

РЕЦЕНЗИЯ

от доц. д-р инж. Цанко Владимир Караджов
на дисертационния труд на маг. инж. Петър Стоянов Цвятков на тема:

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

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Докторска програма: „Точно уредостроене“

1. Актуалност на дисертационния труд

Дисертационният труд е посветен на актуален и практически значим проблем, свързан с оптимизиране на процеса на лазерно цветно маркиране на изделия от въглеродна стомана. В съвременното машиностроително производство нарастват изискванията към трайността, четимостта, устойчивостта и екологичността на маркировките, използвани за идентификация, проследимост и защита на изделията. Това е особено важно при детайли и инструменти, работещи в условия на механично натоварване, триене, корозионно въздействие и повишени експлоатационни изисквания.

Традиционните методи за маркиране, като мастиленоструен печат, термотрансферен печат, електрохимично маркиране и термично окисление, имат редица ограничения, свързани с недостатъчна устойчивост, по-ниска прецизност, необходимост от допълнителни материали и в някои случаи неблагоприятно въздействие върху околната среда. В този контекст лазерното цветно маркиране представлява съвременна, безконтактна, високопрецизна и екологично по-чиста технология, която позволява формиране на устойчиви оксидни слоеве и получаване на маркировки с висока информационна плътност.

Темата е особено актуална и поради факта, че въглеродната стомана C75 е сравнително по-слабо изследвана по отношение на цветното лазерно маркиране в сравнение с материали като титан и неръждаема стомана. Това обуславя необходимостта от систематични изследвания върху влиянието на лазерните и технологичните параметри върху контраста, цветовата стабилност, грапавостта, микротвърдостта, износоустойчивостта и корозионната устойчивост на получените маркировки.

2. Познаване на състоянието на проблема

От представения литературен обзор може да се направи извод, че авторът познава в достатъчна дълбочина състоянието на изследвания проблем. В дисертационния труд са разгледани както конвенционалните методи за цветно маркиране на метални изделия, така и съвременните подходи за лазерно цветно маркиране. Представени са основните принципи на действие, технологичните особености, възможностите и ограниченията на различните методи.

Особено внимание е отделено на влиянието на лазерните и технологичните параметри върху структурата, свойствата и качеството на обработваните повърхности. Анализирани са материали, подходящи за реализиране на цветно лазерно маркиране, както и

използваните лазерни източници и технологични системи. Авторът разглежда и приложението на лазерното маркиране при създаване на едномерни и двумерни баркодове, като аргументира неговите предимства по отношение на трайност, четимост, прецизност и устойчивост в сравнение с останалите методи за маркиране.

От направения обзор се вижда, че авторът е идентифицирал съществена липса на систематични изследвания, насочени към влиянието на лазерните и технологичните параметри върху характеристиките на цветната маркировка при въглеродни стомани. Това показва добро познаване на състоянието на проблема и правилно определяне на научната ниша, в която е позициониран дисертационният труд.

3. Съответствие на методите за решаване на проблема с поставената цел

Основната цел на дисертационната работа е оптимизиране на процеса на лазерно цветно маркиране на изделия от въглеродна стомана чрез разработване и прилагане на теоретично-математичен модел, методични подходи и технологични режими, позволяващи количествено изследване на влиянието на лазерните и технологичните параметри върху характеристиките на маркировката.

За постигане на тази цел са поставени задачи, свързани с идентифициране и систематизиране на факторите, влияещи върху контраста и четимостта на лазерната маркировка; разработване на теоретично-математичен модел; разработване на методика за експериментални изследвания; подбор и конфигуриране на лазерен източник и сканираща система; експериментално изследване на влиянието на основните параметри върху контраста, грапавостта, микротвърдостта, цветовата разлика, възпроизводимостта на цветовете, износоустойчивостта и корозионната устойчивост.

Методите за определяне на контраста, грапавостта, микротвърдостта, цветовата разлика, износоустойчивостта и корозионната устойчивост са правилно подбрани и позволяват комплексна оценка на качеството на получените маркировки.

Поради това считам, че избраните методи напълно съответстват на поставената цел и формулираните задачи. Те осигуряват необходимата научна и инженерна основа за оптимизация на процеса на лазерно цветно маркиране на въглеродна стомана С75.

