

## **МЕТОДИКА И МОДЕЛ, ИЗСЛЕДВАЩИ ОТНОСИТЕЛНОТО ОТКЛОНЕНИЕ ОТ ТОЧНОСТТА ПРИ ЛАЗЕРНО РЯЗАНЕ НА C235**

**Николай Тончев**  
tontchev@vtu.bg

**Виктор Георгиев**  
viktor\_georgiev@vtu.bg

**Емил Янков**  
eyankov@uni-ruse.bg

**ВТУ „Тодор Каблешков“,  
София**

**ВТУ „Тодор Каблешков“,  
София  
БЪЛГАРИЯ**

**Русенски университет  
„Ангел Кънчев“**

***Ключови думи:** Лазерно разкрояване, режими на лазерно рязане за стомана C235, моделиране, много факторен анализ.*

***Резюме:** В настоящата статия се представя анализ чрез методологията за проектиране на база отклика на изследвани величини при оптимизиране на параметрите на лазерно рязане по отношение на точността на размерите за продукти от C235. Изследват се входните фактори, като скорост на рязане, мощност и налягане на въглеродният диоксид, върху качествено рязане, изразено чрез относителното отклонение от точността. Статията предлага алгоритъм и регресионен модел за оптимизиране на отклонението от размерите между модел и изрязан контур, чрез минимизиране грешка на това отклонение. На база проведен експеримент и резултати от изследването е създадена обобщена методика. Тя може да се използва след планиран експеримент за определяне на точността на всякакви контури от изследван материал с определена дебелина.*

### **1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Обработката с лазерни лъчи (LBM) като ефективен инструмент за отстраняване на материал, утвърждава лазерното третиране все повече като технология в индустрията. Именно като ефективна алтернатива LBM пред някои конвенционални процеси на обработката, вниманието на изследователите е привлечено за провеждане на огромни експериментални и числени изследвания. Изключение в това направление не прави и разкрояването чрез лазерно рязане, което е безконтактна, производствено гъвкава и високо производителна техника, позволяваща относително точно профилиране на широка гама от листови материали [1]. За получаването на висококачествен резултат от лазерното рязане, обикновено стартира процес на оптимизация [2, 3, 4, 5], който оправдава полученото качество и направените разходи по отношение на времето и финансите. Следователно има голяма мотивация в моделирането и оптимизирането на този неконвенционален процес на обработка. Моделирането и оптимизацията се осъществяват на основата на свързани експерименти. Експерименталните данни формулират връзката между качествена характеристика и входните параметри чрез модела и повърхнината на отклика. Експериментите са проведени чрез използване на DOE (Design of Experiments), а резултатите се утвърждават чрез анализа на дисперсията.

В цитираната в това изследване литература е показано, че методът за проектиране на експерименти (DOE) като метода на повърхността на реакцията е полезен за извличане на точни математически модели. Разработването на точен модел между входните и изходните променливи на LBM процеса е трудно и сложно поради нелинейното поведение на процеса при различни условия. Няма обща формула или постановка в общия случай. Всяка дебелина или материал, а също и лазерно оборудване в случая на LBM, изисква свои собствени експерименти. При тях входните променливи са параметрите на системата, материала и процеса, а изходните променливи са качествените характеристики на лазерно обработения детайл, включително геометричните характеристики, металургичните характеристики, грапавостта на повърхността и скоростта на отстраняване на материала.

В литературата се срещат алгоритми за оптимизиране на параметрите на лазера за лазерно рязане без неравности [6], които обаче не са свързани с точността на изделието между зададения и получения контур. Цитираният алгоритъм включва проектиране на експерименти единствено с един фактор в дадения момент. Влиянието на повече от един технологичен параметър върху качеството на среза е разгледан в [7], където качеството на лазерното рязане е анализирано чрез геометрия на прорежа и грапавост на повърхността.

За прецизното изпълнение на технологията е необходима гарантирана точност. За съжаление колективът не откри конкретни изследвания в тази връзка. По тази причина се наложи прилагане на методологията за проектиране на основа отклика на изследваната величина при оптимизиране на параметрите на лазерно рязане по отношение на точността на размерите за продукти от C235.

## 2. ЦЕЛ, ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Целта на изследването е създаване на алгоритъм и регресионен модел за оптимизиране на отклонението от размерите между модела и изрязания контур чрез минимизиране на грешката на това отклонение. На основата на проведения експеримент и резултатите от изследването се създава обобщена методика. С помощта на методиката е необходимо да се направи анализ на отклонението на точността в зависимост от параметрите на технологичния режим.

Обектът за изследване е най-широко валцуваната стомана C235. Нейният химичен състав е посочен в Табл. 1.

