



МОДЕЛИ И СРАВНЯВАНЕ НА ПЛЪТНОСТТА НА МОЩНОСТТА ЗА ТОПЕНЕ И КИПЕНЕ ПРИ ПОВЪРХНОСТНО ЛАЗЕРНО ОБРАБОТВАНЕ НА ИНЖЕНЕРНИ МАТЕРИАЛИ СЪС ЗНАЧИТЕЛНО ПРИЛОЖЕНИЕ

Н. Тончев, Е. Янков* Н. Христов, Н. Тейрумниекс

tontchev@vtu.bg, eyankov@uni-ruse.bg, n_d_hristov@vtu.bg, normunds.teirumnieks@vtu.bg

Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков“

София 1574, Гео Милев 158

*** Русенски университет „Ангел Кънчев“**

Русе, ул. "Студентска" 8

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: лазери; повърхностна лазерна обработка; критична плътност на мощността; сравнение на пет вида материали; регресионен анализ.

Резюме: Технологиите при лазерна повърхностна обработка предлагат широк спектър от възможности за постигане на иновативни повърхностни свойства. В хода на това проучване авторите изследват аналитично критичните плътности на мощността на топене и кипене при обработване на различни широко прилагани материали с помощта на лазер. С помощта на изведените модели е възможно да се осигури прецизен контрол за качество и рентабилност в тази напреднала технология. След систематизирането на известни понятия и прилагането на събраните различни материални константи за мед, титан, алуминий, St316 и рубин са изведени модели и са сравнени критичните плътности на мощността за двете гранични състояния. Резултатите от сравнението са показват, че поради най-голямата топлопроводимост на медта е необходима най-голяма плътност на мощността. След медта по двата изследвани показателя следва рубина, титана, St316 и последен по необходима вложена енергия е алуминия. Установен е порядъка на отношението между плътностите на мощността при кипене и топене. Този порядък ориентируващо за повечето материали е около 10 пъти, с изключение при алуминия, където при него това отношение е около 7 пъти. Изследването е свързано с разбирането на основните прагове на реакцията на материала към лазерната енергия даващо информация при разработването на нови процеси и приложения.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на технологиите от високотехнологичната индустриализация разработват и внедряват концентрирани източници на енергия. Понастоящем лазерната повърхностна обработка съсредоточава приложението си в ключови области, оформящи съвременното икономическо развитие в световен мащаб. Независимо от това, някои от процесите по време на лазерно обработване все още не са напълно

изучени [1]. Следователно това дава ход за продължаване изследването на физикохимичните и фазовите промени, които настъпват по време на взаимодействието между лазерния лъч и различни видове материали [2].

Модификацията на повърхностния слой се диктува от параметрите на лазерна обработка и оптичните и термичните свойства на материалите. Тези фактори сумарно влияят на общия температурен профил в зоната на обработка, като по този начин предизвикват промени в свойствата на материала (включително механични, устойчивост на корозия, трибологични, антибактериални и т.н.) както в дълбочина, така и в радиална посока [3], [4]. Постигнатите модификации на повърхностните свойства на слоя до голяма степен се определят от настройките на параметрите на лазерния източник, като: дължина на вълната на лазерния лъч, непрекъснатата вълна (CW) или импулсен режим на работа, дължина на импулса, пикова мощност, форма на импулса, честота на повторение, разпределение на енергията на лъча в неговото напречно сечение, включително размер на фокусното петно и дълбочина на фокуса [5].

Прилагането на различни лазерни технологии също води до различни ефекти върху свойствата на модифицираната повърхност. Така например, в допълнение към плътността на мощността и плътността на енергията в зоната на обработка, скоростта на сканиране или времето за взаимодействие на лазера оказват силно влияние върху модификацията на метална повърхност. Всички тези специфични характеристики определят редица предимства на лазерната повърхностна обработка пред конвенционалните методи на обработка, като локално нагряване на повърхността без промяна на свойствата на субстратния материал, прецизност и висока скорост на работа и ниска цена [6].

