальными методами оказывается затруднительным.

Известно, для исследования относительно быстротекущих физических явлений и процессов применяется компьютерное моделирование.

Целью данной работы является моделирование тепловых полей при импульсной лазерной обработке методом конечных элементов.

1. Методика исследований

В работе рассматривалась двумерная задача по моделированию тепловых полей и термического цикла. Расчеты проводились с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics®. При лазерной обработке одиночным импульсом температура нагрева будет в значительной степени зависеть от параметров излучения (плотность мощности Pg , Дж/м²; диаметр пятна D , мм; длительность импульса $\tau_{и}$, мс) и свойств материала (плотность ρ , кг/м³; теплопроводность λ , Вт/м·°С; удельная теплоемкость C_p , Дж/кг·°С). При многоимпульсной обработке большой интерес представляет термический цикл нагрева и охлаждения. В этом случае

на температуру нагрева будет влиять еще и частота следования импульсов f , Гц. При этом температурное воздействие от каждого последующего импульса будет накладываться на предыдущее, то есть средняя температура нагрева будет зависеть от суммы термических циклов одиночных импульсов [10, 17].

Поскольку в настоящей работе моделируется тепловое поле и термический цикл от лазерного нагрева без оплавления поверхности, то физические свойства стали (плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость) принимались зависящими от температуры в диапазоне от 0 до 1500 °С, которые рассчитаны в работах [4, 16, 20]. Расчетное изменение плот-

ности, коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры (в диапазоне от 0 до 1500 °С) показано на рис. 1.

Путем аппроксимации кривых (рис. 2) получены функции теплофизических свойств материала, зависящих от температуры: $\rho(T)$, $\lambda(T)$ и $C_p(T)$, и имеющие следующий вид:

$$\rho(T) = 7923 - 0,4836 \cdot T + 4 \cdot 10^{-5} \cdot T^2,$$

$$\lambda(T) = 12,518 \cdot e^{0,001 \cdot T},$$

$$C_p(T) = 480,75 \cdot e^{0,0003 \cdot T}.$$

Свойства нержавеющей стали AISI 304 и параметры лазерной обработки, использованные в расчетной модели, приведены в табл. 1.

