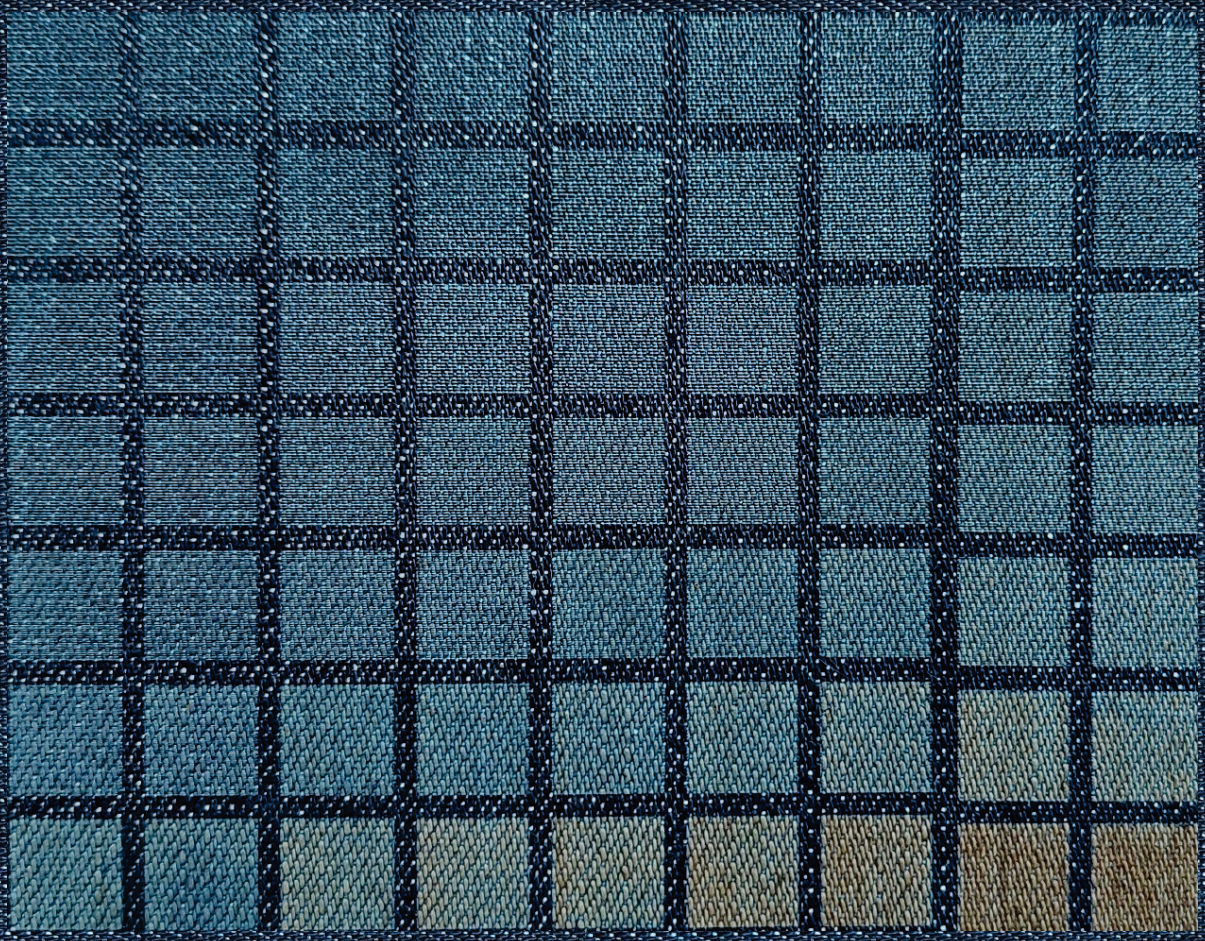
Борислав Цонев Стоянов

ЛАЗЕРНО МАРКИРАНЕ НА ТЕКСТИЛНИ МАТЕРИАЛИ



УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
ГАБРОВО
2023

Борислав Цонев Стоянов

ЛАЗЕРНО МАРКИРАНЕ НА ТЕКСТИЛНИ МАТЕРИАЛИ

УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
"ВАСИЛ АПРИЛОВ"
ГАБРОВО, 2023

В монографията се представят основните технологии за маркиране на текстилни материали и тяхното приложение. В частност е разгледан процеса на лазерно маркиране. Обобщени са групи от фактори, влияещи върху процеса на лазерно маркиране на текстилни материали. Проследена е тенденцията в развитието на световния пазар на текстилни влакна, както и на лазерна техника, въз основа на което е подбран текстилен материал и техника за неговата обработка. Изяснен е физическия модел на процеса лазерно маркиране. Проведено е проучване разкриващо поведението на текстилния материал, след лазерна обработка, в аспект на изменение на здравина на опън по основа и вътък, разтегливост до скъсване по основа и вътък, устойчивост на претриване и коефициент на избелване при изменение на основните фактори мощност и стъпка на лазерното лъчение. За изследваните свойства са изведени регресионни математични модели и са решени задачи за намиране на комплексни оптимални решения на изследваните свойства.

Тази монография е подкрепена от проект BG05M2OP001-1.002-0023 „Център за компетентност „Интелигентни мехатрони, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.

© Борислав Цонев Стоянов – автор, 2023

© Университетско издателство „Васил Априлов“ – Габрово, 2023

ISBN 978-954-683-687-8

Списък на използваните означения

№	Означение	Величина	Димензия
	A	поглъщателна способност (абсорбционна)	-
	A_0	поглъщателна способност на материала при $T_0 = 273{,}15K$	-
	A	константа, зависеща от яркостта на фона	-
	B	константа, зависеща от яркостта на фона	-
	BPP	параметър на качеството на лазерния лъч	$mm.mrad^{-1}$
	C	топлинен капацитет	$J.K^{-1}$
	CAGR	съставен годишен темп на растеж	-
	CO_2	източник на лазерно лъчение на основата на въглероден диоксид	-
	CCD	Charge-Coupled Device - зарядо-свързан прибор /светлочуствителен прибор за цифрови апарати	
	D	пропускаща способност (трансмисионна)	-
	D	Диаметър на лъча, падащ върху оптичната система	mm
	E	енергия на лазерното лъчение	J
	E_A	енергия на погълнатото лъчение	J
	E_D	енергия на пропуснатото лъчение	J
	E_{ef}	ефективна енергия	$J.m^{-2}$
	E_{ch}	енергия на химичните реакции	J
	E_{con}	загуба на енергия от конвекция	J
	E_l	линейна плътност на енергията	$J.m^{-1}$
	E_P	импулсна енергия	J
	E_{PR}	енергия на технологичния процес	J
	E_R	енергия на отразеното лъчение	J
	E_r	енергия на радиационното излъчване	J
	E_ρ	обемна плътност на погълнатата енергия	$J.m^{-3}$
	ΔE_{ab}	цветна разлика	-
	F_O	падащ светлинен поток върху съответната повърхност	J
	F_R	отразена част на светлинния поток	J
	F_R	критерий на Фишер	-
	F_A	погълната част на светлинния поток	J

	F_D	преминала част на светлинния поток през материала	J
	I	интензитет на лъчението	$W.cm^{-2}$
	I_r	интензитет на отразения лъч	$W.cm^{-2}$
	I_0	интензитет на падащото лъчене	$W.cm^{-2}$
	I_p	линейна импулсна плътност	m^{-1}
	L_f	яркост на фона	nt
	L_x	яркост на изображението	nt
	ΔL^*	светлинна разлика на цвета	-
	M^2	качество на лъча	-
	N	брой на повторенията при маркиране	-
	Nd:YAG	лазерен източник на основата на неодимов итрий-алуминиев гранат	-
	P	средна мощност	W
	P_a	средна мощност	W
	P_p	импулсна мощност	kW
	Q	количество топлина	J
	R	отражателна способност	-
	R	брой на повторенията при маркиране	-
	R	коефициент на множествена корелация	-
	S	площ на работното петно	m^2
	T	температура	$°K, (°C)$
	T_m	температура на топене	$°K, (°C)$
	T_v	температура на изпарение	$°K, (°C)$
	T_o	температура на околната среда	$°K, (°C)$
	T_p	температура на нагряване на повърхността	$°K, (°C)$
	V	обем	m^3
	V	скорост на маркиране	$m.s^{-1}$
	W_d	фокусно разстояние	mm
	ΔW_d	дефокусировка	mm
	X_i	фактор на влияние	-
	Y_i	целева функция	-
	a	коефициент на температуропроводност	$m^2.s^{-1}$
	Δa^*	червено/зелена разлика на цвета	-

	b_i, b_{ii}, b_{ij}	коефициенти на математичен модел	-
	Δb^*	жълто/синя разлика на цвета	-
	c	специфичен топлинен капацитет	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
	c	скорост на светлината	$m.s^{-1}$
	d	диаметър на работното лазерно петно	mm
	d_i	коефициенти за изчисляване на математичния модел в зависимост от броят на факторите	-
	d_f	диаметър на минималното работно лазерно петно	mm
	f	честота на повторение на импулсите	s^{-1}
	$f(p)$	функция от вероятността за различаване	-
	k	коефициент на топлопроводност	$W.m^{-1}.K^{-1}$
	k_p	отношение на гъстина на тъкани	-
	k_{nn}	коефициент на припокриване	%
	k^*	контраст, Weber-контраст	%
	$k^*_{\text{пр}}$	прагов контраст	%
	k'	екстинкция (загасване на веществото)	-
	l_d	дължина на топлинната дифузия	m
	m	маса	kg
	n	показател на пречупване	-
	n'	константа, зависеща от материала и лазерното лъчение	-
	p	налягане	$N.m^{-2}$
	p	вероятност за различаване	-
	q_S	плътност на мощността	$W.m^{-2}$
	$q_{S,\text{кр},m}$	критична плътност на мощността на топене	$W.m^{-2}$
	$q_{S,\text{кр},v}$	критична плътност на мощността на изпарение	$W.m^{-2}$
	r_f	радиус на минималното работно лазерно петно	mm
	t_d	време за топлинната дифузия	s
	t_{vd}	време за въздействие в зоната на обработка	s
	t_R	коефициент на Стюдент	-
	v	скорост на обработка	$m.s^{-1}$
	Δx	стъпка/отместване на лазерния лъч	m
	z_R	дължина на Рейли	m

	α	коефициент на поглъщане (абсорбция)	m^{-1}
	α	ъгъл на наклона на стъпката/отместването	deg
	α	ъглов размер на обекта в ъглови минути	$''$
	β	коефициент на пропускане	-
	δ	дълбочина на проникване	m
	η	коефициент на полезно действие на процеса	-
	θ	ъгъл на разходимост	rad
	λ	дължина на вълната на лазерното лъчение	$\mu m, nm$
	ξ_{ef}	коефициент на ефективност на процеса	-
	$\xi_{mrk,ef}$	коефициент на ефективност на маркиране	-
	ρ	коефициент на отражение	-
	ρ	плътност	$kg.m^{-3}$
	σ	електрическа проводимост	-
	τ_p	продължителност на импулсите	ns
	υ	честота на повторение на импулсите	kHz
	ЕЕО	електроерозийна обработка	-
	ЕИО	електроимпулсна обработка	-
	ЕЛО	електроннолъчева обработка	-
	К	комплексно влияещи фактори	-
	Л	лазерен източник	-
	ЛПЕ	линейна плътност на енергията	-
	ЛИП	линейна импулсна плътност	-
	М	материал	-
	МАО	магнитоабразивна обработка	-
	МИО	магнитоимпулсна обработка	-
	МИУ	магнитоимпулсно уякчаване	-
	МИФ	магнитоимпулсно формообразуване	-
	НТИ	нетъкани текстилни материали	-
	Пл	плетива	-
	ПлО	плазмена обработка	-
	$P_{\text{в}}$	вътъчна гъстина	$\text{бр}/10cm$
	$P_{\text{о}}$	основна гъстина	$\text{бр}/10cm$

	$P_{\text{р}}$	гъстина на редовете	$\text{бр}/10cm$
	$P_{\text{ст}}$	гъстина на стълбовете	$\text{бр}/10cm$
	СЛО	светлиннолъчева обработка	-
	Т	технологичен процес	-
	Тк	тъкани	-
	ТПМ	текстилни площни изделия	-
	УЗО	ултразвукова обработка	-

Въведение

Лазерната обработка на текстил е съвременен и перспективен метод. Тя заема мястото си като надеждна и ефективна алтернатива на традиционните методи за обработване на всички видове текстилни материали. Прилага се най-често при нанасяне на изображение, текст, лого или код директно върху повърхността. Лазерния лъч предизвиква структурна или фазова промяна в обработвания материал. Тя може да включва един или комбинация от следните физични процеси: карбонизация, избелване, депигментация, модификация на покритието, топене, изпаряване и др.

Прилагането на метода в текстилната индустрия устойчиво нараства заради постигането на високи скорости на обработка, точност и гъвкавост. В редица задачи за финишна обработка дори се е превърнал в незаменимо решение. Лазерното маркиране например има редица предимства пред традиционните техники поради това, че процеса на маркиране с лазер е по-гъвкав, автоматизиран и лесно се интегрира в различни производствени технологии. Въпреки това в практиката често се работи чрез налучкване на принципа „проба-грешка-корекция“. За да се предотврати прогарянето на целия слой материя, се практикува тестване върху различни мостри, докато се установят точните настройки. Необходими са няколкократни проби, за да се избере правилната мощност и скорост. Огромното разнообразие на текстилни материали, 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 текстилни материали, естествени или химични, 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. Стандартите и изискванията към индустриалните маркировки могат да се отнесат и към изделията от памук, които са предмет на изучаване в монографичния труд, поради значителната им употреба в текстилната промишленост. Според изследване на световното потребление на влакна, памучните влакна са най-широко използваните от естествените влакна.

Общите предимства на различните видове техники за лазерно маркиране са: много добро качество на маркиране, висока ефективност, ниски операционни разходи, безконтактен метод, системно контролиран с висока прецизност и възпроизводимост, както за големи серии така и за единични бройки при запазване на висока производителност.

Областите на приложение на лазерното маркиране се разширяват непрестанно поради неговата икономичност, относително слабо и

контролирано влияние върху функционалните характеристики на обработвания продукт. Лазерното маркиране превъзхожда значително традиционните методи за маркиране на текстил, които изискват значително количество енергия, вода и други консумативи. Множество проучвания по темата доказват екологичното влияние на процеса върху околната среда.

Изследването на процеса лазерно маркиране на текстилни материали, 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 текстилната индустрия.

1 Маркиране на текстилни материали – състояние на проблема

1.1 Електрофизични технологии за обработка на материали

Икономическия растеж изисква непрекъснато обновяване и усъвършенстване на технологиите за обработка на материали. Класическите технологии в някои случаи не удовлетворяват съвременните изисквания и това налага да се разработват принципно нови и технически прогресивни технологии, наречени неконвенционални [Кузманов, Т. (2004, 2009)]. С тях се цели постигане на по-висока икономическа ефективност и по-добро качество. Когато като основна преобразуваща енергия в зоната на обработка се прилага електрофизична енергия (оптична, електрическа, електромагнитна и др.), неконвенционалната технология се нарича електрофизична. Електрофизичните, наред с електрохимичните технологии (основани на химичното въздействие на електрическия ток) формират една по-голяма група, наречена електротехнологии. В редица обработки се прилага едновременно въздействие на различни видове енергии (електрическа, електрохимическа, механична и др.) и те могат да се обединят в групата на комбинираните технологии – фиг.1.1.

Фиг. 1.1. Класификация на неконвенционалните технологии

Според вида на въздействието електрофизичните технологии са с топлинно и с механично действие - фиг.1.2.

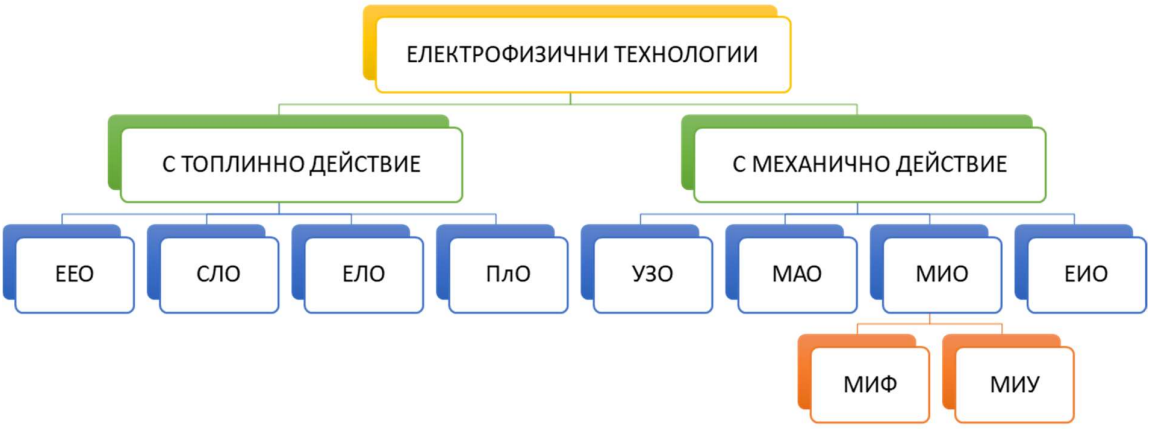
Към обработките с топлинно въздействие се отнасят следните технологии:

- електроерозионна обработка (ЕЕО);
- светлиннолъчева обработка (СЛО);
- електроннолъчева обработка (ЕЛО);
- плазмена обработка (ПлО) и др.

