

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО

Факултет: „Машиностроене и уредостроене“

Катедра: „Материалознание и механика на материалите“

инж. СИМЕОН ЦАНКОВ ЦЕНКУЛОВСКИ

**Особености при лазерно маркиране на слоесто армирани
композити на полимерна основа**

АВТОРЕФЕРАТ

**за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“**

Област на висшето образование: **5. Технически науки**
Професионално направление: **5.6. Материали и материалознание**
Научна специалност: **Материалознание и технология на
машиностроителните материали**

Научен ръководител
доц. д-р инж. Иван Ненов Митев

юли, 2025г.
Габрово

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Материалознание и механика на материалите” към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово, проведен на 08.07.2025 г.

Дисертационният труд съдържа 146 страници и приложение. Научното съдържание е представено в увод, 5 глави и заключение и включва 74 фигури, 22 таблици и 1 приложение. Цитирани са 186 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 „Материалознание и механика на материалите” към факултет „Машиностроене и уредостроене” на Технически университет – Габрово и във фирма „АДТЕХ“ ЕООД гр. Габрово

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на от ч. в Заседателна зала, сграда Ректорат на Технически университет – Габрово.

Автор: инж. Симеон Цанков Ценкуловски
e-mail: simeon.tsenkulovski@gmail.com

Заглавие: ОСОБЕНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНО МАРКИРАНЕ НА СЛОЕСТО АРМИРАНИ
КОМПОЗИТИ НА ПОЛИМЕРНА ОСНОВА

Тираж: 3 бр.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Лазерите са надеждна и ефективна алтернатива на традиционните методи за обработване на всички видове материали. През последните години използването на лазери за маркиране на материали се увеличава заради скоростта, точността и гъвкавостта на тази модерна техника. Паралелно с това обаче тази технология не е изучена в достатъчна степен и информацията в научната литература за управление и контрол на тези процеси е сравнително малко и непълна. Не могат да се намерят научни аспекти относно маркирането с лазер на изделия от различни видове композитни материали, въпреки че през последните години те намират все по-масово приложение в индустриалното производство. В практиката при маркирането на този тип материали се работи чрез налущване на принципа „проба-грешка-корекция”. Огромното разнообразие на композитни полимери създава редица трудности при прилагането на лазерното маркиране и поражда необходимостта от търсене на научен подход за решаването им. Термичните, оптичните и механичните свойства на различните композити на полимерна основа, правят тази област интересна и предизвикателна за оптимизация и управление на процеса. За да се получат желаните резултати и качество на маркировката е необходимо процеса да се контролира чрез настройване на параметрите на лазерната система спрямо характеристиките на конкретния материал.

Изследване на процеса лазерно маркиране на слоесто армирани композити с полимерна матрица, които представляват една значителна част от промишлените материали, е важна стъпка към изясняването му в теоретичен и експериментален аспект. Получените резултати ще дадат възможност за оценка и разширяване на практическото приложение на тази иновативна технология в промишлеността.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационната работа е оптимизиране на параметрите на процеса лазерно маркиране на слоесто армирани композитни материали на полимерна основа.

За постигането на поставената цел в настоящото изследване е необходимо да се решат следните задачи:

1. Разработване на уредба за лазерно маркиране на слоесто армирани композитни материали на полимерна основа - формиране на концептуален модел и изработване на прототип.
2. Избор на материали и методики за изследване.
3. Разработване физичен модел на процеса лазерно маркиране на слоесто армирани композити на полимерна основа.
4. Изследване влиянието на технологичните фактори върху качеството на маркировката.
5. Оптимизиране технологичните параметри на процеса.

Методи на изследване

Представените в работата изследвания са осъществени със съвременни и адекватни за решаване на поставените задачи методи и технически средства. Приложени са методи за моделиране, статистическа обработка и анализ на експерименталните резултати, планиране на експериментите и оптимизиране посредством специализиран софтуер.

Научна новост

Научната новост се заключава в:

- Разработване на концептуален модел на лазерна уредба за маркиране на слоесто армирани композити на полимерна основа;

□ Построяване на графични зависимости за влиянието на технологичните параметри на процеса лазерно маркиране (мощност на лазерното лъчение и скорост на маркиране) върху геометричните параметри на лазерният щрих (дълбочина, широчина и напречен профил), формиран върху образци от текстолит и стъклотекстолит;

□ Построяване на математични модели за влиянието на изследваните технологични параметри върху дълбочината и широчината на маркировъчния щрих при изследваните слоесто армирани композитни материали.

Приложимост

□ На база разработеният концептуален модел е изработена уредба за лазерно маркиране, както на слоесто армирани композити, така и на други неметални материали на полимерна основа;

□ Определени са оптималните комбинации от мощност на лазерният лъч и скоростта на маркиране, с оглед получаване на маркировъчен щрих с подходящи геометрични параметри (дълбочина и широчина).

Апробация на дисертационния труд

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширено заседание на катедра “Материалознание и механика на материалите” при ТУ–Габрово.

Етапи от дисертационната работа са обсъждани и публикувани в:

- ISPC “Environment Technology Resources”, Rezekne, Latvia, 2023г. и 2024г.;
- International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance“, 2022 и 2023 г.;
- Списание „Индустриални технологии“ 2024 г.;
- Journal of Technical University of Gabrovo – 2025 г.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е съставен от: съдържание, приети означения и съкращения, въведение, 5 глави, заключение, класификация на приносите, списък на публикации по дисертацията, използвана литература и приложение, в общ обем 146 стр., в които са поместени текст, формули, 74 фигури и графики и 22 таблици.

Литературата обхваща 159 заглавия (статии, доклади, книги, учебници, дисертации, справочници и каталози, стандарти) и 27 интернет сайтове. От литературните източници 112 са на латиница.

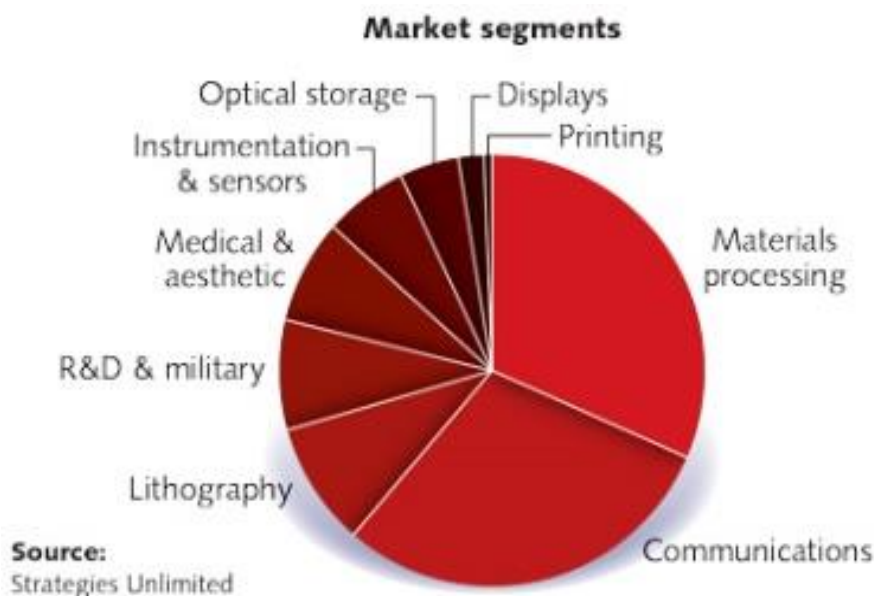
СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава първа: Лазерно маркиране на индустриални материали – състояние на проблема, анализ на съществуващите решения

Лазерните технологии са почти във всяка сфера на живота, като едно от най-широкото им приложение е за обработка на индустриални материали чрез: *рязане, заваряване, маркиране, гравирание, пробиване на отвори*, и други - фиг. 1.3.

При лазерно маркиране на индустриални материали от съществено значение за качеството на маркировката е контраста γ . Факторите които оказват влияние върху контраста могат да се групират в четири основни направления:

- свойства на материалите за маркиране;
- характеристики на лазерния източник;
- особености на технологичния процес;
- комплексни свойства.



Фиг.1.3. Приложение на лазерната технология [123]

Системите за лазерно маркиране най-вече могат да се определят като:

- ❑ процес с ниско-експлоатационни разходи;
- ❑ нанасяне на маркировки с високи скорости;
- ❑ подходящи за голямо разнообразие от материали;
- ❑ подходящи за много фини надписи;
- ❑ изключително надеждни, дори и в тежки производствени условия.

Проблемите съпътстващи използването на лазерната технология за маркиране са:

- ❑ Ниско ниво на защита. Маркиращите системи най-често са от отворен тип, което създава постоянна опасност от облъчване на операторите от лазерното лъчение. Задължителна е употребата на лични предпазни средства, което от една страна защитава оператора, а от друга понижава или ограничава свободата на движение и възприятие.
- ❑ Слаба автоматизация. Действията по пренастройка и зареждане на маркиращата система се извършва предимно ръчно, което от своя страна води до голям риск от грешки и създаване на бракувана продукция. Точността на настройка и позициониране на детайлите е субективно и не може да се компенсира. Качеството на нанесените маркировки е в пряка зависимост от човешката намеса, което води до завишени изисквания към квалификацията на персонала. Същото води до забавени процеси на маркиране и работа с детайла/изделието, съответно загуба на ценно производствено време и намалена производителност на системата.
- ❑ Ниски комуникационни възможности. Затруднено събиране на електронни данни за извършените операции за обработените детайли. Липсва централизирана система (сървър) за регистриране и обработка на данни от маркирането. Липсва възможност за отдалечен контрол върху генериране на работната програма за маркиране и осъществяване на проследимост на процеса. Невъзможност за гъвкави промени в програмата по време на производствените процеси.

От наличните данни относно лазерното маркиране на индустриални материали може да се заключи, че задълбочените и научно обосновани изследвания върху този процес са недостатъчни в научната литература. Не се срещат данни относно физичната същност на процеса лазерно маркиране на слоесто армирани композитни материали с полимерна матрица. Не е изяснена взаимовръзката и степента на влияние на различните параметри на

технологичният процес (оптичните и топлофизични свойства на материала и др.) върху качеството на маркировката. Това налага за всеки конкретен случай, да се установят експериментално оптималните работни интервали за постигане на най-високо качество при максимална производителност. Липсата на систематизирана информация за лазерното маркиране на слоесто армирани композитни материали на полимерна основа ограничава приложението на този метод в индустрията. За надеждното прогнозиране и оптимизиране на технологичния процес лазерно маркиране на тези материали е необходимо той да бъде научно изследван.

Глава втора: Апаратура, материали и методики за изследване

2.1. Апаратура за изследване

2.1.1. Разработване на концептуален модел

След направения анализ на съществуващите решения при лазерните системи за маркиране и формулирани нови възможни подобрения, се дефинират следните характеристики на уредбата:

- ❑ източник на лазерно лъчение - Fiber лазер;
- ❑ изходяща мощност на лазерното лъчение – 50 W;
- ❑ защитена конструкция с предпазни капаци и защитно стъкло за наблюдение на процеса;
- ❑ възможност за включване на централна аспирация;
- ❑ въвеждане на допълнителни оси на движение:
 - ✓ *равнинно движение на лазерния лъч реализирано от сканиращо устройство;*
 - ✓ *линейни оси за въвеждане и отвеждане на детайлите в зоната на маркиране;*
 - ✓ *за фокусиране на лазерния лъч;*
 - ✓ *за извършване на ротация на детайл при синхронизиране с подавателно движение в работната област;*
- ❑ въвеждане на сервоуправление на осите за повишаване точността на позициониране и подобряване повторемостта на процеса.

Сравнителния анализ на концептуалния модел на система за лазерно маркиране на слоесто армирани композити с полимерна матрица с алтернативни решения е извършен по избрани показатели. Това са динамично генериране на програмата за маркиране, сервоуправление на осите на движение, брой на допълнителните оси на движение, необходимост от допълнително охлаждане, минимална големина на лазерното петно, дълговечност на оборудването, необходимост от консумативи и поддръжка на оборудването, оптично водене на лазерното лъчение с минимални загуби, ниска консумация на електроенергия за процеса, качество и дълготрайност на нанасяната маркировка.

2.1.2. Предимства на модела

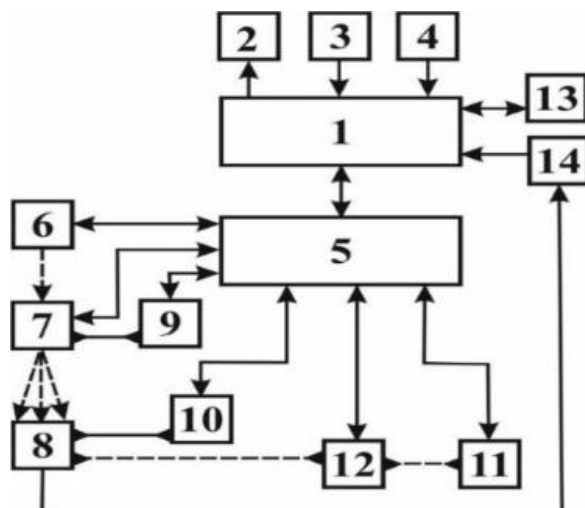
С така предложения концептуален модел за разработване на продуктова иновация - система за лазерно маркиране на неметални материали, се представя едно значително подобрение на съществуващите в момента на пазара системи за лазерно маркиране включваща:

- ❑ Fiber лазер със средна изходяща мощност от 50 W;
- ❑ сканираща глава XY с работно поле 140x140 mm;
- ❑ възможност за извършване на спомагателни движения по три оси:
 - линейни по ос X и Z, въртяща ос A;
- ❑ серво-управление и мотори за задвижване на осите;
- ❑ сървър за отдалечено управление и реализиране на динамично генериране на програмите за маркиране.

2.1.3.Разработване на лазерна уредба за маркиране на слоесто армирани композитни материали с полимерна матрица

На база концептуалният модел е изработена лазерна уредба за маркиране с периферия съгласно фиг. 2.2. Тя е базирана на Fiber laser – RFL- P - 502B с оптична леща F-theta lens–SL – 1064-150-2106 - фиг. 2.3.

Генераторът за лазерно маркиране е съставен от шест основни възела - фиг. 2.4.



Фиг.2.2. Схема на експерименталната установка:

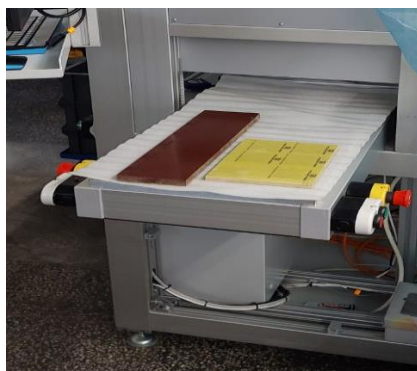
1 – компютър; 2 – монитор; 3 – клавиатура; 4 – мишка; 5 – контролер;
6 – източник на лазерно лъчение; 7 – сканиращо устройство;
8 – детайл; 9, 10, 11, 12 – устройства за движение по X, Y, Z и завъртане около вертикалната ос; 13 – сървър; 14 – баркод четец.



Фиг.2.3. Общ вид на установката за лазерно маркиране на слоесто армирани композити с полимерна матрица



а.