Използването на мед, титан, алуминий, St 316 и рубин, в редица индустрии, като машиностроене, електроника, самолетостроене и аеронавтика, се увеличава, тъй като базираните на тези материали компоненти намират твърде широко приложение. Някой от съвременната лазерна обработка на тези материали има своите присъщи проблеми поради различни материални константи, вкл. отражателна способност и топлопроводимост и това води до справяне с редица предизвикателства [7], [8].

2. ЦЕЛИ И ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА.

Повърхностната критична плътност на лазерната мощност в контекста на топене и изпаряване на метали е важен параметър при обработката на лазерни материали. Той представлява прага, при който плътността на падащата лазерна мощност е достатъчна, за да предизвика фазови промени в материала.

Определянето на тази критична плътност е от решаващо значение поради няколко причини:

- Правилното определяне на критичната плътност на мощността предотвратява прекомерното влягане на енергия. Без това знание съществува риск от прилагане на енергия над необходимия праг, потенциално причинявайки неволна повреда на материала или неблагоприятно променяйки свойствата му.
- Познаването на праговата плътност на мощността за топене или изпаряване помага за оптимизиране на параметрите на лазерна обработка. Това позволява на експертите в тази област да контролират прецизно вложената енергия, необходима за специфични трансформации на материала, осигурявайки ефективна и точна обработка.
- Познаването на критичната мощност на плътността е гаранция за постигане на висококачествен резултати при лазерна обработка на материали.

- Точното определяне на критичната плътност на мощността спомага за ефективността на разходите. Това знание минимизира загубата на енергия и материали чрез прецизно насочване на енергията, необходима за желаните материални промени.
- Следвайки предписаният подходящ диапазон на плътност на мощността се осигурява възпроизводимост и еднаквост в свойствата на третирания материал, като повърхностна морфология, твърдост и микроструктура.

Като цяло, определянето на повърхностната критична плътност на лазерната мощност при топенето и изпаряването на метали е от основно значение за прецизния контрол, осигуряването на качеството, ефективността на разходите и напредъка в технологиите за лазерна обработка на материали.

Целта на изследването е да систематизира известни понятия, които да приложи за различни материални константи на мед, титан, алуминий, St316 и рубин, след което да изведе модели за критичните плътности на мощността, които в последствие да сравни.

3. СЪЩНОСТ И РЕЗУЛТАТИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Изследването е аналитично. То се основава на законите на физиката. Основните формули на които се използват при всички пресмятания са както следва:

<p><i>Критична плътност на мощността на топене</i></p> $(1) \quad q_{scm} = \frac{(1 + s)k(T_m - T_0)}{2A} \sqrt{\pi v}$ $(2) \quad s = \frac{L_m}{c(T_m - T_0)}$	<p><i>Критична плътност на мощността на изпарение</i></p> $(3) \quad q_{scv} = \frac{(1 + s')k(T_v - T_0)}{2A} \sqrt{\pi v}$ $(4) \quad s' = \frac{L_m + L_v}{c(T_v - T_0)}$
---	--

където,

k= Коефициент на топлопроводимост, W/(kg.K);

T_{m(v)}= Температура на топене (изпаряване), K;

T₀ - Начална температура, K;

v= Скорост, m/s;

m²/s;

d= Диаметър на работното петно, m;

c= Специфичен топлинен капацитет, J/(kg.K); L_m= Скрита топлина на топене, J/kg;

A= Капацитет на абсорбция;

a= Коефициент на топлопроводимост,

L_m= Скрита топлина на топене, J/kg;

L_v= Скрита топлина на изпарение, J/kg.

Диапазонът в който се променя скоростта на сканиране на лазерният лъч в това изследване е [10÷100] mm/s. За съпоставимост на резултатите, всички аналитични пресмятания са направени при едни и същи общи параметри:

- диаметър на работното петно d=30 μm;
- капацитет на абсорбция A=0,4;
- начална температура T₀=300 K.

