



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене“

маг. инж. ПЕТЪР СТОЯНОВ ЦВЯТКОВ

**ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ЛАЗЕРНО ЦВЕТНО
МАРКИРАНЕ НА ИЗДЕЛИЕ ОТ ВЪГЛЕРОДНА СТОМАНА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация
за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Област на висше образование: 5.Технически науки
Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство
Докторска програма: Точно уредостроене

Габрово, 2026 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене”

маг. инж. ПЕТЪР СТОЯНОВ ЦВЯТКОВ

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ЛАЗЕРНО ЦВЕТНО МАРКИРАНЕ НА ИЗДЕЛИЕ ОТ ВЪГЛЕРОДНА СТОМАНА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5.Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Докторска програма: Точно уредостроене

Научени ръководители:

доц. д-р инж. Димчо Йорданов Пулов ТУ- Габрово

проф. д-р Любомир Костадинов Лазов РТУ - Латвия

Рецензенти:

доц. д-р инж. Николай Тодоров Долчинков

доц. д-р инж. Цанко Владимирова Караджов

Габрово, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Машиностроене и уредостроене ” към факултет „Машиностроене и уредостроене ” на Технически университет – Габрово, проведен на 15.06.2026 г.

Дисертационният труд съдържа 184 страници. Научното съдържание е представено в увод, 5 глави и едно приложение и включва 107 фигури и 20 таблици. Цитирани са 150 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката/изследванията на/по дисертационния труд е/са извършена/и в катедра „Машиностроене и уредостроене ” към факултет „Машиностроене и уредостроене ” на Технически университет – Габрово , лазерния център към RTU – Rezekne, Латвия и във фирма „Технолес ” АД.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на Г. ОТ Ч. В зала на Технически университет – Габрово.

Автор: маг. инж. ПЕТЪР СТОЯНОВ ЦВЯТКОВ

Заглавие: Оптимизиране на процеса на лазерно цветно маркиране на изделие от въглеродна стомана

Тираж: 5 бр.

Място на отпечатване:

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Лазерното маркиране се утвърждава като ефективен метод за повърхностна модификация на метални изделия, благодарение на високата енергийна плътност, добрата насоченост и кохерентност на лазерното лъчение. В съвременната индустрия съществува нарастваща необходимост от трайни, висококонтрастни и екологични маркировки върху метални изделия, които да осигуряват проследимост, защита от фалшификация и дълготрайна четливост при екстремни експлоатационни условия.

Анализът на научната литература показва, че изследванията в областта на цветното лазерно маркиране са фокусирани предимно върху титан и неръждаеми стомани, като над 60% от публикуваните трудове са посветени на тези материали. Въглеродната стомана С75, въпреки широкото ѝ приложение в машиностроенето и инструменталното производство, е значително по-слабо проучена. Това създава съществена научна празнина, която настоящата дисертационна работа цели да запълни.

Практическата значимост на изследването се обуславя от необходимостта от внедряване на устойчиви технологии в производството на местни предприятия, специализирани в производството на циркулярни триони и банцигови ленти. Традиционните методи за маркиране – електрохимични, механични и мастиленоструйни – се характеризират с редица недостатъци, включително използване на вредни химикали, ниска производителност, недостатъчна разделителна способност и ниска устойчивост на маркировките.

Научният интерес към лазерното маркиране бележи устойчив възходящ тренд, като анализът на публикациите в Scopus, Google Scholar и ScienceDirect показва среден годишен ръст от 10-12% през последните години, което потвърждава актуалността на тематиката.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационната работа е да се оптимизира процесът на лазерно цветно маркиране на изделия от въглеродна стомана чрез разработване и прилагане на теоретично-математически модел, методични подходи и технологични режими, позволяващи количествено изследване на влиянието на лазерните и технологичните параметри върху характеристиките на маркировката.

За изпълнение на формулираната цел са решени следните задачи:

1. Идентифициране и систематизиране на факторите, влияещи върху контраста и четимостта на лазерната маркировка върху въглеродна стомана C75.
2. Разработване на теоретично-математически модел за определяне на подходящи лазерни параметри при цветно маркиране на въглеродна стомана.
3. Разработване на методика за провеждане на експериментални изследвания на процеса на лазерно цветно маркиране.
4. Подбор и конфигуриране на лазерен източник и сканираща система, отговарящи на изискванията на изследването и на индустриалната приложимост на процеса.
5. Експериментално изследване на влиянието на лазерните и технологичните параметри върху основните характеристики на маркировката, включително контраст, грапавост, микротвърдост, цветова разлика, възпроизводимост на цветовете, устойчивост на надраскване и корозионна устойчивост.

Методи на изследване

Теоретични методи: анализ на научната литература, математическо моделиране на топлофизичните процеси, числени пресмятания на критичните плътности на мощността, анализ на енергийния баланс.

Експериментални методи: лазерно маркиране с фибър лазерни системи Raycus RF-30 и Rofin PowerLine F-20 Varia, спектрофотометрични измервания, профилометрия с лазерен микроскоп Olympus OLS5000, изпитване на микротвърдост с динамичен ултрамикротвърдомер DUH-211S, изпитване на устойчивост на надраскване с CSM REVETEST Scratch Macrotester, корозионни изпитвания в камера Q-FOG CCT1100.

Научна новост

Научната новост на дисертационния труд се състои в:

1. Разработването на интегрирана методика за оптимизация на процеса на лазерно цветно маркиране, обединяваща аналитични модели, числен анализ и експериментални зависимости, като са определени критичните стойности на плътността на мощността, съответстващи на режимите на окисление, топене и изпарение при въздействие върху стомана C75.
2. Дефинирането на технологичен прозорец за цветно лазерно маркиране на въглеродна стомана C75, основан на експериментално валидирани граници на основните параметри.
3. Установяването на количествени зависимости между контраста, цветовата разлика и морфологията на повърхността на лазерно маркирани зони, експериментално потвърдени за въглеродна стомана C75.

Приложимост

- Демонстрирана практическа приложимост на резултатите за целенасочено проектиране на маркировки с предварително зададени функционални свойства.
- Създадена методика за оценка на възпроизводимостта на цветовете, която може да бъде използвана като инструмент за контрол на качеството при серийно и масово производство.
- Разработени практически препоръки за индустриално внедряване на процеса на цветно лазерно маркиране на въглеродна стомана С75.

Апробация на дисертационния труд

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани и обсъдени на международни научни конференции и са публикувани в следните издания:

1. Pulov, D., Tsvyatkov, P. Optical Systems for Reducing the Divergence of Laser Beams 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 3, pp 339–343, DOI: 10.17770/etr2023vol3.7217
2. Tsvyatkov, P., Teirumnieks, E., Yankov, E., Pīgožnis, K., Lazov, L. Investigation of the Influence of Technological Parameters of Laser Marking on the Degree of Contrast 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 2, pp. 370–374, DOI: 10.17770/etr2023vol3.7319
3. Tsvyatkov, P., Teirumnieks, E., Yankov, E., Pīgožnis, K., Lazov, L., Investigation of Surface Roughness of Carbon Steel Machined Parts after Nanosecond Fiber Laser Marking 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 2, pp. 358–362, DOI: 10.17770/etr2023vol3.7317
4. Tsvyatkov, P., E. Yankov, L. Lazov, L., E. Teirumnieks, E. Teirumnieks, Color marking of stainless steel and titanium with the laser oxidation method 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 2, pp. 363–369, <https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7318>
5. L Lazov , P Tsvyatkov , N Angelov. Analysis of the process of laser ablation of marble surfaces. XXI International Conference and School on Quantum Electronics. Resources. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. p. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1859/1/012014
6. P. Tsvyatkov, Reproducibility of laser color marking on c75 steel obtained by a nanosecond pulsed laser , Mashinostroene i mashinoznanie, 2026

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е структуриран в увод, пет глави, заключение и приложения. Общият обем е 146 страници, включващи 74 фигури, 22 таблици и 1 приложение. Цитирани са 186 литературни източника.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1: Анализ на съвременното състояние при цветното маркиране на метални изделия

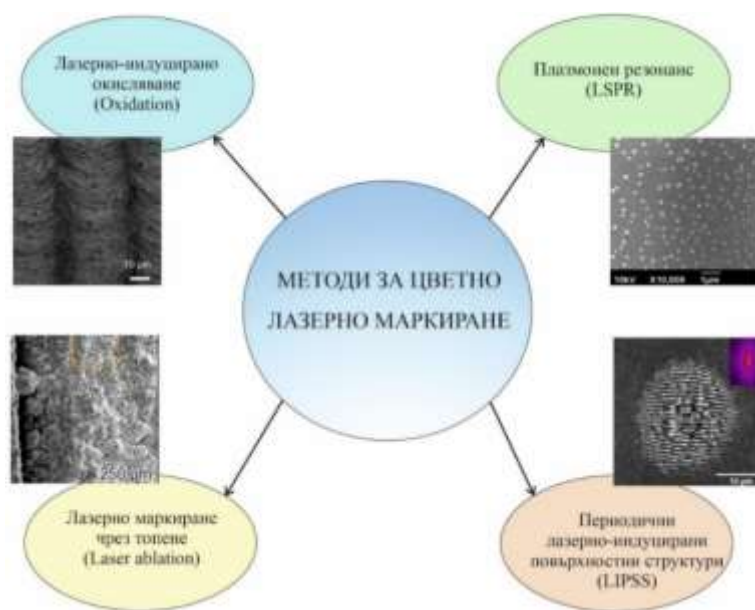
1.1 Конвенционални методи за цветно маркиране на метали

Традиционните методи за оцветяване на метални повърхности включват електролитно (анодиране), термично и термохимично окисление, при които промяната на оптичните свойства се дължи на контролирания растеж на оксидни слоеве. Тези процеси често се характеризират със сложна поддръжка на оборудването, висока енергийна консумация и генериране на вредни за околната среда отпадъци. Мазилеоструйният и термотрансферният печат осигуряват по-голяма гъвкавост и производителност, но получените маркировки са с ниска устойчивост на износване и лесно се изтриват.

1.2 Лазерно маркиране на метални изделия Лазерното маркиране се утвърждава като високотехнологична алтернатива, предлагаща **висока прецизност** с възможност за създаване на устойчиви оксидни слоеве, без механичен контакт с материала. Методът позволява пълна автоматизация и екологична съвместимост, и не използва консумативи и агресивни химикали.