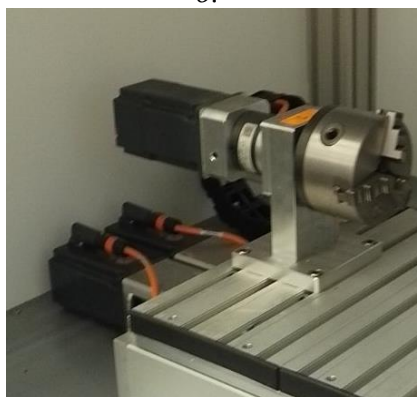
б.



в.



г.



д.



е.

Фиг.2.4. Основни модули на уредбата за маркиране:

а – корпус с пулт управление; б – модул хоризонтален; в – модул вертикален; г – сканираща глава; д – въртяща глава; е – шкаф управление

2.2.Материали за изследване

За изследване са подбрани слоести композитни материали на полимерна основа с армиращата фаза от памучни и стъклени слоеве, а матрицата е оформена от фенолформалдехидна и епоксидна смоли.

Текстолита е с дебелина 10 mm и механични характеристики съгласно DIN 7753/ PFCC 202, и IEC 60893 Hgw 2082.

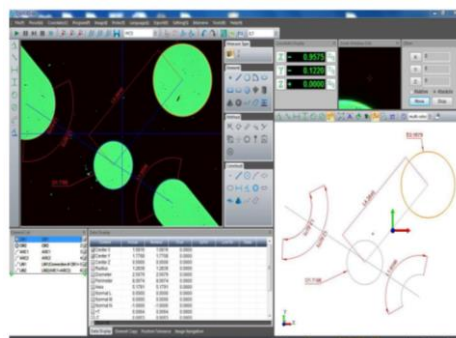
Стъклотекстолита е с дебелина 10mm и механични характеристики тип PTGC 201, съгласно IEC/EN 60893-3-1.

2.3.Методики за изследване

В процеса на изследване са използвани методики за определяне геометричните параметри на маркировъчния шрих, за измерване на средната и максимална грапавост и за оптимизиране на технологични обекти.



Фиг. 2.7. Общ вид на измервателен микроскоп PHILIPS URD



Фиг.2.8.Софтуер за 2D и 3D INSIZE ISD – V150



Фиг. 2.12. Общ вид на профиломер ZEISS

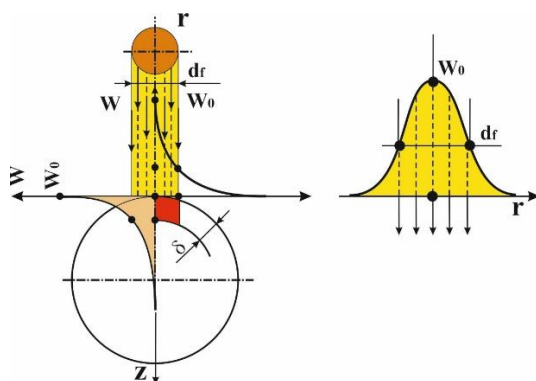
Качественият анализ на изследваните образци е извършен на измерителен микроскоп PHILIPS URD – фиг. 2.7. с използване на софтуер INSIZE ISD – V150 – фиг.2.8, а измерванията за грапавостта са направени с портативен профиломер ZEISS – фиг. 2.12, който е съвместим със следните стандарти: DIN 4762, DIN 4768, DIN 4771, DIN 4775 DIN 4766-1.

Глава трета: Елементи на енергийния баланс при лазерно маркиране на слоести полимерни композити

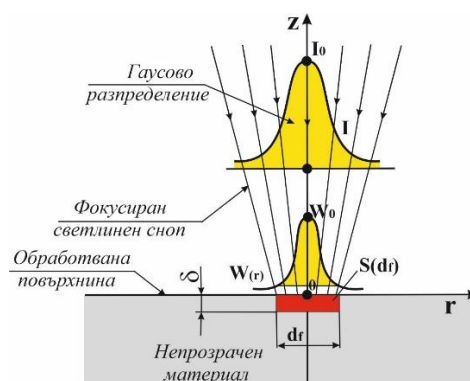
3.1. Взаимодействие на лазерният лъч с веществото при локално обработване на неметални материали

Локалното лазерно обработване на материала е резултат от появата и използването на мощни светлинни потоци, които действат по повърхността на обработваното изделие. То може да се разглежда като локализиране в максимална степен на термичното въздействие по радиус – r , на снопа (най-често по Гаусово разпределение на повърхностната плътност на мощността) и в дълбочина на материала – по оста z – фиг.3.1.

В зависимост от прозрачността на материала при $\delta \ll d_f$ се формира повърхностен източник на топлина с различно разпределение на погълнатата плътност на мощността – $W(r, z)$ – фиг.3.2.



Фиг.3.1. Принципна схема на локално повърхностно лазерно термично въздействие върху неметални материали в зависимост от дълбочината на проникване – δ и размера на заготовката – r



Фиг.3.2.Образуване на повърхностен вторичен източник на топлина в непрозрачен материал

При обработване на неметални материали нормалното Гаусово разпределение е най-разпространеният закон за дефиниране плътността на мощността – $I(r)$, в нормалното сечение на енергийния сноп (или в контактното петно). Съответстващият му локален източник на топлина също се характеризира с нормално разпределение на повърхностната плътност на погълтаната мощност – $W(r)$, и може да се пресметне по 3.1:

$$W(r) = W_0 \cdot e^{-k \cdot r^2} = A \cdot I_0 \cdot e^{-k \cdot r^2} \quad (3.1)$$

където: k – коефициент на концентриране на потока, характеризиращ формата на кривата на нормално разпределение.

Топлинната мощност на локалния топлинен източник (3.2) можем да получим чрез интегриране на повърхностната плътност на мощността $W(r)$ по повърхността на контактното петно - $S_f = \pi \cdot r_f^2$.

$$P_0 = \int_{(s)} W(r) \cdot dF = \left(\frac{\pi}{k}\right) \cdot W_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot r_f^2}) \quad (3.2)$$

В зависимост от начина на поглъщане на енергията на падащият сноп светлина може да различим два характерни случая:

- непрекъснато поглъщане в хода на проникване на светлинният сноп в материала;
- проникване на светлинният сноп в материала на определена дълбочина - δ_z , без поглъщане, след което поглъщането се разпределя равномерно във всички направления при непрекъснато отслабване с отдалечаване от центъра (дифузионно разсейване).

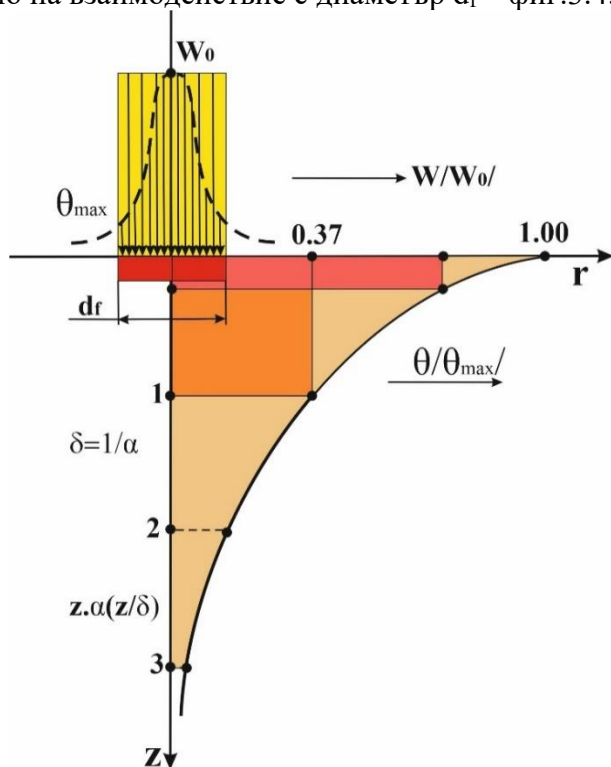
При обработване на неметални материали с лъчист топлообмен при лазерното обработване е налице непрекъснатото поглъщане на енергия в дълбочина на материала.

Следователно дълбочината на проникване можем да определим с 3.5:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (3.5)$$

където: α – коефициент на поглъщане на светлинната вълна.

Зависимостта на поглъщане от дълбочината на проникване (закон на Bouguer - Lambert) е валидна при равномерно разпределение на плътността на мощността – W_0 , в енергийното петно на взаимодействие с диаметър d_f – фиг.3.4.



Фиг.3.4.Разпределение на повърхностната енергия (относителна плътност на мощността W/W_0 и на относително прегряване θ/θ_{max}) при лазерно обработване

$$\frac{W}{W_0} = e^{\alpha \cdot z} \text{ или } \frac{W}{W_0} = e^{-\delta \cdot z} \quad (3.6)$$

$$\text{където: } \delta^2 = \frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}$$

Следователно при лъчево обработване на неметални материали и Гаусово разпределение на повърхностната плътност на погълнатата мощност в контактното петно, разпределението по дълбочина на обработваната зона може да се определи с 3.7:

$$\frac{W}{W_0} = e^{\left\{ - \left[\left(\frac{2r}{d_f} \right)^2 + \frac{z}{\delta} \right] \right\}} \quad (3.7)$$

От констатираното следва, че в резултат на лазерното маркиране на полимерни слоеви композити, настъпват структурни и/или химически процеси, водещи до маркировки с различни характеристики.

Когато лазерният лъч се насочи към обработвания материал, енергията му се трансформира в топлината, която променя физико-механичните характеристики на материала чрез изпарение, изгаряне (овъгляване), топене или други структурни трансформации.

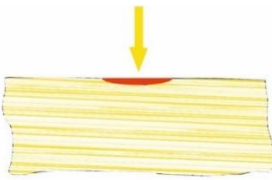
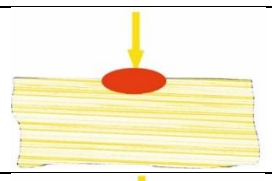
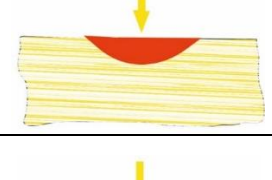
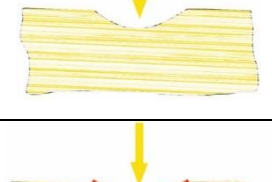
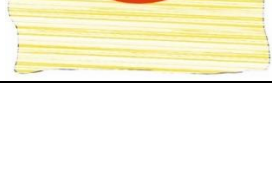
Лазерът действа с големи плътности на мощността от $10^8 \div 10^{11} \text{ W.m}^{-2}$ и продължителност на импулсите между $10 \text{ ns} \div 10 \text{ }\mu\text{s}$, върху определена област от материала, като в резултат от фокусирането на лъча, нагряването е много интензивно в малка зона (няколко десети микрометра). Много важен параметър е дълбочината на проникване – δ (3.5) във веществото, като се абсорбира почти цялата енергия на лазерния лъч и го загарява. Дълбочината на проникване зависи от оптичните и топлофизичните свойства на материала. Разстояние от $\delta = 10 \text{ nm}$ светлинният лъч в полимерни матрици изминава за време от 1 ns .

Тази погълнатата енергия се превръща в топлина за време от $t < 10^{-9} \text{ s}$, предавайки се бързо на материала, който от своя страна се превръща в източник на топлина. Топлината се разпределя по различен начин в зависимост от вида на материала. Това води до структурни и фазови превръщания, топене и/или изпарение. Част от разтопената течност (стопилка) се изхвърля извън зоната на облъчване под действие на повърхностното налягане, предизвикано от интензивното изпарение на материала. Останалата част се загарява за много кратко време и започва да кипи при което се освобождава във вид на газ, т.е. настъпва отново фазово превръщане от течно към газообразно състояние.

3.2. Етапи на процеса лазерно маркиране на неметални материали

За композитни материали с полимерна матрица, топлинното действие на лазерното лъчение се изразява в увеличаване на температурата на матрицата и армиращата фаза до температура, при която протичат четири процеса, които предизвикват изменения в химичните и/или физичните им свойства - таблица 3.1.

3.1. Етапи на процеса лазерно маркиране

Процес	Схема	Фаза	Механизъм
Размекване – нагряване под T° на топене		Промяна на структурата, на цвета, потъмняване, избелване.	Деструкция на полимерната верига, фото-разграждане, оксидация
Пяно подобна структура		Формиране на газови мехурчета	Частично разграждане на материала
Топене - нагряване над T° на топене		Структурни и цветови промени	Рекристализация и встъкляване
Изпарение - нагряване над T° на изпарение или разрушаване		Формиране на канали без промяна на цвета, скрайбиране	Превръщане от течно или твърдо в газообразно състояние и карбонизация
		Формиране на канали с цвят, различен от цвета на основния материал	Отнемане на слоеве, нанесени върху основния материал, аблация

В зависимост от вида на материала и достигнатата температура, лазерната маркировка се реализира по един или няколко от по-горе разгледаните процеси: структурни промени, депигментация, промяна на цвета, изгаряне (карбонизация), топене и изпарение.

Процесите протичащи при лазерно маркиране на основните неметални индустриални материали са представени в таблица 3.2 .

Таблица 3.2. Процеси на лазерно маркиране на неметални материали

Процес	Материал			
	полимери	стъкло	керамика	силикон
Аблация	O-	O+	O-	O+
Фрагментация		O+		
Окисляване	O-			
Топене	O-	O+	O-	O+
Деструкция	Ц++	С+	Ц+	
Пяна	Ц++			
Избелване	Ц+			
Промяна на цвета	Ц++	Ц++		
Карбонизацията	Ц++			
Дехидратация	Ц++			
Забележка: O → промяна в отразяването, Ц → промяна в цвета - нисък контраст, + нормален контраст, ++ много добър контраст				

3.3. Елементи на енергийния баланс

Процесите, протичащи в материала, зависят основно от плътността на мощността (q_s) и времето на въздействие на лазерното лъчение (t_{vd}), както и от оптичните и топлофизичните характеристики на обработвания материал. Интензитетът на падащото лъчение намалява в дълбочина, след като премине през слой вещество с определена дебелина.

Една част от светлинният поток – E , на падащия върху обработвания материал лазерен лъч се отразява от повърхността му - E_R , друга се поглъща - E_A , а трета преминава през него - E_D . Ако тази зависимост се изрази чрез енергията, ще има вида 3.8:

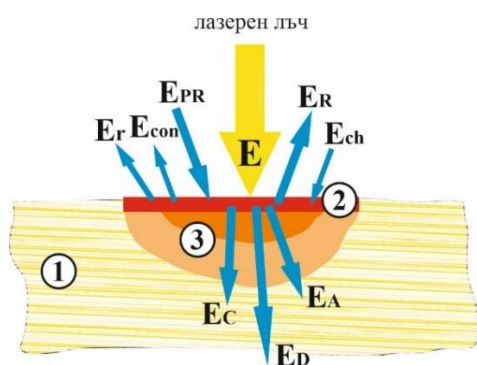
$$E = E_R + E_A + E_D \quad (3.8)$$

където: E - енергия на падащото лъчение;

E_A - енергия на погълнатото лъчение;

E_R - енергия на отразеното лъчение;

E_D - енергия на пропуснатото лъчение.



Фиг. 3.6. Схема на енергийния баланс при маркиране на слоесто армирани композити с полимерна матрица

При взаимодействието на лазерният лъч с материала на образеца 1 - фиг.3.6, в зоната на обработка 2 се получава и допълнителна енергия вследствие на протичането на други възможни процеси, като: химични реакции - E_{ch} - оксидация, E_c - енергия, преминала в топлинно повлияната зона 3 около работното област, E_r - енергия на радиационното излъчване, E_{con} - загуба на енергия от конвекция, E_{PR} - енергия на технологичния процес - енергия за нагряване, топене, и/или изпарение.