С механично въздействие са технологични процеси като:

- ултразвукова обработка (УЗО);

- магнитоабразивна обработка (МАО);
- магнитоимпулсна обработка (МИО)
  - магнитоимпулсно формообразуване (МИФ);
  - магнитоимпулсно уякчаване (МИУ);
- електроимпулсна обработка (ЕИО) и др.



Фиг. 1.2. Класификация на съвременните електрофизични технологии

Неконвенционалните методи с топлинно действие (ЕЕО, СЛО, ЕЛО, ПлО) се характеризират със значително повишаване на температурата в обработваната зона и последващо изпарение на материал. При ЕЕО, под действието на импулси на електрически ток, се отделя, чрез изпарение на микропорции, материал от заготовката на обработваните повърхнини на детайла. Формообразуването на повърхнините по този метод се реализира на електроерозийни машини чрез копирна, обхождаща или контурна схема в зависимост от вида на инструмента - електрод. ЕЛО се базира на управлението на електронен поток с много висока плътност и трансформиране на енергията от кинетична в топлинна при достигане на материала, в резултат на което той се разтопява и изпарява. Етапите за реализиране на тази обработка са следните:

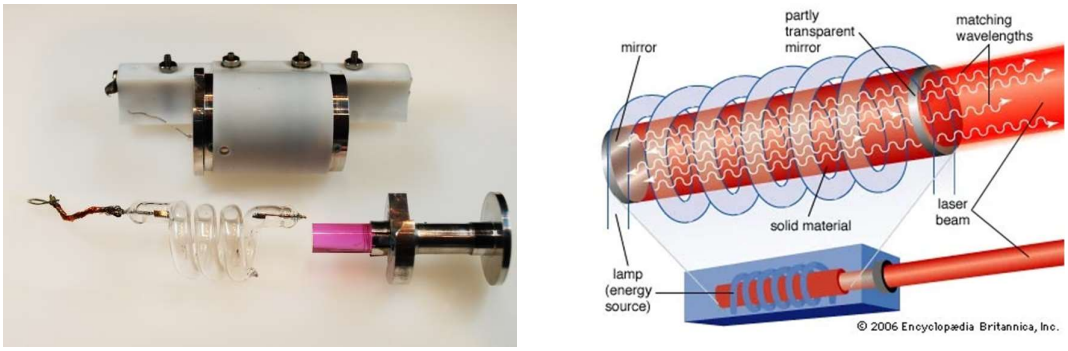
- генериране на свободни електрони;
- ускоряване на електроните;
- фокусиране и насочването им към обработваната зона.

ПлО е термично въздействие, при което материалът се загрява до разтопяване и последващо отделяне на част от него. Такива обработки са газопламъчното рязане, плазмено-лъчевото обработване, плазмено рязане, плазмено наваряване и др. [Кузманов, Т. (2004)]. СЛО се осъществява чрез насочен, кохерентен, монохроматичен светлинен лъч с много висока плътност на енергията - лазер. Концентрирането на светлинния лъч в малка

площ от обработваната повърхност и достигането на много високи температурни стойности предизвиква нагряване, разтопяване и изпаряване на материала. Този метод намира все по-широко приложение за обработка на материали с разнообразни физико-механични свойства, като: маркиране, гравиране, заваряване, рязане и други. Процесът лазерно маркиране има редица предимства пред останалите методи за маркиране. Нанесената върху материалите и изделията информация като буквено-цифрова, графична или кодирана (бар-кодове, 2D-матрични кодове) е много подходяща за автоматизирано четене с електронни устройства и за проследяване на маркирания продукт по време на производствения процес и по цялата търговска верига [Schuöcker, D. (1998)].

1.2 Светлиннолъчева (лазерна) обработка

Началото на квантовата електроника е поставено преди почти 70 години (1954г.) с получаването на стимулирано излъчване на електромагнитни трептения със свръхвисока честота (в микровълновата област на електромагнитния спектър), наречено от руските учени Н. Басов и А. Прохоров „молекулен генератор“, а от американските физици Ч. Таунс, Дж. Гордън и Х. Цайгер, - „МАЗЕР“ (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation - усилване на микровълни с помощта на стимулирано излъчване). За това свое откритие те получават Нобелова награда през 1964г. [Лилков, В. (2011)]. Шест години по-късно (1960г.) се поставя началото и на лазерната епоха от Т. Мейман (Theodore H. Maiman) с получената от него червена флуоресценция на рубинов кристал след осветяването му със зелена светлина в оптичната област на електромагнитния спектър. Той разработва уред, чийто принцип на действие е бил еднакъв с принципа на действие на мазера, поради което го нарекъл „ЛАЗЕР“ (от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - усилване на светлина с помощта на стимулирано излъчване), - фиг.1.3. [Замфиров, М. и др. (2001); Lazov, L. et al. (2010); Steen, M. et al. (2010)]. Скоро след изобретяването на рубиновия лазер, той привлича вниманието на много учени от цял свят след което са създадени десетки други видове лазери.



а) *б)*

Фиг.1.3. Първият в света рубинов лазер на Т.Мейман

а) принципна схема ; б) [Lasers of the 60's. (2010); Encyclopedia Britannica (2006)].

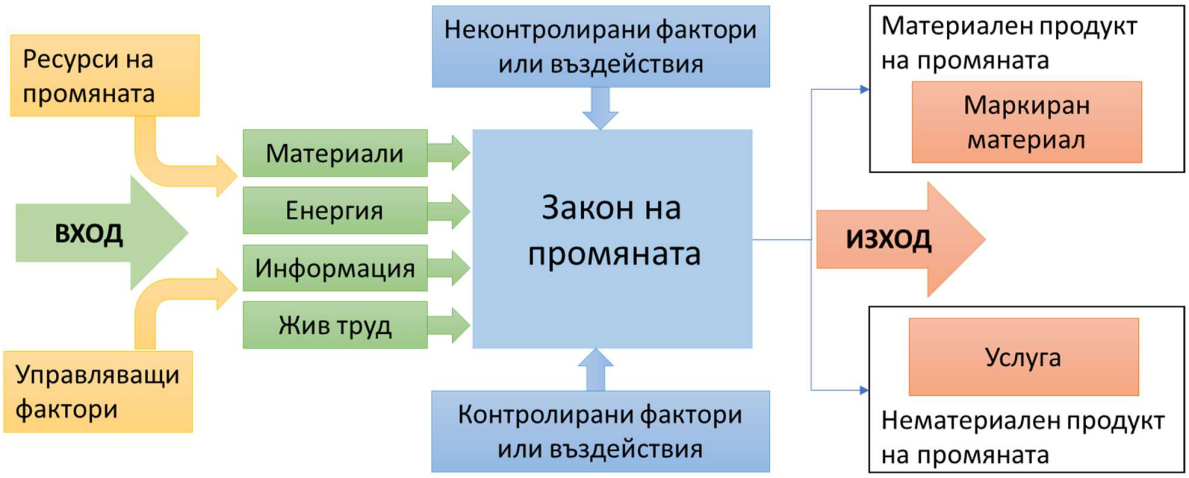
От създаването на лазера, едно от най-големите технически постижения на човечеството, списъкът с приложенията му се увеличава всеки ден. Лазерите се използват като носители на информация и като инструменти за физически изследвания и обработки, предлагайки иновативни решения. Прегледът на научната литература показва един огромен спектър от приложения на лазера в съвременния живот: наука, изкуство, образование, промишленост, медицина, военно дело, селско стопанство, археология, комуникации, опазване на околната среда, машиностроене, автомобилостроене, самолетостроене, корабостроене, космически технологии, текстилна промишленост за различни видове обработки, измервания на линейни и ъглови величини, контрол и диагностика на готови стоки, трансфер на информация и др.

Лазерът е оптичен квантов генератор на монохроматична, кохерентна светлина с много голяма интензивност и насоченост. Той излъчва тънък, добре насочен сноп с постоянна дължина на вълната, постоянна фаза и голяма яркост.

Принципът на действие на лазера е комбинация между квантово-механични и термодинамични процеси [Динев, Ст. (1993); Вейко, В. (2007); Замфиров, М. (2011); Лилков, В. (2011)]. Източниците на електромагнитно (лазерно) лъчение се наричат лазери. Съществува огромно разнообразие от лазери, но всеки от тях има три основни елемента: активна среда, източник на енергия и резонатор. Активната среда съдържа веществото (твърдо, течно, газообразно, полупроводник), чиито атоми излъчват под въздействие на външен източник на енергия индуцирано (принудено, стимулирано) електромагнитна енергия (фотони) при преминаването им от по-високо към по-ниско енергетично ниво. Източникът на енергия е външно електромагнитно поле (например падаща върху тях светлина), което

въздействия на активната среда и предизвиква квантовите преходи на електроните. Резонаторът се състои от две огледала, поставени в двата края на активната среда. Едното огледало е с коефициент на отражение $p = 100\%$, а другото е полупропускливо, с по-малък коефициент на отражение. Възникналото лъчение от активната среда под действието на източника на енергия, достигайки до едното огледало, се отразява и преминава отново през средата, при което нови атоми излъчват и го усилват. Този процес се повтаря многократно, докато лъчението достигне необходимия интензитет и се изведе през полупрозрачното огледало.

Лазерната обработка на материали се базира на получаването на много високи температури, които могат да стопят или изпарят практически всеки материал, благодарение на голямата концентрация на мощност и енергия в много малък участък съответно за лазери, работещи в непрекъснат режим и в импулсен режим. Технологията на маркиране на различни материали с лазерен лъч е неконвенционална технология [Кузманов, Т и др. (2004), (2009)]. Тя представлява процес с определена последователност на етапите, при който на входа се намира необработеният материал, а на изхода се получава обработеният материал, който в общия случай е променените материал, съдържащ буквено-цифрова или графична информация - фиг.1.4.

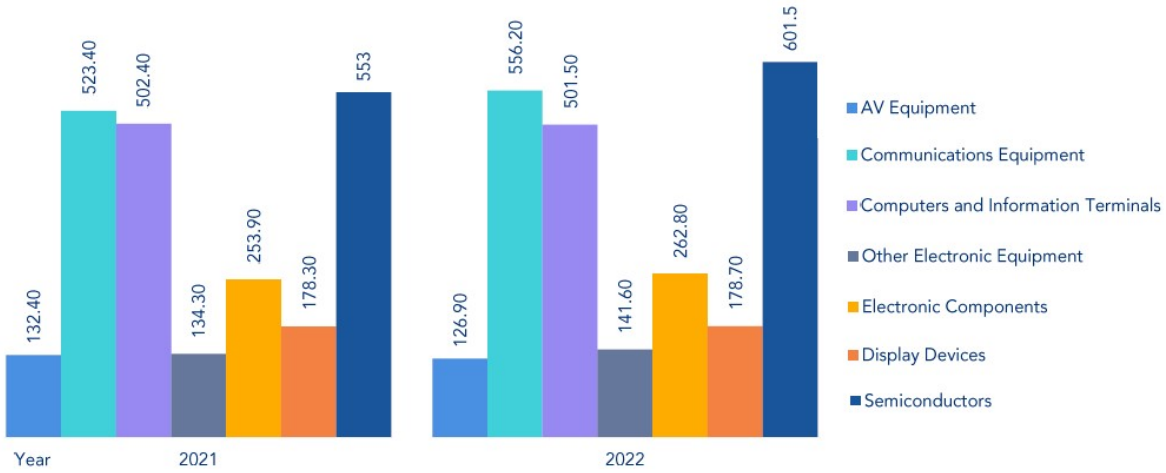


Фиг. 1.4. Технологията на лазерното маркиране като кибернетична система, [Кузманов, Т и др. (2009)].

1.3 Световно потребление на лазерни технологии – тенденции

Лазерните технологии са почти във всяка сфера на живота, като едно от най-широките им приложения е за обработка на материали чрез: рязане,

заваряване, маркиране, гравиране, пробиване на отвори и други [https://world-of-photonics.com/en/newsroom/laser-wop-talk/no-3/ Photons in Production—From Science to Industrial Application, LASER WoP Talk No. 3 on March 9, 2022; https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/lasers-market, Lasers Market - Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2023-2028); www.laserphotonics.com Laser Engraving and Marking Machines] – фиг.1.5.

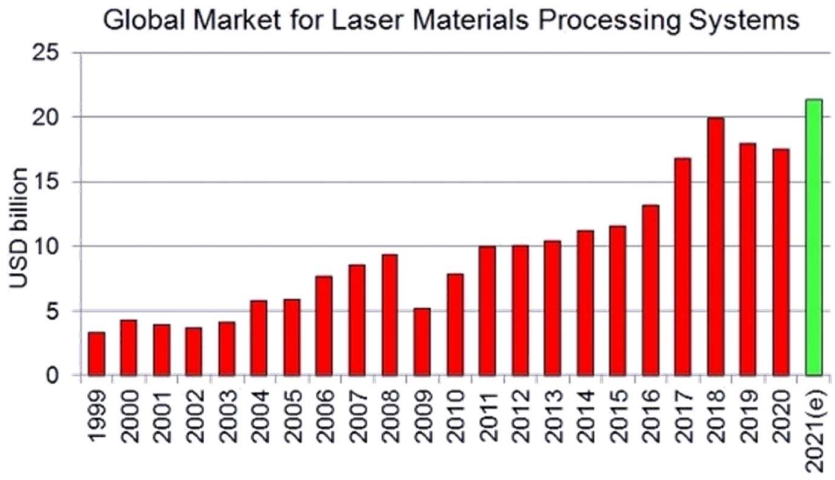


Фиг. 1.5. Сфери на приложения на лазерни технологии и инвестиции, млрд. USD

[https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/lasers-market

Lasers Market - Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2023-2028)]

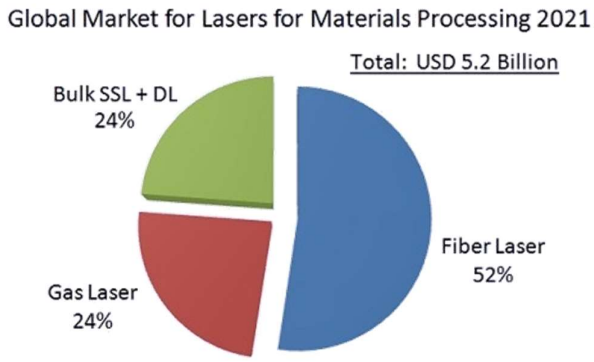
Световния пазар на промишлени лазерни системи отбелязва силен растеж за 2021г., въпреки пандемичния ефект от предходните 2019-2020г. – фиг.1.5. Изброените сектори включват аудио-визуално оборудване, комуникационно оборудване, компютърна техника, друго оборудване /включва обработки на текстилни материали/, електронни компоненти, дисплеи и полупроводници. Предварителни данни, базирани на първите три тримесечия, показват, че пазара на лазерни технологии достига нов рекорден връх от 21,3 млрд. USD, което е с 22% повече спрямо 2020г. – фиг.1.6. Пазарът на индустриални лазерни източници също достигна нов рекорден обем от 5,2 млрд. USD през 2021 г. Тези констатации, са получени от фирмата за пазарни проучвания Optech Consulting [https://www.lasersystemseurope.com/news/global-laser-systems-market-shows-strong-growth-2021] – фиг.1.7.



Фиг. 1.6. Световен пазар за лазерни системи за обработка на материали, млрд. USD

[https://www.lasersystemseurope.com/news/global-laser-systems-market-shows-strong-growth-2021]

Този растеж е движен главно от основните крайни индустрии на обработка на лазерни материали, включително микроелектроника, автомобилостроене и обща обработка за разкрояване на листов материал. Въпреки че изброените приложения съществуват от десетилетия, включените технологии продължават да растат и да се развиват.“



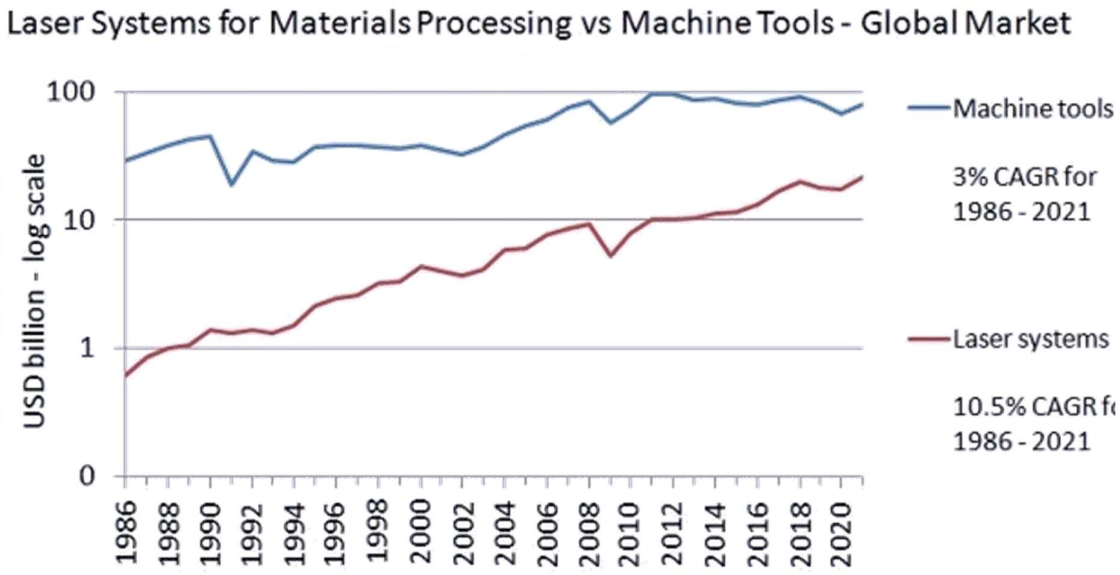
Фиг. 1.7. Относителен дял на типовете лазерни системи.