1.3 Методи за лазерно цветно маркиране

Съгласно литературния анализ, съществуват четири метода за цветното лазерно маркиране, които са показани на **Error! Reference source not found..**



Фигура 5. Методи за лазерно цветно маркиране:

Методът за лазерно окисляване може да се внедри в промишлеността. Формираните тънки интерферентни оксидни филми (10-500 nm) са устойчиви на външни влияния.

1.4 Влияние на технологичните и лазерните параметри върху свойствата и структурата на обработените с лазерно лъчение материали.

Качеството и характеристиките на маркировката се определят от комплексното взаимодействие на следните изследвани параметри:

- **Мощност и плътност на енергията:** Оптималните нива (напр. 18–22 W за неръждаема стомана) гарантират висок контраст, докато превишаването им води до прегряване и разрушаване на слоя.
- **Скорост на сканиране (v):** Влияе директно върху дебелината на оксидния слой; при високи скорости (>400 mm/s) оксидацията е недостатъчна за контрастна маркировка.
- **Честота на импулсите (f):** Определя топлинното натрупване; високите честоти могат да доведат до по-нисък контраст поради прегряване.
- **Стъпка между линиите (x):** Малката стъпка (<6 μm) води до голямо препокриване и нехомогенност.
- **Дефокус:** Положителният дефокус (+0.5 до +1.5 mm) способства за формиране на по-равномерен защитен слой и подобрява устойчивостта на корозия.
- **Брой повторения:** Обикновено 2-3 повторения осигуряват максимална устойчивост и микротвърдост, докато повече преминавания могат да предизвикат напукване.

Изследванията показват, че тези параметри пряко влияят върху контраста, микротвърдостта (повишение до 30%), износоустойчивостта и корозионната устойчивост на повърхносния слой.

1.5 Цветна маркировка върху метали

Научните изследвания в областта на цветното лазерно маркиране се фокусират предимно върху **титан и неръждаема стомана** (над 60% от публикациите), заради способността им да формират стабилни оксидни слоеве с висока устойчивост и широка цветова гама. В същото време материали като алуминий и медни сплави остават по-слабо проучени, а за **въглеродната стомана S75** практически липсват систематични данни в литературата. Този научен дефицит обосновава необходимостта от детайлно изследване на технологичните параметри при маркирането на по-слабо проучени, но масово използвани в индустрията материали

1.6 Видове лазери за цветно маркиране

Изборът на лазерен източник е критичен за механизма на оцветяване. Основните типове включват наносекундни фибър лазери (най-разпространени в индустрията), МОРА системи, пикосекундни и фемтосекундни лазери (за прецизни наноструктури с минимално термично влияние).

Обобщената сравнителна характеристика на тези източници е представена в таблица 8 по-долу:

Таблица 1. Обобщена информация за четирите лазера, използвани за цветно маркиране.

Критерий	Наносекундни лазери (ns)	МОРА лазери	Пикосекундни лазери (ps)	Фемтосекундни лазери (fs)
Продължителност на импулса	10–300 ns	10 ns – 1 μ s (регулируеми)	1–100 ps	10–500 fs
Подходящи материали	Неръждаема стомана, алуминий, някой пластмаси	Неръждаема стомана, титан, някои полимери	Метали (LIPSS ефект), керамика, прозрачни материали	Всички метали, стомана, титан с наноструктури, стъкло, полимери
Цветове	★★★ (ограничена гама): черно, златисто, сиво	★★★★★ (по-широка гама): син, зелен, червен	★★★★★ (LIPSS ефекти)	★★★★★ широка гама
Скорост на маркиране	★★★★★ (Висока)	★★★★★ (Средна)	★★★★★ (Ниска)	★★★★★ (Много ниска)
Интеграция в поточни линии	★★★★★ (Лесно)	★★★★★ (Оптимизация)	★★★★★ (Сложна)	★★★★★ (Ограничена)
Термично въздействие	★★★★★ (Високо)	★★★★★ (Умерено)	★★★★★ (Минимално)	★★★★★ (Отсъства)
Сложност на управление	★★★★★ (Лесно)	★★★★★ (Средна)	★★★★★ (Сложно)	★★★★★ (Много сложно)
Цена	★★★★★ (Ниска)	★★★★★ (Средна)	★★★★★ (Висока)	★★★★★ (Много висока)
Енергийна ефективност	★★★★★ (Средна)	★★★★★ (Добра)	★★★★★ (Ниска)	★★★★★ (Много ниска)
Производители и типове	Фибърни лазери (IPG, SPI), Nd:YAG	МОРА-фибърни (IPG, Raycus)	Твърдотелни (Trumpf, Coherent)	Титан-сапфирни, Yb-легиранни фибърни

Въз основа на извършения анализ в тази част от работата могат да бъдат направени следните изводи:

1. **Значителен научен дефицит при въглеродните стомани:** Докато титанът и неръждаемата стомана са обект на мащабни проучвания, въглеродната стомана (особено тип С75) е значително по-слабо изследвана по отношение на лазерното цветно маркиране, а конвенционалните методи като анодирането са напълно неприложими за този материал.
2. **Предимства на лазерното окисляване:** Методът на лазерно окисляване се определя като най-перспективният подход за цветно маркиране на въглеродни стомани, тъй като позволява формирането на стабилни и устойчиви оксидни слоеве с висока прецизност и екологична съвместимост.
3. **Избор на оптимална технология:** Индустриалното приложение се реализира най-ефективно чрез наносекундни фибър лазерни системи, поради тяхната надеждност и лесна интеграция, докато иновативни методи като LIPSS и DLIP остават ограничени заради високата цена и сложната си конфигурация.
4. **Необходимост от систематични изследвания:** Констатирана е липса на количествени зависимости между технологичните параметри (мощност, скорост, честота) и експлоатационните характеристики на маркировката (контраст, устойчивост и цвят) върху въглеродна стомана, което обосновава актуалността на дисертационния труд

ГЛАВА 2. ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ НА КОНТРАСТА НА МАРКИРОВКАТА

Целта на тази част от работата е формулирането на теоритичните основи за анализ и оптимизация на процеса на лазерно цветно маркиране. Въведените на аналитични модели, които ще служат като инструмент за планиране на експерименталните изследвания.

2.1 Фактори, свързани с лазерния източник. Тези фактори определят концентрация на енергията в зоната на взаимодействие. Основен параметър е средната мощност P , която при импулсен режим се определя от енергията на импулса E_p и честотата ν :

$$P = E_p \cdot \nu \quad (2.1)$$

За формирането на контрастна маркировка от решаващо значение е плътността на мощността q_s ,

$$q_s = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (2.5)$$

характеризираща концентрацията на енергия върху работното петно с диаметър d .

Степента на енергийно натрупване при движение на лазерния лъч по права линия се определя чрез коефициента на припокриване на импулсите

$$k_{Lx} = (1 - \frac{v}{v \cdot d}).100\% \quad (2.8)$$

където v е скоростта на маркиране. Оптичните характеристики, като дължината на вълната λ и коефициентът на поглъщане α , допълнително определят дълбочината на проникване и интензивността на нагряване.

2.2 Фактори, свързани с технологичния процес

Технологичните параметри управляват времето за взаимодействие и пространственото разпределение на енергията. Скоростта на маркиране v е в обратна зависимост от времето на въздействие $t_{вз}$ на лазерния лъч върху материала:

$$t_{вз} = \frac{d}{v} \quad (2.11)$$

При растерно маркиране качеството се определя от стъпката между линиите Δx , която задава коефициента на припокриване на растерните линии k_{Ly} :

$$k_{Ly} = (1 - \frac{\Delta x}{d}).100\% \quad (2.14)$$

Допълнителни фактори като дефокусировката и броят на повторенията N позволяват фино регулиране на доставената енергия за постигане на по-дълбока или по-интензивна оксидация.

2.3 Фактори с комплексен характер Тези величини обединяват влиянието на основните лазерни и технологични параметри за по-пълно описание на процеса. Линейната плътност на енергията (ЛПЕ) отразява погълнатата енергия на единица дължина в зоната на маркиране. Линейната импулсна плътност (ЛИП) съответства на броя импулси, паднали на единица дължина по траекторията. За оценка на енергията на единица площ се използва ефективната енергия

$$E_{eff} = ЛПЕ \cdot ЛИП = \frac{P \cdot v}{v^2} \quad (2.18)$$

2.4 Фактори, свързани със свойствата на материала.

Оптичните и топлофизичните характеристики, като коефициентите на поглъщане и топлопроводимост, определят топлинния баланс и фазовите изменения, необходими за формиране на оксиден слой.

Изводи и констатации

1. Анализът показва, че лазерните и технологичните параметри са функционално взаимосвързани и трябва да се оценяват като съвкупност, определяща ефективното енергийно натоварване.
2. Въведените обобщени енергийни величини с комплексен характер позволяват редуциране на броя на независимите фактори и служат като основа за прецизно оптимизиране на процеса на маркиране.
3. Идентифицираните ключови параметри (мощност, скорост, честота и стъпка) формират аналитичната рамка за провеждане на експерименталните изследвания върху въглеродна стомана C75

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕН АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РАБОТНИ ИНТЕРВАЛИ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ ПРИ ЛАЗЕРНО ЦВЕТНО МАРКИРАНЕ

3.1 Определяне на работните интервали на плътността на мощността Настоящата глава е посветена на численото определяне на работните интервали на основните технологични параметри, необходими за планиране на експерименталните изследвания върху въглеродна стомана C75. Чрез теоретични математически пресмятания се определят границите между режимите на окисление, топене и изпарение, които са критични за качеството и енергийната ефективност на процеса. Получените резултати служат за научно обоснован избор на експериментални режими и интерпретация на крайните резултати.

Минимален диаметър на работното петно на лазера Размерът на фокусното петно d_0 е критичен параметър, тъй като пряко влияе върху плътността на мощността. Изчисленията се извършват по следната формула:

$$d_0 = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (3.1)$$

Отчита се качеството на лъчението, фокусното разстояние, а също и дължината на вълната.