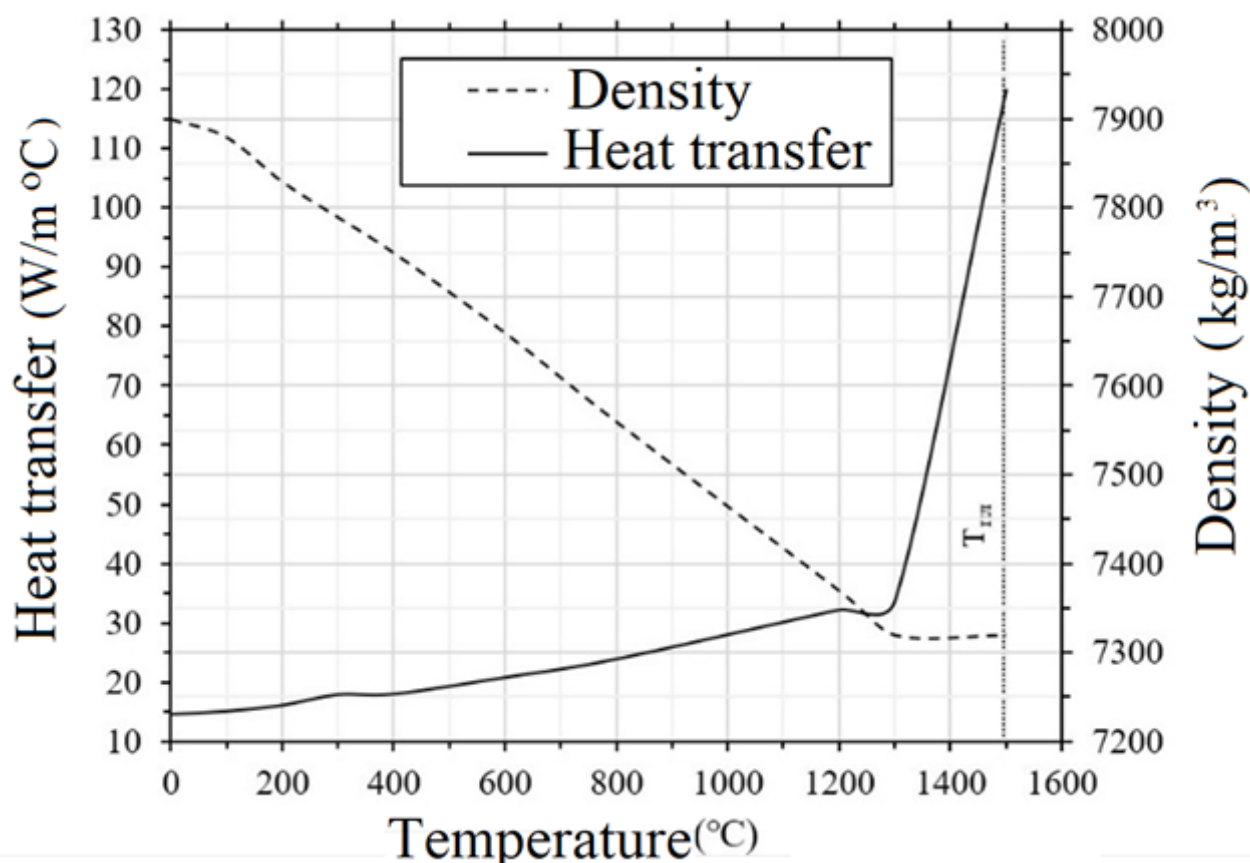


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности и плотности стали AISI304

Fig. 1. Temperature dependence of thermal conductivity and density of steel AISI304

Таблица 1. Параметры лазерной обработки и свойства стали AISI304

Table 1. Laser processing parameters and properties of AISI304 steel

	Символ / Symbol	Значение / Value	Ед. изм. / Unit
<i>Параметры обработки / Processing Options</i>			
Частота следования импульсов / Pulse repetition rate	f	10–50	Hz
Энергия импульса / Pulse energy	$E_{\text{и}}$	0,5–1	J
Средняя плотность энергии импульса / Average pulse energy density	φ	–	$\text{J/m}^2 \cdot 10^7$
Длительность импульса / Pulse duration	$\tau_{\text{и}}$	0,4–2	ms
Диаметр пятна / Spot diameter	D	0,8–1,0	mm
Отклонение Гауссовского распределения / Deviation of the Gaussian distribution	φ	100	μm
Координата центра лазерного луча / Laser beam center coordinate	x_r	1000	μm
<i>Свойства материала / Material Properties</i>			
Коэффициент излучения / Radiation weighting factor	ε	0,7	–
Коэффициент поглощения / Absorptance	A	0,37	–
<i>Прочие параметры / Other parameters</i>			
Коэффициент теплопередачи / Heat transfer coefficient	h	10	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
Постоянная Стефана – Больцмана / Stefan-Boltzmann constant	σ	$5,67 \times 10^{-8}$	$\text{W/m}^2 \text{K}^4$
Температура окружающей среды / Ambient temperature	T_a	293,15	K
Исходная температура материала / Initial material temperature	T_i	293,15	K
Длительность обработки / Processing time	t	2	s

2. Результаты и их обсуждение

Размеры расчетной области должны выбираться таким образом, чтобы по возможности максимально полно описать явление, выбирая расчетную область значительно больше масштабов изучаемого явления. На рис. 2 приведена схема, показывающая направление тепловых потоков, возникающих на виртуальном образце, имеющем раз-

меры $4 \times 4 \times 1,5$ мм. Где Q_1 – тепловой поток от импульсного лазерного источника и направлен на поверхность 2, Q_2 – тепловые потери от конвективного теплообмена между окружающей средой и телом, направлены от поверхностей 1, 2 и 3, Q_3 – тепловые потери от излучения, направлена от поверхностей 1, 2 и 3. Поверхность 4 принята, как изолированная от прочих воздействий.