За да бъдат осъществени съответните пресмятания на петте изследвани материала е необходимо да се предоставят управляващите константи от всички уравнения (1), (2), (3) и (4), параметри. Това е осъществено в табл. 1.

Таблица 1. Управляващи, константи и величини.

Управляваща константа	Cu	Ruby	Ti	St 316	Al
k, Коефициент на топлопроводимост, W/(kg.K);	401	40	22	18,9	236
c, Специфичен топлинен капацитет, J/(kg.K);	380	750	4507	500	830
a, Коефициент на топлопроводимост, m ² /s;	1.18 10 ⁻⁴	1.34 10 ⁻⁵	9.39 10 ⁻⁶	4.73 10 ⁻⁶	1.15 10 ⁻⁴
T _m , Температура на топене, K;	1356	2323	1941	1663	833
T _v , Температура на изпаряване, K;	2868	3270	3560	3084	2600
L _m , Скрита топлина на топене, J/kg;	207 10 ³	1093 10 ³	390 10 ³	290 10 ³	399 10 ³
L _v , Скрита топлина на изпарение, J/kg	473 10 ⁴	1938 10 ⁴	1063 10 ⁴	745 10 ⁴	1053 10 ⁴

Сред методите на приложната математическа статистика регресионният анализ заема важна позиция, като един от най-разпространените методи за обработка на резултатите от десетте наблюдения за всеки от материалите при двете състояния (топене и кипене). В повечето случаи функционалната връзка между тези променливите е неизвестна и е необходимо да се изградят някои аналитични зависимости (регресионно уравнение) [9],[10], което описва тази връзка с приемлива точност. Връзката е между зависимите и независимите променливи. Същото се осъществява след апроксимация от комбинациите по десетте състояния на независимата променлива от скоростта на сканиране на лазерния лъч, след като са осъществени всички изчисления по по-горе определения алгоритъм. В табл.2 и табл. 3 са посочени коефициенти на моделите, описващи критичната плътност на мощността. Всички изведени модели от този тип имат вида:

$$(5) \quad q_{sc\ m}(v) = b_0 + b_1 v + b_2 v^2 + b_3 v^3$$

Таблица 2. Коефициенти от моделите за определяне критичната плътност на мощността при топене на изследваните материали от повърхностно лазерно обработване

Коефициенти на моделите при описването на критична плътност на мощността при топене за A= 0.4					
Структура на модела	Cu	Рубин (Ruby)	Ti	St 316	Al
b ₀	280594405578.8	182559440.549	82505622.373	80191496.499	60641146.85
b ₁ *V	190681196582.251	122455244.756	55084401.826	54483775.253	41277200.039
b ₂ *V ²	-2302086247.108	-1474836.83	-657064.103	-657541.189	-498161.125
b ₃ *V ³	11361693.862	7280.886	3211.679	3243.989	2457.322

Таблица 3. Коефициенти от моделите за определяне критичната плътност на мощността при кипене на изследваните материали от повърхностно лазерно обработване

Коефициенти на моделите при описването на критична плътност на мощността при кипене за A=0.4					
Структура на модела	Cu	Рубин (Ruby)	Ti	St 316	Al
b ₀	2725910489358.8	1570167832.08	833447552.401	753559440.52	1570167833
b ₁ *V	1853972999233.3	1067271872.578	566518803.422	512144599.9	1067271873
b ₂ *V ²	-22384271561.98	-12880034.965	-6837132.867	-6180221.45	-12880035.
b ₃ *V ³	110459401.711	63536.519	33728.05	30485.237	63536.519