Относителния дял на лазерите според техния вид – файбър, диоден, CO_2, твърдотелен и др. Очевидно е превъзходството в употребата на файбър лазерите пред останалите видове с относителен дял от 52%, повече от два пъти спрямо всеки от тях. В случая диодните и твърдотелните са обединени в една обща графична част.

В бъдещия растеж в сегмента се очертават две основни крайни индустрии за индустриални лазери, а именно електрониката и автомобилната индустрия. В миналото новите разработки в тези сектори са били от решаващо значение за нови и разширени лазерни приложения, като например за електромобилност, ръчни електронни устройства и техните

компоненти. Очакванията са това да продължи, както и да се появят напълно нови лазерни приложения.

По отношение на развитието на пазара на лазерни системи – фиг.1.8, се наблюдава тенденцията от среден годишен темп от 9% през последните 15 години, при което тази тенденция на растеж не показва насищане.

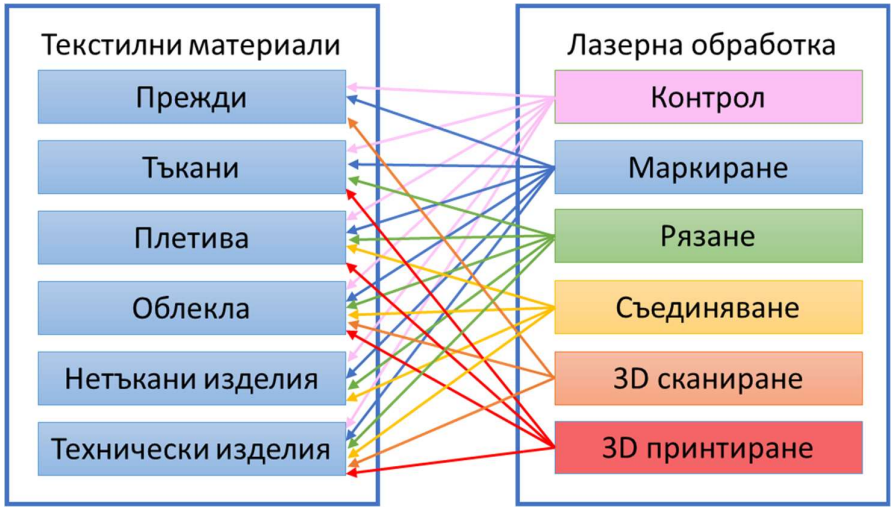


Фиг. 1.8. Световен пазар за лазерни системи сравнен с машинни инструменти, млрд. USD

1.4 Приложение на лазерните технологии в текстилната индустрия

Съществуващите лазерни източници се предлагат в много широк диапазон на мощност и все по-често се използват в текстилната индустрия за контрол, рязане (кроене), маркиране, гравиране, съединяване, 3D сканиране и други - фиг. 1.9 [Lasers for Materials Processing, 2014].

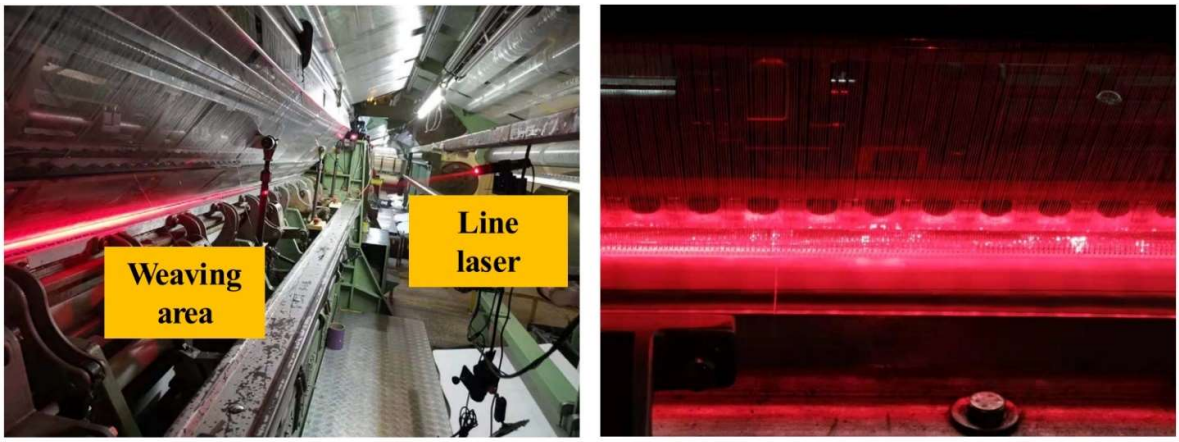
Замяната на традиционните трудоемки операции с лазерни технологии предлага нови възможности за иновативни решения и е ключов въпрос за икономически успех на текстилната индустрия в бъдеще.



Фиг. 1.9. Лазерни приложения за различни текстилни изделия

1.4.1 Контрол

Откриване на дефекти и скъсани нишки, при производство на прежди и площни изделия се предлага от [Musa E., (2009), (2011); Yan, N. et al. (2021)]. Според тях, най-ефективен контрол е директното откриване на скъсана нишка в мястото на изпридане, плетене или тъкане – фиг.1.10. Метода се състои в получаване на отразена лазерна светлина от всяка нишка, засичана от камера със супер разделителна способност. Метода може да се приложи за единични или множество нишки едновременно.

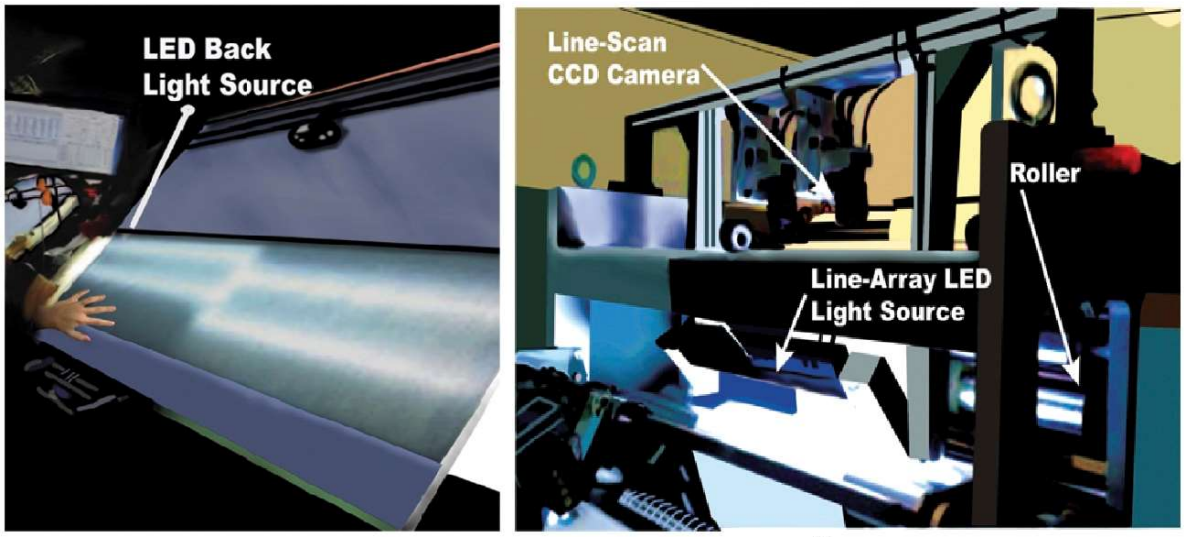


Фиг. 1.10. Преждите при тъкане се облъчват с лазер (а), заснето изображение от камера с висока резолюция (б), [Yan, N. et al. (2021)]

Откриването на дефекти в тъкани може да се извърши с морфологична обработка на изображение, базирано на лазер [Nayak, R., Padhye, R. (2016);

Mallik-Goswami, B., Datta K., (2000); Ribolzi et al. (1993); Mursalin et al. (2005); Rasheed, A et al. (2020)]. Базираният на лазер оптичен анализ на Фурие може да се използва за откриване на дефекти в тъканта, тъй като структурния модел се повтаря на редовни интервали. Тъканта се фокусира с лазер след което се наслагват дифракционни решетки, получени от периодичността на основни /надлъжни/ и вътъчни /напречни/ нишки в тъканта. Използва се леща на Фурие за създаване на дифракционна картина на тъканта. Втора леща на Фурие със същото фокусно разстояние увеличава и инвертира изображение на пробната тъкан. CCD камера заснема и прехвърля на компютър изображението на пробната тъкан – фиг.1.11.

Компютърно приложение сравнява получените изображения със съхранения модел чрез преобразуване на изображението в двоичен код. Извежда се сигнал за дефект, когато измереният параметър се отклонява от стандарта. Степента на дефектност зависи от степента на отклонение от стандарта.



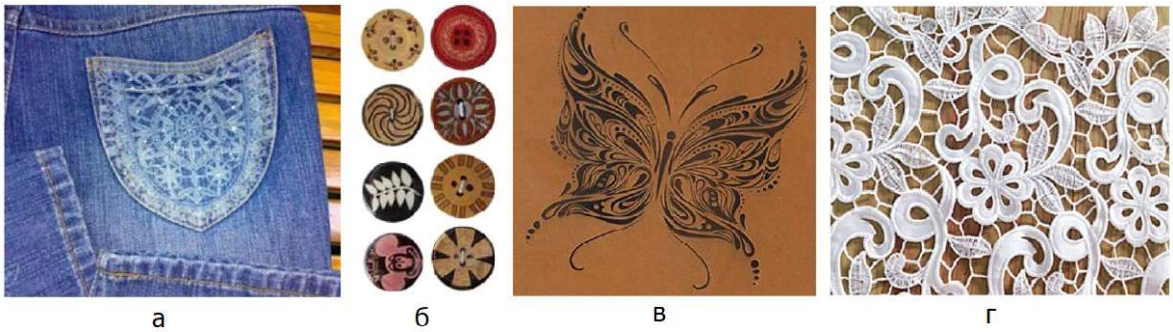
Фиг. 1.11. Контрол на дефектността на плат: а – просветна маса; б – лазерно измерване комбинирано със CCD камера, [Rasheed, A et al. (2020)]

1.4.2 Маркиране (гравиране)

Лазерното маркиране (гравиране) се прилага върху различни материали: дървени, метални изделия, естествена кожа, текстил и др. [Стоянов, Б., и др. (2016); Lazov, L., et al. (2015); www.laserphotonics.com]. Текстилните

обработки се осъществяват на модерни лазерни системи върху плат, готови дрехи, емблеми, етикети и други. Продуктите са актуални и модерни, което ги прави търсени на пазара. Текстилните платове най-често са с малка дебелина от 0,1 до 5,0 mm [Кеворкян, А., (1977); Стоянов, Б., (2008)]. За тях по-подходящо е да се прилага лазерно маркиране. Гравирането се препоръчва за материали с дебелина по-голяма от 2,5 mm. От текстилните материали такива са 3D плетените, тъкани и нетъкани платове, както и текстилните композити.

При лазерното гравиране лазерът се използва за маркиране или гравиране на обект. Процесът е много сложен и често се използват компютъризирани системи за задвижване на лазерната глава [Kan et al. (2010); Juciene et al. (2013)]. Въпреки сложността, много прецизни и чисти гравюри могат да бъдат получени с висока скорост на производство. Техниката не включва физически контакт с повърхността за гравиране, следователно няма износване. Марките, получени чрез лазерно гравиране, са чисти, отчетливи и постоянни. В допълнение, лазерите са по-бързи от другите конвенционални методи, използвани за отпечатване на продукти, което осигурява по-голяма гъвкавост при избора на материал.



Фиг.1.12 Мостри от лазерно гравиране: а – плат Деним; б – копчета; в – кожа; г – бродерия [Nayak, R., Padhye, R. (2016)].

Лазерното гравиране се използва за гравиране на печатни сита, за издълбаване, за създаване на шарени копчета, за гравиране на кожа, Деним и др. Картини, шарки на цветя и дори персонализирани подписи могат да бъдат гравирани върху кожени обувки, кожена чанта, портфейл, кожен колан, кожен диван и кожени дрехи, което значително увеличава добавената стойност на продуктите – фиг.1.12. Освен това лазерното гравиране се използва за създаване на бродиран модел в тъканта чрез избледняване на цвета и изгаряне на тъканите.

Гравирането на Деним е друго бързо развиващо се приложение на лазера [Juciene et al. (2013); Kan (2014a); Ortiz-Morales et al. (2003); Tarhan and Sarıışık (2009)]. Лазерът се използва за създаване на миниатюрни дизайни и шарки върху дънкови платове, както и завършени дънкови платове. Тази техника може да се използва вместо традиционните техники като пясъкоструене и измиване с киселина. Методът на избелване на повърхността на плат Деним чрез химични обработки причинява замърсяване на околната среда, докато лазерното избелване е екологично чист процес [Esteves, F. et al. (2007); Ferrero F. et al. (2002); Kyttänen, J., (2012)]. Лазерната технология става все по-популярна и се прилага като заместител на традиционните финишни процеси в текстилната промишленост [Štepánková, M., et al. (2010)]. Тази технология намалява консумацията на вода с 80% и премахва токсичните химикали, използвани за третиране на Деним платовете по традиционните методи. Чрез нея се намаляват разходите за потребление на енергия при три пъти по-висока производителност спрямо конвенционалните методи - до 160 чифта дънки за час [Textile World Magazine, (2016)].

Фиг.1.13 Лазерно маркиране на Деним [Nayak, R., Padhye, R. (2016)]

Чрез контролируемите лазерни параметри, като количеството енергия, прилагана върху детайла, се променя повърхността по зададен модел, което се отразява на външния му вид без нежелателно увреждане на материала. Точността и гъвкавостта на дизайна са много широки, което не може да се постигне с традиционните методи. Лазерите могат да създават 3D ефекти чрез техники като бродиране, щамповане или дори видими порязвания, разкъсвания и поправки. Всяко изображение, което е създадено в компютърно проектиран дизайн (CAD), може да бъде прехвърлено върху Деним чрез подходящ лазерен процес. При използване на лазери характеристики като добро качество на режима, висока стабилност на мощността, контрол в реално време на мощността на лазера и бързо време на нарастване на импулса са важните параметри, които могат да доведат до промяна на цвета без овъгляване или други повреди на тъканта. Такива щети

могат да намалят живота на продукта и са неприемливи от естетична гледна точка.

Предимствата на лазерното гравиране пред традиционните методи включват:

- висока работна скорост без механичен контакт;
- без износване на компоненти;
- намален отпадък;
- възможни са точни контури.