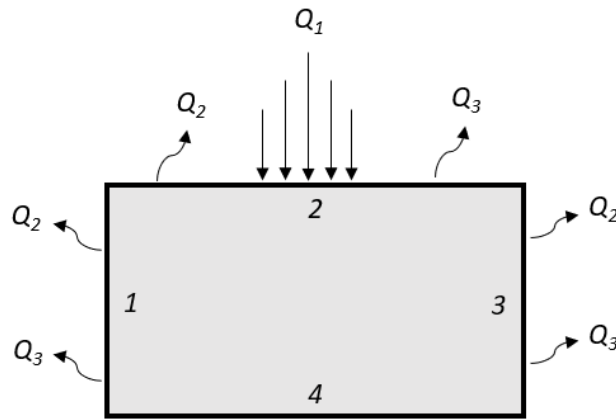


Рис. 2. Двухмерная расчетная схема тепловой модели

Fig. 2. Two-dimensional calculation scheme of the thermal model

Данный интегрированный вычислительный подход включает различные физические явления для прогнозирования температуры нагрева материала во время многоимпульсной лазерной обработки. Таким образом можно составить следующее уравнение теплового баланса [18]:

$$- \frac{\partial T}{\partial y} = Q_1 - Q_2 - Q_3.$$

Тепловой поток Q_1 будет определяться средней плотностью мощности лазерного луча, попадающего на поверхность. При этом плотность мощности будет иметь Гауссовское нормальное распределение [19]:

$$Q_1 = P_g = A \left[\frac{E_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}} \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)} \right] e^{-\left[\frac{(x-x_r)^2}{2\phi^2} \right]}.$$

Тепловые потери от конвективного теплообмена между окружающей средой и нагреваемым телом будут определяться по формуле:

$$Q_2 = h(T_i - T_a).$$

Тепловые потери от излучения будут рассчитываться по формуле:

$$Q_3 = \varepsilon \delta (T_i^4 - T_a^4).$$

Таким образом, уравнение теплового баланса в случае нагрева тела лазерным лучом будет определяться следующим выражением:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \beta P_g - h(T - T_a) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4).$$

На рис. 3 приведены тепловые поля после единичного импульса длительностью 0,4 мс в различных временных моментах. Как показано на рисунке тепловое поле увеличивается даже после прекращения воздействия лазерного луча. Область нагрева материала свыше 500 °С распространяется на глубину до 70–80 мкм.

В каждом импульсе длительностью 0,4 мс из-за высокой плотности лазерной энергии ($>3,5 \times 10^7$ Дж/м²) и локализованного характера лазерного луча температура поверхности в замкнутом объеме быстро повышается и достигает максимума. Прекращение светового воздействия и потери тепла за счет внешнего естественного конвективного охлаждения и излучения вызывают понижение температуры материала. При обработке с частотой следования импульсов 10 Гц потери тепла за счет конвективного охлаждения больше, чем при обработке с частотой 50 Гц. Это приводит к тому, что средняя температура поверхности и на глубине 100 мкм повышается (рис. 4), в то время как максимальная температура на поверхности остается практически неизменной. Дальнейшее остывание области реализуется медленно, так как время релаксации температурного поля сопоставимо с временем следования импульсов.