Максимална плътност на мощността q_{smax} се определя от максималната средна мощност P_{max} и диаметъра на петното.

$$q_{smax} = \frac{4P_{max}}{\pi d_0^2} \quad (3.2)$$

За използваната система с мощност 30 W и фокусно разстояние 290 mm са получени следните стойности:

Таблица 2. Параметрите на маркиращата система

Laser	P_{max}	f	d_0	q_{smax}
Fibre	30 W	290 mm	43,24 μm	$20,4 \times 10^9, \text{W/m}^2$

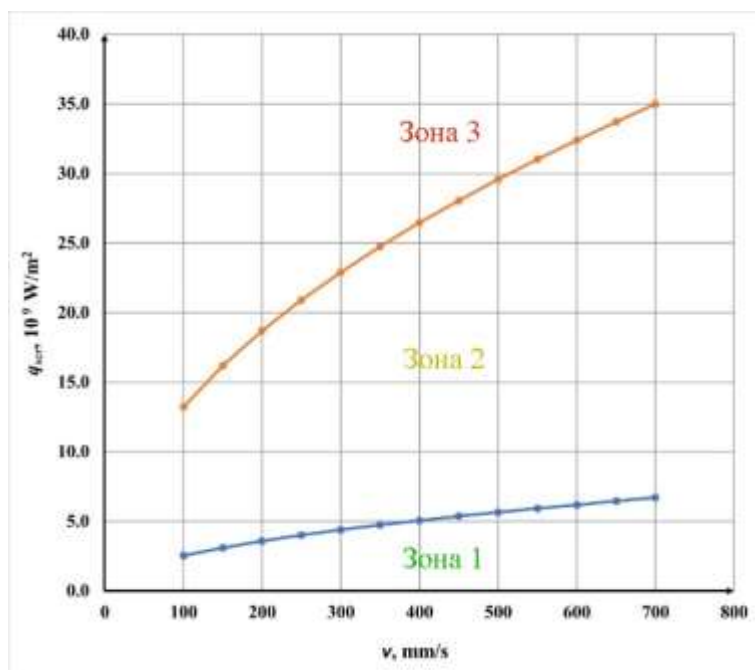
Критична плътност на мощността на топене (q_{scm}) и изпарение (q_{scv})

За определяне на праговите условия при стомана C75 се използват изразите:

$$\text{Топене} \quad q_{scm} = \frac{(1+s)k(T_m - T_0)}{2A} \sqrt{\frac{\pi \cdot v}{a \cdot d}} \quad (3.3)$$

$$\text{Изпарение} \quad q_{scv} = \frac{(1+s'')k(T_v - T_0)}{2A} \sqrt{\frac{\pi \cdot v}{a \cdot d}} \quad (3.5)$$

На фигура 12 е показана зависимост на критичната плътност на мощността от скоростта.



Фигура 1. Графики на зависимостта $q_{scr} = q_{scr}(v)$ при маркиране с фибър лазер FP-30: синя – на топене; червена – на изпарение.

Въз основа на изчисленията се дефинират три работни зони:

1. **Зона на оксидация (Зона 1):** Намира се под кривата на топене ($q_s < q_{scm}$); тук се реализира цветно маркиране чрез контролирано нагряване и оксидация.
2. **Зона на топене (Зона 2):** Разположена между кривите на топене и изпарение; в нея материалът преминава в течна фаза.
3. **Зона на изпарение (Зона 3):** Намира се над кривата q_{scv} ; тук се осъществява гравирание и създаване на канали чрез отнемане на материал.

Изводи и констатации

1. Определянето на критичните плътности на мощността позволява точно разграничаване на режимите на оксидация, топене и изпарение, което дефинира технологичните прагове.
2. Установено е, че с увеличаване на скоростта от 100 до 700 mm/s, необходимата плътност на мощността за преход към топене или изпарение нараства нелинейно с около 2,65 пъти.
3. За висококачествена цветна маркировка се препоръчват честоти в интервала 80–160 kHz и растерна стъпка 0,02–0,035 mm, осигуряващи максимална хомогенност на оксидния слой при индустриални скорости на обработка

ГЛАВА 4. АПАРАТУРА И МЕТОДИКА НА ПРОВЕДЕНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

4.1 Експериментална установка и материал За нуждите на експеримента са използвани две лазерни системи на базата на файбър лазери – Raycus RF-30 и ROFIN PowerLine F-20 Varia. Системите са оборудвани с високоточни галванометрични скенери Galvoscan RS1001 и Rofin BLG-P12, осигуряващи скорости на маркиране до 20 000 mm/s. Управлението на процеса се извършва чрез специализиран софтуер EZcad и Visual Laser Marker, позволяващ прецизна настройка на енергийните параметри.

Материалът, обект на изследване, са студено валцувани листове от високовъглеродна стомана C75 с дебелина 1 mm. Повърхността на материала се характеризира с първоначална грапавост $Ra=0.112 \mu m$. За нуждите на изследването са подготвени серии от образци, при които систематично са вариран основните енергетични характеристики на лазерното лъчение като мощност, честота и продължителност на импулса. Проследено е влиянието на технологичните параметри чрез промяна на скоростта на сканиране и стъпката между растерните линии, задавани прецизно чрез специализирания управляващ софтуер. Чрез тези вариации в режимите на маркиране се цели установяване на оптималните условия за формиране на устойчиви оксидни слоеве с различен цвят и контраст върху повърхността на стомана C75. За провеждане на комплексните изпитания са подготвени серии от образци, показани в Таблица 16

Таблица 3. Брой изследвани образци по вид на проведените изследвания

Вид на изследването	Размер	Брой
Изследване на контраст	$80 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	5 бр.
Изследване на грапавост	$80 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	5 бр.
Цветова разлика	$80 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	10 бр.
Тест за устойчивост на надраскване	$13 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	16 бр.
Тест за корозоустойчивост	$80 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	6 бр.
Възпроизводимост на цвета	$80 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	8 бр.
Четимост на маркировката	$80 \times 100 \times 1 \text{ mm}$	4 бр.
Микротвърдост	$10 \times 10 \times 1$	8 бр.

4.2 Използвана апаратура

- **Olympus OLS5000:** 3D измервателен лазерен микроскоп, използван за визуален анализ на повърхността и прецизно измерване на грапавостта.
- **Shimadzu DUH-211S:** Динамичен ултрамикротвърдомер за определяне на твърдостта на тънки оксидни слоеве.
- **CSM REVETEST Scratch Macrotester:** Апарат за изследване на коефициента на триене, адхезията и устойчивостта на маркировката към надраскване.
- **Q-FOG CCT1100:** Камера за ускорени корозионни изпитания в солена мъгла и променлива влажност.
- **Ocean Optics USB4000:** Спектрофотометър за измерване на спектралните характеристики и координатите на цвета в системата CIE Lab.

4.3 Методики на проведените изследвания

Методика за определяне на контраста на маркировката

Определянето на контраста се извършва чрез софтуерна обработка на цифрови изображения, съгласно стандарт БДС 16383:1986. Цветните изображения се конвертират в сива скала (стойности 0–255) с помощта на Adobe Photoshop, за да се идентифицират разликите в интензивността. Измерват се стойностите на маркираната зона (N_x) спрямо необработения материал (N_f). Крайният контраст се изчислява чрез линейна интерполация, като за по-висока точност се взема средноаритметичната стойност от пет измервания.

Методика за определяне грапавостта на повърхностите Измерването се провежда с лазерен микроскоп OLYMPUS по оптичен метод съгласно стандарта ISO 4287. Методиката използва лазерно сканиране и регистриране на интерференцията, което позволява висока разделителна способност до 10 nm по вертикала. Анализират се ключови параметри като R_a . Получените данни позволяват оценка на промените в микрорелефа в зависимост от енергийната плътност на лазера.

Методика за определяне на микротвърдостта Микротвърдостта се изследва по метода на Vickers съгласно ISO 14577-1 чрез натоварване с диамантена пирамида с върхов ъгъл 136° . Върху повърхността се прилага сила от 50г. със задържане под товар за 22 секунди. Размерът на получената следа се измерва с камера, след което твърдостта (HV) се изчислява аналитично. За гарантиране на надеждност се правят по десет отпечатъка на зона, като допустимата неопределеност е под $\pm 3\%$.

Методика за изпитване на корозионната устойчивост Изпитването се провежда в среда на неутрална солена мъгла (5% NaCl) при температура $35,0^\circ\text{C}$ съгласно стандарт EN ISO 9227. Образците се подлагат на въздействие в

продължение на 48 часа, като се следи нивото на рН на разтвора в границите 6,5–7,0. Оценката на корозията се извършва чрез измерване на дълбочината на питинга чрез метода на двойното фокусиране с микроскоп. Допълнително се определя процентното съотношение на корозиралата площ спрямо общата повърхност на маркировката.

Методика за измерване на цветовата разлика За изследване на цветовите характеристики се използва стандарт ISO 11664-6 и системата CIE Lab (L^*, a^*, b^*). Спектрофотометърът се калибрира с еталонна бяла плочка, а измерванията се извършват с източник D65 и геометрия 45°/0. Изчислява се общата цвetoва разлика ΔE_{ab} като евклидово разстояние между координатите на маркираната и немаркираната зона. За критерий за цвetoво сходство в индустриални условия е приета стойност $\Delta E_{ab} \leq 7$.

Методика за измерване на устойчивост на надраскване Износоустойчивостта и адхезията се определят чрез „scratch test“ по стандарт ISO 20502 с използване на диамантен индентор Rockwell C. Прилага се прогресивно натоварване от 0 до 30 N със скорост 10 N/mm, като се регистрират коефициентът на триене и дълбочината на проникване. Чрез оптичен микроскоп (над 200x) се идентифицира критичната сила L_c , при която се появяват първите пукнатини или олющване на оксидния слой. Този метод позволява сравнителен анализ на механичната здравина на маркировката при различни лазерни режими.