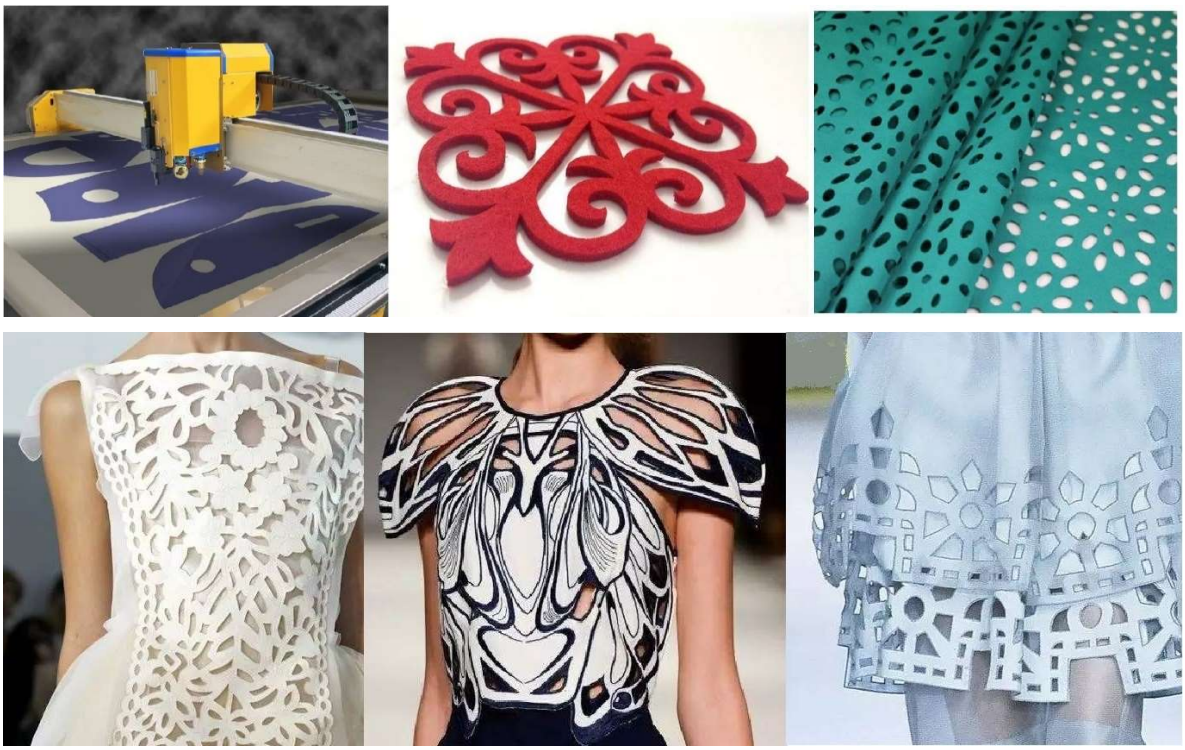
За извършване на процеса в търговската мрежа се използват основно два вида лазери: твърди (дължина на вълната 1064 nm) и газови (дължина на вълната 10,64 μm).

1.4.3 Рязане (кроене)

Първото индустриално приложение на CO_2 лазерите е било прорязването на шперплатовите основи на щанците в опаковъчната индустрия [www.embroiderymarket.com]. От това ранно приложение през 1972г., тази технология се е развила извънредно много и сега лазерите се използват с голям икономически и технически успех за рязане на почти всички материали. Кроенето (рязането) на тъкани с лазер се превръща в изключително популярна техника и се налага много успешно през последните години в текстилната индустрия [www.30WattsCO2.com; www.laserphotonics.com]. Бързо и лесно се режат различни платове като лен, памук, коприна, филц, кожа, както и Kevlar® или друг технически текстил. Изрязването на тъканта по зададения контур е с висока прецизност, като краищата се обгарят, предотвратявайки разнищване на ръбовете – фиг.1.14.

Най-важните предимства на лазерната технология, сравнена с конвенционалните способи за разкрой чрез механично рязане с нож или чрез щанцоване, са:

- качеството на среза е по-добро, ръбовете са гладки и без разкъсвания;
- във функция на времето качеството се запазва константно;
- възможно е реализирането на фини контури с произволен радиус;
- позволява запечатване на ръбовете (синтетични и естествени тъкани);
- висока гъвкавост и индивидуалност;
- няма разтягане на материала (безконтактен метод);
- инструментът не се износва;
- няма складови разходи за инструмента;
- висока работна скорост.



Фиг.1.14 Лазерно рязане (разкрояване) на текстилни материали [www.goldenlaser.cc]

Ограничение на лазерното рязане е броят слоеве на тъканта, които могат да бъдат срязани от лъча. Най-добър резултат се получава при рязане на един или няколко слоя, но точността и прецизността не се постигат при няколко слоя едновременно. Освен това има шанс отрязаните ръбове да се залепят, особено при работа със синтетика. Тъй като в съоръженията за производство на облекло се набляга на многослойното рязане, лазерното рязане изглежда малко вероятно да стане широко разпространено. Въпреки това, той се използва успешно при рязане на голямо-габаритни детайли, напр. платна, където еднослойното рязане е норма.

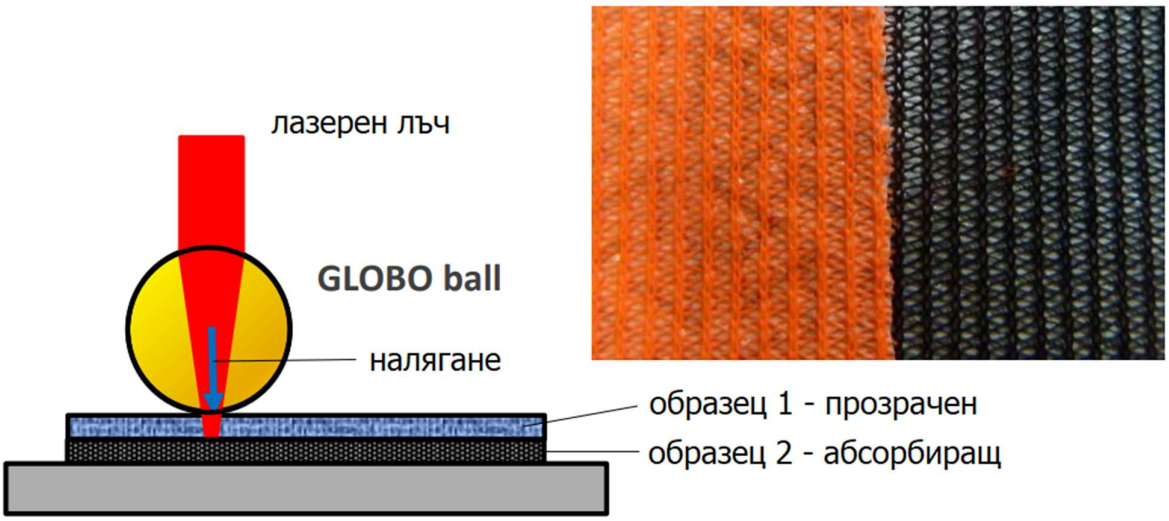
1.4.4 Съединяване (заваряване)

Създаването на облекла и изделия със специални свойства и предназначение (например надуваеми възглавници за автомобили) променя и изискванията към свързването на отделните им детайли – фиг.1.15. Характеристиките на съединителните шевове се променят и традиционното зашиване вече не е достатъчно [Matthews, J., (2011)]. Изследванията за запояване с лазер на текстилни материали и разработването на съответните

машини започва през 1990г. Водещи институти работят върху тази нова технология [Prabir, J., (2011)].

Фиг.1.15 Лазерно заваряване на текстилни материали

Процедурата на лазерно заваряване за текстил въз основа на Clearweld® метод на предаване на лазерно заваряване, използва специални материали, за да се абсорбира инфрачервената радиация – фиг.1.16. Ако се образуват сажди, те добавят цвят в свръзката и това силно ограничава използването на лазерното заваряване. За да се заваряват тъкани, радиацията от NIR (Near Infra Red) лазера, предавана от термопластичните влакна в естественото им състояние, трябва да се абсорбира в мястото на свързване. За текстилно приложение, където външният вид е много важен и трябва да се извърши без добавянето на нежелан цвят на заварките, се използва Clearweld® метод, който е патентован през 1998г. [Jones, et al, (2007)].



Фиг.1.16 Лазерно съединяване на текстилни материали

Някои от предимствата на лазерното заваряване са:

- заваряване на всички термопластични текстилни материали;
- здравината на заварения шев може да достигне здравината на основния материал;
- получаване на естетичен шев;
- дава възможност съединяването (шиенето) и запечатването да се реализират едновременно;
- автоматизиране и пълен контрол на процеса.

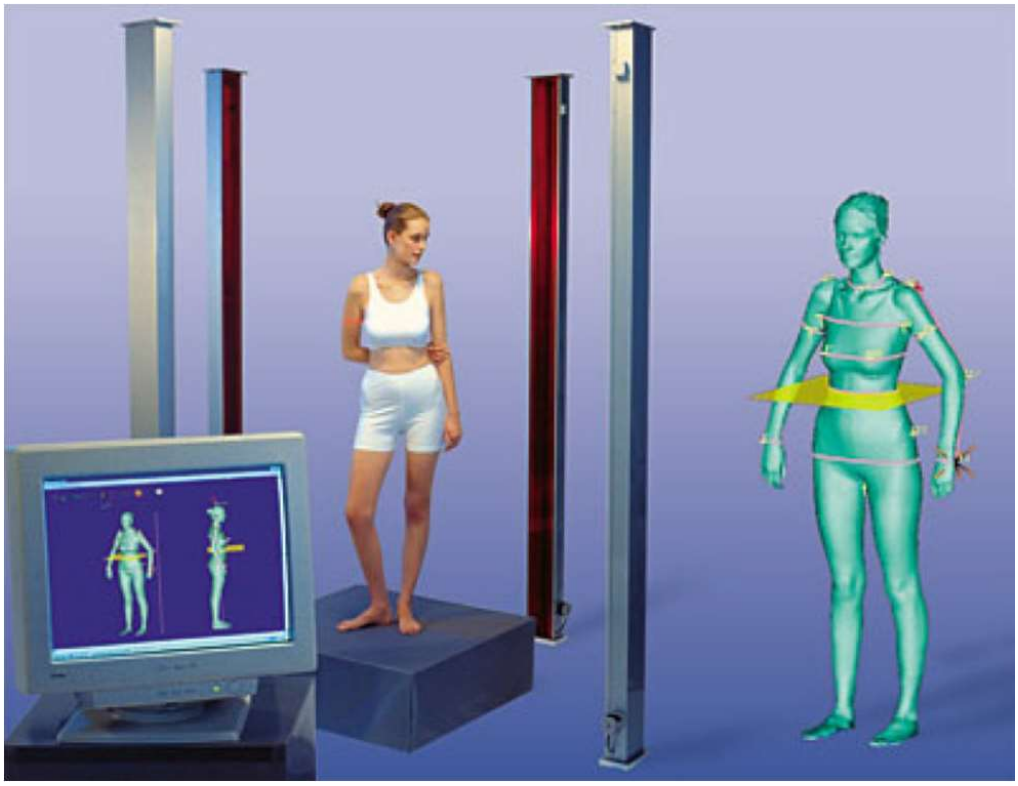
1.4.5 3D сканиране

Технологията на триизмерното (3D) лазерно сканиране може да бъде използвана в различни области като: ергономия, инженерство, био-медицина и облекло. Антропометрията или изучаването и измерването на човешкото тяло започва през 1870г., когато са мерили обикновения човек, за да се осигури по-добро прилягане на униформите на войниците от армията на Наполеон. Създаването на 3D лазерните скенери, чиято основна функция е да се измерва повърхността на триизмерни обекти, позволява получаването на точни данни за човешкото тялото за секунди. Лазерното сканиране решава много проблеми, позволява повече гъвкавост в прототипи и промяна на съществуващите продукти и процеси, като по този начин разширява възможностите за иновативни решения. Тъй като ролята на дигиталните инструменти в процеса на проектиране провокира нови начини на мислене и също така насърчава нови подходи към дизайна, 3D сканирането проправя пътя за персонализиране в редица приложения [Lerch, T., (2007)].

Терминът масово персонализиране започва да се използва, когато се получават облекла по поръчка в зависимост от размерите на тялото и избора на индивида. Първото нещо за масово персонализиране на дрехите е получаване на точни измервания на тялото на индивида [Nayak R., et al. (2015a)]. Технологията за лазерно сканиране използва един или няколко лазера с форма на тънки ивици за измерване на размера на тялото. Използват се също така и камери за заснемане на сцената и подпомагане на лазерния скенер – фиг.1.17.

Измерванията на тялото са получени чрез прилагане на прости геометрични правила [D'Apuzzo (2007); Tong et al. (2012); Ashdown et al. (2004)]. За да се осигури безвредността на лъча, могат да се използват само безопасни за очите лазери. Допълнителни оптични устройства като огледала могат да се използват за подпомагане на един лазерен лъч. Лазерното сканиращо устройство, състоящо се от светлинни сензори и оптични системи, се фокусира върху човешкото тяло за дигитализация. Броят на

светлинните сензори и оптичните системи може да варира в зависимост от позициите на тялото.



Фиг.1. 17. 3D лазерно сканиране на тяло, [Nayak, R., Padhye, R. (2016)]

1.4.6 3D принтиране (синтероване)

Лазерното синтероване (Laser sintering) е създадено от Рос Холдър (Ross Holder) през 1979 г., а в края на 80`те вече е на пазара [Matthews, J., (2011)]. Началото на лазерното синтероване на текстил е поставено от Jiri Evenhuis през 1999г. Това е производствена техника, при която се изграждат триизмерни форми слой по слой, чрез лазерно синтерован полиамиден прах. Произвеждат се триизмерни облекла и аксесоари с подобна на „ризница“ текстура. Има различни техники за 3D принтиране, различаващи се главно по начина на изграждане на слоевете до създаване на обекта, като топене или омекване на материала за производство на слоевете. Най-често срещаните технологии са „Селективно лазерно синтероване“ (SLS - Selective Laser Sintering) и „Моделиране чрез разтопено отлагане“ (FDM - Fused Deposition Modeling). Първите търговски продукти от този тип са били пуснати на пазара през 2005г. „3D модата“ много бързо се превръща в норма на подиумите в целия свят, като се създават уникални 3D аксесоари и колекция за мъже и жени - фиг.1.18. [Schuöcker, D., et al. (2014)].

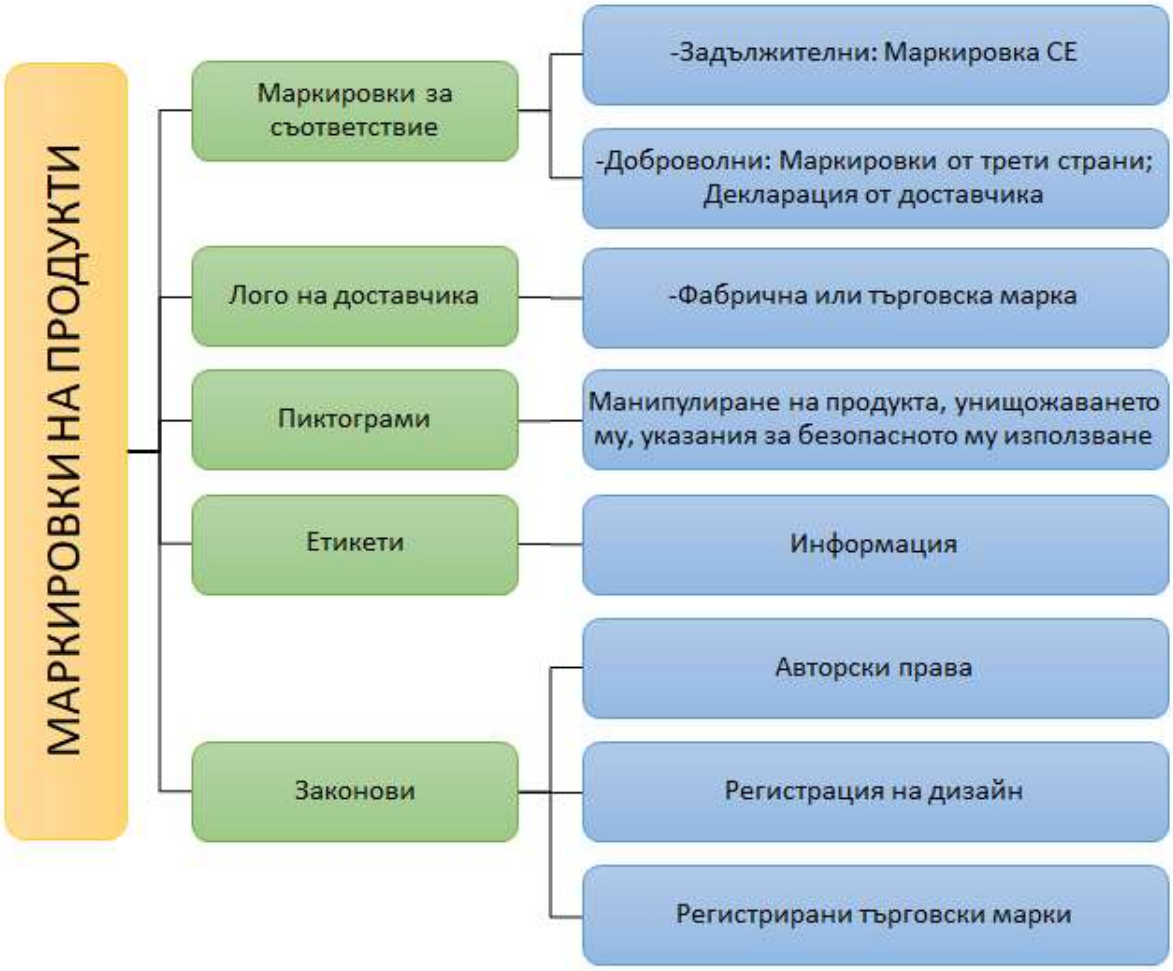
Фиг. 1.18. Лазерно синтеровано текстилно изделие

[https://www.architerials.com/2010/08/3d-printed-fabrics-surprise-theyre-real-and-theyre-sustainable/trackback/index.html]

1.5 Маркиране на текстилни материали

1.5.1 Видове маркировки

Маркировката представлява определена информация - текст, символи или кодове, нанесена директно върху продукт или по друг начин [Ангелова, Й., (2016)].