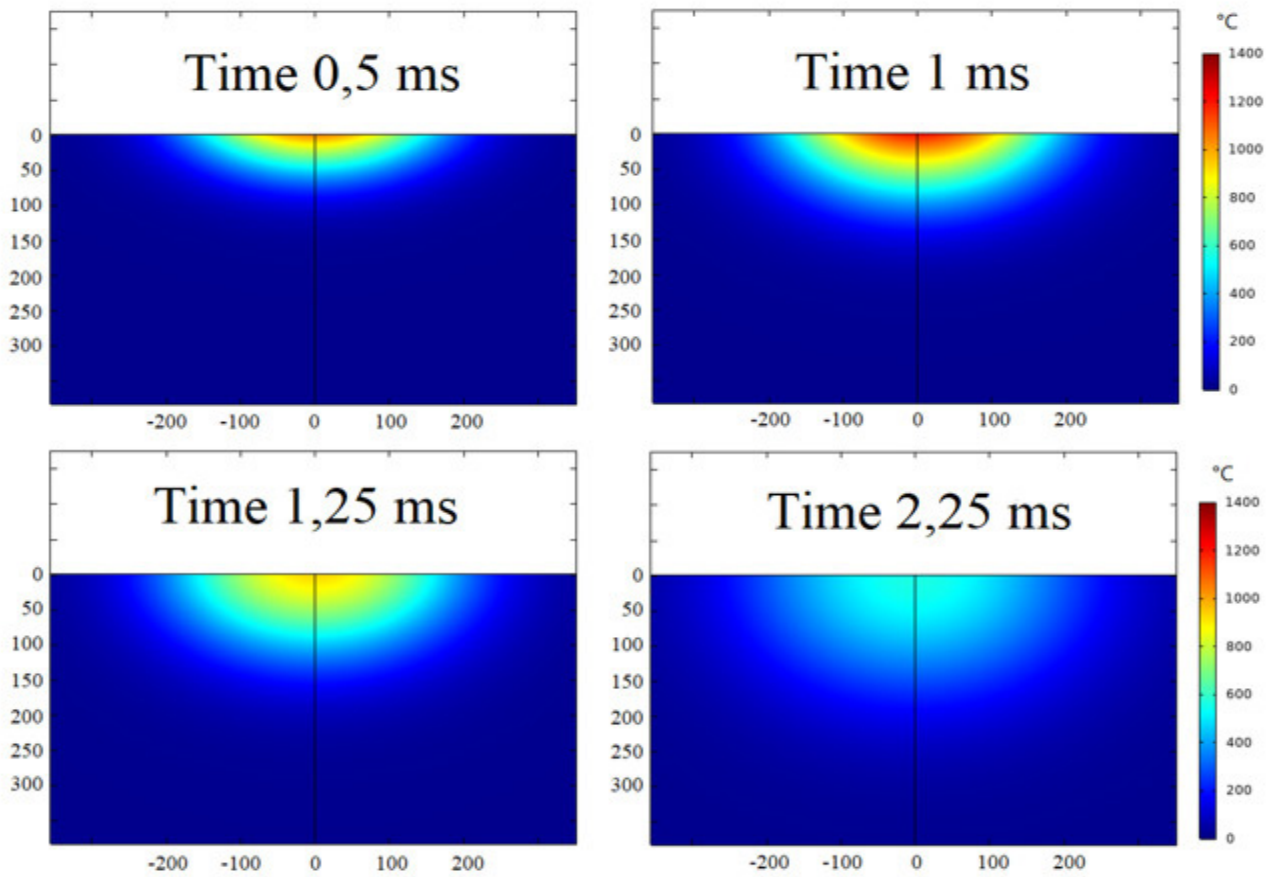


Рис. 3. Температурные поля при различной энергии импульса

Fig. 3. Temperature fields at various pulse energy

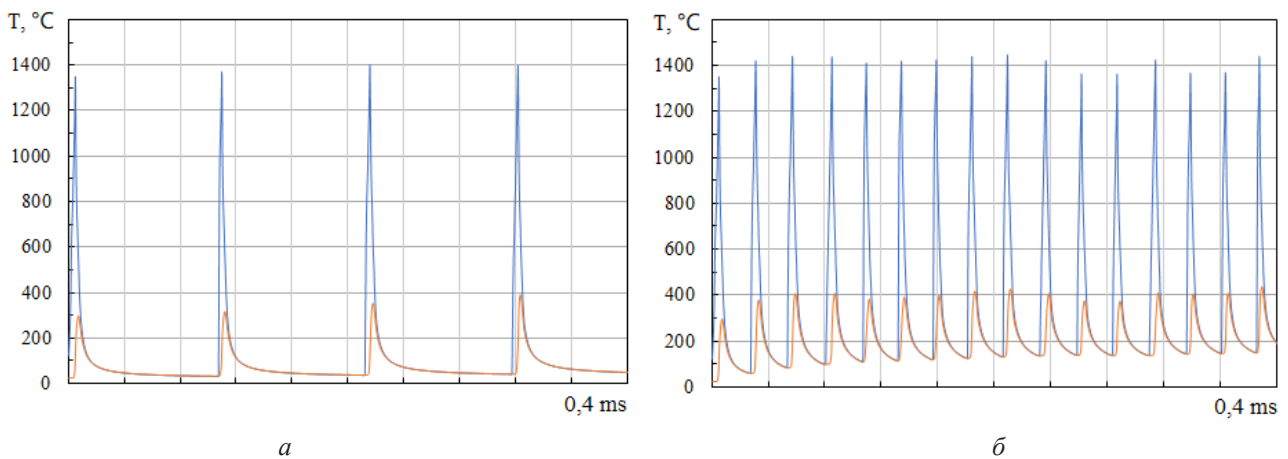


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры от времени обработки на поверхности и на глубине 100 мкм при:
a – 10 Гц; *б* – 50 Гц

Fig. 4. Dependences of the maximum temperature on the treatment time on the surface and at a depth of 100 μm at:
a – 10 Hz; *б* – 50 Hz

Выводы

В данной статье приведена двухмерная компьютерная модель тепловых процессов при нагреве материала стационарным лазерным лучом в импульсном режиме, позволяющая прогнозировать и исследовать термические циклы при различных технологических параметрах обработки. Кроме этого, разработанная модель позволяет рассчитать термические циклы и поля на различных глубинах образца.