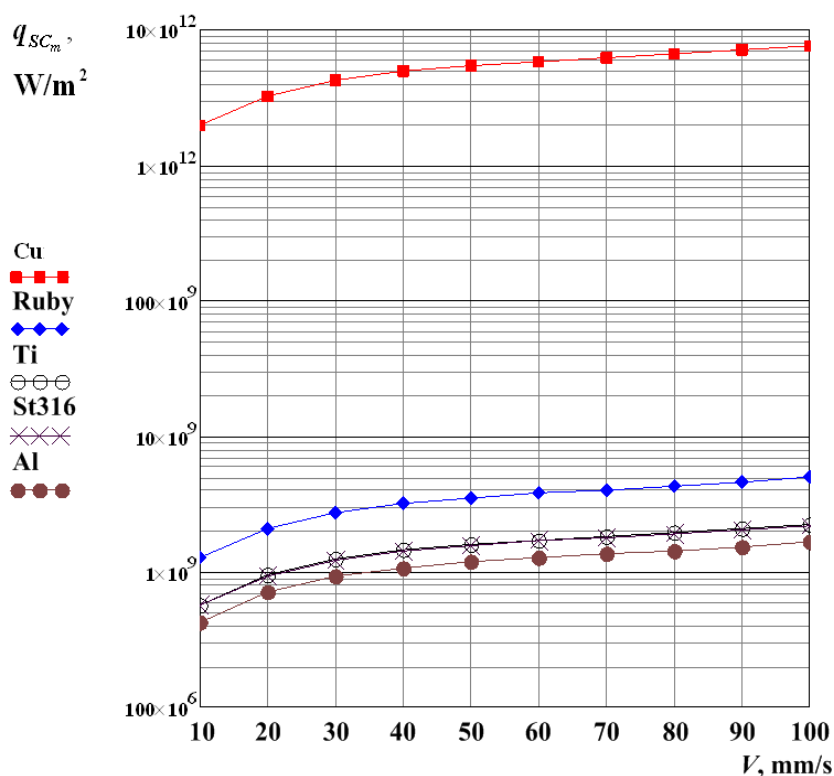
След систематизирането на известни понятия и прилагането на събраните различни материални константи за мед, титан, алуминий St316 и рубин се изведоха модели и се сравниха критичните плътности на мощността за двете гранични състояния. Резултатите от сравнението са показани в табл.4 и на фиг. 1, фиг. 2. От тях може да се определи подреждането на изследваните материали по необходимата вложена енергия за достигане на съответния необходим праг. Определена е подредбата,

и е потвърдено, че поради най-голямата топлопроводимост на медта е необходима най-голяма плътност на мощността. След медта по двата изследвани показателя следва рубина, титана, St316 и последен по необходима вложена енергия е алуминия. От табл. 4 може точно да се установи порядъка на отношението между плътностите на мощността при кипене и топене. Този порядък ориентировъчно за повечето материали е около 10 пъти, с изключение при алуминия, където при него това отношение е около 7 пъти.