Фиг. 1.19. Видове маркировки [https://www.ctec-sz.com/]

Тя е важен елемент в съвременното производство и потребление на стоки и материали с определени функции: идентификационни, информационни, предупредителни, естетически и др. Изискванията на европейските, а и на световните пазари налагат маркировката като неразделна част от предлаганите продукти [www.ec.europa.eu]. Маркировката има различно предназначение и се изработва съобразно конкретните изисквания - фиг.1.19.

Маркировката е необходима на производителя за контрол на производствения процес - проследяване етапите от създаването на изделията и отстраняване на дефекти с цел добро качеството на продукцията. За потребителя маркировката има преди всичко информационно значение относно основните характеристики на продукта, като например идентификация на производителя, размер, суровинен състав, грижи и поддръжка на изделието, указания за възможни алергични вещества, запалимост, изисквания за опазване на околната среда и други

[Наредба за маркировката, (2000)]. Европейските стандарти не са задължителни, но производителите са стимулирани да ги спазват, тъй като тяхното прилагане гарантира съответствие на качеството спрямо регламентите и наредбите.

Маркировката може и да е част от самото изделие или да се прикрепя към изделието по различни начини. Тя може да съдържа графична или цифрово-буквена информация и езиково-независими символи или кодове. В текстилното производство при маркиране на платове - върху всеки топ плат се поставя етикет, съдържащ следната информация [Кожухаров, Хр.,(1997)]:

- предприятие (фирма) производител, лого;
- наименование и шифър на тъканта по ЕКП (Единен класификатор на продукцията);
- количествен и качествен състав;
- качество по БДС;
- брой на бонифицираните дефекти;
- дължина на топа плат (действителна и бонифицирана);
- широчина на плата;
- указания за условията на експлоатация: пране, гладене, избелване, химическо чистене и други).

Предприятията в ЕС се насърчават да се съобразяват с екологичните аспекти и да маркират изделията си според съответните стандарти, за да защитят правата си на големите нововъзникващи пазари като Китай, Индия, Бразилия или Мексико. На световно равнище европейските предприятия са жертви на мащабно копиране и фалшификация. Проблемите със защитата на марките, дизайна и моделите вече са известни в творческите отрасли.

1.5.2 Методи на маркиране

Съществуват много различни методи за маркиране на промишлени материали [Schuöcker, D. (1998)]. Тук ще се разгледат по-подробно методите, които се прилагат основно за маркиране на текстилни материали.

1.5.2.1 Ситопечат

Ситопечатът се прилага върху изделия от картон, дърво, пластмаса, текстил, метал, самозалепващо PVC фолио и представлява способ за печат, при който върху повърхността на материали и/или готови изделия се нанася печатно изображение, като мастилото преминава през сито шаблон. Сито шаблонът се изготвя от тънка мрежа, опъната и залепена върху рамка, която се залива със светлочувствителна емулсия или филм и след експонация се получава готова печатна форма. Мастилото преминава през зоните от мрежата, където не е нанесена емулсията. Тези отворени части от ситото

представляват изображението, което се пренася върху материала с помощта на печатащ ракел. Ситопечатът върху текстил (тениски, блузи, суитчъри, шапки, работно облекло, якета и друг трикотаж) се извършва върху дрехата с пластизолни текстилни мастила. При директния печат мастилото прониква в текстила, след което се изсушава с печка с инфрачервено излъчване на температура около 150°C и изпирането му при пране на 30÷40°C е невъзможно. Положителна страна на ситопечата е, че сито мрежата може да прилепва към цилиндрични, конусни и овални повърхнини и да се печатат изделия с различни повърхнини. Печатният слой може да бъде с неравномерна дебелина и значително по-голяма, отколкото при другите видове печат. Основните недостатъци на метода са липсата на гъвкавост, ограниченост в размерите на изображението, трудоемкост (извършва се ръчно) и невъзможност да се автоматизира процесът. Маркировката, получена чрез сито печат, има малка плътност на нанесената информация и ниска износоустойчивост [www.sitopechat.com].

1.5.2.2 Тампонен печат

Тампонният метод е предназначен за изделия с плоски повърхности. При него информацията се нанасяне върху материала чрез предварително подготвено клише и това ограничава размера на изображението. Той не е подходящ за маркиране на големи изображения. Бързото износване на клишето и не високата износоустойчивост на маркировката са другите недостатъци на метода, както и ниската му производителност [www.dijoprint.com].

1.5.2.3 Термопринтиране

Термопринтирането е дигитален печат върху текстил [Милчевски, В., (2014)]. Съществуват два основни типа технологии - трансферен печат и директен (DTG или Direct-to-Garment): При трансферния печат щампата е напечатана предварително върху специална трансферна хартия или фолио, след което се прехвърля с помощта на термо-трансферна преса и трансферно лепило върху дрехата. При този тип печат текстилното мастило остава залепено върху тъканта и след пране и свиване на материята лесно се напуква и набръчква. Директният печат се изработва с DTG принтери за пълноцветен печат върху различни по цвят трикотажни платове или изделия (бели, цветни и черни фланелки, ризи, якета, джинси, суичъри, чанти, кърпи) и е алтернатива на ситопечата. Приложим е както за единични бройки, така и за серийно производство. Предимствата му са в ярките, наситени цветове; високата резолюция, достигаща до 1440 dpi; високата скорост на печат; компютърно обработено произволно изображение или многоцветно лого. С тези принтери освен върху текстил може да се печата и върху други материали - дърво, опъната на рамка канава и т.н.

Недостатъците на метода са свързани с необходимостта от скъпи мастила и консумативи, и нанасянето само върху плоски повърхности [www.tampoprint.com].

1.5.2.4 Бродерия

Бродериятa в повечето случаи се прилага с декоративна цел, но може да има и информационен характер (букви, цифри, кодове). Бродериятa се извършва ръчно или машинно. Може да бъде бродирана апликация - изработва се предварително върху подложка, която след това се зашива към изделието или директно бродиране върху избрания материал. Предимствата на метода са във възможността да се използват неограничен брой цветове, високо качеството на изработката, надписите са издръжливи на многократно пране, има добра устойчивост на ултравиолетови лъчи, придава оригинален и стилен вид на дрехите и рекламните материали; икономически изгодна, когато се прилага за надписи върху ежедневно работно облекло, в тези случаи е за предпочитане пред печата. Недостатъкът се изразява в трудоемък и разходоемък процес.

1.5.2.5 Етикетиране

Според наредба за етикетирането и наименованията на текстилните продукти, издадена на основание на Закона за защита на потребителите и в съответствие с директивите на ЕС, „Лицата, които пускат на пазара текстилни продукти за производствени или търговски цели, трябва да ги етикетират" [Наредба за етикетирането, (2012)]. "Етикетиране" е нанасянето на необходимата информация по наредбата чрез отпечатване върху продукта или чрез използване на прилепен или прикрепен етикет. Наредбата се отнася до съдържанието на информацията, без да регламентира методите на нанасянето и. Използват се голямо разнообразие от етикети и ръстови марки - прикачващи се, пришити към самата дреха, самозалепващи се, на които предварително е нанесена необходимата информация: лого на фирмата, суровинен състав на изделието, знаци за третиране, изисквания за безопасност и екологичност, бар код, търговска информация. Най-често се изработват чрез термотрансферен печат или ситопечат, но могат да бъдат също така хартиени, картонени или текстилни етикети. Етикетите и ръстовите марки намират приложение във всички продукти на леката промишленост за маркиране на дрехи (бельо, трикотаж, ризи, спортни облекла, костюми), работно облекло, спално бельо, хавлиени изделия, шапки, килими, тапицерии на мебели и автомобили, одеяла, кухненски покривки и т.н.

1.5.2.6 Лазерно маркиране

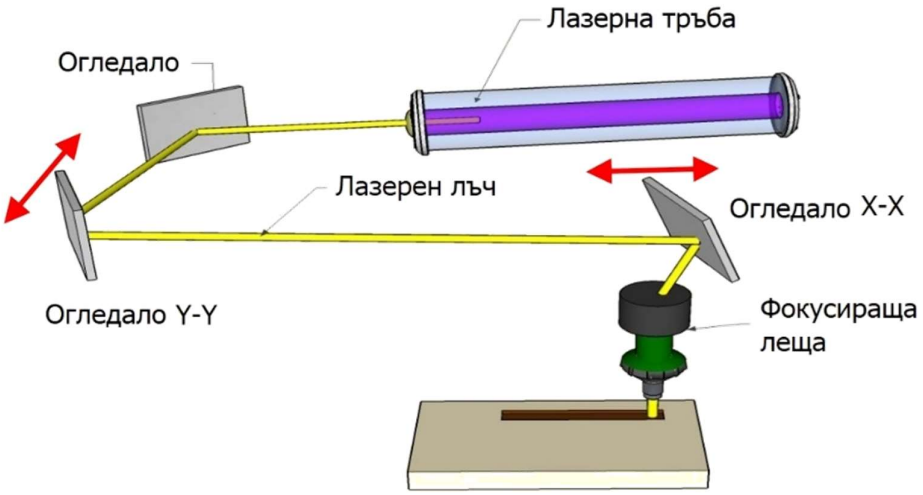
Процесът на лазерно маркиране е навлязъл масово в производството на метални изделия [Ангелов, Н., (2011); , Lawrence, J.et al. (2017)] и инструменти, полупроводникови прибори, стъклени и керамични изделия, но през последните години все по-широко се разпространява и в текстилната промишленост като алтернатива на традиционните методи за маркиране [Ангелова, Й., (2016); Стоянов Б. и др. (2016б); Chow Y. (2011); Ghoranneviss, M., (2007); Yuan G. et al. (2012, 2013)].

Фиг. 1.20. Проектиран модел с методите на графичния дизайн (а) и съответстващото му нанасяне чрез лазерно маркиране върху дрехата (б) [Yuan G. et al. (2013)].

Това е иновативен метод, който се различава много от маркирането по който и да е друг начин, без влагане на консумативи, не са необходими нито химикали, нито мастилени ленти или други материали. Когато като средство за маркиране се използват лазерни системи, повърхностите на изделията се обработват с лазерен лъч изключително точно и качествено, с ясни контури, много бързо и прецизно. Лазерното маркиране е безконтактно въздействие в структурата на обработвания материал, като резултатът е получаване на трайно контрастно изображение. Върху повърхността на изделието с този метод може да се нанася информация: надписи, идентификационни символи (букви и цифри), bar-кодове, матрични кодове (2D), специални знаци, серийни номера, изображения, декорация и т.н. В практиката с помощта на лазер много лесно се създава произволно изображение по собствен дизайн, избелване и ефекти на състаряване на Деним – фиг.1.20. [Nayak R., R. Padhye, (2016); Ozguney, A. Et al. (2009); Solaiman, Md. Et al., (2015); Štepánková, M, et al. (2011); Kan, C.W., (2014б), Mondal, M. et al. (2014), Ortiz-Morales, M. et al. (2003), Tarhan, M., et al. (2009), Hung, O.N.; et al. (2016)].

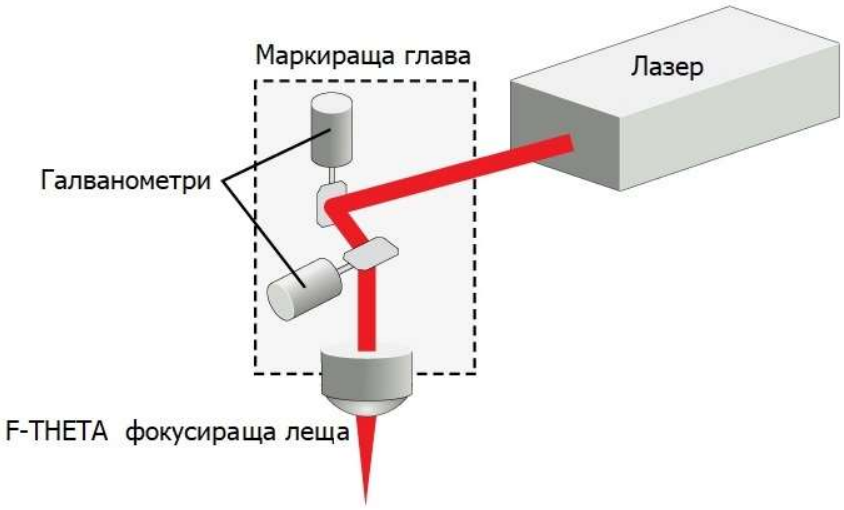
Лазери се използват за гравиране и маркиране на широка гама от органични материали, в това число и на текстилни облекла. Лазерната маркировка е с добър контраст, трайна и неизтриваема, не може да бъде променена или унищожена. Лазерната маркираща система може лесно да се интегрира към поточни линии и самостоятелни стендове [US6753501 B1, (2004)].

Плотерната система за маркиране се реализира най-често от лазерен източник (тръба), комбинация от огледала - отклоняващо, координатно по ос Y и ос X и фокусираща леща – фиг.1.21. Системата позволява маркиране върху големи площи. Недостатък е ниската скорост на маркиране.



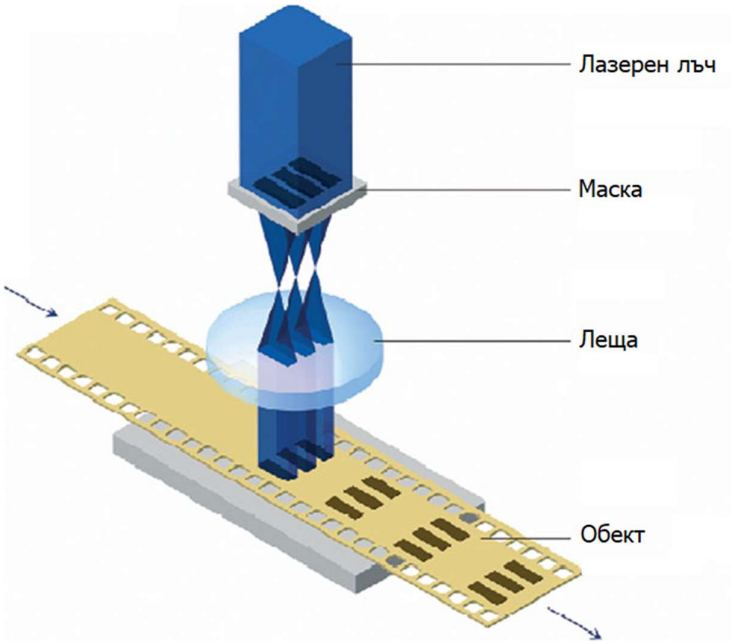
Фиг. 1.21. Плотерна система за маркиране

Галванометричната система за маркиране се реализира от лазерен източник, маркираща глава и фокусираща леща – фиг.1.22. Маркиращата глава се състои от две огледала, задвижвани от галвомотори, които последователно отклоняват лазерния лъч по ос X и ос Y. F-Theta леща осигурява фокусиране на лазерния лъч върху равнинна повърхност, която се явява работната повърхност за обработка. Предимство на метода е много високата скорост на маркиране. Недостатък е ограничението на големината на работното поле, зависещо от фокусиращата леща.



Фиг. 1.22. Галванометрична система за маркиране

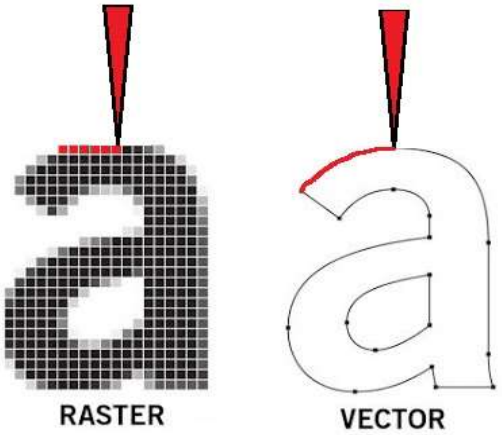
Проекционното маркиране се реализира с маска (шаблон), като лазерният лъч преминава през нея и се проектира върху работната зона - фиг.1.23.



Фиг. 1.23. Проекционна система за маркиране

Методът позволява маската да се използва многократно, като по този начин не се променят параметрите на обработката и се постигат високи скорости на работа. Но от друга страна маската се явява и недостатък на метода, защото за всяка нова задача трябва да се подготвя нова маска. Приложението на метода е ефективно за многосерийно производство.

Маркирането се реализира чрез три основни способа: растерен, векторен или проекционен. При растерното маркиране изображението се получава, като лазерният лъч се движи последователно в редове, подобно работата на матричен принтер, и нанася поредица от точки изграждащи изображението. Методът намира приложение основно при нанасяне на буквено-цифрова информация, по-рядко за графични изображения [Ангелов, Н., (2011); Динев, Ст., (1993), LATI (2016); Lazov, L., et al. (2015)]. Чрез векторно маркиране маркировката се изписва от фокусиран лазерен лъч, който обхожда непрекъснат контур – фиг.1.24. Прилага се за всякакъв вид информация -цифрови кодове, бар кодове, 2D кодове, лога и почти всеки друг вид. Това е най-разпространеният и гъвкав метод на лазерна маркировка. Растерното и векторното маркиране могат да се реализират от плотерна или сканираща система [Динев, Ст., (1993), Lazov, L., et al. (2015)]. Проекционния метод е удобен за нанасяне на непроменлива информация, кодирана в маската, за реализиране на големи серии.