Полученные результаты расчета позволяют определять оптимальные технологические режимы, которые актуальны для химико-термической и термической обработки без оплавления поверхности металлов и сплавов.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК-2024.2022.4.

The research was carried out with financial support the Grant of the President of the Russian Federation No. МК-2024.2022.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schaaf P. Laser nitriding of metals // Progress in Materials Science. 2002. V. 47, Iss. 1. P. 1–161. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00003-7.
2. Höche D., Kaspar J., Schaaf P. Laser nitriding and carburization of materials // Laser Surface Engineering. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. 2015. P. 33–58. DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00002-7.
3. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration / N. Maharjan et al. // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 366. P. 311–320. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.03.036.
4. Deng D., Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements // Computational Materials Science. 2006. V. 37, Iss. 3. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.comatsci.2005.07.007.
5. Dubey A. K., Yadava V. Laser beam machining – a review // Int. J. Mach. Tools Manuf. 2008. V. 48, Iss. 6. P. 609–628. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017.
6. Chemical and structural modifications of laser treated iron surfaces: investigation of laser processing parameters / A. L. Thomann et al. // Appl. Surf. Sci. 2004. V. 230, Iss. 1–4. P. 350–363. DOI: 10.1016/j.apusc.2004.02.060.
7. Investigation of the thermal stability of laser nitrided iron and stainless steel by annealing treatments / E. Carpenne et al. // Hyperfine Interact. 2002. V. 139, Iss. 1–4. P. 355–361. DOI: 10.1023/A:1021287725293.
8. Meijer J., van Sprang I. Optimization of laser beam transformation hardening by one single parameter // Annals of the CIRP. 1991. V. 40, Iss. 1. P.183–186. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61963-5.
9. HAZ microstructure simulation in welding of a ultra fine grain steel / Y. Shi et al. // Computational Material Science. 2004. V. 31, No. 3–4. P. 379–388. DOI: 10.1016/j.commat.2004.04.004.
10. Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., Kiet Tieu A. // Utilization of the finite element and Monte Carlo model for simulating the recrystallization of inhomogeneous deformation of copper // Computational Materials Science. 2007. V. 38, No. 4. P. 765–773. DOI: 10.1016/j.commat.2006.05.013.
11. Kou S., Sun D. K., Le Y. P. A fundamental-study of laser transformation hardening // Metallurgical Transactions A – Physical Metallurgy and Materials Science. 1983. V. 14. P. 643–653. DOI: 10.1007/BF02643780.
12. Komanduri R., Hou Z. B. Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. V. 44, Iss. 15. P. 2845–2862. DOI: 10.1016/S0017-9310(00)00316-1.
13. Leung M. K. H., Man H. C., Yu J. K. Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50, Iss. 23–24. P. 4600–4606. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.022.
14. Control loop tuning by thermal simulation applied to the laser transformation hardening with scanning optics process / S. Martinez et al. // Appl. Therm. Eng. 2016. V. 98. P. 49–60. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMAL.2015.12.037.
15. The Manufacturing of Hard Tools from Metallic Powders by Selective Laser Melting / F. Abe et al. // J. Materials Processing Technology. 2001. V. 111, No. 1–3. P. 210–213. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00522-2.
16. Influence of Forming Conditions on the Titanium Model in Rapid Prototyping with the Selective Laser Melting Process / F. Abe et al. // Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part C. 2003, V. 217, Iss. 1. P. 119–126. DOI: 10.1243/095440603762554668.

17. Kim S., So S., Ki H. Controlling thermal deformation using a heat sink in laser transformation hardening of steel sheets // *J. Mater. Process. Technol.* 2015. V. 216. P. 455–462. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.014.

18. So S., Ki H. Effect of specimen thickness on heat treatability in laser transformation hardening // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2013. V. 61. P. 266–276. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.048.

19. Oh S., Ki H. Prediction of hardness and deformation using a 3-D thermal analysis in laser hardening of AISI H13 tool steel // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 121. P. 951–962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.156.

20. Surface treatment of welded duplex stainless steels by diode laser / E. Capello et al. // *Journal of Laser Applications.* 2007. V. 19, Iss. 3. P. 133–140. DOI: 10.2351/1.2567412.