Таблица 1. Химичен състав на стомана 235

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
≤0,22	≤0,05	≤0,60	≤0,30	≤0,040	≤0,040	≤0,30	≤0,012	≤0,30

Използваната апаратура е файбър Лазер *Durma HD-F 4020/4KW*, с общо предназначение за рязане на листов материал с дебелина на листовата стомана до 20 mm, хром-никелова стомана до 10 mm и алуминиев листов прокат до 12 mm с размери на листа до 4064×2032. Това е динамична лазерна машина характеризираща се с интелигентни режещи глави за своите операции. Главата на лазера има интегрирана сензорна система, следяща процеса на рязане и предоставяща съответната информация на оператора. По този начин стана възможно да се изпълнят технологичните режими, предвидени за изпълнението на целите на изследването.

Всеки вид ламарина съдържа три технологии за рязане според това какъв контур се реже. На Фиг. 1 е показана пробата с предварително изрязани различни контури за лист от 3 mm от стомана C 235. Процесът на рязане на листовата стомана протича със скорост от 3000 mm/min при режим *Fast* (при който е изрязан външният контур на

квадрата, Фиг. 1) и мощност на лъча от 2500W. С режим *techno medium*, със скорост 2400 mm/min са изрязани вътрешните четири квадрата и окръжността при мощност от 2300 W. С режим *techno small*, със скорост 2600 mm/min при мощност от 1700 W са изрязани четирите малки окръжности. В Табл. 2 са показани режимите за рязане на трите контура. Тези режими спомогнаха да се планира експериментът с режими показани в Табл. 3.

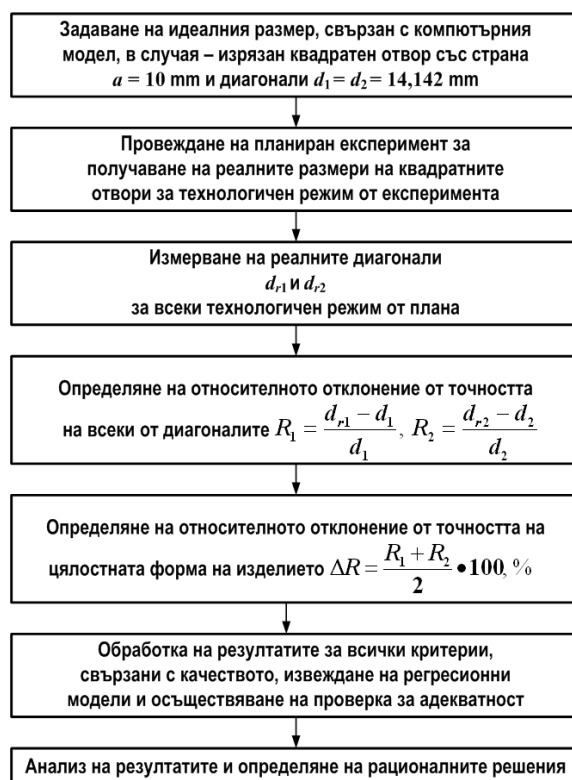
**Таблица 2. Технологични параметри за изрязване на черна стомана с дебелина 3мм**

Видове режими	Скорост [mm/min]	Focus Off-set	Налягане на газа [Bar]	Мощност [W]	Честота [kHz]
Fast	3000	3.7	0.5	2500	5
Medium	2400	3.7	0.4	2300	5
Small	2600	3.7	0.6	1700	5

След изрязания контур със съответния режим може да бъде определена разликата между зададеното и полученото значения. Това може да се осъществи, като се измерят реалните диагонали след разкрояването за всеки технологичен режим и на тяхна база се определи относителното отклонение от всеки диагонал.



**Фиг.1. Предварително изрязани експериментални контури на чиято база е формиран плана на експеримента**



**Фиг.2. Методика за определяне на относителното отклонение от формата на размерите при разкрояване**

След определянето на относителното отклонение от точността за двата диагонала може да бъде определено отклонението от точността за цялостната форма на изделието. Формулите за тези преобразувания са показани в алгоритъма на методиката, Фиг. 2.

Описаната на Фиг. 2 методика успешно може да бъде модифицирана и за 3D – печат, където отново стои проблем с разлика между зададено и получено.

### 3. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

На база на предварителните експерименти, описани в Табл.1, е планиран експеримент, който е, както следва:

**Табл. 3. Планиран експеримент, за извеждане на модел за модела за относителното отклонение от точността**

№	V, mm/min	P, W	N, bar	Относително отклонение от точността, ΔR %
1	2400	1700	0,4	9.21
2	3000	1700	0,4	9.31
3	2400	2500	0,4	9.10
4	3000	2500	0,4	9.85
5	2400	1700	0,6	10.0
6	3000	1700	0,6	9.21
7	2400	2500	0,6	10.1
8	3000	2500	0,6	9.52
9	3000	2100	0,5	9.62
10	2400	2100	0,5	9.31
11	2700	2500	0,5	9.46
12	2700	1700	0,5	9.42
13	2700	2100	0,6	9.62
14	2700	2100	0,4	9.31

В Табл. 3 за всеки изрязан контур е получена стойност за относителното отклонение от точността ΔR, % за която по стандартна методика [8] е изведен регресионен модел.