4.4 Изводи и констатации

1. Избраните лазерни системи Raycus и Rofin притежават необходимата стабилност и точност на импулса за постигане на възпроизводими резултати върху стомана C75.
2. Комплексната експериментална апаратура и прилагането на международно признати стандарти (ISO, БДС, EN) гарантират научната достоверност и точност на измерванията.
3. Комбинацията от оптични, механични и корозионни методи позволява цялостна количествена оценка на експлоатационните характеристики на лазерната маркировка

Глава 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

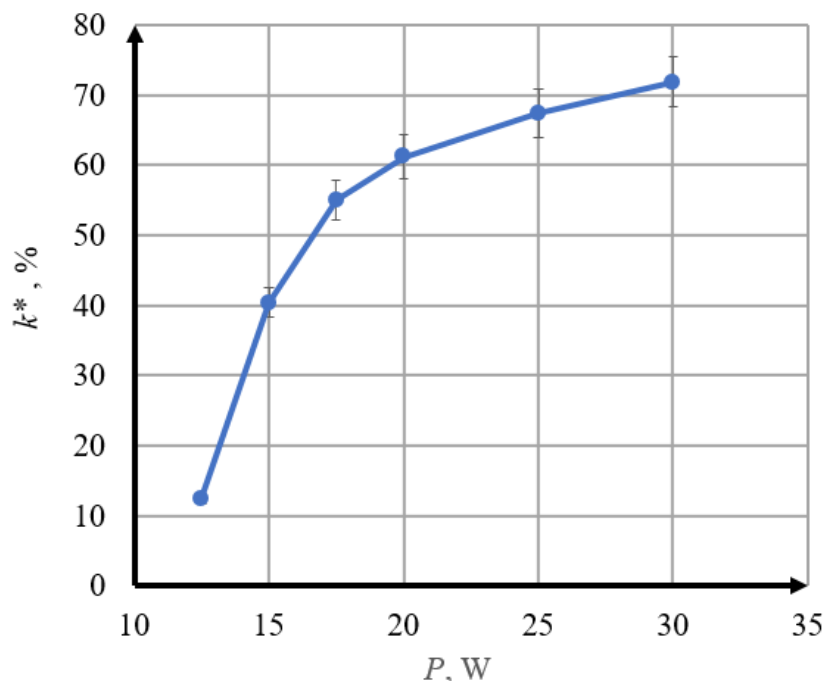
В настоящата глава са представени и детайлно анализирани резултатите от проведените експериментални изследвания, насочени към установяване на количествените зависимости между лазерните параметри и основните експлоатационни характеристики на цветната маркировка

Проведени са голям брой експериментални изследвания, като по-важните резултати от тях са:

Изследване на контраст k^* , %

Влияние на средната мощност P на лазерния източник

При маркиране на образец от въглеродна C75 с фибър лазер FP - 30 със следните параметри: $v = 300 \text{ mm/s}$; $\Delta x = 0,03 \text{ mm}$; $\nu = 40 \text{ kHz}$ за мощност в $P \in [12, 30] \text{ W}$



Фигура 2. Графика, представяща експерименталната зависимост $k^*=k^*(P)$

От графиката могат да се направят следните изводи :

За мощности в диапазона $P \in [12, 17] \text{ W}$ скоростта на нарастване на контраста като функция на мощността $\Delta k^* / \Delta P$ е $8,6 \text{ \% / W}$

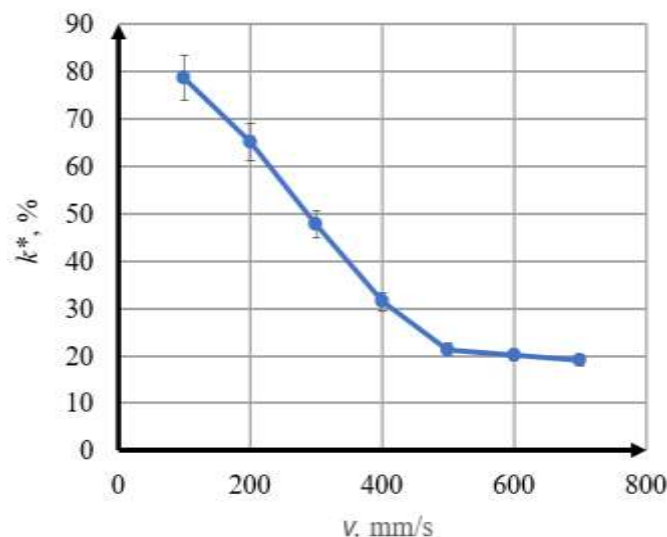
В този интервал маркирането се получава маркиране посредством топене.

За мощности в диапазона $P \in [17, 30] \text{ W}$ скоростта на нарастване на контраста във функция от мощността $\Delta k^* / \Delta P$ е $1,36 \text{ \% / W}$; С по-високата плътност на мощността в този диапазон на маркирането се получава посредством топене и изпарение.

Скоростта на промяна на контраста в интервала $P \in [12, 17] \text{ W}$ нараства 6 пъти по-бързо от този в интервала $P \in [17, 30] \text{ W}$. Може да се каже, че контрастът на маркировката, получена чрез изпарение, нараства по-бавно.

Оптималният интервал за повърхнинна плътност на мощността на лазерното лъчение при скорост на маркиране $v = 300 \text{ mm/s}$ е $q_s \in [6,37 \cdot 10^9; 7,64 \cdot 10^9] \text{ W/m}^2$.

Влияние на скоростта v на маркиране



Фигура 3. Графика, представяща експерименталната зависимост $k^* k^*(v)$

От графиката могат да се направят следните изводи :

С намаляване на времето на въздействие, контрастът също намалява;

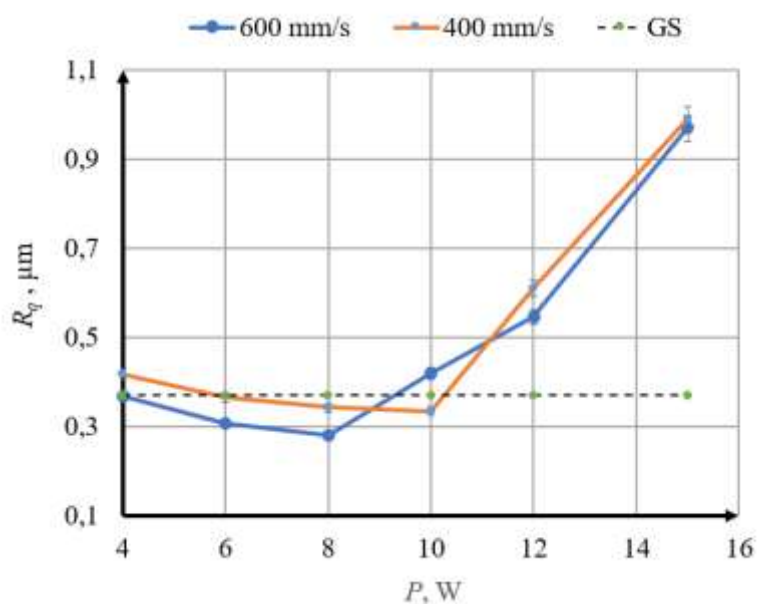
Когато скоростта се увеличава в диапазона $v \in [100, 500]$ mm/s , се наблюдава нелинейно намаляване на контраста, като скоростта на намаляване функция от скоростта $\Delta k^* / \Delta v \in 0,147 \text{ \% / mm/s}$;

За скорости в диапазона $v \in [500, 700]$ mm/s не се наблюдава промяна в контраста. Наблюдава се почти линейна зависимост.

За скорости в интервала $v \in [400, 700]$ mm/s не се препоръчва да се използва, тъй като контрастът на маркировката е близък до минималната стойност от 15%, за четливост на маркировката.

Изследване на грапавостта R_q , μm

Изследване на грапавостта в диапазона $P \in [4, 15]$ W и $v = 400 \text{ mm/s}$ и 600 mm/s ; $\nu = 100 \text{ kHz}$; $\Delta x = 0,01 \text{ mm}$



Фигура 4. Графика, представяща експерименталната зависимост $R_q = R_q(P)$

От анализа на графиката могат да се направят следните изводи :

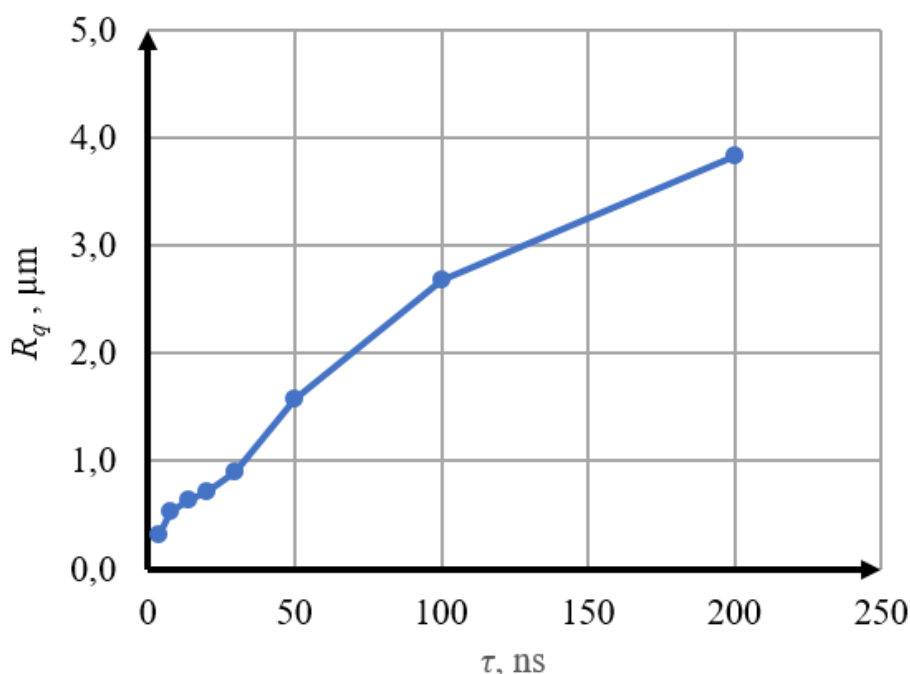
С увеличаване на мощността в диапазона $P \in [4, 15]$ W грапавостта на обработка нараства нелинейно и за двете изследвани скорости;

За мощности в диапазона $P \in [4, 8]$ W грапавостта на маркираната повърхност е под тази на материала при доставка.

За мощности в диапазона $P \in [10, 15]$ W скоростта на нарастване на грапавостта като функция на мощността $\Delta R_q / \Delta P$ е $0.131 \mu\text{m} / \text{W}$. След 10W, се наблюдава рязко увеличаване на грапавостта.

При 600 mm/s и 8 W се постига най-ниска грапавост до $0,281 \mu\text{m}$, след което грапавостта започва да нараства значително с увеличаване на мощността, достигайки до $0,971 \mu\text{m}$ при 15 W.

Влияние на продължителността τ на импулса в диапазона $\tau \in [4, 200]$ ns



Фигура 5. Графика, представяща експерименталната зависимост $R_q = R_q(\tau)$

От анализа на графиката могат да се направят следните изводи :

В интервала $\tau \in [20, 200]$ ns, нарастването на грапавостта става все по-изразено, достигайки стойност от $R_q = 3,836 \mu\text{m}$ при 200 ns.