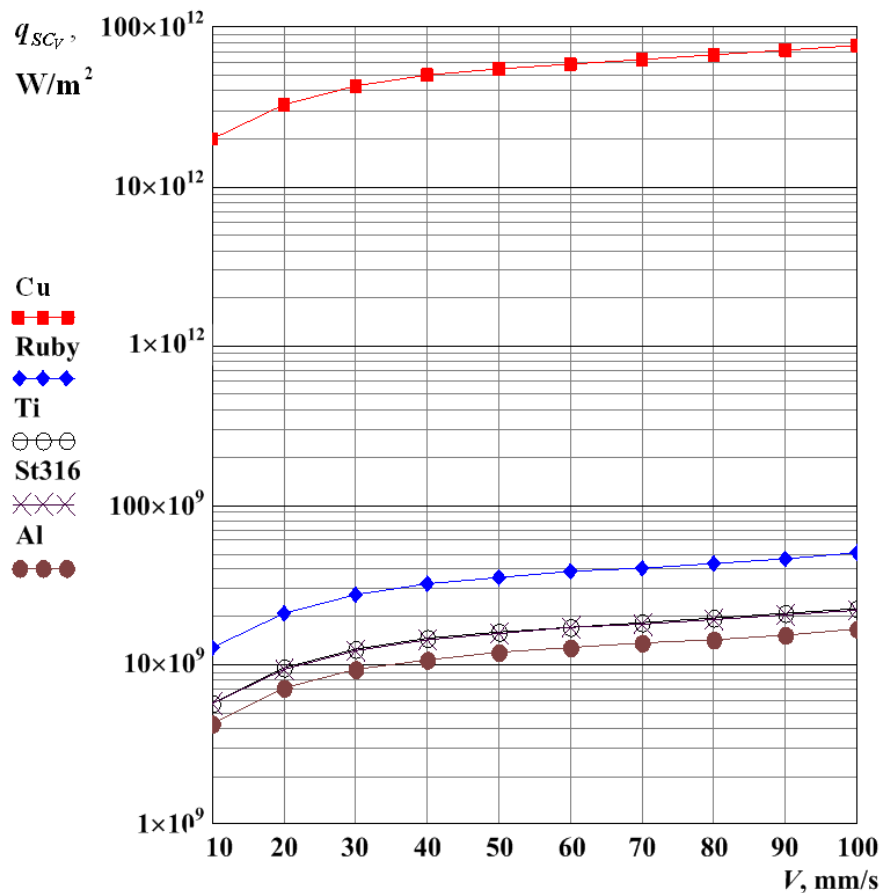
За всички пет материала, на фиг.1 и фиг.2 са изобразени плътностите на мощността съответно за топене и кипене за изследвания диапазон от скорости на сканиране на лазерния лъч. Сравняването на тези мощности на плътността наложи използването на логаритмичен мащаб. От показаното на фиг.1 и фиг.2 поради спецификата на данните може да се съди единствено за тенденцията на изменение и аранжирането на материалите. За проследяване на резултатите плътността на мощността и конкретни изводи по тях за конкретни стойности на скоростта е съставена табл. 4.

Таблица 4. Стойности на критичните плътности на мощността при различни скорости на сканиране

Критична плътност на мощността на топене					
$v, mm/s$	Cu	Рубин (Ruby)	Ti	St 316	Al
10	$2.39 \cdot 10^{12}$	$1.538 \cdot 10^9$	$694.364 \cdot 10^6$	$683.002 \cdot 10^6$	$517.263 \cdot 10^6$
50	$5.345 \cdot 10^{12}$	$3.44 \cdot 10^9$	$1.553 \cdot 10^9$	$1.527 \cdot 10^9$	$1.157 \cdot 10^9$
100	$7.559 \cdot 10^{12}$	$4.865 \cdot 10^9$	$2.196 \cdot 10^9$	$2.16 \cdot 10^9$	$1.636 \cdot 10^9$
Критична плътност на мощността на изпарение					
$v, mm/s$	Cu	Рубин (Ruby)	Ti	St 316	Al
10	$23.235 \cdot 10^{12}$	$13.378 \cdot 10^9$	$7.101 \cdot 10^9$	$6.421 \cdot 10^9$	$3.221 \cdot 10^9$
50	$56.913 \cdot 10^{12}$	$29.915 \cdot 10^9$	$15.879 \cdot 10^9$	$14.356 \cdot 10^9$	$7.199 \cdot 10^9$
100	$73.474 \cdot 10^{12}$	$42.306 \cdot 10^9$	$22.456 \cdot 10^9$	$20.302 \cdot 10^9$	$10.181 \cdot 10^9$



Фиг.1. Графична интерпретация за критичната плътност на мощността при топене на изследваните материали



Фиг.2. Графична интерпретация за критичната плътност на мощността при кипене на изследваните материали