Фиг. 1.24. Растерно и векторно маркиране

Всеки от трите способа има своите предимства и недостатъци. Според конкретния случай на маркиране се подбира най-подходящият начин в зависимост от изискванията за скорост, големина на обработваната зона, гъвкавост и инвестиционни разходи.

Днес всички органични полимери, каквито са и текстилните влакна, могат да се маркират, по един или друг начин, чрез лазерно лъчение. Когато лазерният лъч бъде фокусиран върху обработвания материала с цел маркиране, енергията му се поглъща от повърхностния слой и го загрява. В резултат от реакция, породена от топлината и според вида на материала, резултатът е различен [Bosman, J.,(2007); Lerch, T., et al. (2007); Bosman, J.,(2007); Ortiz-Morales, M. et al.(2003)]:

- изменение на цвета чрез карбонизация или избелване;
- изпаряване на повърхностния слой материал с дебелина от части на микрона до стотици микрони;
- изменение на структурата чрез разтопяване на повърхността.

Предимствата на лазерната технология в сравнение с традиционните техники за маркиране са посочени в редица литературни източници [Ангелов, Н., (2011); Динев, Ст., (1993); Лилков, В., (2011); Schuöcker, D., (1998)] и могат да се обобщят в следното:

- много добро качество на маркировката, дължащо се на стабилността и управляемостта на лазерния източник;
- възможност за маркиране на почти всички съществуващи материали -метали, полупроводници, диелектрици, керамика, стъкло, текстил и други;
- маркиране на различно големи зони - от много малки до големи;
- минимална термично повлияна зона;
- безконтактен метод - липсва механично въздействие върху материала;
- висока износоустойчивост, практически неизтриваема;
- прецизност - точността е до микрони;
- висок контраст и плътност на нанесената информация;
- висока производителност (до няколко стотин символа в секунда);
- гъвкавост (графични изображения от векторен или растерен тип);
- маркировка на труднодостъпни места;
- не е необходима допълнителна обработка;
- маркиране в движение;
- интегриране в поточни и автоматизирани линии;
- нанасяне на информация в online-режим;
- висока сигурност и защита на информацията, не може да се фалшифицира;
- екологично чист процес;
- ниски разходи - без използване на мастила или друг вид консумативи, за разлика от всички принтери.
- рентабилен метод както за големи серии, така и за единични бройки.

1.5.2.7 Обобщени характеристики на методите за маркиране

От направената съпоставка на основните методи за маркиране - таблица 1.1, се вижда, че лазерният метод удовлетворява в най-голяма степен критериите, предявявани от производители и потребители към маркировката на изделията [Ангелова, Й., (2015а)].

Таблица 1.1. Сравняване на основните методи на маркиране на текстилни изделия

№	Параметър	Методи на маркиране					
		Ситопечат	Тампонен печат	Термо-принтиране	Бродерия	Етикетиране	Лазерен
1	Контраст	+	+ +	+ +	+ +	+ +	+
2	Прецизност	- -	-	-	-	-	+ +
3	Гъвкавост	- -	- -	+	-	+	+ +
4	Износоустойчивост	-	-	-	+	- -	+ +
5	Маркиране на труднодостъпни места	- -	- -	- -	- -	-	+ +
6	Цветово разнообразие	+	-	+ +	+	+	+
7	Защита на информацията	-	-	+	+	- -	+ +
8	Опазване на околната среда	- -	-	-	+ +	+	+ +
9	Маркиране в движение	- -	- -	- -	- -	- -	+ +
10	Маркиране на сложни изображения	- -	-	+ +	+	+	+ +
11	Себестойност	+	+	-	-	-	+

Легенда: ++ мн. добър; + добър; - задоволителен; - - незадоволителен

В сравнение с традиционните методи за маркиране на текстилни материали лазерната маркираща система е:

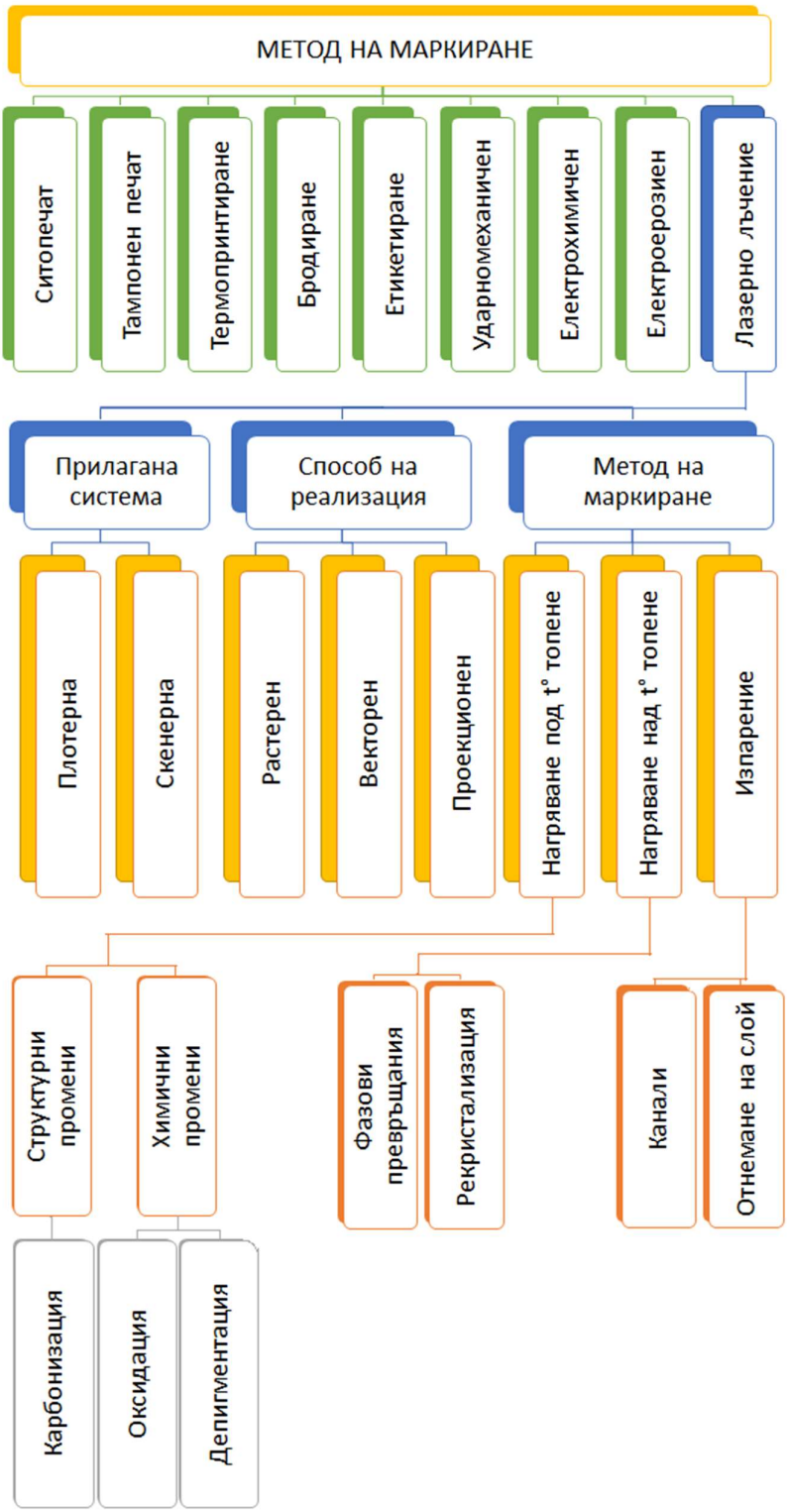
- оптически инструмент, който няма директен контакт с материала, няма износване, не изисква допълнителни консумативи като тонер, мастило или разтвори;
- изключително надеждна, дори и в тежки производствени условия;
- софтуерът позволява да се управлява удобно от персонален компютър;
- подходяща както за индивидуално маркиране, така и за индустриално приложение на малките, средни и големи серии, а също и за движещи се обекти при скорост на поточната линия до 240 m/min.

Обосновката на предимствата на лазерното маркиране трябва да включва и анализ на разходите в две направления: материални и нематериални. Не

само намаляването на материалните разходи могат да бъдат значителни, но и нематериални. Пример за реални икономии е отношението между вложения капитал и производствените разходи: намален труд за оперирane със системата, намалени прекъсвания за поддръжка и ремонт, намаляване или елиминиране на разходите за инструменти и намаляване или елиминиране напълно на разходите за консумативи. Материалните икономии се дължат на намаляване на времето за маркиране на една бройка от няколко минути до няколко секунди. От тук следва увеличаване на производителността с около 75% и намаляване на разходите с близо 70% от спестяване на труд и отпадането на необходимостта от консумативи. Нематериалните печалби могат да бъдат търсени в няколко области на производствения процес, като например: подобреното качество и надеждност, гъвкавостта на производството, ефективността, подобряване на обслужването на клиентите и тяхната удовлетвореност, подобряване на конкурентното позициониране с новите технологии, бързо реагиране на пазарите с по-кратък производствен цикъл, намалени срокове, както и способността за по-бързо реагиране на краткосрочни промени в пазарното търсене [Laser marking technologies, (2016)].

1.5.3 Класификация на маркировките

Класификацията на маркировките може да бъде направена по различни признаци - фиг. 1.25. Представената класификация с материали включваща група В, в която попадат текстилните полимерни материали (тъкани, плетени платове и т.н.), и в която е включена класификацията на лазерната маркировка. За групата на текстилните материали е характерна малка дебелина, голяма гъвкавост и драпируемост. Методите за маркиране като: ударно-механичен, електроерозионен не са подходящи, защото биха разрушили изделията.



Фиг.1.25. Класификация на маркировките

1.5.4 Оценка на качеството на маркировките

За да се оцени и оптимизира процесът на лазерно маркиране, една от най-важните задачи е да се дефинират критериите за качество на лазерната маркировката. Качеството на маркировката може да се разглежда като субективна и като обективна оценка в зависимост от това как се извършва. Ако се осъществява от човек, оценката ще е органолептична и ще се определя до голяма степен от неговите рецептори. При разчитане на маркировката машинно, от електронни четци например, оценката за качеството на маркировката трябва да отговаря на точно зададени количествени параметри. Някои от основните критерии за оценка на качеството на маркировката, посочени в [Schuöcker, D., et al.(2014)], са следните:

- контраст - разлика между фона и маркираната част от повърхността;
- хомогенност - равномерна плътност във всяка точка от маркировката;
- яснота - всяка част, както и контурът на изображението, трябва да се виждат с подробности;
- износоустойчивост - запазване на маркировката непроменена по време на експлоатацията;

Познанието за обкръжаващия свят в значителна степен се доставя от светлината. Повече от 80% от цялата информация, която човек получава, му се доставя от зрителната система. Електромагнитното излъчване и в частност светлината е най-разпространеният носител на информация за обектите и процесите във вселената. Тази информация възниква благодарение на различната излъчвателна или отражателна способност на обектите, а в случай на прозрачни обекти - тяхната пропускателна способност на лъчението. Отразеният или излъчен от всеки детайл светлинен поток е източник на информация, която се възприема от зрителната ни система. Субективното възприятие на цялото многообразие на светлинни сигнали с различно разпределение на интензитета на електромагнитните трептения по спектъра може да се характеризира с три психофизиологически величини: светлост (L), цветови тон (H) и наситеност (C), на които съответстват яркост, дължина на вълната и честота на излъчването.

Контрастът е разликата в осветеността или цвета, която прави обект (или неговото представяне в изображение или дисплей) различим. При визуалното възприемане на реалния свят контрастът се определя от разликата в цвета и яркостта на обекта и други обекти в същото зрително поле. Човешката зрителна система е по-чувствителна към контраста, отколкото към абсолютната яркост; можем да възприемаме света по подобен начин, независимо от огромните промени в осветеността през деня или от място на място.

1.5.4.1 Weber контраст

Качеството на лазерната маркировка се определя в най-голяма степен от контраста на Weber - k^*. Той представлява осветеността на елементите и фона на едно изображение в относителни единици. Контрастът на Weber обикновено се използва в случаите, когато малки елементи присъстват на голям равномерен фон, т.е. когато средната яркост е приблизително равна на фоновата яркост. В зоната на измерване се прави черно-бяла снимка с цел измерване на контраста [Ангелов, Н., (2019); Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., (2020)]. Чрез сравняване на полученото изображение с референтна скала се избира стойност Lx в диапазона между 0 (черно) и 255 (бяло). Референтна стойност Lf се определя въз основа на основния фон на изображението (това е изображението на повърхността около маркираната зона). Контрастът се определя от отношението между яркостта на изображението Lx и яркостта на фона Lf:

$$k^* = 1 - \frac{Lx}{Lf} \tag{1.1}$$

Контрастът може да се определя в проценти чрез референтна скала от сив цвят. Контраста k^* се определя чрез линейна интерполация от израза:

$$k^* = \frac{Lf - Lx}{Lf}.100\% \tag{1.2}$$

Контрастът се счита, за:

- голям - при стойности на k^*, по-големи от 50% (маркировка и фон рязко се различават по яркост);
- среден - при стойности на k^* от 20% до 50% (маркировка и фон забележимо се отличават по яркост);
- малък - при стойности на k^*, по-малки от 20% (маркировка и фон малко се отличават по яркост).

Според уравнението по-добра видимост на маркировката води до по-високи стойности на k^*. При визуална оценка на направени маркировки [Lazov L., N. Angelov, (2012)], евентуален критерий за добро качество изисква контраст от над 50%, докато при използване на компютърни четци за 2D и баркодове, контрастът трябва да бъде поне 20%.

Визуалното възприемане на маркировката се определя от субективната природа на цветоусещането. Определянето на цвета органолептично, т.е с очите, не е еднозначно. Това се дължи на факта, че цветното зрение на човешките същества е субективно и зависи от различни фактори: умора на очите (случва се, когато очите се концентрират дълго на един или комбинация от цветни обекти); емоционално състояние на наблюдателя (емоционалното състояние или минали преживявания, включващи цветове, може да предизвикат наблюдателя да възприема цветовете по различен начин); тип на осветлението (различните източници на светлина повлияват на цветовете, възприемани от хората - лошото осветление при недостатъчна светлинна енергия възпрепятства правилното възприемане на действителните цветове на материала, пряката слънчева светлина придава лек жълт оттенък на всички цветове, непряка слънчева светлина може да придаде лек син оттенък); интензивността на осветлението; възрастта на наблюдателя (с възрастта остротата на зрението намалява); биологични дефекти на цветоусещането (далтонизъм) и спектралния състав на светлината. Маркировката има определен прагов (граничен) контраст $k^*_{\text{пр}}$, над който може да се разчете. Праговият контраст характеризира способността на окото да различава яркостни разлики и зависи от редица фактори, чиято зависимост е представена с равенство 1.3 [Василев, Н.,(1973)]:

$$k^*_{\text{пр}} = \frac{f(p)}{L_f} . \left(\frac{A}{\alpha} + B\right)^2 \qquad (1.3)$$

където: L_f – яркост на фона, nt;

$f(p)$ – функция от вероятността за различаване;

p – вероятност за различаване;

α – ъглов размер на обекта в ъглови минути;

A и B – константи, зависещи от яркостта на фона.

Автоматизираното разчитане на маркировката с електронни четци има редица предимства пред визуалното, като по-голяма точност, възможност за създаване на база данни, бързо анализиране на информацията и се избягват всички недостатъци на субективния фактор. Поради тези причини изискванията за контраст на маркировката спрямо визуалното възприемане са по-ниски.