Следователно при маркиране на изследваните от нас материали енергията на лазерният лъч (E), която попада върху образците, се трансформира в различни енергии и може да се запише уравнението на енергийния баланс – 3.9:

$$E = E_A + E_R + E_D + E_{PR} + E_{ch} + E_c + E_r + E_{con} \quad (3.9)$$

Тъй като нагряването на материала става с много голяма скорост (за много кратко време), последвано от бързо охлаждане загубите на енергия от конвекция - E_{con} и радиационно излъчване - E_r , са пренебрежимо малки. В резултат на топлопроводността на материала, топлината се разпространява и по дълбочина на детайла, но топлинно повлияната зона е малка, защото времето е кратко и стойностите на - E_c , са малки. В резултат на отражението от повърхността се получават загуби на енергията (E_R), а част от енергията се губи от преминаването ѝ през материала (E_D). Като се отчетат загубите за енергията, необходима за маркиране, може да се запише равенство 3.10:

$$E_A + E_{ch} = E_{PR} + E_c \quad (3.10)$$

3.4. Изводи

1. Локалните източници на топлина при лазерно обработване на неметални непрозрачни материали се характеризират с поле на разпределение на температурата, което следва разпределението на плътността на погълнатата енергия - $W(r,z)$

2. При обработване на неметални материали с лазерен тип топлинен източник максималната температура се регистрира на повърхността на материала.

3. Констатирано са четири етапа в процеса на лазерно маркиране на неметални материали – размекване, формиране на пяно подобна структура, топене и изпарение.

Глава четвърта: Определяне технологичните параметри на процеса

4.1. Влияние на технологичните параметри върху дълбочината на маркировката

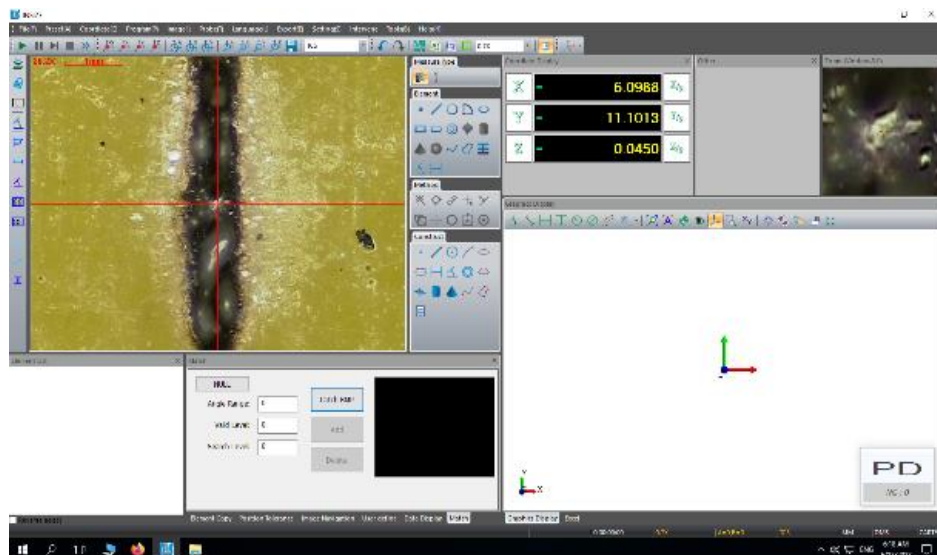
Основните технологични параметри при лазерното маркиране на слоести композитни материали на полимерна основа са скоростта на маркиране и изходящата мощност на лазерната установка. За определяне влиянието им върху дълбочината на маркираните щрихи са направени опити при маркиране със скорост $V = 50 \div 250 \text{ mm/s}$, изходяща мощност $P = 5 \div 50 \text{ W}$, честота на импулсите $f = 50 \text{ kHz}$ и диаметър на фокалното петно $40 \text{ }\mu\text{m}$.

Измерванията на дълбочината на проникване – $\delta \text{ }\mu\text{m}$, е определена в 5 контролни точки разположени по дължината на маркираната линия на разстояние 10 mm . Част от измерванията са представени на фиг. 4.3 и 4.4, а всички експериментални резултати са представени в таблици 4.1 и 4.2 съответно за образци от стъклотекстолит и текстолит, а графичната им интерпретация на фиг. 4.9 и 4.10.

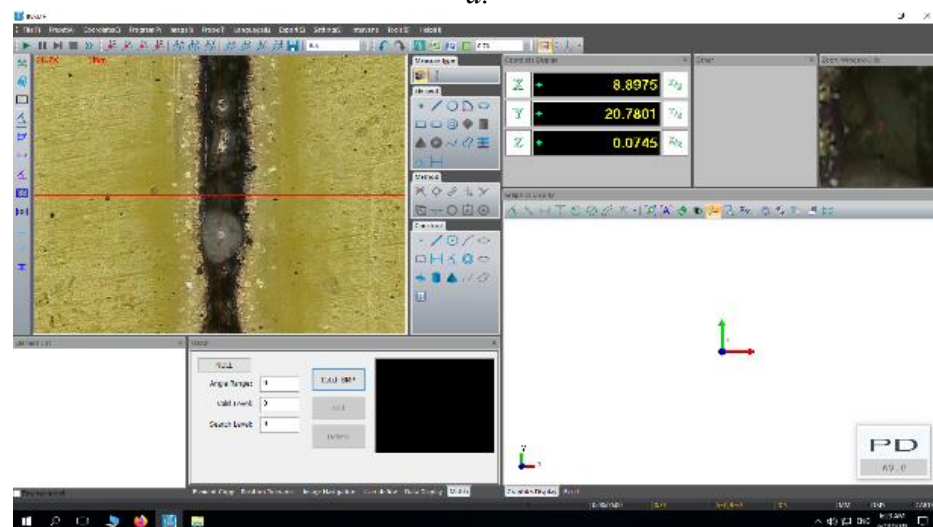
Теоретично при неметални материали максималната дълбочина на проникване на лазерният лъч – δ_{max} , може да се пресметне с израза 4.1 [19]:

$$\delta_{max} = \frac{2P}{\pi \cdot r \cdot \rho \cdot v \cdot c \cdot T} \quad (4.1)$$

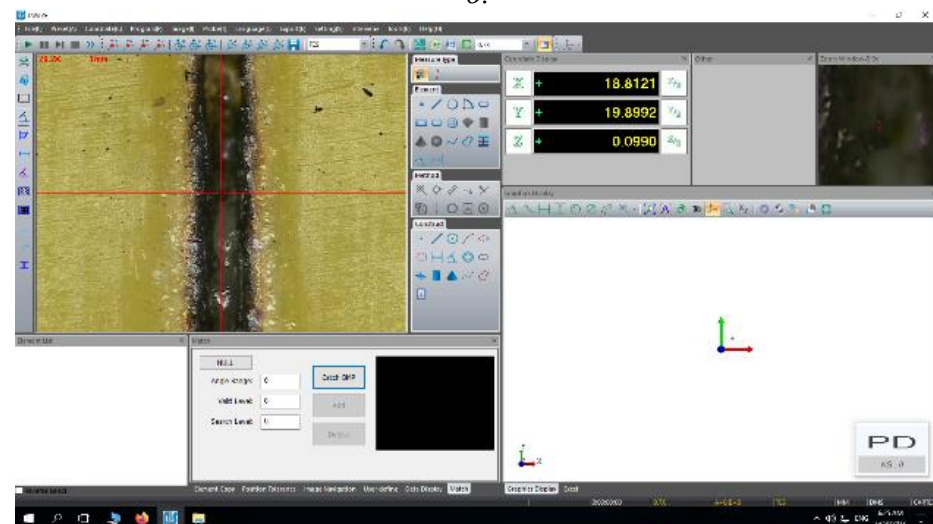
където: P – мощност на лазерното излъчване, W ;
 r – радиус на фокалното петно, μm ;
 ρ – плътност на материала, g/cm^3 ;
 v – скорост на маркиране, mm/s ;
 c – специфична топлина на материала, $\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$;
 T – температура на изпарение, $^\circ\text{C}$.



a.

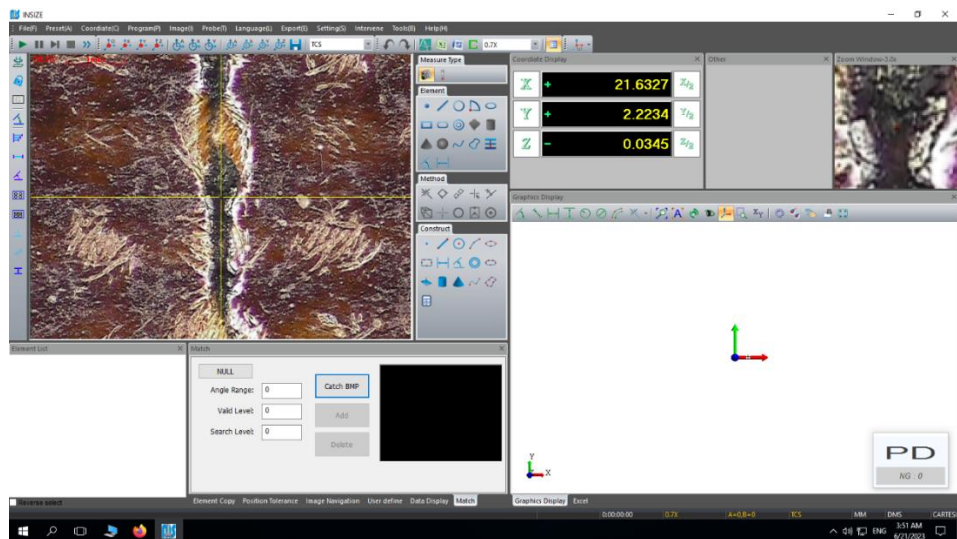


б.

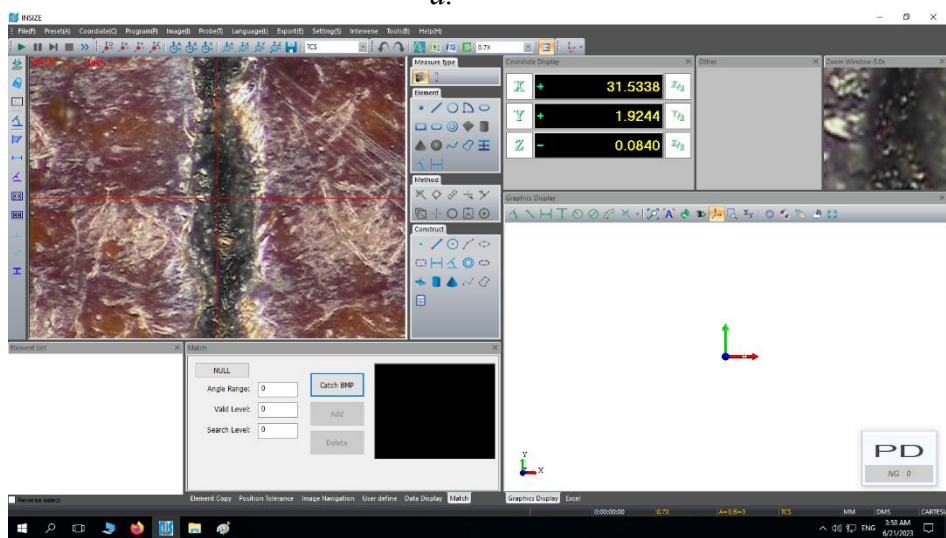


в.

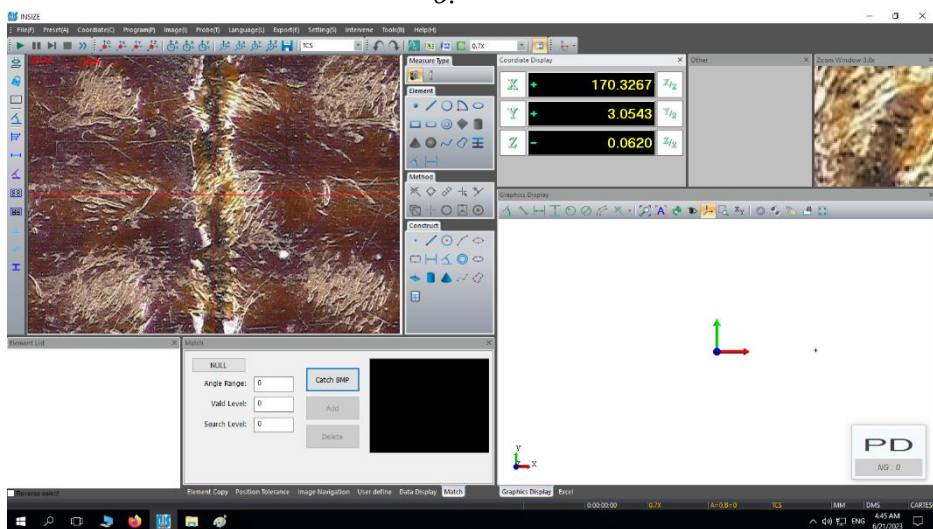
Фиг.4.3. Експериментални резултати при маркиране на стъклотекстолит с $V=50$ mm/s и $f=50$ kHz, $x10$
 а – 25 W; б – 40 W; в – 50 W.



a.



б.



в.

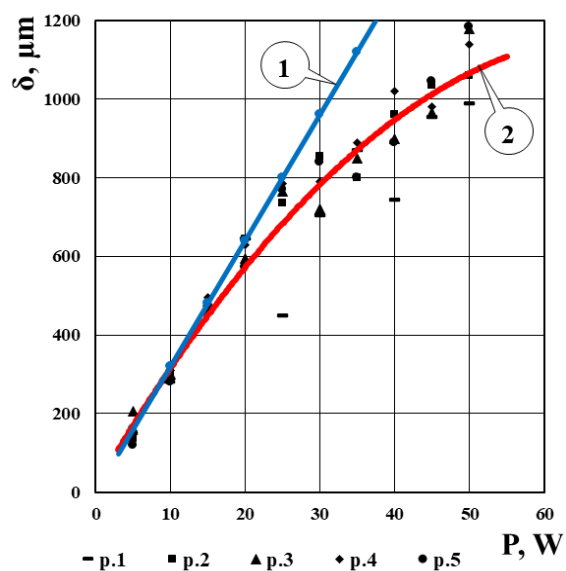
Фиг.4.4. Экспериментални резултати при маркиране на текстолит
с $V=50 \text{ mm/s}$ и $f=50 \text{ kHz}$, $x10$
а – 25 W ; б – 35 W ; в – 50 W .