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изследването са изведени моделите за критичните плътности на мощността за топене и кипене при обработване на мед, титан, алуминий, St316 и рубин при повърхностно обработване с помощта на лазер. С помощта на изведените модели е възможно да се осигури прецизен контрол. Аналитично изследваните критични параметри дават отговори за предотвратява прекомерното влагане на енергия и за това какъв е съответният праг на материала при топене и кипене. С това се прецизно се контролира вложената енергия, което е гаранция за качествено обработване при минимизирана загуба на енергия и материали. Като допълнително предимство може да се посочи възпроизводимостта и еднаквостта в свойствата на третирания материал, като повърхностна морфология, твърдост и микроструктура с което се гарантира качеството на изделието.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bauernhuber, Tamás Markovits, Investigating Thermal Interactions in the Case of Laser Assisted Joining of PMMA Plastic and Steel, Physics Procedia, Vol. 56, 2014, Pages 811-817, ISSN 1875-3892.
- [2] Ridong Wang and Shen Xu and Yanan Yue and Xinwei Wang, Thermal behavior of materials in laser-assisted extreme manufacturing: Raman-based novel characterization, International Journal of Extreme Manufacturing vol.3, 2020.
- [3] T. Mioković, V. Schulze, O. Vöhringer, D. Löhe, Prediction of phase transformations during laser surface hardening of AISI 4140 including the effects of inhomogeneous austenite formation, Materials Science and Engineering: A, Volumes 435–436, 2006, Pages 547-555.

- [4] A.K. Mondal, S. Kumar, C. Blawert, Narendra B. Dahotre, Effect of laser surface treatment on corrosion and wear resistance of ACM720 Mg alloy, Surface and Coatings Technology, Volume 202, Issue 14, 2008, Pages 3187-3198.
- [5] Flemming Ove Olsen and Leo Alting, Pulsed laser materials processing, ND-YAG versus CO₂ lasers, CIRP Annals, 1995, vol.44, pages 141-145.
- [6] Muammer Kalyon and Bekir Sami Yilbas, Laser pulse heating: a formulation of desired temperature at the surface, Optics and Lasers in Engineering, 2003, vol.39, pages 109 – 119.
- [7] Jie Han, Jingjing Yang, Hanchen Yu, Jie Yin, Ming Gao, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng, Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density, Rapid Prototyping Journal, 2017.
- [8] Christos Panagopoulos, A. Michaelides, Laser surface treatment of copper, Journal of Materials Science, 1992, Vol.27, pages 1280-1284.
- [9] Tontchev, N., Materials science, Effective solutions, and technological variants, Lambert, Academic Publishing, 2014, 142
- [10] Tontchev, N., Gaydarov, V., N. Hristov, N., Analyzes and applications through the computational approach DEF MOT, Sofia, 2022, 167 p. (in Bulgarian).

MODELS AND COMPARISON OF MELTING AND BOILING POWER DENSITY IN LASER SURFACE PROCESSING OF ENGINEERING MATERIALS WITH SIGNIFICANT APPLICATION

N. Tontchev, E. Yankov* N. Hristov, N. Teirumnieks

tontchev@vtu.bg, eyankov@uni-ruse.bg, n_d_hristov@vtu.bg, normunds.teirumnieks@vtu.bg

*Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.*

** University of Ruse Angel Kanchev
7014 Ruse, Studentska str. 8*

THE REPUBLIC OF BULGARIA

Key words: Lasers; Surface laser treatment; Critical power density; Comparison of five materials; Regression analysis

Abstract: Laser surface treatment technologies offer a wide range of possibilities to achieve innovative surface properties. In the course of this study, the authors analytically investigate the critical melting and boiling power densities in laser machining of various widely applied materials. With the help of the derived models, it is possible to ensure precise control for quality and cost-effectiveness in this advanced technology. After systematizing known concepts and applying the collected different material constants for copper, titanium, aluminum, St316 and ruby, models are derived and the critical power densities for the two limit states are compared. The results of the comparison show that due to the highest thermal conductivity of copper, the highest power density is required. After copper, according to the two investigated indicators, comes ruby, titanium, St316, and last in terms of required energy input is aluminum. The order of magnitude of the ratio between the boiling and melting power densities was established. This order is approximately 10 times for most materials, with the exception of aluminum, where this ratio is about 7 times. The research is related to the understanding of the basic thresholds of the material's response to laser energy providing information in the development of new processes and applications.