1.5.4.2 Четивност

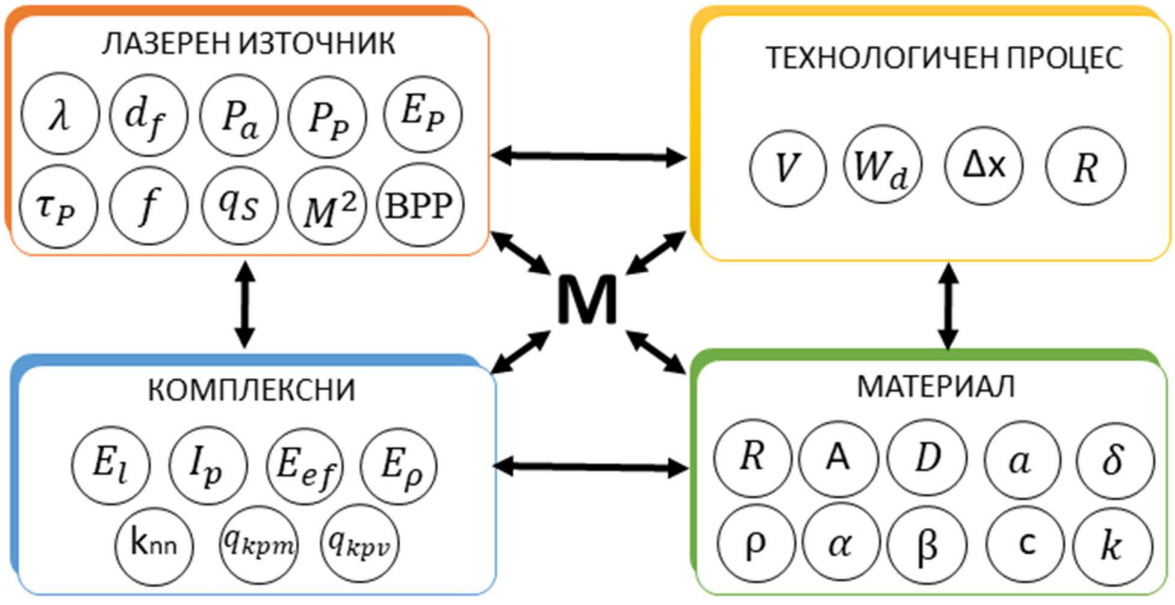
Четивността се използва, за да се опише колко добре четящият може да декодира символ и зависи от характеристиките на маркировката (геометрия, грапавост на повърхността, наличие на оксид) и техниките за измерване. Трябва да се обърне внимание на няколко различни фактора, за да се създаде код или маркировка с добро качество: контраст, размер и консистенция на маркировка.

Добрият контраст увеличава възможността за четене на по-големи разстояния и намалява вероятността от шумови смущения [Microscan]. Четивността обикновено се оценява като се има предвид стойността на контраста на символа k_s^*. Това е разликата между средните аритметични стойности на най-тъмните 10% и най-светлите 10% от пикселите на изображението [Microscan, 2D Codes Step By Step]. Скалата за степен на контраст на символа ISO варира от 0,0 до 4,0. Въпреки това, при работа с лазерно маркиране, тъй като четливостта се влияе от характеристиките на маркирането, настройката на лазерните параметри остава критичен проблем. От литературата [Qi J, Wang KL, Zhu YM., (2003), Tuz L., (2013)] се вижда, че основните параметри на обработка, влияещи върху лазерното маркиране, са:

- средна мощност;
- скорост на сканиране (т.е. скорост на маркиране);
- честота на импулса.

1.6 Фактори които влияят на контраста на лазерната маркировка

Основните фактори, които оказват влияние в по-голяма или в по-малка степен, върху качеството на маркировката (M), са показани на фигура 1.26.



Фиг.1.26. Фактори, оказващи влияние върху качеството на маркировката.

Факторите могат да се представят в четири групи, отнасящи се съответно до:

- материала (Мл),
- лазерния източник (Л),
- технологичния процес (Т),
- комплексно влияещи (К).

1.6.1 Фактори, отнасящи се до материала

1.6.1.1 Оптични характеристики

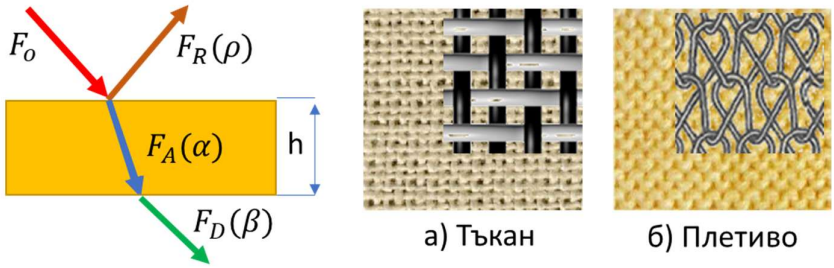
Върху отражателната, поглъщателната (абсорбираща) и трансмисионната (пропускаща) способност на даден материал най-голямо влияние имат: състоянието на обработваната повърхност, дължината на вълната λ на лазерното лъчение, повърхнинната плътност на мощността q_S на лазерното лъчение, температурата T на повърхността на образеца, ъгълът на падане и равнината на поляризация [Ангелова, Й., (2015б)].

За процеса лазерно маркиране на различни материали (Мл) от значение са оптичните им характеристики и коефициенти и тяхната взаимовръзка - фиг. 1.27:

- отражателна способност - R;
- абсорбционна способност - A;
- трансмисионна способност - D;
- коефициент на отражение - ρ;
- коефициент на поглъщане - α;
- коефициент на пропускане - β;

Текстилните площни материали (ТПМ) са с органичен произход и повърхността им е коренно различна от повърхността на твърдите материали (например метали). Те са изградени от гъвкави текстилни нишки, преплетени по различен начин - фиг. 1.27 а), б), в зависимост от това дали са тъкани (Тк), плетива (Пл) или нетъкани текстилни изделия (НТИ), както и от текстурата на всеки един вид. ТПМ имат различна плътност, която се определя от гъстините на текстилните нишки. Следователно между текстилните нишки има въздушни пространства с различна големина и поради това не трябва да се пренебрегва F_D и способността им да пропускат част от светлинния лъч. От друга страна самите ТН (прежди или коприни) са съставени от текстилни влакна и имат различна структура и плътност. В

пространствата между влакната има затворен различен по обем въздух. Текстилните влакна също имат различна структура и плътност.



Фиг. 1.27. Падащ светлинен лъч върху текстилен материал: а - тъкан б - плетиво

$$F_O = F_R + F_A + F_D \tag{1.4}$$

където: F_O – падащ светлинен поток върху съответната повърхност;

F_R – отразена част;

F_A – погълнатата част;

F_D – преминала част през материала.

$$1 = \rho + \alpha + \beta \tag{1.5}$$

където: ρ – коефициент на отражение;

α – коефициент на поглъщане;

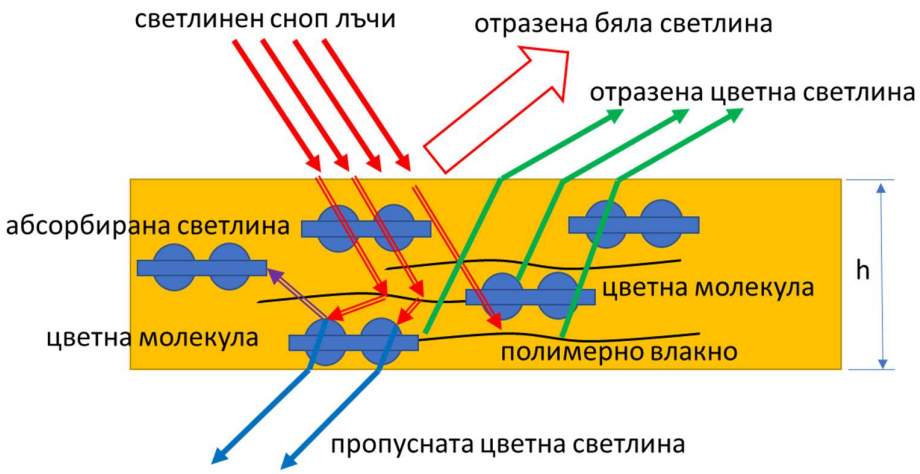
β – коефициент на пропускане.

Таблица 1.2. Отразяване, абсорбиране и пропускане на падащ светлинен лъч

[Замфиров, М., Н. Вучков,(2011)]

Абсолютно бяло тяло	$\rho = 1$	$\alpha + \beta = 0$ или $\alpha = \beta = 0$	Повърхността отразява цялото лъчение
Абсолютно черно тяло	$\alpha = 1$	$\beta = \rho = 0$	Тялото поглъща цялото лъчение
Непрозрачно (сиво) тяло	$\beta = 0$	$\alpha + \rho = 1$	Тялото не пропуска лъчението

Оптичните свойства на ТПМ, освен от различния строеж на повърхността им, в много голяма степен се определят от цвета и лъскавината им. При платовете съществува огромно разнообразие от цветове, постигнати чрез различни багрила. Всичко това говори за доста сложното разпределение на веществото в текстилните платове, за техния специфичен характер и поведение.



Фиг. 1.28. Взаимодействие на падащ светлинен сноп лъчи с плат [Gohl, E., et al. (1989)]

В литературата липсва информация за оптичните свойства на този вид материали или се срещат данни за отделните влакна, но не и данни за платовете като цяло.

Падащата върху плата видима светлина може да се отразява, абсорбира (поглъща) или преминава през него в различна степен и от това зависи цвета му – табл.1.2. На фигура 1.28 е показана сложността на взаимодействието на падащия лъч с плата [Gohl, E., L. Vilensky,(1989)]. Бялата светлина се отразява от повърхността, докато цветната светлина се отразява от аморфната област, в която са свързани боядисаните молекули от влакната на тъканта.

1.6.1.1.1 Отражателна способност

Лазерното въздействие върху веществото при падащо лъчение е различно за различните материали и е свързано с отражението и поглъщането на лъчението. Тази зависимост е изследвана предимно за метали [Ангелов, Н., (2011); Григорьянц, А., и др.(2006); Динев, Ст., (1993)]. Ако платът е достатъчно тънък, цветната светлина преминава през него и се получава ефектът на прозрачност. Отражението, пречупването и поглъщането на светлината са явления, характерни за всички видове вълни. При

отражението светлината се връща обратно в същата среда, достигайки до дадена повърхност. Повърхността на материала, върху който пада светлинния лъч, е определяща за това, каква част от него ще се отрази и каква част ще се абсорбира. Колкото е по-гладка, толкова отражението R е по-голямо и обратно - при грапави повърхности отразяването намалява [Иванчев, Н., и др.(1975)].

Когато върху гладка повърхност пада успореден сноп лъчи, той се отразява, като лъчите са също успоредни помежду си. Ако повърхността е грапава, падащият успореден сноп лъчи се отразява в различни посоки (дифузно отражение). Отражателната способност е функция на дължината на вълната на лазерното лъчение $R = f(\lambda)$ и поради това грапавини от порядъка на дължината на вълната значително увеличават дълбочината на проникване на лазерното лъчение. Затова в някои случаи с цел намаляване на отражателната способност, се прави допълнителна повърхностна обработка на образеца. Тя е безразмерна величина и може да има стойност между 0÷1.

1.6.1.1.2 Коефициент на отражение на лъчението

Той се изразява с отношението 1.6.:

$$\rho = \frac{I_r}{I_o} \tag{1.6}$$

където: I_r – интензитет на отразения лъч;

I_o – интензитет на падащото лъчение.

1.6.1.1.3 Поглъщателна способност

За поглъщателната A способност са в сила аналогични физически закономерности на падащото лазерно лъчение от дължината на вълната λ - фиг.1.29. Колкото по-голяма е поглъщателната способност на материала, толкова по-малка мощност (енергия) на падащото лазерно лъчение е необходима за реализиране на процеса на лазерно маркиране. Полимерите са добър абсорбатор на лазерната светлина [Schuöcker, D., (1998)]. С увеличаване на дължината на вълната λ намалява поглъщателната способност и то почти линейно за ултравиолетовата и видимата област. За лъчение в инфрачервената област експерименталните резултати са в съответствие с формулата на Хаген-Рубенс [Ангелов, Н., (2011)]. Поглъщателната способност A се влияе от температурата T на повърхността,

като с увеличаване на температурата се увеличава и поглъщателната способност [Ангелов, Н., (2011), Лилков, В., (2011)].

$$A = \left(\frac{4c}{\lambda\sigma}\right)^{1/2} \tag{1.7}$$

където: c – скорост на светлината;

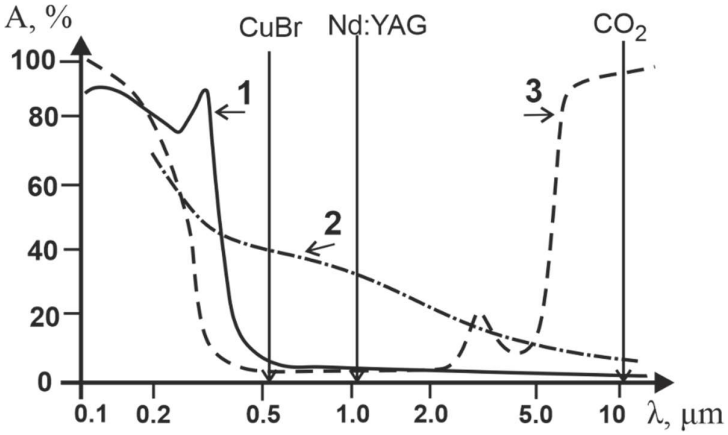
σ – електрическа проводимост;.

$$A(T) = A_0 + n'(T - T_0) \tag{1.8}$$

където: A_0 – поглъщателна способност на материала при $T_0 = 273{,}15K$;

n' – константа, зависеща от материала и лазерното лъчение.

Най-често в теоретични пресмятания се използва линейна апроксимация на зависимост 1.8, с която могат да се правят числени пресмятания за получаване на температурното поле в зоната на въздействие [Ангелов, Н., (2011); Wisniowski, M., (2013)].



Фиг. 1.29 .Абсорбиращата способност като функция на дължината на вълната $A = A(\lambda)$ на някои материали: 1 - Au, Ag, Cu, 2 - метали Fe, Ni, Cr, 3 - изолатори [Schuöcker, D.,(1998)].

Текстилните полимери абсорбират светлината по- различно от металите. От близката ултравиолетова зона до близката инфрачервена зона (видимата светлина) абсорбцията е много малка -неоцветените полимери са прозрачни. YAG лазерите с дължина на вълната близка до инфрачервената зона не са подходящи за полимери.

Въглеродните CO_2 и Ексимерните лазери са приложими за органичните материали тъй като светлината им се поглъща добре. Най-често

приложимата за обработка на полимери е CO_2 системата, докато Ексимерният лазер може да се използва и има задоволителни резултати само ако е с висока импулсна енергия и при много малко фокусно петно [Schuöcker, D.,(1998)].

1.6.1.1.4 Коефициент на поглъщане на лъчението

Коефициентът на поглъщане на лъчението α е друга важна оптична характеристика, оказваща влияние на контраста на маркировката. Като цяло, а е функция на дължината на вълната и температурата. Той участва в закона на Beer-Lambert [Brown, M., C. Arnold, (2010)], който дава намаляването на интензитета на падащото лъчение в дълбочина:

$$I = I_o e^{-\alpha h} \tag{1.9}$$

където: I_o – начален интензитет на лъчението върху обработваната повърхност;

I – интензитет на лъчението, след като премине през слой вещество с дебелина h.

$$\alpha = \frac{4\pi k' n}{\lambda} \tag{1.10}$$

където: λ – дължина на вълната;

n – показател на пречупване;

k' – екстинкция (загасване на веществото).

1.6.1.1.5 Коефициент на пропускане на веществото

Отношението на интензитетите на преминалата и първоначално пропуснатата светлина се нарича коефициент на пропускане β и обикновено се дава в проценти:

$$\beta = \frac{I}{I_0}.100\% \tag{1.11}$$

1.6.1.1.6 Дълбочина на проникване

Дълбочината на проникване δ показва разстоянието, което изминава светлината във веществото, като интензитетът й намалява. Оптичната

дълбочина на проникване за полимери доминира термичната дори при продължително взаимодействие. За метали тази ситуация е обратната.

$$\delta = \alpha^{-1} \tag{1.12}$$

1.6.1.2 Топлофизични характеристики

При процеса на лазерно маркиране се осъществява пренос на топлина в обработваната зона на материала и затова е важно да се разгледат неговите основни топлофизични характеристики - фиг.1.26:

- коефициент на топлопроводимост – k;
- специфичен топлинен капацитет – c;
- коефициент на температуропроводимост – a.

1.6.1.2.1Топлопроводимост, коефициент на топлопроводимост

Топлопроводимостта е явление, при което се пренася топлина от частите на едно тяло с по-висока температура към частите с по-ниска температура и възниква топлинен поток, при който се пренася топлинна енергия. Този процес продължава до изравняване на температурите [Иванчев, Н., и др.(1975)]. Топлопроводимостта зависи от вида, структурата и свойствата на веществата. Тя се оценява чрез коефициента на топлопроводност k и се измерва в $[W.m^{-1}.K^{-1}]$. Изразява количеството топлина, което преминава през материал с площ един квадратен метър и дебелина един метър за време една секунда, ако разликата в температурата е един градус [Кеворкян, А., (1977)]. Топлинното третиране на текстилните материали (ТМ) предизвиква промени в микро и макро структурата им. Когато се обработва повърхността на платовете с лазер, за да се маркират, започва топлинен пренос от горния слой към вътрешността, т.е. реализира се топлопроводимост. В сравнение с металите полимерите показват по-ниска топлопроводимост и по-ниска температура на топене (за повечето от тях между 100÷300°C). Този малък интервал е недостатък, защото прегряването и карбонизирането на повърхността става много лесно. Известно е, че памукът е труден за обработка, защото има склонност към карбонизация. Има полимери, при които дълбочината на топене нараства с увеличаване на скоростта на лазерния лъч. Това на пръв поглед е неочаквано. Този ефект може да се наблюдава при полимери, които имат склонност към карбонизиране. Това се случва когато скоростта е бавна, лазерният лъч остава на същото място за по-дълъг период от време, така в този слой размерът на карбонизирания материал ще бъде по-висок. В резултат на по-голямото количество погълната лазерна светлина и дълбочината на топене ще се намали. При използване на по-висока скорост, дълбочината на карбонизиране ще бъде по-малка и общата третирана дълбочина ще бъде по-висока.