Моделът на относително отклонение от точността ΔR, % при лазерно рязане има вида:

$$\Delta R = 9.41593 - 0.023609 X_1 + 0.107756 X_2 + 0.162448 X_3 + 0.0719866 X_1^2 + 0.156836 X_1 X_2 - 0.337385 X_1 X_2 + 0.03429 X_2^2 + 0.0487461 X_3^2$$

За модела е направена проверка за адекватност, резултатите от които са: Коефициент на множествена регресия  $R = 0.9517$ ;

Проверка по Фишер:

F изчислено  $6.0078 > F$  таблично  $4.8183$  ( $\alpha = 0.05, 8, 5$ ).

Като резултат от проверката може да се определи, че моделът е адекватен и може да бъде използван за прогнозиране.

Анализът на регресионния модел със системата DEFMOT е показан на Фиг. 3, където със съответен цвят е изобразена по тримерната скала чрез проектиране повърхнината на отклика, относителното отклонение от точността ΔR, %. Стойностите



## ЛИТЕРАТУРА:

- [1] H.A. Eltawahni, M. Hagino, K.Y. Benyounis, T. Inoue, A.G. Olabi, Effect of CO<sub>2</sub> laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L, Optics & Laser Technology, Volume 44, Issue 4, 2012, Pages 1068-1082, ISSN 0030-3992,
- [2] K. Huehnlein, K. Tschirpke, R. Hellmann, Optimization of laser cutting processes using design of experiments, Physics Procedia, Volume 5, Part B, 2010, Pages 243-252, ISSN 1875-3892.
- [3] Dubey, A.K., Yadava, V. Robust parameter design and multi-objective optimization of laser beam cutting for aluminium alloy sheet. Int J Adv Manuf Technol 38, 268–277 (2008)
- [4] Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava, Multi-objective optimisation of laser beam cutting process, Optics & Laser Technology, Volume 40, Issue 3, 2008, Pages 562-570.
- [5] Kondayya, D., Gopala Krishna, A. An integrated evolutionary approach for modelling and optimization of laser beam cutting process. Int J Adv Manuf Technol 65, 259–274 (2013)
- [6] B. Adelman, R. Hellmann, Fast Laser Cutting Optimization Algorithm, Physics Procedia, Volume 12, Part A, 2011, Pages 591-598, ISSN 1875-3892
- [7] Genna S, Menna E, Rubino G, Tagliaferri V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. Applied Sciences. 2020; 10(14):4956.
- [8] Vuchkov, I., Boyadjieva, L., Quality Improvement with Design of Experiments. A Response Surface Approach, 2001
- [9] Tontchev, N., „Materials science, Effective solutions, and technological variants“, Lambert, Academic Publishing, 2014, 142 p.
- [10] Tontchev, N., Gaydarov, V., Hristov, N., "Analyses and applications using the computational approach “DEFMOT”, Sofia, 2022, 167 p. (in Bulgarian)

## METHOD AND MODEL INVESTIGATING RELATIVE DEVIATION FROM ACCURACY IN LASER CUTTING OF C235

**Nikolay Tontchev**  
tontchev@vtu.bg

**Viktor Georgiev**  
viktor\_georgiev@vtu.bg

**Emil Yankov**  
eyankov@uni-ruse.bg

**Todor Kableshkov University  
of Transport, 158 Geo Milev  
Str., 1574 Sofia**

**Todor Kableshkov University  
of Transport, 158 Geo Milev  
Str., 1574 Sofia  
BULGARIA**

**University of Ruse „Angel  
Kanchev“, 8 Studentska Str.,  
7017 Ruse**

**Key words:** Laser cutting, laser cutting modes for C235 steel, modeling, multifactorial analysis.

**Abstract:** This paper presents an analysis using the design methodology based on the response of investigated quantities in the optimization of laser cutting parameters in terms of dimensional accuracy for C235 products. The input factors, such as cutting speed, power and carbon dioxide pressure, on the quality cut, expressed by the relative deviation from accuracy, are examined. The paper proposes an algorithm and a regression model to optimize the deviation from the dimensions between a model and a cut contour, by minimizing the error of this deviation. Based on the conducted experiment and research results, a generalized methodology was created. It can be used after a planned experiment to determine the accuracy of any contours of a test material of a specific thickness.