4. Аналитична характеристика на съдържанието и достоверност на получените резултати

Дисертационният труд е структуриран логически последователно и съдържа пет основни глави, които обхващат теоретичните основи, аналитичните изследвания, методиката на експерименталната работа и анализа на получените резултати.

В първата глава е извършен задълбочен литературен обзор и анализ на съществуващите конвенционални методи за цветно маркиране на метални изделия. Представени са техните принципи на действие, технологични особености, възможности и ограничения. Направена е подробна сравнителна оценка между традиционните методи и съвременните технологии за лазерно цветно маркиране, като са изведени основните предимства и недостатъци на всеки от тях, както и областите им на практическо приложение.

Особено внимание е отделено на различните методи за лазерно маркиране върху метални материали и сплави. Систематизирани са резултати от редица научни публикации, свързани с влиянието на лазерните и технологичните параметри върху структурата, свойствата и качеството на обработваните повърхности. Анализирани са различни

материали, подходящи за реализиране на цветно лазерно маркиране, както и използваните лазерни източници и технологични системи.

Авторът разглежда и приложението на лазерното маркиране при създаване на едномерни и двумерни баркодове, като убедително аргументира неговите предимства по отношение на трайност, прецизност и устойчивост в сравнение с останалите методи за маркиране.

Втората глава е посветена на изследването на факторите, определящи качеството на цветната лазерна маркировка върху изделия от въглеродна стомана С75. Анализирани са основните параметри, влияещи върху контраста, четимостта и визуалното възприятие на маркировката. Факторите са систематизирани в четири основни групи: параметри на лазерния източник, параметри на технологичния процес, свойства на обработвания материал и фактори с комплексен характер, възникващи вследствие на взаимодействието между останалите групи. Изследвани са взаимовръзките между тези фактори и тяхното влияние върху крайния резултат от процеса.

В третата глава е проведен числен анализ на процеса на лазерно цветно маркиране с цел определяне на рационални интервали за изменение на основните технологични параметри. Изчислени са минималните диаметри на работното петно при използване на оптични системи с различни фокусни разстояния, както и критичните стойности на плътността на мощността, съответстващи на процесите на топене и изпарение на материала.

Определени са предварителни работни диапазони на плътността на мощността за различни скорости на обработка. Анализирано е влиянието на скоростта, честотата на импулсите и диаметъра на работното петно върху коефициента на припокриване на лазерните импулси. Получените резултати предоставят необходимите инженерни предпоставки за планиране и реализиране на експерименталните изследвания при оптимални условия.

В четвъртата глава са представени използваният материал, експерименталната апаратура и разработените методики за провеждане на изследванията. Подробно са описани физичните, механичните и технологичните характеристики на изследвания материал – въглеродна стомана С75. Схематично е представена използваната лазерна технологична система, както и измервателната апаратура, включваща лазерен микроскоп, микротвърдомер, апарат за определяне на коефициента на триене, камера за изпитване на корозионна устойчивост и спектрометър за анализ на цветовите характеристики.

Особено ценен принос представлява разработването на оригинални методики за определяне на контраста на маркировката, оценка на грапавостта на лазерно обработените повърхности, измерване на микротвърдостта, изследване на корозионната устойчивост, определяне на цветовата разлика и степента на цветово сходство, както и методика за оценка на трибологичните характеристики на получените маркировки. Тези методики осигуряват надеждна основа за обективна оценка на качеството на процеса и получените резултати.

В петата глава са представени резултатите от проведените експериментални изследвания и техният задълбочен анализ. Изследвано е влиянието на основните технологични параметри – лазерна мощност, скорост на маркиране, честота на импулсите и растерна стъпка – върху качествените показатели на маркировката, включително контраст, грапавост и микротвърдост.

Получените експериментални резултати потвърждават коректността на възприетия научен подход и показват, че поставената цел и формулираните задачи на дисертационния

труд са успешно изпълнени. Достоверността на получените резултати се основава на използването на съвременна апаратура, ясно формулирани методики, последователен числен и експериментален анализ, както и на съпоставяне на резултатите с установените в литературата зависимости. Допълнително потвърждение за значимостта на резултатите е тяхното представяне в публикации по темата на дисертационния труд.