Таблица 4.1 Експериментални резултати при образци от стъклотекстолит

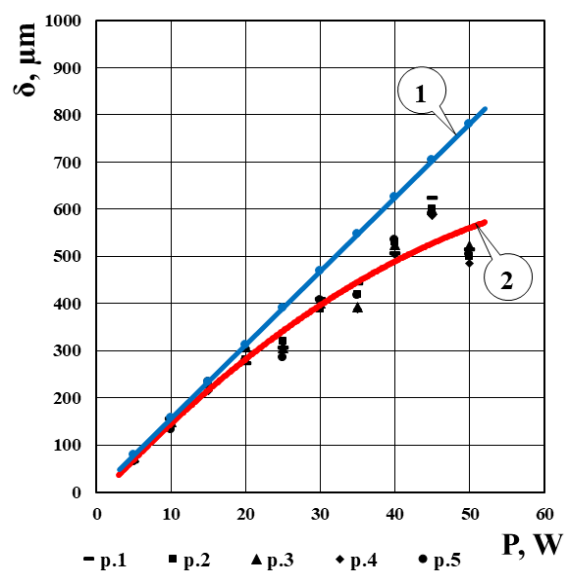
№	P, W	$\delta, \mu\text{m}$						
		p.1	p.2	p.3	p.4	p.5	$\Sigma p_1 \div p_5 / 5$	$\delta_{\text{max}}, \mu\text{m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
V= 50 mm/s								
1	5	150	135	205	155	120	153	160
2	10	280	305	300	310	280	295	320
3	15	456	466	485	495	454	471	480
4	20	645	645	595	630	573	618	640
5	25	450	735	765	785	770	701	800
6	30	705	855	720	790	840	782	960
7	35	870	800	850	890	800	842	1120
8	40	745	960	900	1020	890	903	1280
9	45	955	1035	965	980	1045	996	1440
10	50	990	1060	1180	1140	1185	1111	1600
V= 100 mm/s								
11	5	65	76	75	70	64	70	78
12	10	155	148	149	156	132	148	156
13	15	225	230	232	214	234	227	234
14	20	274	280	308	305	278	289	312
15	25	307	320	305	308	285	305	391
16	30	410	388	400	395	407	400	469
17	35	442	420	393	388	417	412	547
18	40	506	531	525	504	534	520	625
19	45	625	600	598	586	591	600	703
20	50	515	500	522	485	503	505	781
V= 150 mm/s								
21	5	49	50	50	51	52	51	52
22	10	105	100	98	97	103	101	104
23	15	145	138	140	150	137	142	156
24	20	174	192	185	179	180	182	208
25	25	217	189	205	194	200	201	260
26	30	255	252	250	247	276	256	312
27	35	365	345	360	355	365	358	365
28	40	410	416	415	414	415	414	417
29	45	392	345	354	374	370	367	469
30	50	401	347	355	341	346	358	521
V= 200 mm/s								
31	5	35	34	37	38	35	36	39
32	10	76	78	70	75	78	75	78
33	15	110	115	110	110	116	112	117
34	20	150	145	152	155	155	151	156
35	25	185	185	185	190	185	186	195
36	30	223	231	220	225	226	225	234
37	35	255	245	258	251	256	253	274
38	40	310	312	305	310	313	310	313
39	45	275	279	301	270	260	277	352
40	50	302	314	322	306	286	306	391
V= 250 mm/s								
41	5	25	31	30	31	29	29	31
42	10	55	60	60	64	55	58	63
43	15	90	93	89	86	91	90	94
44	20	125	115	120	120	111	118	125
45	25	155	151	147	145	151	150	156
46	30	180	175	178	171	175	176	188
47	35	213	207	205	201	213	208	219
48	40	240	251	235	239	234	240	250
49	45	270	265	255	275	275	268	281
50	50	310	305	298	295	305	303	313

Таблица 4.2 Експериментални резултати при образци текстолит

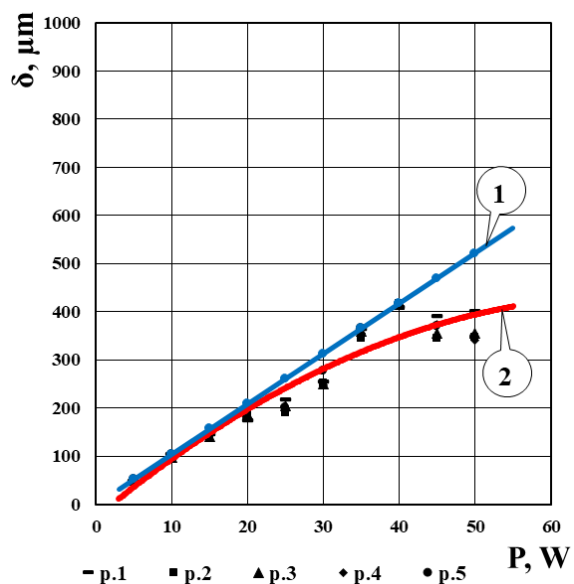
№	P, W	$\delta, \mu\text{m}$						
		p.1	p.2	p.3	p.4	p.5	$\Sigma p_1 \div p_5 / 5$	$\delta_{\text{max}}, \mu\text{m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
V= 50 mm/s								
1	5	85	94	85	90	90	89	91
2	10	162	164	161	150	158	159	182
3	15	220	232	225	224	219	224	273
4	20	315	298	290	288	269	292	364
5	25	405	398	397	402	413	403	455
6	30	476	492	490	480	497	487	546
7	35	610	605	608	618	599	608	636
8	40	725	720	710	709	721	717	727
9	45	701	700	708	705	706	704	818
10	50	667	655	658	660	685	665	909
V= 100 mm/s								
11	5	45	40	42	40	43	42	45
12	10	85	85	90	88	92	88	91
13	15	125	110	114	121	100	114	136
14	20	142	145	155	146	122	142	182
15	25	199	201	190	195	205	198	227
16	30	245	251	250	255	234	247	273
17	35	308	292	295	300	310	301	318
18	40	364	355	363	362	356	360	364
19	45	332	329	317	332	320	326	409
20	50	341	350	338	337	334	340	455
V= 150 mm/s								
21	5	25	30	35	25	35	30	30
22	10	54	59	65	65	57	60	61
23	15	90	85	90	90	95	90	91
24	20	115	115	120	125	117	118	121
25	25	130	127	135	130	138	132	152
26	30	165	160	161	168	161	163	182
27	35	205	210	212	210	203	208	212
28	40	240	242	240	240	238	240	242
29	45	215	210	214	216	205	212	273
30	50	225	231	224	230	220	226	303
V= 200 mm/s								
31	5	25	12	14	25	26	21	23
32	10	42	45	46	45	48	45	46
33	15	65	67	75	70	63	68	68
34	20	95	81	95	85	95	90	91
35	25	115	110	115	98	99	107	114
36	30	135	125	131	135	138	132	136
37	35	150	155	150	153	158	153	159
38	40	180	165	180	175	175	175	182
39	45	195	205	185	195	190	194	205
40	50	205	190	185	184	181	189	227
V= 250 mm/s								
41	5	0	10	0	41	27	16	18
42	10	26	19	40	44	35	33	36
43	15	55	35	60	50	55	51	55
44	20	75	75	75	70	65	72	73
45	25	75	95	75	75	100	86	91
46	30	106	102	95	107	95	101	109
47	35	125	110	115	125	115	118	127
48	40	145	145	125	125	120	132	146
49	45	140	160	155	125	135	143	164
50	50	180	175	170	180	170	175	182



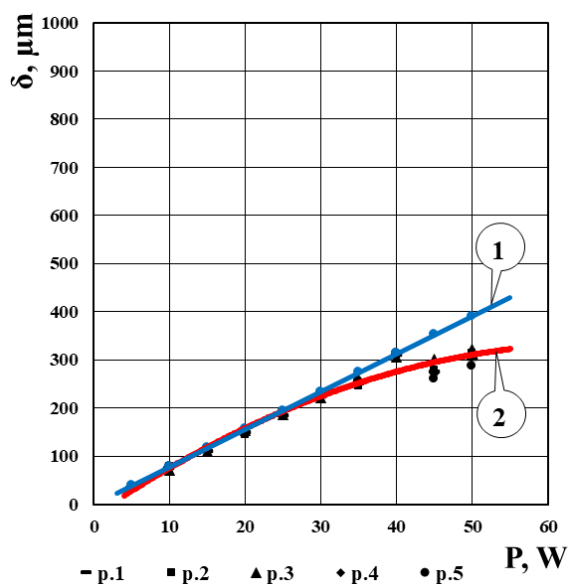
a.



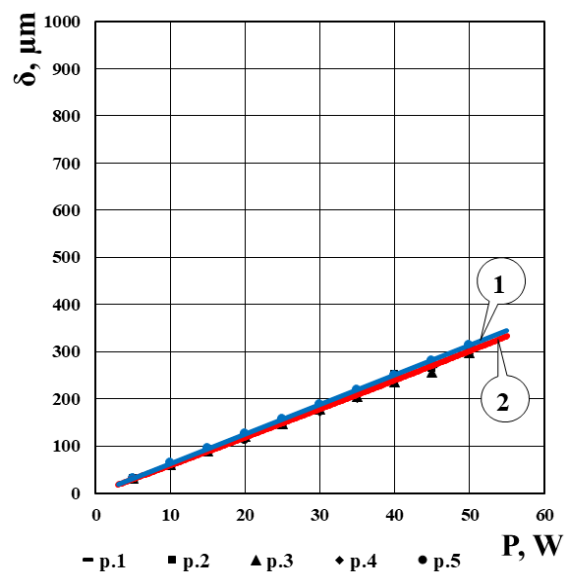
б.



в.



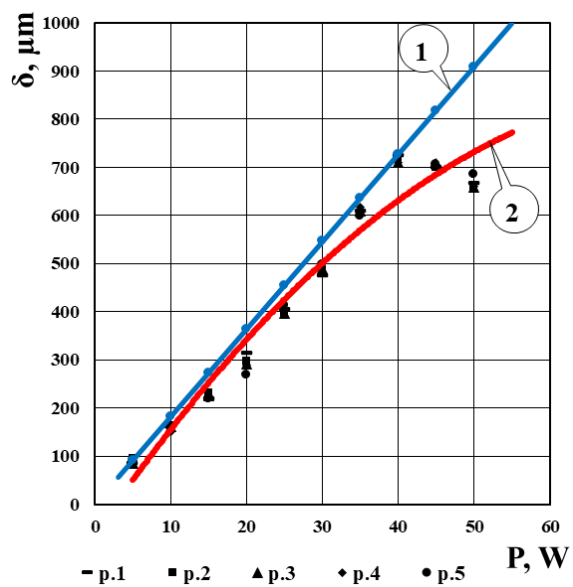
г.



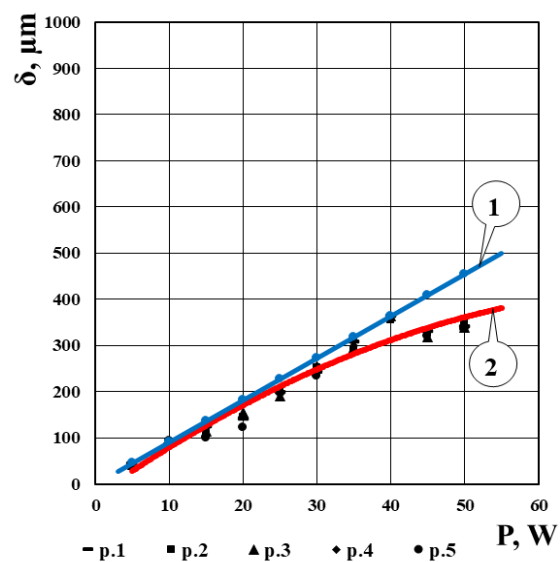
д.

Фиг.4.9. Изменение дълбочината на лазерната маркировка при образци от стъклотекстолит в зависимост от мощността на лазерното лъчение при честота 50 Hz и скорост:

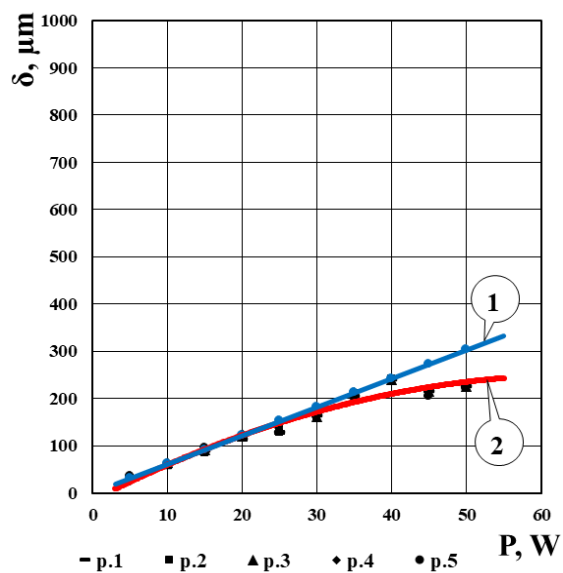
1 – $\delta_{\text{тах}}$ (теоретично)
 2 – $\delta_{\text{ср}}$ (експериментално)
 а – 50 mm/s; б – 100 mm/s;
 в – 150 mm/s; г – 200 mm/s;
 д – 250 mm/s.



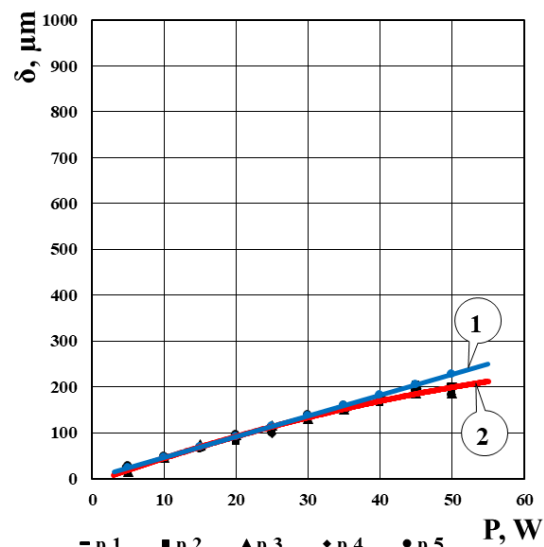
a.



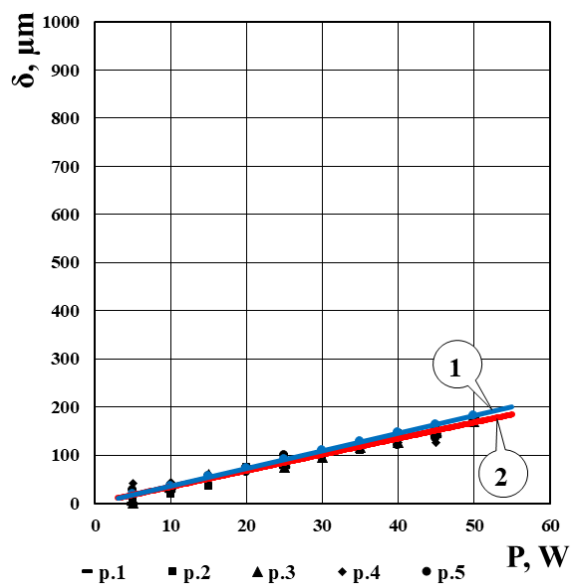
б.



в.



г.



д.

Фиг.4.10. Изменение дълбочината на лазерната маркировка при образци от текстолит в зависимост от мощността на лазерното лъчение при честота 50 Hz и скорост:

- 1 – $\delta_{\text{тах}}$ (теоретично)
- 2 – $\delta_{\text{ср}}$ (експериментално)
- a – 50 mm/s; б – 100 mm/s;
- в – 150 mm/s; г – 200 mm/s;
- д – 250 mm/s.

Използвайки справочни данни са пресметнати максималните теоретични стойности на дълбочината на проникване при лазерно маркиране на изследваните материали (колона 9 от таблици 4.1 и 4.2). Съгласно 4.1 дълбочината на проникване е в линейна зависимост от мощността на лазерното излъчване. Получените експериментални резултати при маркиране на образците показват, че това е валидно само при малки мощности на маркиране – до 20 W. При тях експерименталните резултати се различават от теоретичните такива под 10 % (таблица 4.3).

С нарастване стойностите на изходящата мощност над 20 W разликата в измерените стойности за дълбочината на маркиране при образци от стъклотекстолит нараства от 4 до 30 %. Най-големи разлики се фиксират при образците маркирани с минимална скорост – 50÷100 mm/s. При големите скорости на маркиране разликите намаляват, като при скорост 250 mm/s експерименталните резултати на практика се препокриват с теоретично пресметнатите.