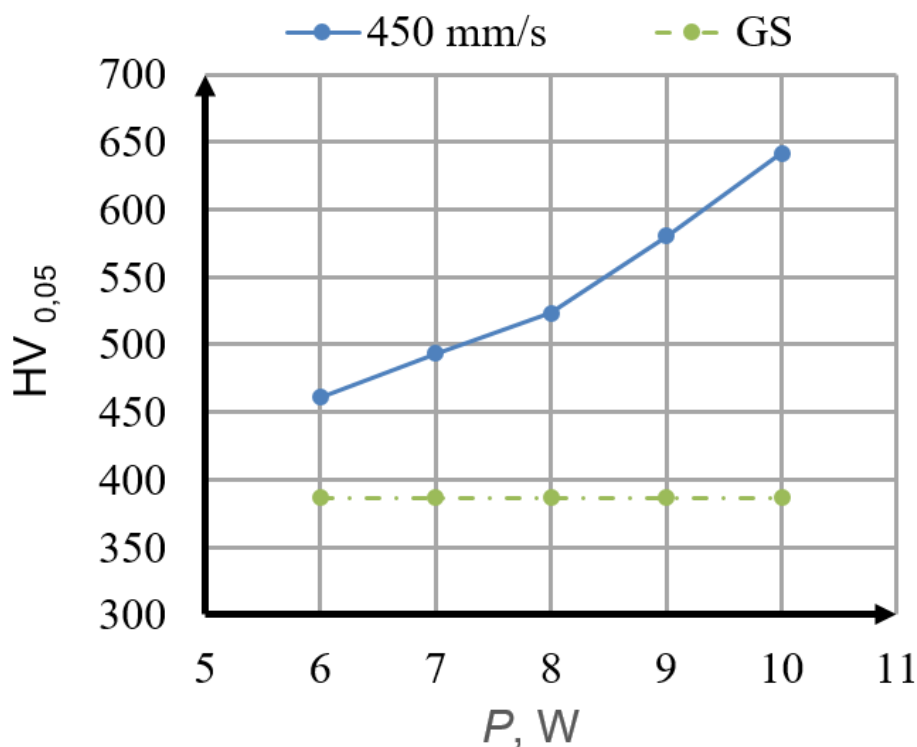
В интервала $\tau \in [4, 20]$ ns скоростта на нарастване на грапавостта като функция на продължителността на импулса $\Delta R_q / \Delta \tau$ е $0,0254 \mu\text{m}/\text{ns}$;

Грапавостта R_q нараства 1,47 пъти по-бързо в интервал $\tau \in [4, 20]$ ns в сравнение с втория интервал $\tau \in [20, 200]$ ns.

Направените изследвания показват, че по-дългите импулси водят до по-груба обработка на повърхността, което може да се обясни с по-голямото количество енергия

Изследване на микротвърдост $HV_{0,05}$

Влияние на средната мощност P на лазерния източник при маркиране на образец от въглеродна C75 с фибър лазер FP - 30 със следните параметри: $v = 450 \text{ mm/s}$; $\Delta x = 0,01 \text{ mm}$; $\nu = 100 \text{ kHz}$ за мощност в $P \in [6, 10] \text{ W}$



Фигура 6. Графика, представяща експерименталната зависимост $HV_{0,05} = HV_{0,05}(P)$.

От графиката могат да се направят следните изводи:

Увеличението на микротвърдостта на маркираната спрямо необработената повърхност (GS) е:

- При мощност $P = 6 \text{ W}$ е 18,49% увеличение
- При мощност $P = 10 \text{ W}$ е 64,91% увеличение

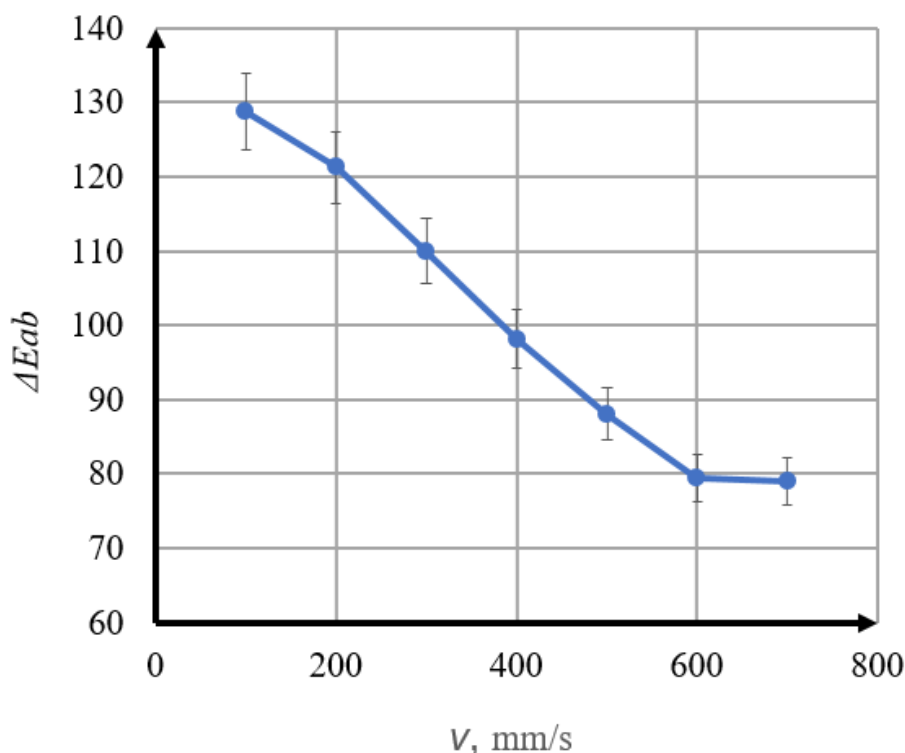
Микротвърдостта нараства линейно с изменение на мощността в диапазона $P \in [6, 10] \text{ W}$. В изследвания интервал скоростта на нарастване на микротвърдостта като функция на мощността $\Delta HV_{0,05} / \Delta P$ е $45 \text{ HV}_{0,05}/\text{W}$;

В интервала $P \in [9, 10] \text{ W}$ скоростта на нарастване на микротвърдостта като функция на мощността $\Delta HV_{0,05} / \Delta P$ е $61 \text{ HV}_{0,05}/\text{W}$. Микротвърдостта в този интервал е нараснала 1,57 пъти спрямо необработения (основен) материал;

Това изследване показва, че увеличаването на лазерната мощност води до значително подобрене на микротвърдостта на стомана C75, като това нарастване е по-изразено при по-високи мощности. Кривите на натоварване и проникване потвърждават повишаването на микротвърдостта с увеличаване на мощността.

Изследване на цветовата разлика

Влияние на скоростта v на маркиране при маркиране на образец от въглеродна C75 с файбър лазер FP - 30 със следните параметри: $P = 15 \text{ W}$; $\Delta x = 0,03 \text{ mm}$; $\nu = 40 \text{ kHz}$ за скорост $v \in [100, 700] \text{ mm/s}$



Фигура 7. Графика, представяща експерименталната зависимост $\Delta E_{ab} = \Delta E_{ab}(v)$

От анализа на графиката могат да се направят следните изводи:

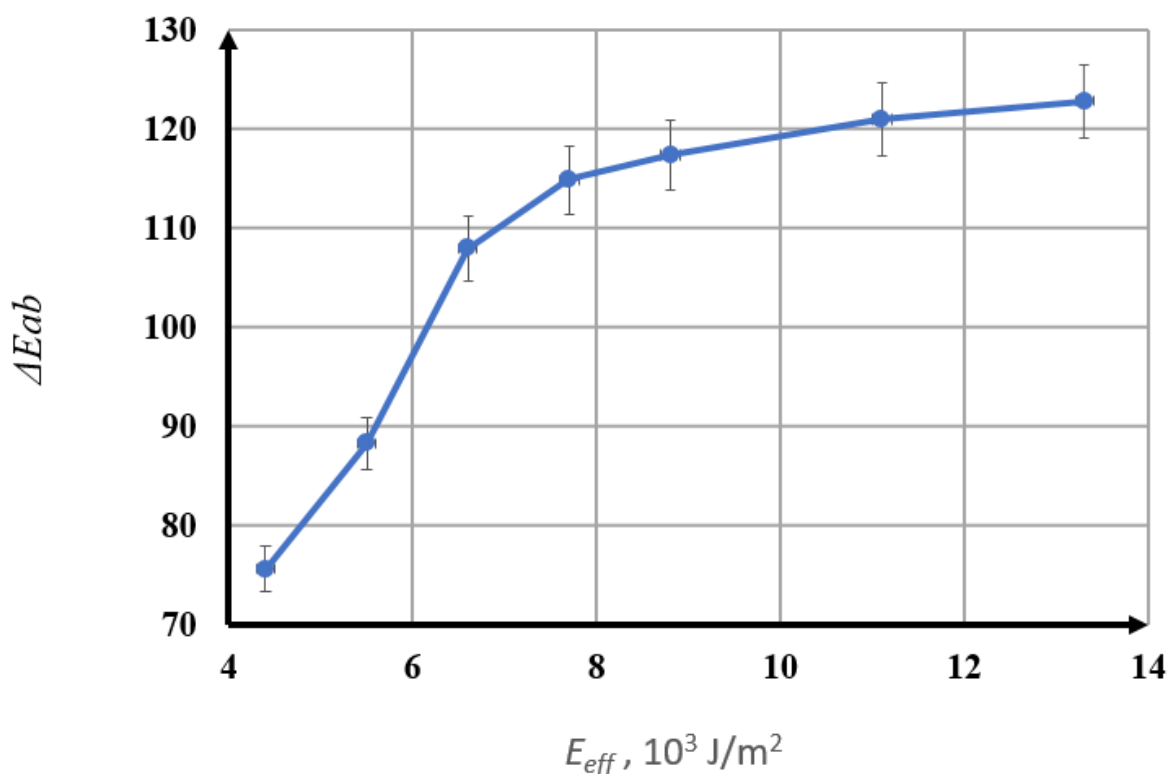
При ниски скорости $v = 100 \text{ mm/s}$, лазерът има по-дълго време да взаимодейства с материала, което води до по-интензивни и по-дълбоки структурни промени и това довежда до по-значителна цветова разлика ΔE_{ab} .

С увеличаване на скоростта, при стойности в интервала $v \in [600, 700] \text{ mm/s}$ промени в цветовата разлика не се забелязват. Плътността на мощността на единица площ е много малка. $q_s = 6,7 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ тази енергия слабо влияе върху химичните и физичните свойства на оксидния слой.