5. Научно-приложни и приложни приноси на дисертационния труд

Считам, че приносите, формулирани в дисертационния труд, имат предимно научно-приложен и приложен характер. Те са свързани с разработване, експериментално изследване и практическо обосноваване на технологични режими и методики за лазерно цветно маркиране на изделия от въглеродна стомана С75.

Научно-приложни приноси

Научно-приложните приноси са свързани с разработването и апробирането на методичен подход за изследване и оптимизиране на процеса на лазерно цветно маркиране на въглеродна стомана С75. В дисертационния труд са определени основните фактори, влияещи върху качеството на маркировката, като лазерна мощност, скорост на маркиране, честота на импулсите, растерна стъпка, плътност на мощността и коефициент на припокриване. Установени са зависимости между технологичните параметри и получените характеристики на маркировката, включително контраст, цветова разлика, грапавост, микротвърдост, износоустойчивост и корозионна устойчивост.

Към тази група приноси може да се отнесе и разработването на експериментална методика за комплексна оценка на качеството на лазерно маркирани повърхности. Чрез нея се създава възможност за обективно сравняване на различни технологични режими и избор на оптимални параметри за получаване на устойчиви цветни маркировки.

Приложни приноси

Приложните приноси се изразяват в определяне на практически приложими технологични режими за лазерно цветно маркиране на изделия от въглеродна стомана С75. Получените резултати могат да бъдат използвани при внедряване на лазерното маркиране в реални производствени условия, особено при маркиране на режещи инструменти, циркулярни триони, банцигови ленти и други изделия от въглеродна стомана.

Практическа стойност има и предложената методика за оценка на възпроизводимостта на цветовете, контраста и устойчивостта на маркировките, която може да се използва като инструмент за контрол на качеството в производствени условия. Разработените технологични препоръки дават възможност за получаване на трайни, четими и устойчиви маркировки, включително QR кодове, без използване на химически реагенти и без необходимост от допълнителни материали.

Приемам приносите като съществени и съответстващи на съдържанието и резултатите, представени в дисертационния труд.

6. Публикации по дисертацията

Резултатите от дисертационния труд са представени в 6 публикации, свързани с тематиката на изследването. Публикациите обхващат въпроси, свързани с оптични системи за лазерни лъчи, влияние на технологичните параметри върху контраста на лазерната

маркировка, грапавост на повърхности след наносекундно фибър лазерно маркиране, цветно маркиране на неръждаема стомана и титан, лазерна аблация, както и възпроизводимост на лазерно цветно маркиране върху стомана С75.

5 от публикациите са представени на международни научни форуми и са публикувани в рецензирани и реферирани издания, което показва, че резултатите са преминали през научно обсъждане и са достъпни за академичната общност. В значителна част от публикациите докторантът е първи автор, което показва неговото активно участие и водещ принос при разработването на изследваната проблематика.

Считам, че публикационната активност е в съответствие с изискванията за придобиване на образователна и научна степен „доктор“.

7. Забележки и препоръки по дисертацията

Към дисертационния труд нямам забележки и препоръки.

8. Заключение

В заключение може да се каже, че представеният дисертационен труд е завършено научно-приложно изследване, посветено на актуален и практически значим проблем. Работата съдържа задълбочен литературен обзор, теоретично-математичен анализ, числени изследвания, експериментална методика и обстоен анализ на получените резултати. Поставената цел е постигната, а формулираните задачи са изпълнени.

Считам, че дисертационният труд отговаря на изискванията на Закона за развитие на академичния състав в Република България и Правилника за неговото прилагане за придобиване на образователна и научна степен „доктор“.

Във връзка с гореизложеното давам положителна оценка на дисертационния труд и предлагам на почитаемото Научно жури да присъди на инж. Петър Стоянов Цвятков образователна и научна степен „доктор“ в професионално направление **5.1 Машинно инженерство**, докторска програма „Точно уредостроене“.

Дата: 03.09.2026 г.

Рецензент:

/доц. Цанко Караджов/