Аналогични са и резултатите при маркировката на образците от текстолит.

При изходяща мощност до 15 W получените резултати се различават с 10÷15 %, с нарастване на изходящата мощност над 15 W разликите в измерените стойности варира от 4 до 27 %. При високите скорости на маркиране – 200÷250 mm/s разликите между измерените и теоретичните криви е минимална – под 10 % и на практика те се препокриват.

С увеличаване скоростта на маркиране от 50 до 250 mm/s и при двата изследвани от нас материали дълбочината на маркировъчните щрихи намалява около 5÷7 пъти, което е резултат от по малкото време за топлинно въздействие върху изследваните повърхнини.

При всички изследвани режими на маркиране резултатите при стъклотекстолитовите образци са по-добри в сравнение с тези получени върху образците от текстолит. Това се обяснява с отражателната способност на материала – R. Тя се дефинира с отношението 4.2.

$$R = \frac{J_T}{J_0} \quad (4.2)$$

където: J_T – интензитет на отразеният лъч;

J_0 - интензитет на падащото лъчение.

Отражателната способност – R, главно зависи от състоянието на обработваната повърхнина. Основна нейна характеристика е класа на грапавост. С увеличаване класа на грапавост на обработваната повърхност отражателната и способност намалява. Грапавини от порядъка на дължината на вълната значително увеличават дълбочината на проникване на лазерния лъч.

В конкретният случай дължината на вълната е $\lambda=1.06 \mu\text{m}$.

Измерената грапавост на маркираните образци. е показана на фиг.4.11.



а.



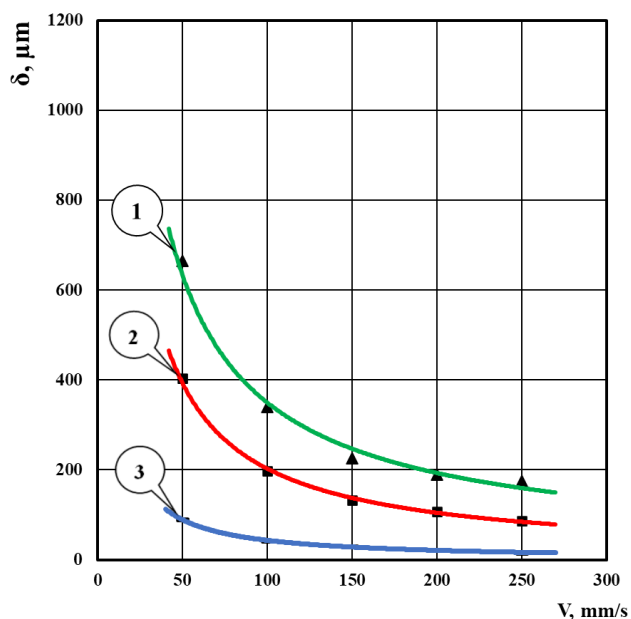
б.

Фиг. 4.11. Стойности на грапавостта по повърхността на:
а – текстолитови образци; б - стъклотекстолитови образци

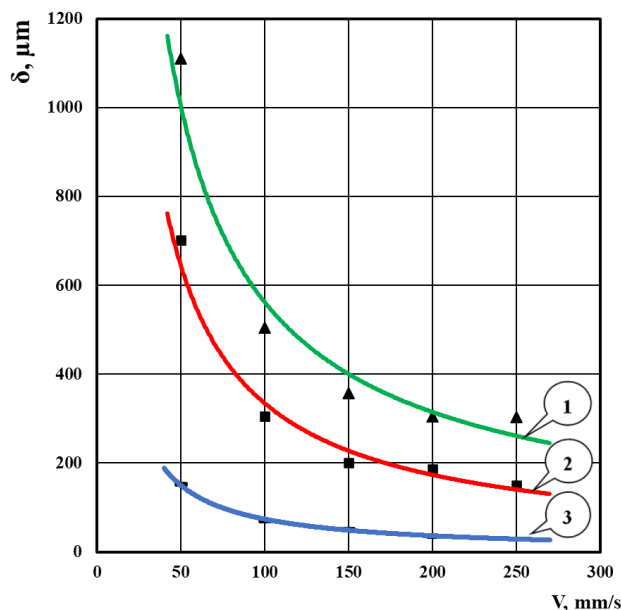
Вижда се, че при образците от текстолит средната грапавост – R_a , е близка до дължината на лазерното лъчение, но стойностите за R_z са над 4 пъти по-големи от дължината на вълната. Това води до значително разсейване мощността на лъченето и понижени стойности за δ .

При стъклотекстолитовите образци фиг. 4.11 б, стойностите за R_a са $0.225 \mu m$ и са над 4 пъти по-малки от дължината на вълната, а за $R_z = 1.703 \mu m$ са съизмерими с дължината на падащата вълна. С това се обясняват и получените разлики в стойностите за δ , при двата изследвани материала.

На база получените експериментални резултати от таблици 4.1 и 4.2 са представени графични зависимости за влиянието на скоростта на маркиране върху дълбочината на формираните маркировъчни щрихи, които са показани на фиг. 4.12. и 4.13. съответно за образци от текстолит и стъклотекстолит.



Фиг.4.12. Влияние на скоростта на маркиране върху дълбочината на маркировката върху образци от текстолит при изходяща мощност:
1 – 50 W; 2 – 25 W; 3 – 5 W



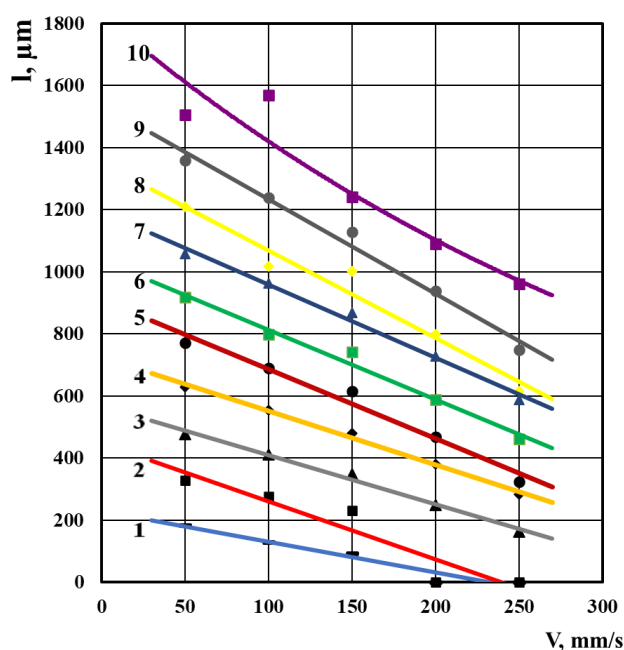
Фиг.4.13. Влияние на скоростта на маркиране върху дълбочината на маркировката върху образци от стъклотекстолит при изходяща мощност:
1 – 50W; 2 – 25W; 3 – 5W

4.2. Влияние на технологичните параметри върху широчината на маркировката

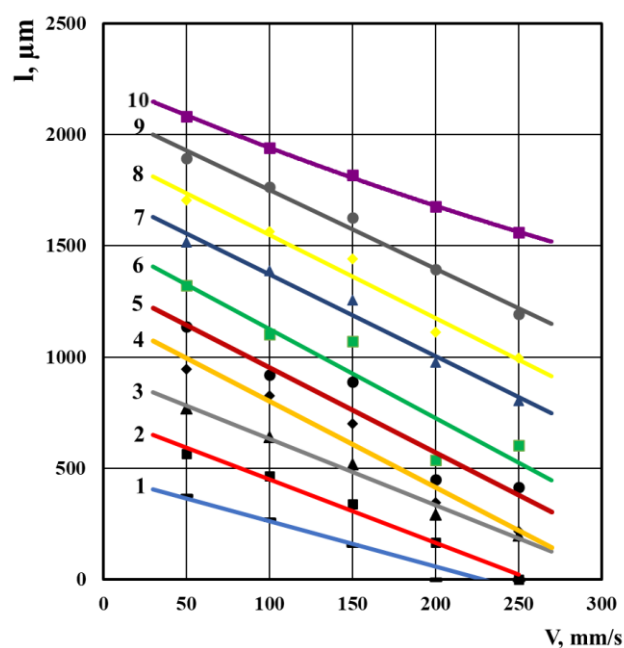
При аналогични характеристики на технологичните параметри на процеса лазерно маркиране от т. 4.1, са проследени промените в широчината на маркировъчния щрих – $1 \mu m$. Графичната интерпретация на резултатите за влиянието на скоростта на маркиране и мощността на лазерното лъчение върху широчината на маркировъчния щрих е показана съответно на фиг. 4.14. и 4.15.

От фигурите се вижда, че зависимостите на широчината на маркировъчната щриха от мощността на лазерното лъчение и скоростта на маркиране са линейни.

Максимална широчина при маркиране на образци от текстолит се постига при максимална мощност – 50 W и минимална скорост на движение на лъча от 50 mm/s - $1500 \mu m$. При мощност на лъча от 50 W с нарастване скоростта на маркиране от 50 до 250 mm/s широчината на маркировката намалява от 1500 до $960 \mu m$ – ≈ 1.6 пъти.



а.



б.

Фиг.4.14. Влияние скоростта на маркировката върху широчината на щриха при различни стойности на изходящата мощност за образци от:

а - текстолит; б - стъклотекстолит:

1 – 5 W; 2 – 10 W; 3 – 15 W; 4 – 20 W; 5 – 25 W; 6 – 30 W; 7 – 35 W;
8 – 40 W; 9 – 45 W; 10 – 50 W

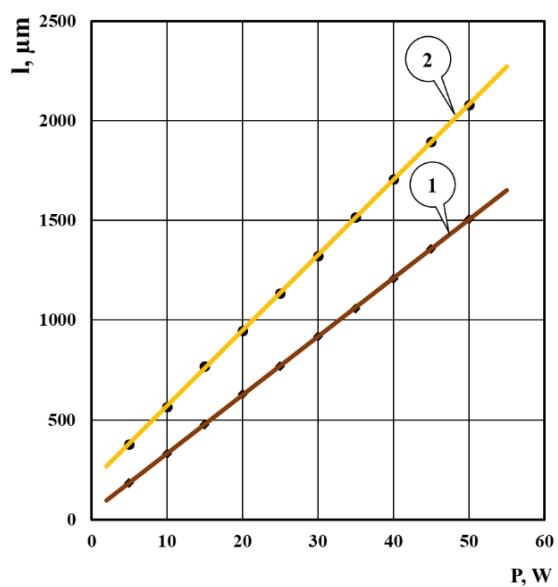
За образци от стъклотекстолит получените резултати са аналогични. Максимална широчина на маркиране се постига при мощност от 50 W и скорост от 50 mm/s – 2080 μm . При мощност на лъчение 50 W с нарастване скоростта на маркиране от 50 до 250 mm/s широчината на маркиране намалява.

При постоянна скорост на маркиране 50 mm/s и нарастване мощността на лазерният лъч от 5 до 50 W, широчината на маркировката при текстолитовите образци нараства от 180 до 1500 – ≈ 8 пъти, а при стъклотекстолитовите образци от 177 до 2080 μm – ≈ 12 пъти.

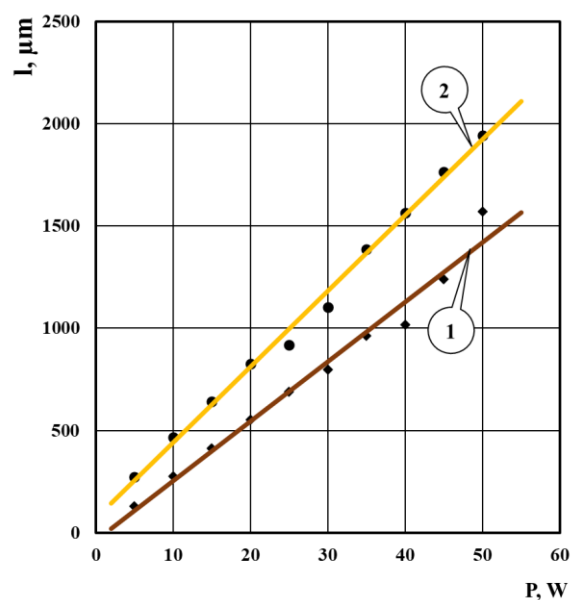
Съпоставяйки получените експериментални резултати от изследваните два типа образци се вижда – фиг.4.15, че широчината на маркировката при образците от стъклотекстолит е по-голяма при всички изследвани режими на маркиране в сравнение с тази върху образци от текстолит. Най-съществена е разликата при високите мощности на лъчение, при които стойностите на маркировката при стъклотекстолит са $1.25 \div 1.55$ пъти по-високи в сравнение с тези получени върху образци от текстолит от 2080 до 1560 μm – ≈ 1.3 пъти.

По-голямата широчина на маркировката при образците от стъклотекстолит аналогично на резултатите в т. 4.1 може да се обясни с по-малката грапавост на маркираната повърхнина спрямо тази на образците от текстолит. Към това трябва да се добави, че стойностите на топлоустойчивостта по Мартенс и специфичната топлина на образците от текстолит (таблица 2.1) са съответно 160 $^{\circ}\text{C}$ и 0.446 cal/g. $^{\circ}\text{C}$ и са значително по-високи в сравнение с тези на стъклотекстолита (таблица 2.2) съответно 105 $^{\circ}\text{C}$ и 0.20 cal/g. $^{\circ}\text{C}$.

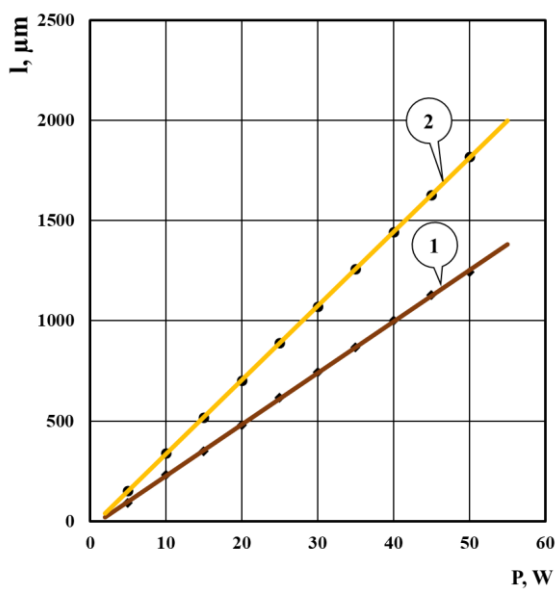
Това предопределя необходимостта от по-малко количество топлина за разтопяване на матричната фаза на стъклотекстолитовите образци в сравнение с тези от текстолит и наличието на немаркирани зони от маркировката при мощности до 10 W и високи скорости на маркиране – 150–250 mm/s.



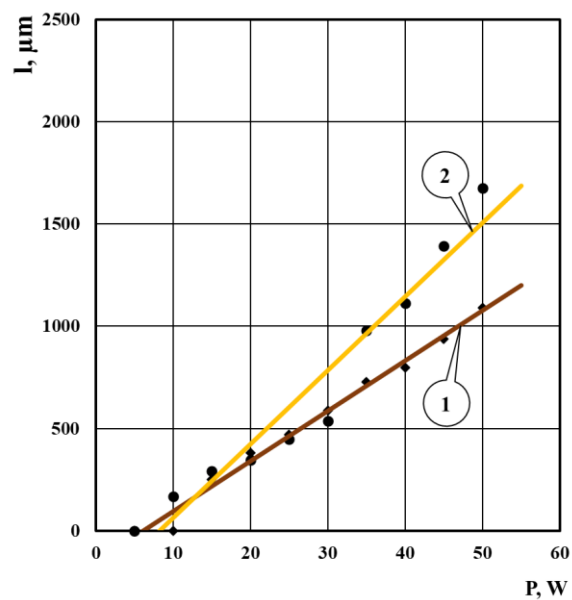
a.



