

## ТОПЛОФИЗИЧНИ ВЕЛИЧИНИ, ВЛИЯЕЩИ НА ЛАЗЕРНО МАРКИРАНЕ НА ИЗДЕЛИЯ ОТ СТОМАНА

**Николай Ангелов**

*Технически университет – Габрово, ул. Хаджи Димитър № 4, e:mail: angelov\_np@abv.bg*

## THERMO-PHYSICAL MAGNITUDES INFLUENCING THE LASER MARKING OF STEEL PRODUCTS

**Nikolay Angelov**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhy Dimitar str., e:mail: angelov\_np@abv.bg*

### Abstract

*A classification of the thermo-physical magnitudes influencing the laser marking process of steel products, was made. Interdependencies and their relationships with other magnitudes, are examined. The role of each of them for the studied process, is discussed. Numerical experiments were conducted and the results were analyzed.*

**Keywords:** laser marking, steel, thermo-physical magnetudes, numerical experiments.

### ВЪВЕДЕНИЕ

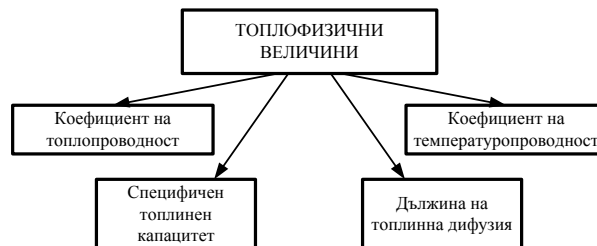
Лазерното маркиране е сложен технологичен процес. Величините, които влияят на контраста при лазерно маркиране могат да се обединят в три групи, свързани с/със: свойствата на материала, лазерния източник и технологичния процес [1-3]. Към тях трябва да се прибавят и величините коефициент на препокриване (свързан с тези на лазерния източник и технологичния процес) и обемна плътност на погълнатата енергия (свързана с величини от трите групи).

Тези основни величини се намират в определени физични зависимости помежду си. Те са важни за разбиране на физичната същност на процеса [1-3].

Цел на доклада е да се направи класификация на топлофизичните величини, влияещи на процеса лазерно маркиране на стомани и да се изследва влиянието на коефициента на топлопроводност и коефициента на температуропроводност.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

На фиг. 1 са представени основните топлофизични величини, имащи значение за процеса на лазерно маркиране на стомани:



**Фиг. 1.** Теплофизични величини, влияещи на лазерното маркиране на стомани

### - Коефициент на топлопроводност $k$

Коефициентът на топлопроводност  $k$  е важна физична характеристика при изграждане на физичния модел на взаимодействието на лъчението с веществото, тъй като пряко влияе на размерите на геометрията в зоната на обработка (в случая маркировка) и свързаната с нея температурно овлияна зона.

Коефициентът на топлопроводност  $k$  зависи от състава на материала, структурата му, температурата  $T$ , налягането  $p$ . За стоманите налягането  $p$  не оказва съществено влияние върху  $k$ . При изграждането на физични и математически модели за оптимизация на процеса трябва да се познава зависимостта  $k = k(T)$ . Експерименталните

изследвания показват намаляване на коефициента на топлопроводност  $k$  с увеличаване на температурата  $T$ . Редица автори дават линейна апроксимация на зависимостта [4-5]:

$$k = k_0 + b(T - T_0), \quad (1)$$

където  $k_0$  е стойността на коефициента на топлопроводност при температура  $T_0 = 273,15$  К,  $b$  – опитно установена константа.

Примесите понижават рязко коефициента на топлопроводност. Причината е увеличаването на структурните нееднородности, които предизвикват разсейване на електроните.

По-ниските стойности на коефициента на топлопроводност за стомана в сравнение с чисти метали, например желязо водят до образуване на пренебрежимо малка температурно овлияна зона или до липсата ѝ. Следователно маркираните линии са с по-голяма острота и отчетливост (един от критериите за качество на лазерната маркировка) и с по-висок контраст отколкото при наличие на голяма топлинно овлияна зона. За получаване на маркировка с необходимия контраст трябва да са изпълнени и другите критерии за качество.

#### - Специфичен топлинен капацитет $c$

Специфичният топлинен капацитет  $c$  на металите почти не се изменя с температурата  $T$  през цялото време на лазерно въздействие и за изграждането на физически модел на процеса на лазерно маркиране може да се приеме за постоянен.

Физичното обяснение на този феномен се дава със закона на Дюлонг-Пти. За моларния топлинен капацитет при металите е в сила зависимостта

$$C = 3R = \text{const}, \quad (2)$$

където  $R = 8,31$  J/(mol.K) е универсална газова константа.

Поради връзката между моларния топлинен капацитет  $C$  и специфичния топлинен капацитет  $c$

$$C = \mu c, \quad (3)$$

където  $\mu$  е моларната маса на веществото можем да заключим, че и  $c = \text{const}$ .

Квантовата теория също дава много слабо увеличение на моларния топлинен капацитет на електронния газ с нарастване на температурата.