Когато скоростта се увеличава в диапазона $v \in [100, 600] \text{ mm/s}$, се наблюдава нелинейно намаляване на цветовата разлика, като скоростта на намаляване на цветовата разлика във функция на скоростта $\Delta E_{ab} / \Delta v$ е $0,01 \Delta E_{ab} / \text{mm/s}$;

За скорости в интервала $v \in [600, 700] \text{ mm/s}$ не се препоръчва да се използва, тъй като цветовата разлика на маркировката е близък до минималната стойност различима от електронни устройства $\Delta E_{ab} < 3$.

Влияние на ефективната енергия E_{eff}



Фигура 8. Графика, представяща експерименталната зависимост $\Delta E_{ab} = \Delta E_{ab}(E_{eff})$.

От анализа на графиката могат да се направят следните изводи:

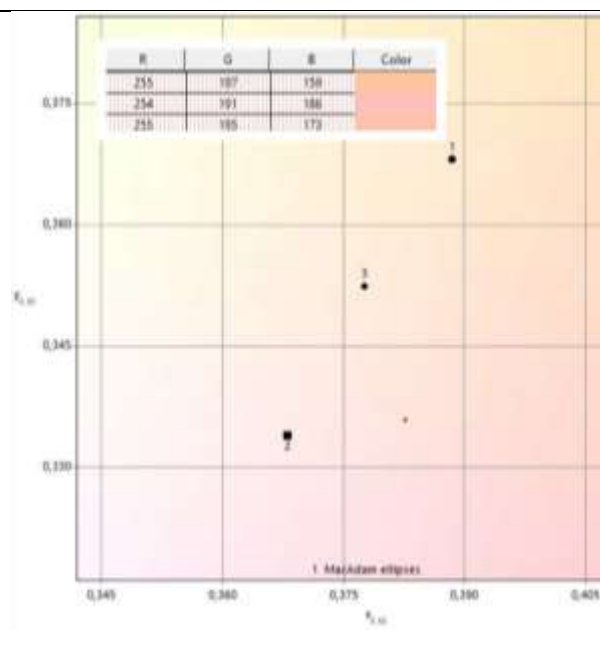
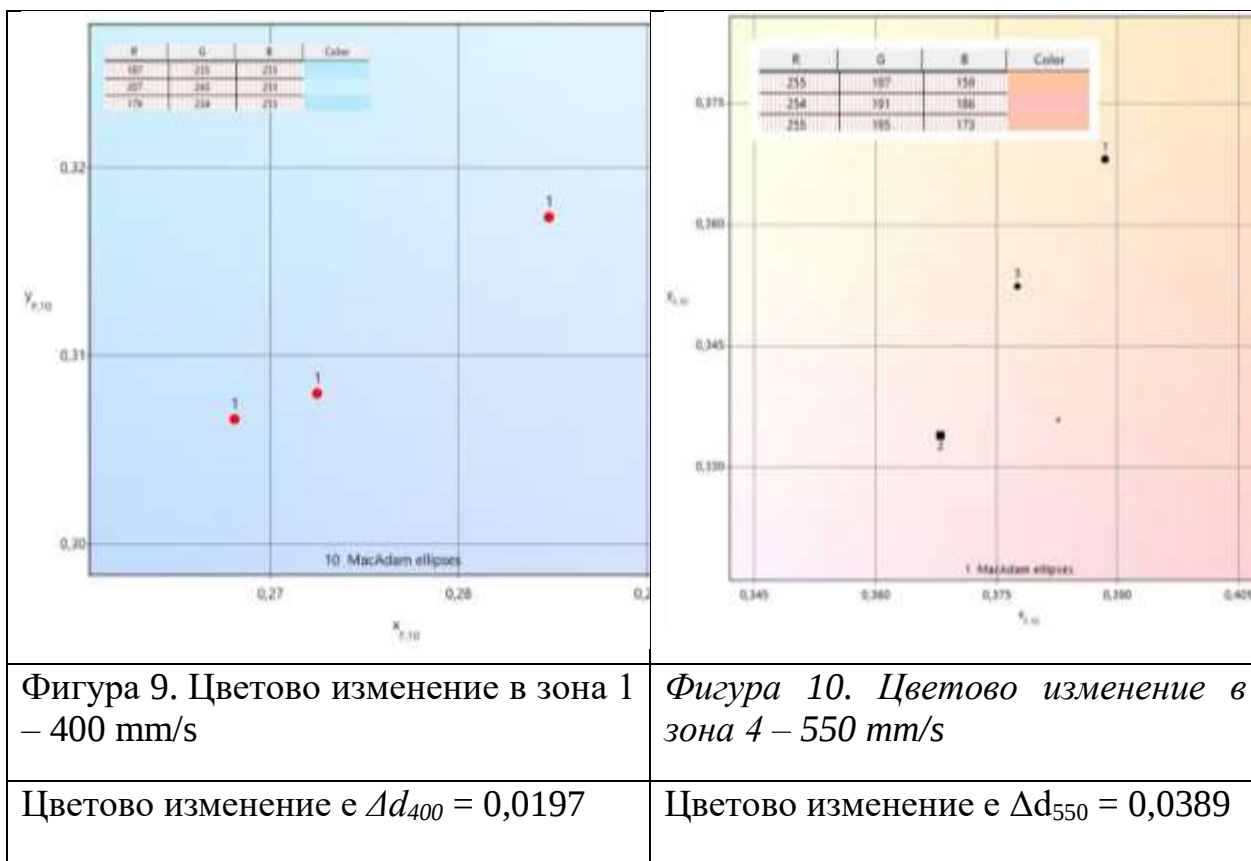
Процентна промяна на цветовата разлика ΔE_{ab} е най-голяма в интервала между $E_{eff} \in [5,5; 6,6] \cdot 10^3 \text{ J/m}^2$, като тя е 23%

За ефективната енергия в диапазона $E_{eff} \in [4,4; 7,7]$ скоростта на нарастване на цветовата разлика във функция от ефективната енергия $\Delta E_{ab} / \Delta E_{eff}$ е 11,89; В този диапазон има висока скорост на нарастване на цветовата разлика.

Оптималната стойност за ефективната енергия е да се намира около $7,7 \text{ J/m}^2$, защото от графиката се вижда, че след тази точка промяната в цветовата разлика е минимална при увеличаване на енергията.

Изследване на възпроизводимост на цветовете

За извършване на оценката се използва CIE 1931 цветово пространство, като измерените със спектрометър стойности на x,y координатите на всеки маркиран образец се нанасят върху CIE 1931 и цветовото изменение се оценява чрез евклидовото разстояние Δd .



Малка повторяемост с по-голямо цветово изменение на маркировката се отчита при скорост $v = 550 \text{ mm/s}$. При тази скорост възпроизвеждането на цвета е най-нестабилно и маркираните зони имат голямо визуално отклонение. Тази скорост при тези параметри на маркиране трябва да се избягват.

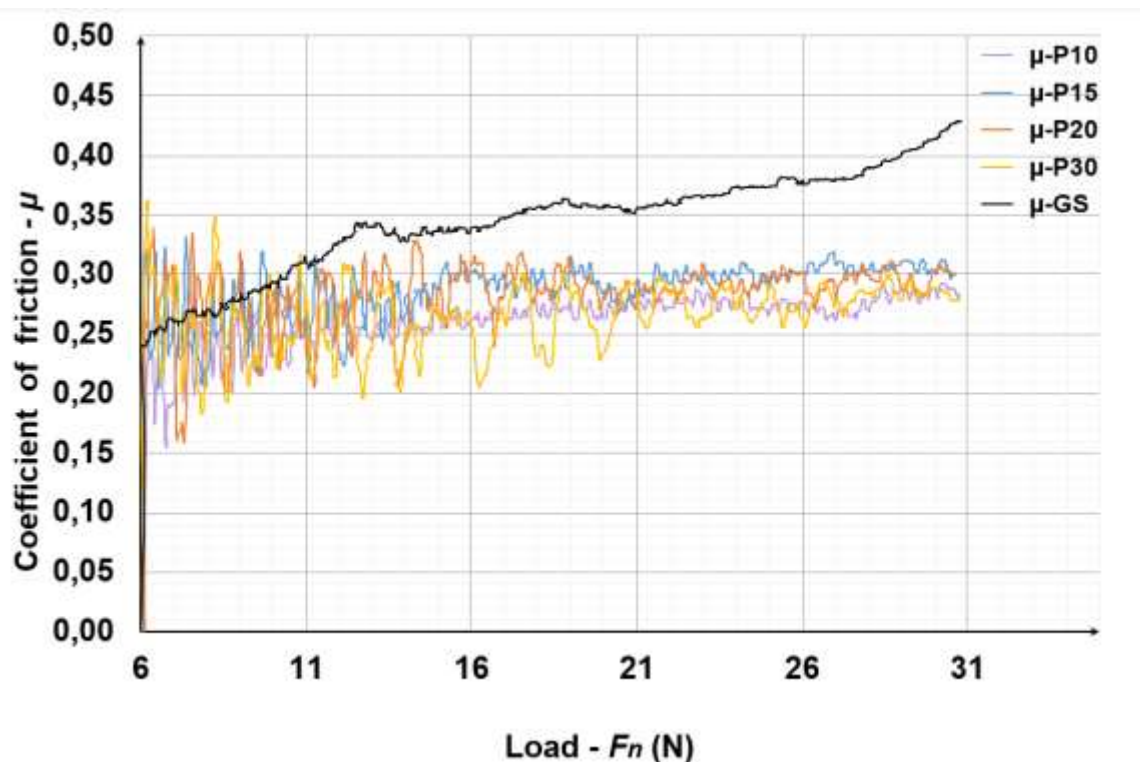
Най-добра повторяемост с най-малко изменение на цветовите координати се отчита при скорост $v = 400 \text{ mm/s}$ това е светло синия цвят. Тази скорост показва най-добра възпроизводимост и стабилност на цвета, което е подходящо за прецизна маркировка.