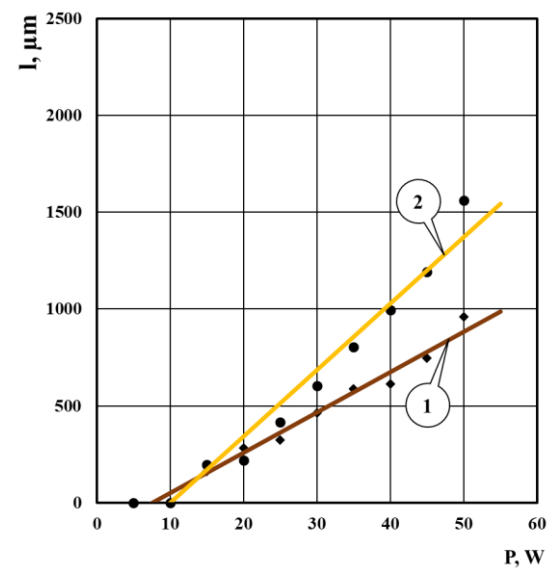
б.



в.



г.



д.

Фиг.4.15 .Влияние на изходящата мощност върху широчината на маркировката при образци от:

1 – текстолит;

2 – стъклотекстолит.

a – $V=50 \text{ mm/s}$; б - $V=100 \text{ mm/s}$;

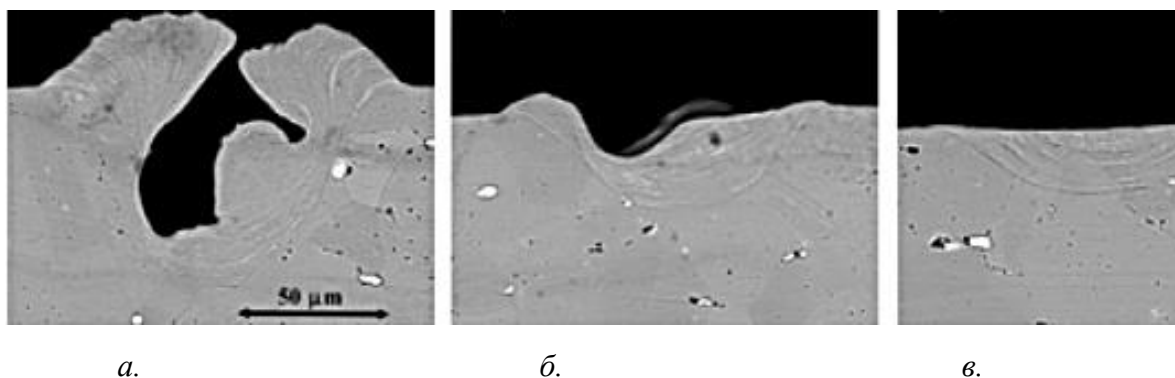
в - $V=150 \text{ mm/s}$; г - $V=200 \text{ mm/s}$;

д - $V=250 \text{ mm/s}$;

4.3. Влияние на технологичните параметри върху профила на напречното сечение на маркировъчния шрих

При анализиране резултатите от литературните източници [94, 95, 100, 102, 105] се констатира, че при лазерно маркиране на метални индустриални материали се наблюдава наличието на три типа маркировъчни канала. Най- подробно те са описани в изследванията на никел-кобалтовата сплав “Inconel 718” [100]:

- Маркировки при които всички точки от профила са положителни и маркировъчният шрих е напълно или частично затворен – фиг. 4.16 а;
- Маркировки при които точките от профила наподобяват Гаусово разпределение (повдигнат горен ръб – $Z \geq 0$ и отрицателен долен ръб – $Z \leq 0$) – фиг.4.16 б;
- Маркировки при които профилите са квази плоски, като на фиг.4.16в и при промяна на увеличението точките от профила наподобяват профила на Гаус.



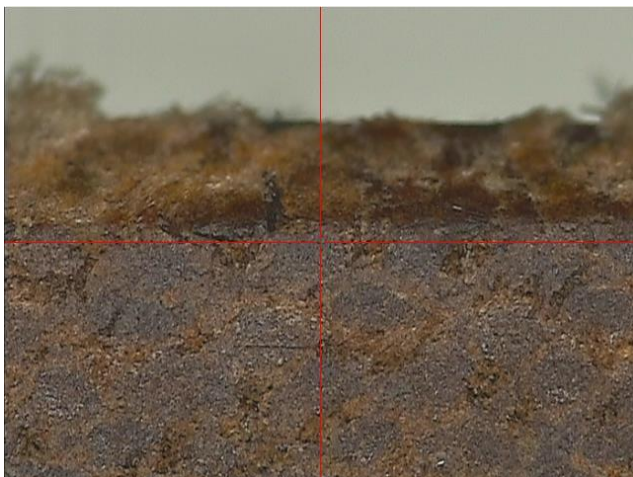
Фиг.4.16. Профил на напречни сечения на маркировки получени върху образци от “ Inconel 718” [100]

За определяне влиянието на технологичните параметри върху профила на напречното сечение на маркировката при композитни слоесто армирани материали с полимерна матрица са изследвани влиянието на мощността на лъчение – P , W и честотата на лазерните импулси – f , kHz.

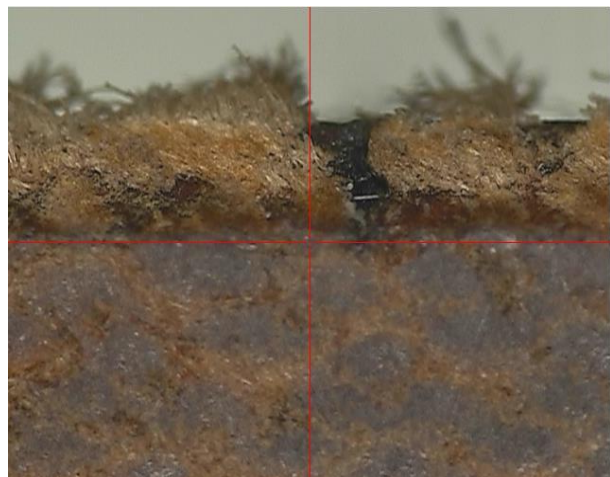
От получените експериментални резултати в т. 4.1 и 4.2 се констатира, че оптимални геометрични параметри на маркировъчния шрих се получава при скорост на маркиране $V_c = 50$ mm/s и честота на лазерният импулс $f = 50$ kHz. В тази връзка експериментите за изследване профила на напречното сечение на маркировъчния канал са проведени при тези технологични параметри. Експерименталните резултати получени при различни стойности на мощността са представени на фиг.4.17 и 4.18 съответно за образци от текстолит и стъклотекстолит, а за влиянието на честотата на лазерния импулс върху профила на канала на фиг. 4.19 и 4.20.

От фиг.4.17 и 4.18 се вижда, че с нарастване мощността на лазерното лъчение от 10 до 50 W профилът на маркировката преминава от псевдо равнинен към такъв наподобяващ Гаусово разпределение на точките от контура. По силно това е изразено при образците от текстолит – фиг.4.17, защото текстилната армираща фаза има по-ниска топлинна устойчивост в сравнение със стъклената такава.

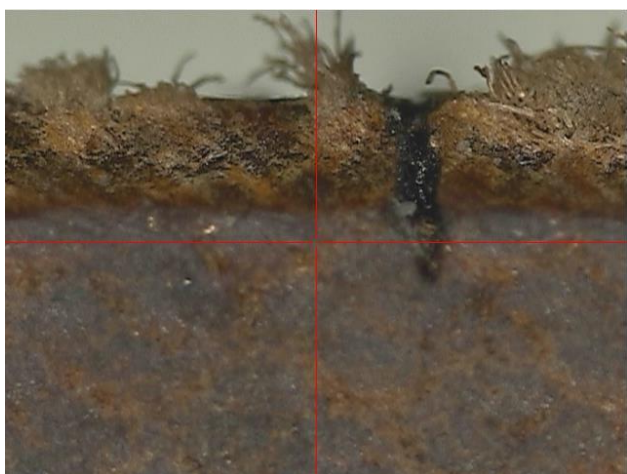
Резултатите от влиянието на честотата на лазерният импулс върху напречния профил на канала показват, че с нарастването на честотата от 50 до 80 kHz, профилът на канала на маркировката се променя от Гаусово разпределение на контура към псевдо равнинен. Това е резултат от по-слабото топлинно въздействие на лъченето в дълбочина на обработвания материал при постоянна скорост на движение на лъча и постоянна мощност.



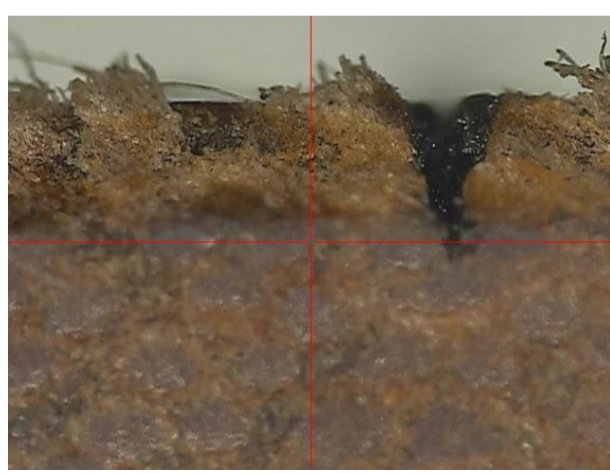
а.



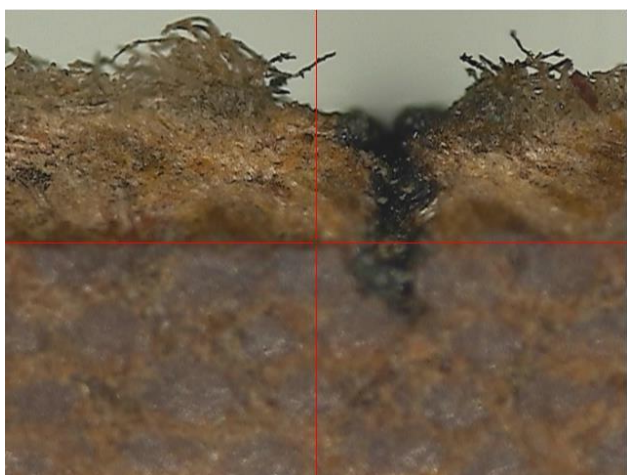
б.



в.



г.



д.

Фиг.4.17. Влияние мощността на лазерното лъчение върху профила на маркировъчния шрих при маркиране на образци от текстолит с режим на маркиране: $V_c = 50 \text{ mm/s}$ и $f = 50 \text{ kHz}$, $\times 30$
 а – $P = 10 \text{ W}$; б – $P = 20 \text{ W}$;
 в – $P = 30 \text{ W}$; г – $P = 40 \text{ W}$;
 д – $P = 50 \text{ W}$;



а.



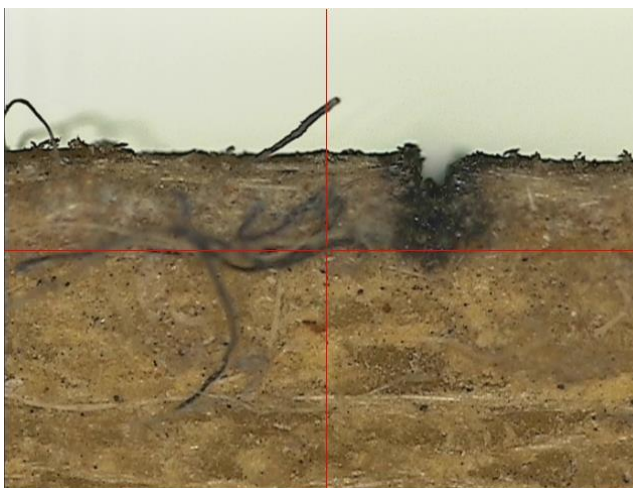
б.



в.

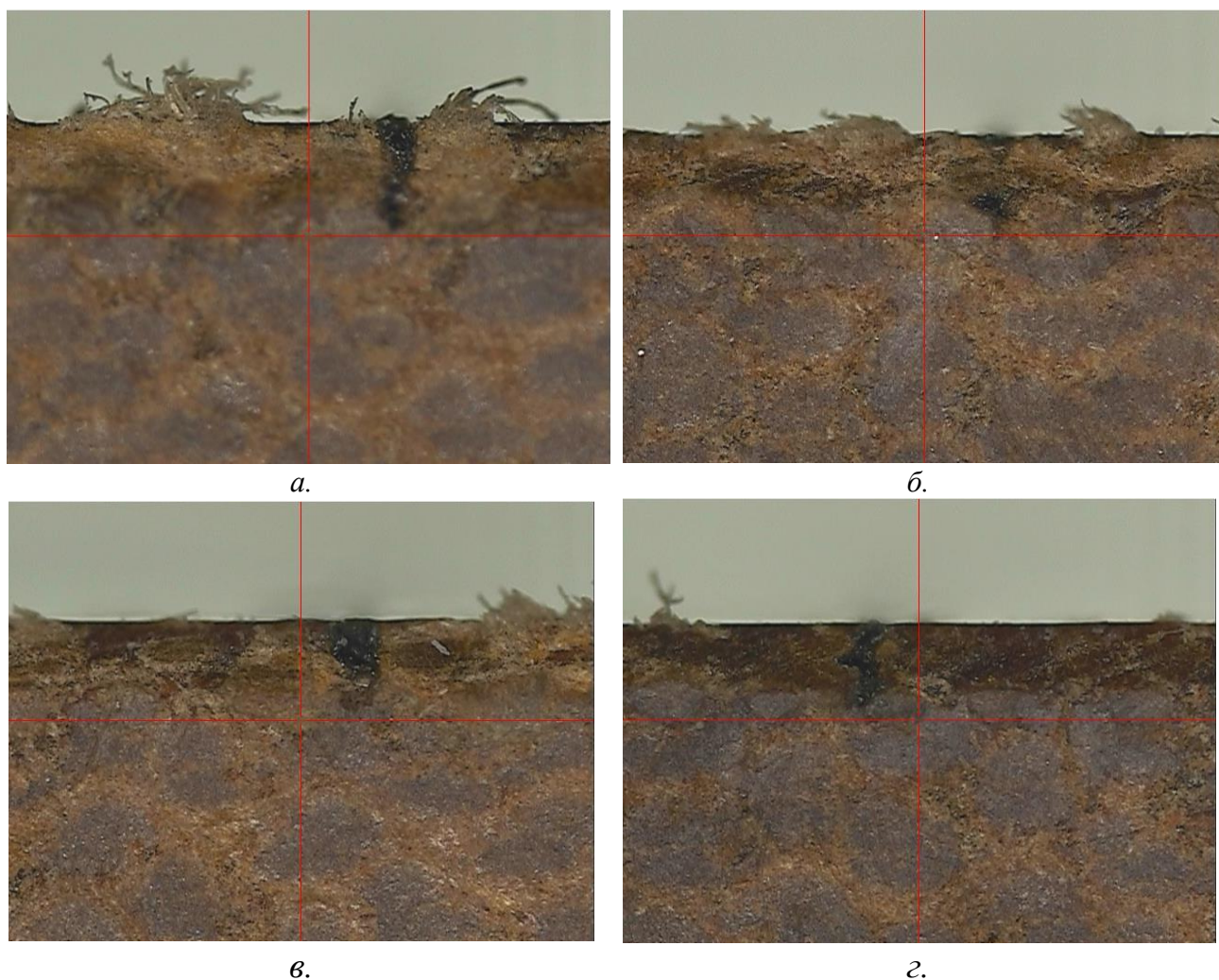


г.