**- Коефициент на температуропроводност**  
Коефициентът на температуропроводност  $a$  е комплексна характеристика, която свързва в определена зависимост величините коефициент на топлопроводност  $k$ , специфичен топлинен капацитет  $c$  и плътност  $\rho$

$$a = \frac{k}{c\rho}. \quad (4)$$

За метали и сплави специфичният топлинен капацитет  $c$  почти не се изменя с температурата  $T$ . Поради факта, че величините  $k$  и  $\rho$  зависят от  $T$ , то и коефициентът на температуропроводност  $a$  също се явява функция на  $T$ .

За нуждите на моделни изграждания и числени пресмятания може да се използва следната линейна зависимост

$$a(T) = a_0 + m(T - T_0), \quad (5)$$

където  $a_0$  е коефициент на температуропроводност на материала при температура  $T_0 = 273,15$  К, а  $m$  е константа, зависеща от материала.

#### - Дължина на топлинна дифузия

Дължината на топлинната дифузия се определя с израза

$$l_d = \sqrt{at_d},$$

където  $t_d$  е време на топлинна дифузия.

Когато дълбочината на проникване на лъчението е много по-малка от дължината на топлинна дифузия ( $\delta \ll l_d$ ), топлинният източник в материала може да се разглежда като повърхностен. Това е характерно за метали и сплави (включително стомани), за които поглъщането става в много тънък повърхностен слой.

#### Числени експерименти

Изследвано бе влиянието на коефициента на топлопроводност и коефициента на температуропроводност върху процеса на лазерно маркиране. Проведени бяха числени експерименти с програма TEMPERATURFELD3D [6], която е специализирана за получаване на температурни полета при лазерно въздействие върху различни материали – метали и сплавите им, полупроводници и диелектрици. Пресмятанията се отнасят за влакнесто-оптичен лазер – иновационен лазер с широко приложение в индустрията.

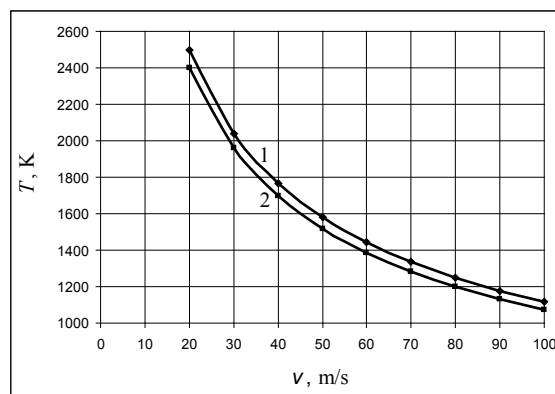
Числените експерименти са направени за стомани 15Cr2 и 2C10. Техните основни параметри са дадени в табл. 1. Стомана 2C10 има с 36-40% по-големи стойности на коефициента на топлопроводност и коефициента на температуропроводност. Останалите им характеристики са близки.

Таблица 1. Някои основни параметри на стомани 15Cr2 и 2C10

Стомана	15Cr2	2C10
Параметър		
$k$ , W/(m.K)	44	60
$c$ , J/(kg.K)	496	482
$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	7810	7846
$a$ , m <sup>2</sup> /s	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$

Проведоха се серия от числени експерименти. Скоростта на маркиране се изменяше в интервала  $v \in [20, 100]$  mm/s със стъпка 10 mm/s. Останалите лазерни и технологични параметри се поддържаха постоянни и са едни и същи за двете стомани. Получиха се температурни полета в зоната и около зоната на лазерно въздействие. Построени бяха графики на зависимостта на температурата  $T$  от скоростта  $v$  за двете стомани (фиг. 2). От анализа им могат да се направят следните изводи:

- С увеличаване на скоростта се наблюдава нелинейно намаляване на температурата и за двете стомани. В интервала  $v \in [20, 60]$  mm/s кривите са по-стръмни отколкото в интервала  $v \in [60, 100]$  mm/s;
- Температурата на нагряване в зоната на въздействие е малко по-голяма за стомана 15Cr2 спрямо стомана 2C10. Това се дължи на по-малките стойности на коефициента на топлопроводност и температуропроводност на стомана 15Cr2;
- Температурно овлияната зона при стомана 15Cr2 е с около 20% по-малка от тази за стомана 2C10.



Фиг. 2. Графики на зависимостта на температурата  $T$  от скоростта  $v$  при лазерно маркиране на: 1 – стомана 15Cr2; 2 – стомана 2C10

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Класификацията на топлофизичните величини и показването на значението на всяка от тях спомага за по-задълбоченото изучаване на технологичния процес лазерно маркиране на стомани. Получените резултати от числените експерименти кореспондират с теорията. Изследванията могат да продължат с реални експерименти за различни стомани и лазерни източници.

## REFERENCE

- [1] Dinev S. Lasers in modern technology, Alfa, Sofia, 1993.
- [2] Schuöcker D. Handbook of the Eurolaser Academy, CHAPMAN&HALL, London, 1998.
- [3] Angelov N. Optimization of the Process Laser Marking of Samples of Instrumental Steel, PhD thesis, TU of Gabrovo, 2011.
- [4] Hook J., H. Hall Solid state physics, Wiley, Chichester, 199.
- [5] Sandner H., M. Neubronner, G. Stübner Stoffwerte von reinen Metallen und Metalllegierungen, Springer, Berlin, 2002.
- [6] Belev I. Field of calculation of laser-induced temperature fields, Diploma thesis, Technical University, Gabrovo, 2009.