Други оптимални стойности за маркиране са при следните стойност:

$$P = 15 \text{ W}; v = 300 \text{ mm/s}; \Delta x = 0,03; v = 40 \text{ kHz}; \underline{\Delta d = 0,0081}$$

Изследване устойчивостта на надраскване

Изследване на влиянието на силата на натоварване F_n върху коефициента на триене μ на образци, маркирани с различна мощност на лазерния източник $P \in [10, 30] \text{ W}$



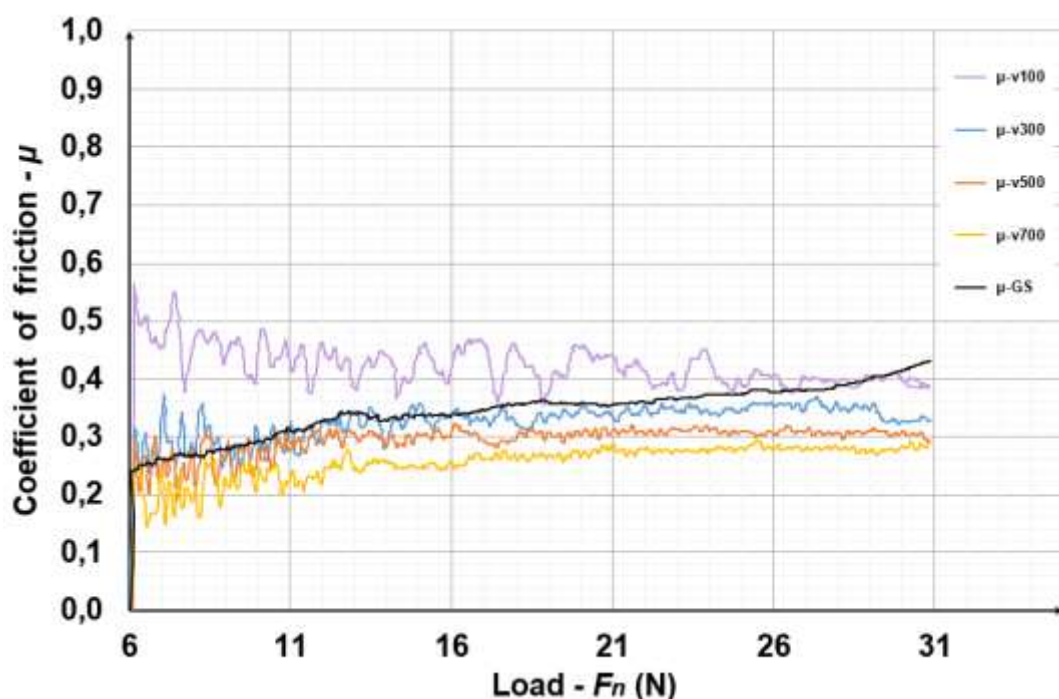
Фигура 11. Графика, представяща експерименталната зависимост $\mu = \mu(F_n)$.

От графиката могат да се направят следните изводи :

Вследствие от процесите на топене и изпарение, протичащи при маркиране с мощност $P \in [20, 30]$ W, се наблюдават големи колебания в коефициента на триене μ при натоварване $F_n \in [6, 20]$ N. Върху повърхността на образеца се получава маркировка с дълбоки канали и кратери, вследствие на въздействие с плътност на мощността $q_s \in [12; 15,3] \cdot 10^9$ W/m², които са с голяма грапавост, а от там и голям коефициент на триене.

Лазерното маркиране с мощност $P \in [10, 15]$ W е подобрило физичните свойства на стоманата като се е получила устойчива на надраскване маркировка.

Изследване на влиянието на силата на натоварване F_n върху коефициента на триене μ на образци при различно време на въздействие на лазерния източник.



Фигура 12. Графика, представяща експерименталната зависимост $\mu = \mu(F_n)$.

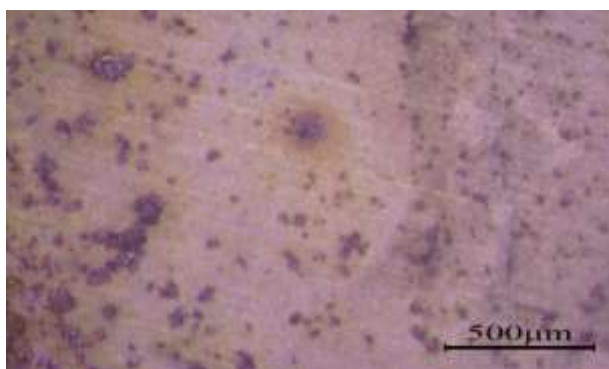
От графиката могат да се направят следните изводи :

Вследствие на продължителното време на въздействие при маркиране със скорост $v=100$ mm/s се получават на повърхността на стоманата дълбоки канали в резултат на процесите на топене и изпарение. Грапаавостта на повърхността е голяма и от там са и големи колебания в коефициента на триене μ при натоварване $F_n \in [6, 25]$ N. За тази изследвана зона коефициентът на триене е станал по-голям в сравнение с основния необработен материал GS. При тази скорост $v=100$ mm/s е намалена износоустойчивостта на стоманата и този режим не трябва да се използва за маркиране.

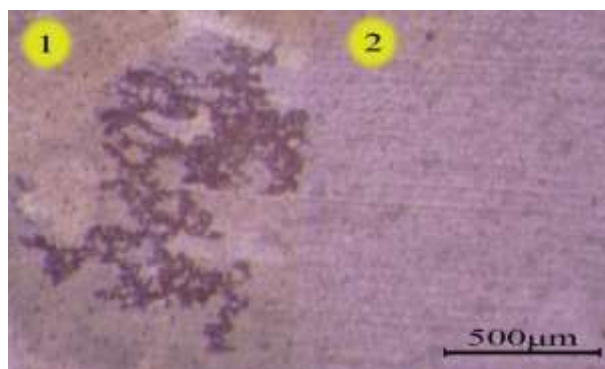
Образците, маркирани със скорост $v \in [300, 700]$ mm/s, коефициентът на триене μ е с по-ниска стойност от материала при доставка и е в границите $F_n \in [0,27; 0,31]$, което означава, че се е получила закалка на повърхността, вследствие на лазерното маркиране.

5.7 Изследване на корозоустойчивостта

Стоманата при доставка (немаркирана) след въздействие в условия на солена мъгла е със 100% поразена площ. Корозията има локален характер (питингова), дължаща се на наличието на повърхностни дефекти (от механична обработка). Има промяна на цвета на повърхността, както и отделни цветни корозионни продукти. На Фигура 13 са показани снимки, маркирани и немаркирани повърхности след въздействие в условия на солена мъгла.



Б



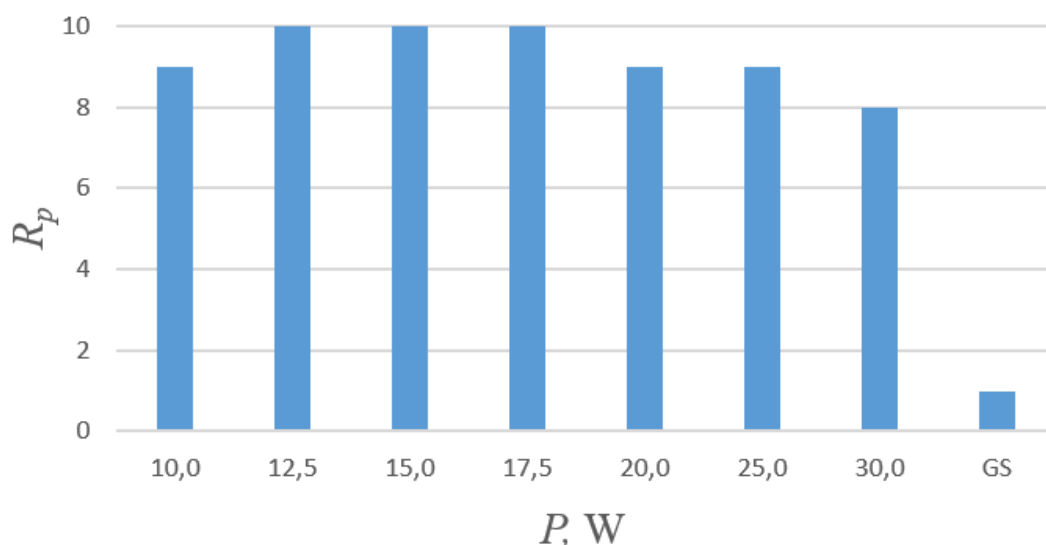
Г

Фигура 13. Изображения на маркирани и немаркирани повърхности преди и след въздействие в условия на солена мъгла.

Б – стомана в условия на доставка на повърхността се наблюдават корозионни продукти в цвят характерен за желязото. Наблюдават се питинги, които на отделни места са се развили в интеркристална корозия.

Г – зона 1 – повърхност в условия на доставка. В зона 1 ясно се виждат наличието на оцветени корозионни продукти и множество питинги, които са оцветени в кафяв и тъмнокафяв цвят, което показва, че са дълбоки. В отделни области питинговата корозия се е развила в интеркристална. В зона 2 – лазерно маркирана повърхност не се наблюдава развитие на интеркристална корозия. На някои места има малко питингова, но са единични и плитки. На места сивата метална повърхност е запазена.

Графичната зависимости на изменението на коефициента за оценка на защитната способност на покритието R_p във функция от средната мощност P е показана на Фигура 14.



Фигура 14. Графика, представяща зависимостта $R_p = R_p (P)$.

С увеличаване на мощността корозионните увреждания на външния вид се увеличават, като маркировки с плътност на мощността над $q_s > 14 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ не се препоръчват, защото не са корозоустойчиви.

Маркировки с плътност на мощността под $q_s < 5 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ са с намалена устойчивост на корозия. Под тази стойност на плътността на мощността на енергията не е достатъчна, за да се получи корозионно устойчиво покритие.

Оптимална стойност на плътността на мощността е в интервала $q_s \in [5, 9] \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ при която се получава устойчива на корозия маркировка.

ОБОБЩЕНИ ИЗВОДИ

1. Лазерното цветно маркиране на въглеродна стомана С75 е силно зависим процес от комбинацията на лазерни и технологични параметри, като мощност, скорост, честота, стъпка между растерните линии и припокриване на импулсите. Оптимизацията на тези параметри е ключова за постигане на висока контрастност, стабилни цветове и добра механична и корозионна устойчивост.
2. Теоретичните модели за критична плътност на мощността позволяват ясно разграничаване на режимите на оксидация, топене и изпарение, като оптималните интервали за цветно маркиране се намират в зоната на контролирана оксидация и частично топене. Режимите на изпарение водят до структурни увреждания и влошена корозионна устойчивост.
3. Контрастът на маркировката е пряко свързан с енергийната плътност и времето на въздействие, като най-високи стойности се постигат при плътности $q_s \in [6.37 \times 10^9; 10.2 \times 10^9] \text{ W/m}^2$. Контрастът е в положителна корелация с цветовата разлика ΔE_{ab} при режими, водещи до дебели и равномерни оксидни слоеве.
4. Цветовата разлика ΔE_{ab} е силно чувствителна към мощността, скоростта и честотата, като ниските скорости и средните мощности водят до наситени и стабилни цветове. Високите скорости намаляват ΔE_{ab} под прага на различимост, което прави маркировката трудно четима.
5. Възпроизводимостта на цвета зависи от стабилността на термичния режим, като най-добри резултати се постигат при скорости 400–600 mm/s и честоти 70–100 kHz. Режимы с нестабилно топлинно натрупване (напр. 550 mm/s) водят до значителни цветови отклонения.
6. Грапавостта на маркираната повърхност е в нелинейна зависимост от мощността, скоростта и стъпката между растерните линии.
 - Ниски мощности и високи скорости съответно правят повърхността гладка.
 - Високи мощности съответно увеличават грапавостта и риск от микропукнатини. Грапавостта влияе пряко върху корозионната устойчивост и трибологичните свойства.
7. Микротвърдостта на маркираната зона нараства значително при увеличаване на мощността и намаляване на скоростта, като при 10 W се

достига увеличение с 64.91% спрямо материала при доставка. Повишената микротвърдост подобрява износоустойчивостта и намалява коефициента на триене.