д.

Фиг.4.18.Влияние мощността на лазерното
лъчение върху профила на маркировъчния
щрих при маркиране на образци от
стъклотекстолит с режим на маркиране:
 $V_c = 50 \text{ mm/s}$ и $f = 50 \text{ kHz}$, $\times 15$
 $a - P = 10 \text{ W}$; $б - P = 20 \text{ W}$;
 $в - P = 30 \text{ W}$; $г - P = 40 \text{ W}$;
 $д - P = 50 \text{ W}$;



Фиг.4.19. Влияние честотата на лазерният импулс върху профила на щриха при маркиране на образци от текстолит с $V_c=50 \text{ mm/s}$ и $P = 30 \text{ W}$, $\times 30$:
 а - $f=50 \text{ kHz}$; б - $f=60 \text{ kHz}$; в - $f=70 \text{ kHz}$; г - $f=80 \text{ kHz}$

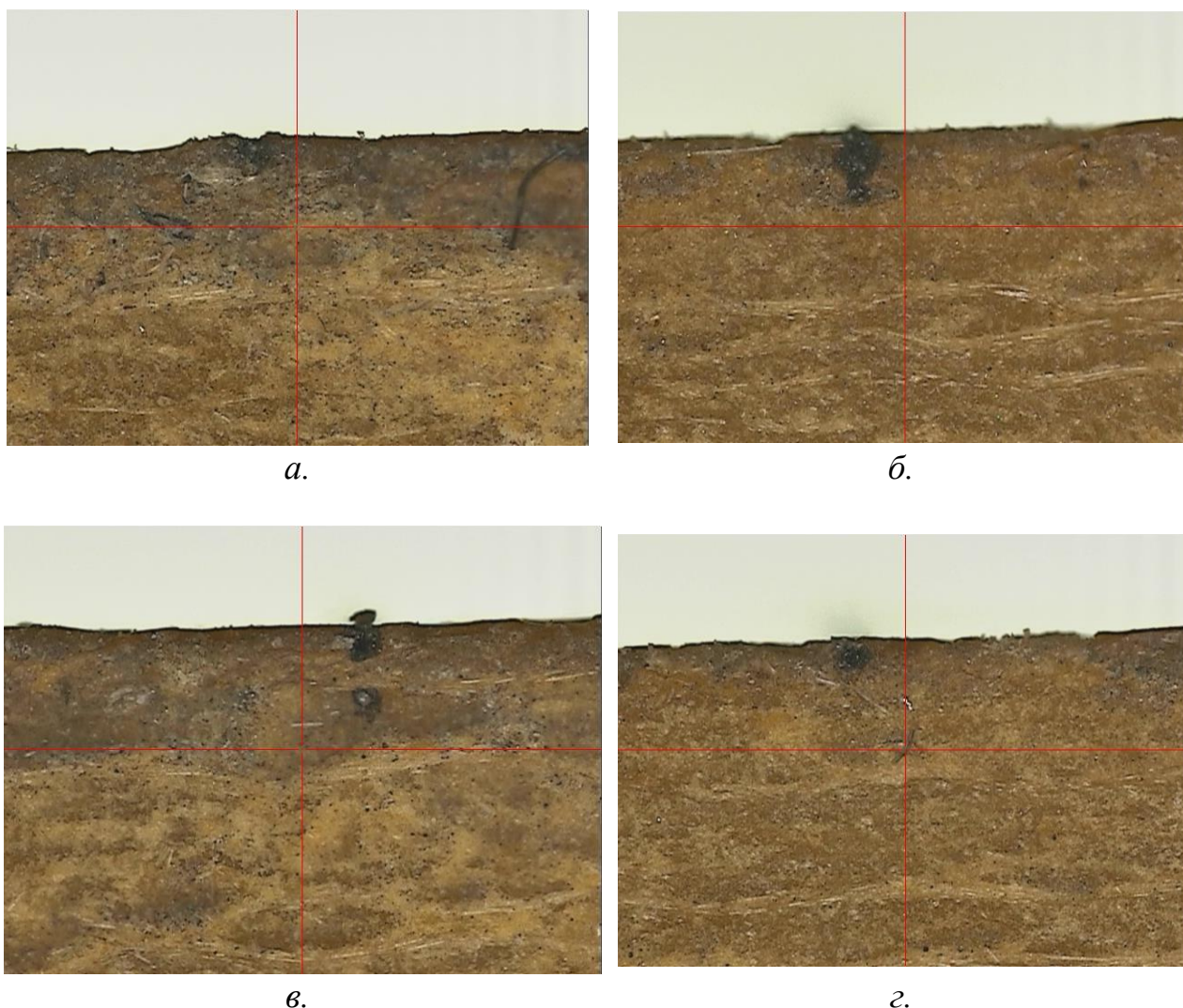
4.4. Изводи

1. Разработени са зависимости за изменение на геометричните параметри на лазерния щрих (дълбочина и широчина) в зависимост от скоростта на маркиране ($20 \div 250 \text{ mm/s}$) и изходящата мощност ($5 \div 50 \text{ W}$).

2. Доказано е, че при лазерно маркиране със скорост $50 \div 250 \text{ mm/s}$ на слоесто армирани композити, дълбочината на маркировъчния щрих се изменя по линеен закон само при мощност на лъчение до 20 W . При мощности над 20 W и скорости на маркиране $50 \div 200 \text{ mm/s}$ дълбочината се изменя по параболичен закон, което е изразено по-силно при ниските скорости на маркиране.

3. Доказано е, че с нарастване скоростта на маркиране от 50 до 250 mm/s и при двата изследвани материала дълбочината на маркировъчните щрихи намалява около $5 \div 7$ пъти, което е резултат от по малкото време за топлинно въздействие върху обработваните повърхнини.

4. Доказано е, че при постоянна скорост на маркиране 50 mm/s и нарастване мощността на лазерния лъч от 5 до 50 W , широчината на маркировката при текстолитовите образци нараства от 180 до $1500 \text{ }\mu\text{m}$ – ≈ 8 пъти, а при стъклотекстолитовите образци от 177 до $2080 \text{ }\mu\text{m}$ – ≈ 12 пъти.



Фиг.4.20. Влияние на честотата на лазерният импулс върху профила на щриха при маркиране на образци от стъклотекстолит с $V_c=50 \text{ mm/s}$ и $P = 15 \text{ W}$, $\times 30$:
 $a - f=50 \text{ kHz}$; $б - f=60 \text{ kHz}$; $в - f=70 \text{ kHz}$; $г - f=80 \text{ kHz}$

5. Констатирано е, че по-високите стойности на геометричните параметри при образците от стъклотекстолит в сравнение с тези на текстолита са резултат, както от по-ниските стойности на грапавостта (които са съизмерими с дължината на вълната на лазерния лъч), така и от това, че стойностите на топлоустойчивостта по Мартенс и специфичната топлина на образците от текстолит са съответно 160°C и $0.446 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ и са значително по-високи в сравнение с тези на стъклотекстолита съответно 105°C и $0.20 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

6. Доказано е, че с нарастване мощността на лазерното лъчение от 10 до 50 W профилът на маркировката преминава от псевдо равнинен към такъв наподобяващ Гаусово разпределение на точките от контура. По-силно това е изразено при образците от текстолит, защото текстилната армираща фаза има по-ниска топлинна устойчивост в сравнение със стъклената такава.

7. Доказано е, че с нарастването на честотата от 50 до 80 kHz, профилът на канала на маркировката се променя от Гаусово разпределение на контура към псевдо равнинен. Това е резултат от по-слабото проникване на лазерния лъч в обработвания материал при по-високи стойности на честотата на импулса.

Глава пета: Съставяне на математични модели и оптимизиране на технологичните процеси

От изложеният материал в трета и четвърта глава може да се заключи, че механизма на лазерно маркиране на слоесто армирани композити с полимерна матрица е сложен и многофакторен процес. За да се анализира влиянието на технологичните фактори върху геометрията на маркировката се налага да се съставят математически модели на технологичния процес и се проведе дисперсионен анализ – ANOVA (Analysis of Variance).

Входните фактори и факторното пространство са избрани на базата на проведени предварителни експерименти и анализирани на литературни източници [1, 15, 49, 87]. За изследваният технологичен процес е избран модел в който като входни фактори са избрани изходящата мощност на лъча – X_1 , и скоростта на маркиране – X_2 .

Целеви функции са геометричните характеристики на маркировката, които при образци от стъклотекстолит са: дълбочина на проникване – Y_1 и широчина на марката - Y_2 , а при образците от текстолит са дълбочина на проникване – Y_3 и широчина на марката – Y_4 .

Изследванията са проведени при постоянни стойности на:

- честотата на лазерният импулс – $f = 50 \text{ kHz}$;
- наклон на растера – $\alpha = 0^\circ$;
- дефокусировка – $S = 0 \text{ mm}$;
- повторяемост на маркирането – $R = 1$.

Изследваните образци са облъчени от лазерния лъч директно при нормални условия и следните характеристики на лъча:

- дължина на вълната – $\lambda = 1064 \text{ nm}$;
- диаметър на фокалното петно - $d_f = 40 \text{ }\mu\text{m}$.

Основните стойности на входящите фактори, както и интервалите на вариране при маркиране на образците са представени в таблица 5.1.

На база натрупаните експериментални резултати в таблици 4.1÷4.4 е попълнен плана на експеримента – таблица 5.2.

Таблица 5.1. Области на вариране на факторите

нива на факторите	X_1, W	$X_2, \text{ mm/s}$	кодирана стойност
$X_{i0} + \Delta X_i$	45	250	+1
X_{i0}	25	150	0
$X_{i0} - \Delta X_i$	5	50	-1

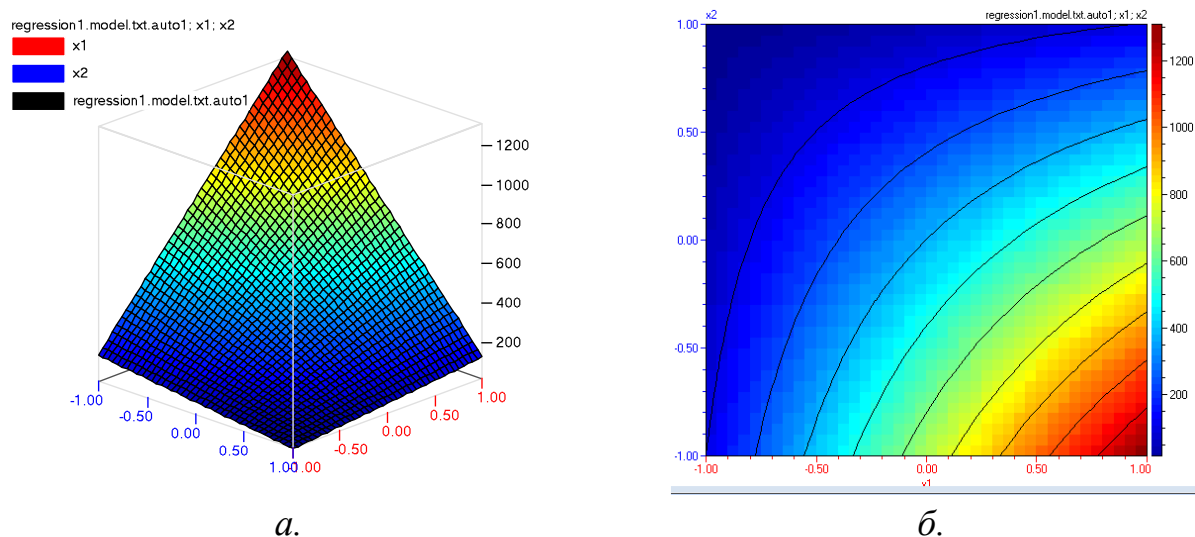
Таблица 5.2. План на експеримента

№	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	X_1^2	X_2^2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	281	1193	182	748
2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	31	377	18	0
3	+1	+1	-1	-1	+1	+1	1440	1893	818	1358
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	160	377	91	183
5	+1	+1	0	0	+1	0	469	1627	273	1128
6	+1	-1	0	0	+1	0	52	153	30	92
7	+1	0	+1	0	0	+1	156	416	91	323
8	+1	0	-1	0	0	+1	800	1136	455	770
9	+1	0	0	0	0	0	260	889	152	615

5.1. Математични модели на технологичните параметри при маркиране на детайли от стъклотекстолит

Получения регресионен модел за определяне дълбочината на проникване на лазерното лъчение в стъклотекстолит – Y_1 приема вида 5.2, а графичната интерпретация на резултатите в дву- и три координатни системи са представени на фиг.5.1.

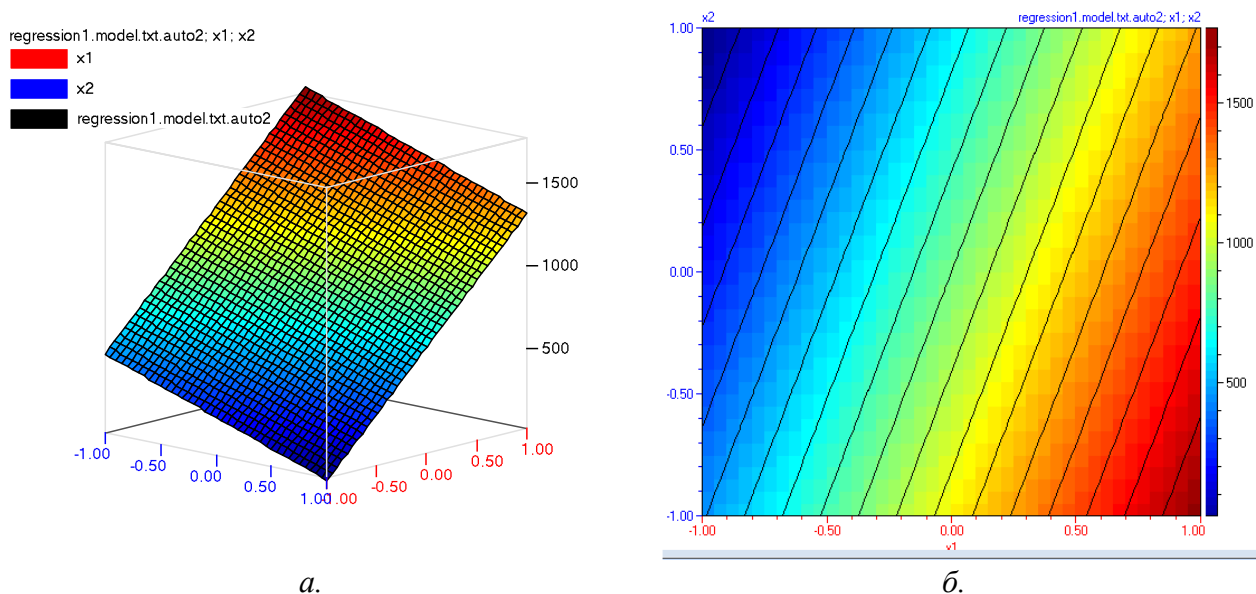
$$Y_1 = 405.444 + 324.500x_1 - 322.000x_2 - 257.500x_1x_2 \quad (5.2)$$



Фиг.5.1. Графично представяне на зависимост $Y_1 = f(X_1, X_2)$
а-в тримерни координати; б – в двумерни координати

Получения регресионен модел за определяне на широчината на маркировъчния шрих при образци от стъклотекстолит (5.4) е с графична интерпретация показана на фиг. 5.4.

$$Y_2 = 895.667 + 634.333x_1 - 236.667x_2 \quad (5.4)$$

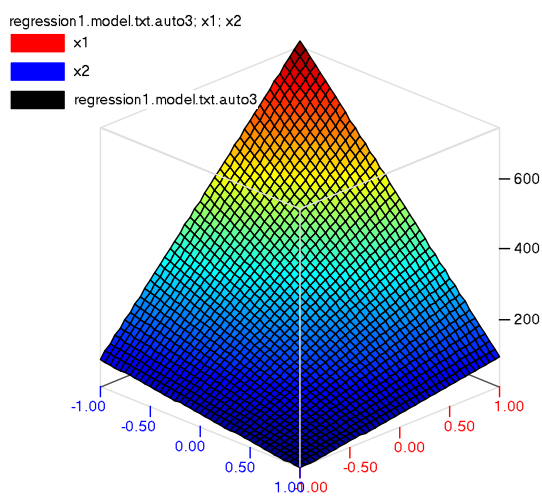


Фиг.5.4.Графично представяне на зависимост $Y_2 = f(X_1, X_2)$
а-в тримерни координати; б – в двумерни координати

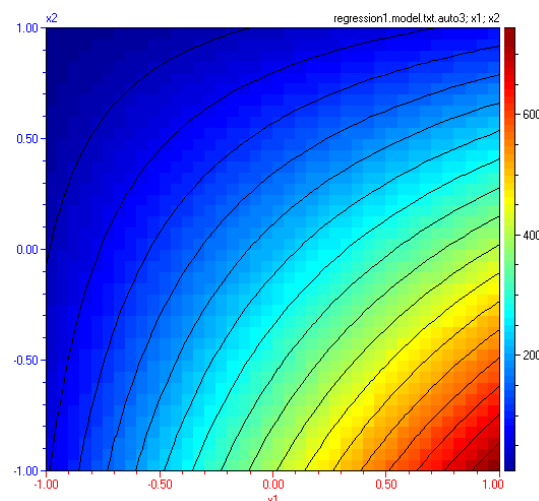
5.2. Математични модели на технологичните параметри при маркиране на детайли от тектолит

Получения регресионен модел за определяне дълбочината на проникване на лазерното лъчение в тектолит – Y_3 приема вида 5.6, а графичната интерпретация на резултатите в дву- и три координатни системи са представени на фиг.5.7.

$$Y_3 = 232.667 + 189.000x_1 - 178.833x_2 - 140.750x_1x_2 + 2.667x_1x_1 \quad (5.6)$$



а.

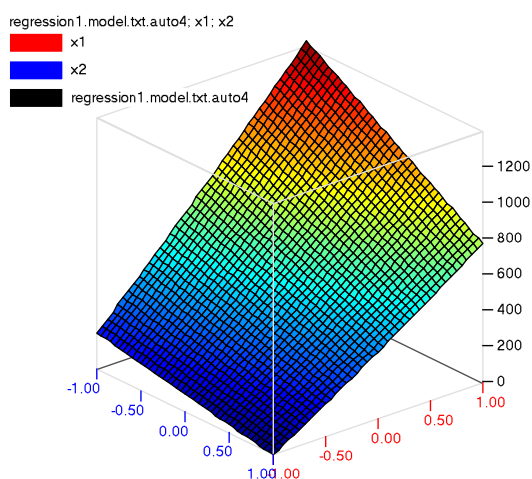


б.

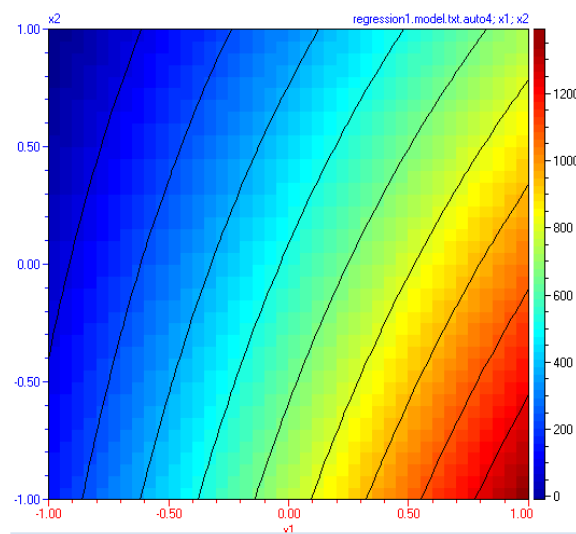
Фиг.5.7. Графично представяне на зависимост $Y_3 = f(X_1, X_2)$
а-в трикоординатна система; б – в двукоординатна система

Получения регресионен модел за определяне на широчината на маркировъчния щрих при образци от тектолит (5.8) е с графична интерпретация показана на фиг. 5.10.

$$Y_4 = 569.333 + 493.167x_1 - 206.667x_2 - 106.750x_1x_2 + 15.500x_1x_1 \quad (5.8)$$



а.



б.

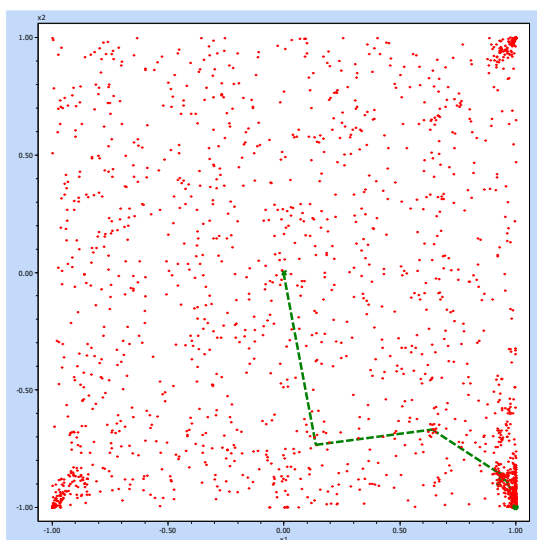
Фиг.5.10. Графично представяне на зависимост $Y_4 = f(X_1, X_2)$
а-в примерни координати; б – в двумерни координати

5.3. Оптимизиране на технологичните параметри

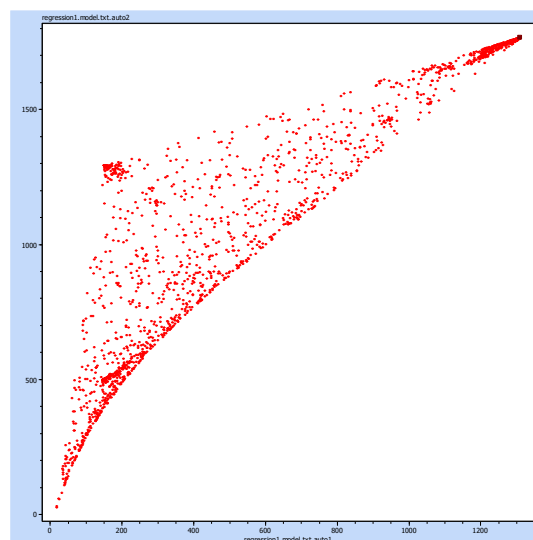
5.3.1. Оптимизиране на процеса маркиране на стъклотекстолитови материали

Оптимизацията на технологичният процес за маркиране на образци от стъклотекстолит е направена на база зададени стойности $Y_{1\max}$ и $Y_{2\max}$.

Оптимизацията е направена чрез недоминиран сортиран генетичен алгоритъм II (NSJA II) и е представена като резултат в Приложение №1.5, а графичната интерпретация е показана на фиг. 5.13.



а.



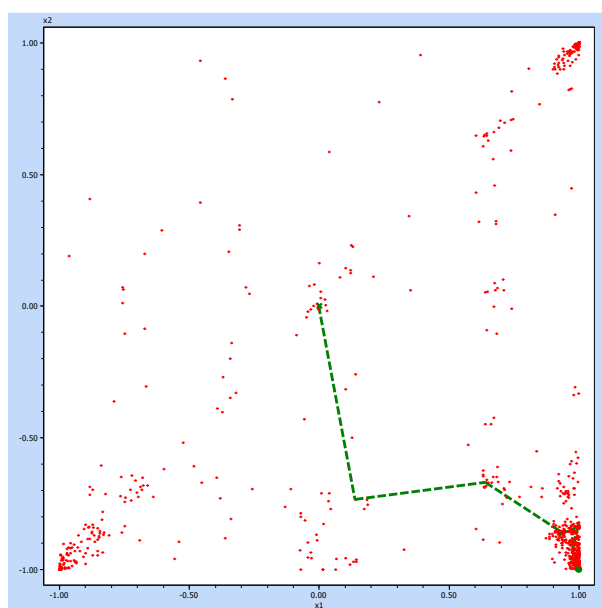
б.

Фиг.5.13. Pareto фронт на максимума на Y_1 и Y_2

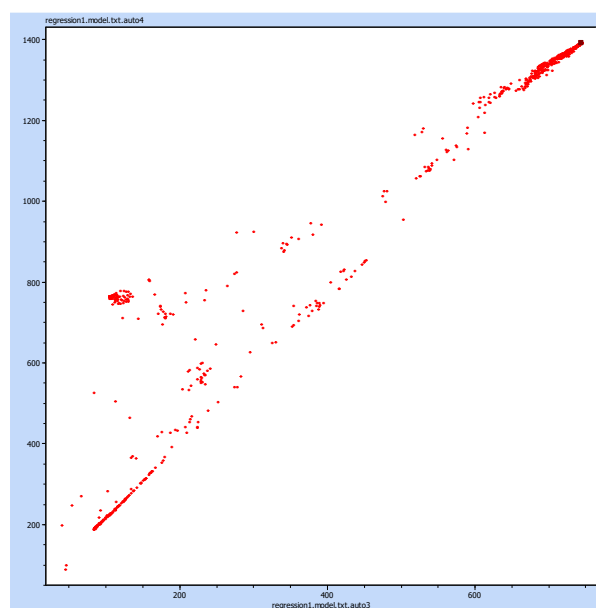
5.3.2. Оптимизиране на процеса маркиране на текстолитови материали

Оптимизацията на технологичният процес за маркиране на образци от текстолит е направена на база зададени стойности $Y_{3\max}$ и $Y_{4\max}$.

Оптимизацията е направена чрез недоминиран сортиран генетичен алгоритъм II (NSJA II) и е представена като резултат в Приложение № 1.6, а графичната интерпретация е показана на фиг. 5.14.



а.



б.

Фиг.5.14. Pareto фронт на максимума на Y_3 и Y_4

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Получените в процеса на изследване резултати позволяват да се формулират приноси в две основни направления – научно-приложни (с оригинален и потвърдителен характер) и приложни.

А. Научно-приложни приноси

А.1. Създаване на нови класификации, методи, конструкции, модели, методики

- Концептуален модел за изработване на лазерна установка, за маркиране на слоесто армирани композити на полимерна основа.
- Математични модели на влиянието на мощността на лъча и скоростта на маркиране върху дълбочината на проникване и широчината на лазерния щрих при лазерно маркиране на текстолит и стъклотекстолит.

А.2. Получаване и доказване на нови факти

- Установени са отговорите на два материала (текстолит и стъклотекстолит) в аспект характеристики на маркировъчния щрих, предизвикани от параметрите на процеса лазерно маркиране.

Б. Приложни приноси

- Работоспособна лазерна установка за маркиране на слоесто армирани композити на полимерна основа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДОКТОРАНТУРАТА

1. **Tsenkulovski, S., I. Mitev, G. Karlovski**, Factors Influencing the Laser Marking of Non-metal Materials, XXXII International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance 2022”, Sozopol, 2022, pp. 54÷58. ISSN 978-1-6654-8569-2/22

2. **Tsenkulovski, S., I. Mitev, G. Karlovski**, Determination of the Penetration Depth of Lazer Marking of Polimeric Materials, XXXII International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance 2022”, Sozopol, 2022, pp. 59÷62. ISSN 978-1-6654-8569-2/22.

3. Mitev, I., **S. Tsenkulovski, G. Karlovski**, Determination of the Penetration Depth of Laser Marking of Glass Fiber Reinforced Polymers, XXXIII International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance 2023”, Sozopol, 2022, pp.34÷38, ISSN 2603-3194.

4. Mitev, I., **S. Tsenkulovski**, Local Processing of Non-Metal Materials with Concentrated Energy Flow, 14th ISPC “Environment Technology Resources”, Rezekne, Latvia, Vol. 3, 15÷16 June, 2023, pp.183÷186, ISSN 1691-5402 print; ISSN 2256-070X online Scopus

5. **Ценкуловски, С., И. Митев**, Елементи на енергийният баланс при лазерно маркиране на слоесто армирани композити с полимерна матрица, „Индустриални технологии“, кн.1, т.11, 2024, с.198÷203, ISSN 1314-9911.

6. Mitev, I., **Tsenkulovski, S.**, Influence of the Technological Parameters of the Laser Marking Process on the Strike Width in Layer Reinforced Composites with a Polymer Matrix, “Industrial technologies”, vol. 11 (1), 2024, p.204÷208, ISSN 1314-9911.

7. **Tsenkulovski, S., I. Mitev**, Influence of the Parameters of the Lasser marking process of the depth of penetration in layer-reinforced composites, 15th ISPC “Environment Technology Resources”, vol. 3, V.Turnovo, Bulgaria, 27 and 28 06.2024, p. 319÷324, ISSN 1691-5402 print; ISSN 2256-070X online Scopus

8. **Tsenkulovski, S.**, Penetration Depth in Laser Marking of Composite Materials with Textile Reinforcement Phase, Journal of Technical University of Gabrovo, vol.70, 2025, ID JTUG-2025-0002

TITLE: PECULIARITIES OF LASER MARKING OF LAYER-REINFORCED COMPOSITES ON A POLYMER BASIS

Author: mag. eng. Simeon Tsankov Tsenkulovski

ABSTRACT: *The lack of systematic information on the laser marking of layered reinforced polymer-based composite materials limits the application of this method in industry. For reliable prediction and optimization of the technological process of laser marking of these materials, it is necessary to scientifically investigate it.*

In this study, based on an in-depth study, a conceptual model of a system for laser marking of layered reinforced composites with a polymer matrix (textolite and glass-textolite) has been formed. Based on the model, a system with a Fiber laser – RFL- P - 502B with an optical lens F-theta lens– SL – 1064-150-2106 has been manufactured.

The interaction of the laser beam with the substance during local processing of non-metallic materials has been examined. The stages of the laser marking process of non-metallic materials have been traced and an energy balance equation has been derived.

Experiments were conducted to determine the influence of the technological parameters of the laser marking process (radiation power and marking speed) on the geometric characteristics of the laser stroke (depth, width and cross-section of the channel) and graphical dependencies were drawn up for the relationship between them.

Based on regression analysis, mathematical models describing the influence of the technological parameters of the process on the geometry of the laser stroke have been compiled and optimization of the process has been performed using the non-dominated sorted genetic algorithm II (NSGA II).

Keywords: *laser marking, layered reinforced composites with polymer matrix, geometric parameters of the laser stroke, mathematical models, optimization*