8. Износоустойчивостта се подобрява съществено вследствие на лазерното маркиране, като силата на триене F_t намалява 1.5–1.7 пъти в зависимост от режима. Най-ниски стойности на μ се постигат при 10 W и честоти 20–60 kHz, където се наблюдава повърхностно закаляване.
9. Корозионната устойчивост е силно зависима от морфологията на повърхността и припокриването на импулсите.
 - Оптимални режими: $KL_x=93\%$, честота 70–90 kHz, стъпка $\Delta x=0.035\text{--}0.045\text{ mm}$.
 - Режимы с изпарение и високи стойности на плътност на мощността влошават устойчивост, като на повърхността има напуквания и отлагания на NaCl.
10. Дисертационната работа е посветена на оптимизирането на процеса на лазерно цветно маркиране на въглеродна стомана C75 чрез съчетаване на теоретични модели и експериментални изследвания. Поставената цел е постигната чрез последователно изясняване на физичните механизми, определяне на критичните енергийни режими и анализ на влиянието на основните лазерни и технологични параметри върху оптичните, механичните и корозионните характеристики на маркировката.
11. В първа глава е направен обстоен обзор на съществуващите методи за цветно маркиране и е установена липсата на систематични изследвания върху въглеродни стомани. Втора глава дефинира факторите, определящи контраста и качеството на маркировката.
12. В трета глава са разработени теоретични зависимости за плътността на мощността, припокриването и критичните режими на обработка. В четвърта глава е представена методика за експериментални изследвания, а в пета глава са анализирани резултатите за контраст, грапавост, микротвърдост, цветова разлика, възпроизводимост, износоустойчивост и корозоустойчивост.
13. Получените резултати показват, че оптималното цветно маркиране се постига при балансирані режими на мощност, скорост, честота и припокриване, които осигуряват стабилни оксидни слоеве, висока четливост, добра механична устойчивост и повишена корозионна защита. Установени са взаимовръзки между морфологията, микротвърдостта, износването и корозията, както и между цветовата разлика, контраста и възпроизводимостта на цвета.
14. Актуалността на изследването се обуславя от нарастващите изисквания за трайни, екологични и високопрецизни маркировки. Постигнатите резултати допринасят за разширяване на научните познания в областта на лазерната обработка на въглеродни стомани и предоставят практически приложими режими за индустриално внедряване на устойчиви цветни маркировки, включително за изделия с високи изисквания към износоустойчивост, четливост и защита от фалшификация.

- По-гладката повърхност има по-добра корозионна устойчивост.
 - По-високата микротвърдост има по-ниско триене и по-висока износоустойчивост.
 - Равномерни оксидни слоеве са с по-висок контраст и по-голяма цветова разлика ΔE_{ab} .
15. Оптималните режими за цветно маркиране на стомана C75 са тези, които осигуряват балансирано топлинно въздействие, без преминаване към изпарение:
- мощност 10–15 W
 - скорост 300–600 mm/s
 - честота 70–100 kHz
 - стъпка 0.02–0.04 mm
 - припокриване 85–93%
16. Дисертацията запълва съществена празнина в научните изследвания, като за първи път систематично анализира влиянието на лазерните и технологичните параметри върху цветовата разлика, възпроизводимостта на цвета, механичните свойства и корозионната устойчивост на въглеродна стомана C75.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертационната работа е посветена на оптимизирането на процеса на лазерно цветно маркиране на въглеродна стомана C75 чрез съчетаване на теоретични модели и експериментални изследвания. Поставената цел е постигната чрез последователно изясняване на физичните механизми, определяне на критичните енергийни режими и анализ на влиянието на основните лазерни и технологични параметри върху оптичните, механичните и корозионните характеристики на маркировката.

В първа глава е направен обстоен обзор на съществуващите методи за цветно маркиране и е установена липсата на систематични изследвания върху въглеродни стомани. Втора глава дефинира факторите, определящи контраста и качеството на маркировката.

В трета глава са разработени теоретични зависимости за плътността на мощността, припокриването и критичните режими на обработка. В четвърта глава е представена методика за експериментални изследвания, а в пета глава са анализирани резултатите за контраст, грапавост, микротвърдост, цветова разлика, възпроизводимост, износоустойчивост и корозоустойчивост.

Получените резултати показват, че оптималното цветно маркиране се постига при балансирани режими на мощност, скорост, честота и припокриване, които осигуряват стабилни оксидни слоеве, висока четливост, добра механична устойчивост и повишена корозионна защита. Установени са взаимовръзки между морфологията, микротвърдостта, износването и корозията, както и между цветовата разлика, контраста и възпроизводимостта на цвета.

Актуалността на изследването се обуславя от нарастващите изисквания за трайни, екологични и високопрецизни маркировки. Постигнатите резултати допринасят за разширяване на научните познания в областта на лазерната

обработка на въглеродни стомани и предоставят практически приложими режими за индустриално внедряване на устойчиви цветни маркировки, включително за изделия с високи изисквания към изнosoустойчивост, четливост и защита от фалшификация.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработена и апробирана е интегрирана методика за оптимизация на процеса на лазерно цветно маркиране, която обединява аналитични модели, числен анализ и експериментални зависимости, като едновременно с това са определени критичните стойности на плътността на мощността, съответстващи на режимите на окисление, топене и изпарение при въздействие върху стомана C75.

2. Дефиниран е технологичен прозорец за цветно лазерно маркиране на въглеродна стомана C75, основан на експериментално валидирани граници на основните параметри, като са идентифицирани оптимални технологични режими за формиране на стабилни оксидни слоеве, осигуряващи висока корозионна устойчивост и дългосрочна стабилност на цвета.

3. Установени са количествени зависимости между контраста, цветовата разлика и морфологията на повърхността на лазерно маркирани зони, като тези зависимости са експериментално потвърдени за въглеродна стомана C75 и допълват липсващи до момента систематични данни в научната литература.

4. Доказана е корелация между микротвърдостта, изнosoустойчивостта и коефициента на триене при лазерно маркирани повърхности, като са разкрити и анализирани механизмите на нестабилност на цветната маркировка, свързани с термични флуктуации, недостатъчно енергийно натрупване и непълно припокриване на лазерните линии.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработени са практически препоръки за индустриално внедряване на процеса на цветно лазерно маркиране на въглеродна стомана C75, съобразени с изискванията за възпроизводимост, производителност и експлоатационна устойчивост.

2. Създадена е методика за оценка на възпроизводимостта на цветовете, която може да бъде използвана като инструмент за контрол на качеството при серийно и масово производство и специфични цветови решения с потенциал за антифалшификационни приложения.

3. Демонстрирана е практическата приложимост на резултатите за целенасочено проектиране на маркировки с предварително зададени функционални свойства (контраст, устойчивост, цветова стабилност), което позволява адаптиране на процеса към конкретни индустриални изисквания.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Pulov, D., Tsvyatkov, P. Optical Systems for Reducing the Divergence of Laser Beams 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 3, pp 339–343, DOI: 10.17770/etr2023vol3.7217
2. Tsvyatkov, P., Teirumnieks, E., Yankov, E., Pīgožnis, K., Lazov, L. Investigation of the Influence of Technological Parameters of Laser Marking on the Degree of Contrast 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 2, pp. 370–374, DOI: 10.17770/etr2023vol3.7319
3. Tsvyatkov, P., Teirumnieks, E., Yankov, E., Pīgožnis, K., Lazov, L., Investigation of Surface Roughness of Carbon Steel Machined Parts after Nanosecond Fiber Laser Marking 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 2, pp. 358–362, DOI: 10.17770/etr2023vol3.7317
4. Tsvyatkov, P., E. Yankov, L. Lazov, L., E. Teirumnieks, E. Teirumnieks, Color marking of stainless steel and titanium with the laser oxidation method 14th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Volume 2, pp. 363–369, <https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7318>
5. L Lazov, P Tsvyatkov , N Angelov. Analysis of the process of laser ablation of marble surfaces. XXI International Conference and School on Quantum Electronics. Resources. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. p. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1859/1/012014
6. P. Tsvyatkov, Reproducibility of laser color marking on c75 steel obtained by a nanosecond pulsed laser , Mashinostroene i mashinoznanie, 2026

TITLE: OPTIMIZATION OF THE LASER COLOR MARKING PROCESS OF CARBON STEEL PRODUCTS

Author: mag. eng. Petar Stoianov Tsvyatkov

ABSTRACT: *Laser color marking has emerged as a crucial technology for high-precision, eco-friendly industrial identification, yet its application on specific high-carbon steel materials remains insufficiently explored.*

This dissertation addresses the significant scientific deficit regarding C75 carbon steel, which, despite its industrial importance, has been largely overlooked in laser processing literature.

The research underscores the necessity of a scientific investigation to establish quantitative dependencies between technological parameters and the resulting operational characteristics of the markings

Optimization was conducted using an integrated methodology that combines a theoretical-mathematical model for determining critical power densities with comprehensive experimental validation.

The investigation utilized two high-precision fiber laser systems to carry out extensive testing across a wide range of optical and mechanical properties

Systematic evaluations covered critical performance indicators, including contrast, color difference, surface roughness, microhardness, and wear resistance

The study identified optimal technological regimes that significantly enhance the durability of the markings, specifically achieving superior scratch and corrosion resistance compared to untreated surfaces

Ultimately, the results provide a scientifically grounded framework for the industrial implementation of stable, high-quality color markings on carbon steel products.

Keywords: *Laser color marking, C75 carbon steel, Fiber laser, Theoretical-mathematical model, Contrast, Color difference, Wear resistance, Corrosion resistance.*