Коефициентът на топлопроводност k зависи от състава и структурата на материала, от температурата T и налягането p [Иванчев, Н., и др.(1975)]. Според някои експериментални изследвания коефициентът на топлопроводност намалява с увеличаване на температурата [Ангелов, Н., (2011)]. При оптимизация на процеса е необходимо да се изследва зависимостта $k = k(T)$:

$$k(T) = k_0 + b(T - T_0) \tag{1.13}$$

където: k_0 – стойност на коефициента на топлопроводност при $T_0 = 273{,}15K$;

b – опитно установена константа;

1.6.1.2.2 Топлинен капацитет, специфичен топлинен капацитет

Топлинният капацитет c показва какво количество топлина трябва да се предаде или отнеме на едно тяло, за да се повиши температурата му с 1°К, когато се нагрява и се измерва в $[J.K^{-1}]$. При приемане на еднакво количество топлина различни материали повишат температурата си с различна стойност.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, J.K^{-1} \tag{1.14}$$

$$c = \frac{C}{m}, J.kg^{-1}.K^{-1} \tag{1.15}$$

$$\Delta Q = c.m.\Delta T = c.m.(T_2 - T_1) \tag{1.16}$$

където: ΔQ – количество топлина;

$\Delta T = (T_2 - T_1)$ – температурна разлика;

m – маса.

Специфичният топлинен капацитет c е материална константа, която определя количеството топлина, което се поглъща или отдава от един килограм вещество, за да се измени температурата му с един келвин (1.15) и се измерва в $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ [Schuöcker, D. (1998)]. Плътността на

веществата в твърдо и течно агрегатно състояние не се променя забележимо при термодинамичните процеси, който протичат, и масата може да се приеме за константа. Ако е известен специфичният топлинен коефициент за даден материал, може да се определи количеството топлина, което е необходимо за загряване на дадено вещество до определена температура (1.16).

1.6.1.2.3 Коефициент на температуропроводност

Коефициентът на температуропроводност a е комплексна характеристика, която показва с каква скорост се изравнява температурата на слой от материала и свързва коефициента на топлопроводност k, специфичния топлинен капацитет c и плътността на материала ρ. Данни за текстилни материали са представени в табл. 1.3.

$$a = \frac{k}{c\rho} \tag{1.17}$$

Коефициентът на температуропроводност е функция на температурата и може да се изрази със зависимостта (1.18).

$$a(T) = a_0 + m(T - T_0) \tag{1.18}$$

където: a_0 – коефициент на температуропроводност на материала при $T_0 = 273{,}15K$;

m – константа, зависеща от материала.

Коефициентът на температуропроводност е свързан с дължината на топлинна дифузия и тази връзка се изразява с формулата:

$$l_d = \sqrt{a.t_d} \tag{1.19}$$

където: t_d – време на топлинна дифузия;

Ако поглъщането на лъчението се реализира само от повърхностния слой, топлинният източник в материала е повърхностен и дълбочината на

проникване δ е много по-малка от дължината на топлинна дифузия l_d [Динев, Ст., (1993)].

Таблица 1.3. Топлофизични характеристики [Schuöcker, D. (1998)]

Параметър	Димензия	Материал			
		П	В	ПЕ	ПП
k - коефициент на топлопроводност	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,055	0,045	0,140	0,016
c - специфичен топлинен капацитет	$10^{-3}J.kg^{-1}.K^{-1}$	1,344	1,260	1,275	1,800
a - коефициент на температуропроводност	$10^{-7}.m^2.s^{-1}$	0,155	0,840	0,800	0,990

П - памук, В - вълна, ПЕ - полиестер, ПП - полипропилен

1.6.2 Фактори свързани с лазерния източник

Контрастът на маркировката зависи от следните характеристики на лазерния източник - фиг. 1.26:

- дължина на вълната на лазерния източник - λ, nm;
- диаметър на минималното фокусно петно - d_f, m,
- средна мощност – P_a, W;
- импулсна мощност - P_P, W;
- продължителност на импулсите – τ_p, s;
- честота на повторение на импулсите – f, s^{-1};
- повърхнинна плътност на мощността на лазерното лъчение - $q_S, W.m^{-2}$;
- число на дифракцията - M^2,
- параметър на качеството на лазерния лъч - BPP.

1.6.2.1 Дължина на вълната на лазерното лъчение

Основна характеристика на всеки лазер е дължината на вълната λ. От нея се определя способността за фокусиране на лазерния лъч. От дължината на вълната зависи поглъщателната A и отражателната способност R на съответния материал. Коефициентът на поглъщане α, дълбочината на проникване δ и дължината на Релей z_R са във функционална зависимост от λ [Динев, Ст., (1993); Михайлова, В., (2005)]. За маркиране на текстилни полимерни материали са подходящи лазери с дължина на вълната във видимата и далечната инфрачервена област на лъчението, като $\lambda = 0{,}578 \div 10{,}6\mu m$.

1.6.2.2 Диаметър на минималното фокусно петно

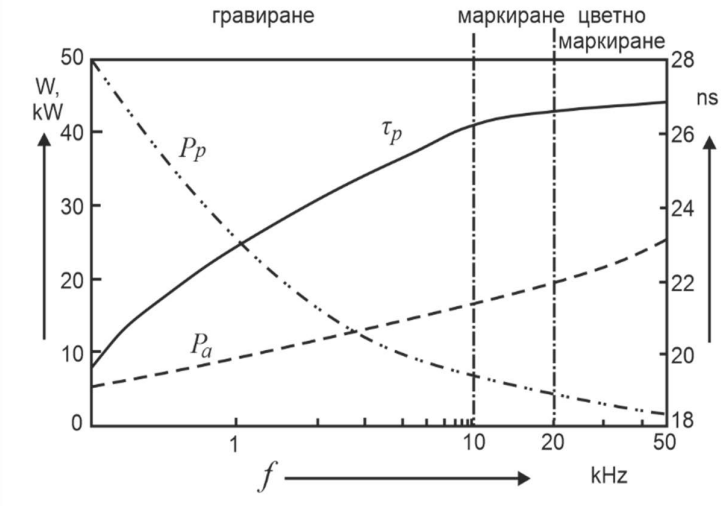
С помощта на фокусиращата оптика (с лещи или с огледала) за всяка лазерна система, лазерният лъч се фокусира върху обработваната повърхност в петно с определен диаметър, наречен диаметър на минималното фокусно петно d_f. Той зависи от дължината на вълната λ, диаметъра на падащия лъч D, фокусното разстояние W_d, параметъра M^2 , и се пресмята от израза [Ангелов, Н., (2011); Динев, Ст., (1993); Недева, Д., (2014); Lazov, L.,et al. (2015)]:

$$d_f = M^2 \frac{4.\lambda.W_d}{\pi.D} \tag{1.20}$$

В зависимост от фокусното разстояние W_d, при един е същи диаметър на изходния лазерен лъч може да се получи минимално фокусно петно с различен диаметър, като колкото фокусното разстояние е по-голямо, по-голямо е и фокусираното петно и обратно - при късофокусните обективи се получава фокусно петно с по-малък диаметър [Динев, Ст., (1993); Недева, Д., (2014)].

1.6.2.3 Средна мощност, Импулсна мощност, Импулсна енергия

Средната мощност P_a за маркиране на текстилни материали не е необходимо да е голяма, достатъчна е мощност в границите $10 \div 50W$.



Фиг. 1.30. Графики на зависимостите $P_a = P_a(f)$, $P_P = P_P(f, \tau_p)$ и $\tau_p = \tau_p(f)$за твърдотелни лазери [Недева, Д., (2014)]

Лазерното маркиране на текстилни площни материали (ТПМ) се осъществява с лазерни източници, работещи в импулсен режим, и много по-важни са:

- мощност на импулса - P_P, W;
- енергия на импулса - E_P, J;
- продължителност на импулса - τ_p, s;
- честота на импулсите – f, s^{-1}.

Взаимозависимостите на тези параметри със средната мощност P_a на лазера е представена на фиг.1.30 и се дава с формулите 1.21 и 1.22. [Ангелов, Н., (2011); Динев, Ст., (1993); Недева, Д., (2014)]:

$$P_P = \frac{P_a}{\tau_p . f}, \qquad kW \tag{1.21}$$

$$E_P = P_P . \tau_p = \frac{P_a}{f}, \qquad J \tag{1.22}$$

1.6.2.4 Повърхнинна плътност на мощността

Повърхнинната плътност на мощността q_S е основен фактор, влияещ върху структурните или фазовите превръщания на материала в зоната на въздействие при маркиране и се изчислява по формулата:

$$q_S = \frac{P}{S} = \frac{4 . P}{\pi . d^2}, \qquad W . m^{-2} \tag{1.23}$$

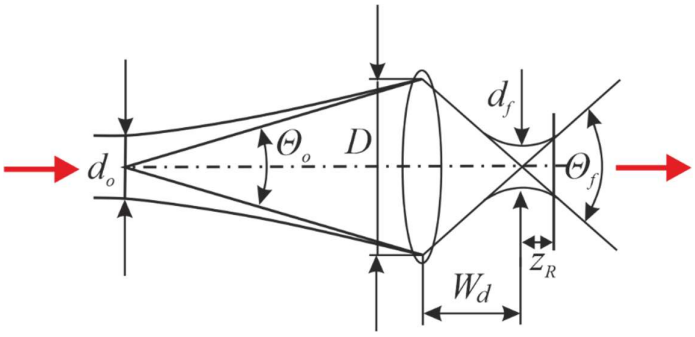
където: $S = d^2/4$ – площ на работното петно;

d – диаметър на работното петно.

Средната мощност, а следователно и плътността на мощността на всеки лазерен източник е определена в техническите спецификации на производителя и не може да се променя. За получаване на оптимален контраст на маркировката за конкретния обработван материал е необходимо да се определят работни интервали на изменението на q_S.

1.6.2.5 Качество на лазерното лъчение

Качеството на лазерното лъчение е комплексна характеристика на всеки конкретен лазерен източник и зависи от: параметъра на качество на лазерния лъч Beam Parameter Product (BPP) (1.26), число на дифракцията M^2 (1.27), ъгъла на разходимост Θ, диаметъра (радиуса) на минималното фокусно петно d_f, фокусното разстояние W_d, дължината на Релей z_R – (1.25). [Ангелов, Н.,(2011), Динев, Ст., (1993), Недева, Д., (2014)]. Ъгълът на разходимост за лазерни източници от видимата и инфрачервената област има стойности $0{,}1 \div 10 mrad$ и се определя от границата 1.24:



Фиг.1.31 .Основни геометрични характеристики на лазерния лъч [Yuan G., et al. (2013)]

$$\theta = \lim \frac{r(z)}{z} = \frac{r_f}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi . r_f} \tag{1.24}$$

$$z_R = \frac{\pi . r_f^2}{\lambda} \tag{1.25}$$

$$BPP = r_f . \theta = \frac{r_f . \lambda}{\pi . r_f} = \frac{\lambda}{\pi} \tag{1.26}$$

$$M^2 = BPP . \frac{\pi}{\lambda} \tag{1.27}$$

Числото на дифракция M^2 е дефинирано от стандарт [ISO 11145:2006] и се въвежда с цел отчитане на нарастването на радиуса на минималното фокусно петно r_f от теоретичната стойност при Гаусовото разпределение на интензитета. Колкото M^2 е по-близо до единица, толкова лазерният лъч е с по-добро качество. За лазерно маркиране е необходимо да се подбере

лазерен източник с параметър в границите $M^2 \in [1{,}1; 2]$ [Ангелов, Н., (2011); Байродин, Ю., (1998); Вейко, В., А. Петров, (2009)]

1.6.3 Фактори свързани с технологичния процес

Факторите свързани с технологичния процес T зависят от:

- Скорост на маркиране - $V, m/s$;
- Дефокусиране - $\Delta W_d, m$.
- Стъпка/отместване - $\Delta x, m$;
- Брой на повторенията – R;
- Ъгъл на наклона на стъпката/отместването α, deg.

1.6.3.1 Скорост на маркиране

Скоростта на маркиране е определяща за качеството на маркировката. Колкото скоростта е по-голяма, толкова времето на въздействие на лазерния лъч е по кратко и енергията, която се поглъща от материала в зоната на въздействие, е по-малка и обратно. От друга страна, колкото скоростта на лазерния лъч е по-голяма, толкова технологичният процес е с по-висока ефективност. Важно е да се познава и вида на обработвания материал и как той абсорбира светлинната енергия, която се трансформира в топлина. Отчитайки и останалите фактори, влияещи на технологичния процес, трябва да се намери оптималната скорост на лазерния лъч за съответния материал, за да се реализира маркировка с необходимия контраст. Връзката между скоростта v на движение на лъча и погълнатата енергия E се дава с формула 1.28, а времето на въздействие t на лъчението до промяна на температурата на обработвания материал до зададена стойност с 1.29. [Динев, Ст., (1993); Лазов, Л., Н. Ангелов, (2011)]:

$$\mathrm{v} = \frac{A.P_a.d_f}{E}, \qquad m/s \tag{1.28}$$

$$t = \frac{\pi^3.k^2.r_f^4(T-T_0)^2}{4.a.A^2.P_a^2}, \qquad s \tag{1.29}$$

където: A – поглъщателна способност;

P_a – средна мощност на падащото лазерно лъчение;

d_f – диаметър на работното петно;

r_f – радиус на работното петно;

k – коефициент на топлопроводност;

T_0 – температура на околната среда;

a – коефициент на температуропроводност.

1.6.3.2 Дефокусировка

Фокусирането на лазерния лъч се реализира с оптична система за работа във фокус (вътре в образеца) или в режим на дефокусировка (ΔW_d „+“ над и „-“ под повърхността на образеца). Зависимостта между дефокусировката ΔW_d и диаметъра на работното петно d_f е линейна, а именно с увеличаване на дефокусировката нараства и диаметърът на петното.

1.6.3.3 Стъпка/отместване

Покриването на определена площ от материала за обработка чрез маркиране най-често се изпълнява като щриховка, изградена от успоредни линии, разположени под определен ъгъл/наклон. Гъстината на щриховката или стъпката на отместване Δx, определя процента на обработената от лазерния лъч повърхност, като обратно пропорционално с намаляване на стъпката на маркиране се увеличава интензивността на въздействие и очаквано контраста нараства. Недостатък на намаляването на стъпката е увеличение на технологичното време за обработка.

1.6.3.4 Брой на повторенията

Изпълнението на лазерна обработка върху материали трудни за маркиране изисква извършване на неколкократни повторения на процеса R, за да се подобри контраста. Повишаване броя на повторенията води до увеличение на получения контраст. Недостатък на големия брой повторения е увеличение на технологичното време за обработка.

1.6.3.5 Ъгъл на наклона на стъпката/отместването

При изпълнението на лазерна маркировка върху текстилни материали – тъкани или плетени, влияние оказва релефа на повърхността им. Маркирането в различни перпендикулярни направления оказват различно въздействие върху количеството избелване на плата. Това се дължи на различните изпъкналости и падини между втъканите или вплетени нишки в структурата на плата. Структурната неравномерност на повърхността определя различни по площ, разположение и височина площадки, които влияят на фокусировката на лазерния лъч. Може да се твърди че във всяко различно направление върху повърхността съществува различен релеф. Най-съществена разлика може да се определи по протежение на основа и вътък при тъканите материали и по бримков ред и стълб при плетените.

Също така не са изключени и междинни направления които подобряват или отслабват маркировката.

1.6.4 Фактори с комплексно влияние

Факторите имащи комплексно влияние са:

- линейна плътност на енергията – E_l, $J.m^{-1}$;
- линейна импулсна плътност - I_p;
- ефективна енергия - E_{ef};
- обемна плътност на погълнатата енергия - E_ρ;
- коефициент на припокриване k_{nn}, %;
- критична плътност на мощността за стопяване $q_{kpm}, W.m^{-2}$;
- критична плътност на мощността за изпаряване $q_{kpv}, W.m^{-2}$.

Взаимовръзките между факторите от трите групи, разгледани по-горе, се описват от факторите с комплексен характер (E_l, I_p, E_{ef} и E_ρ) и се изразяват чрез следните формули [Ангелов, Н., (2011); Динев, Ст., (1993); Lazov, L. (2019)]:

$$\mathrm{E}_l = \frac{A.P_a}{\mathrm{v}}, \qquad J.m^{-1} \tag{1.30}$$

$$I_p = \frac{f}{\mathrm{v}}, \qquad m^{-1} \tag{1.31}$$

$$E_{ef} = \mathrm{E}_l.I_p = \frac{A.P_a.f}{\mathrm{v}^2}, \qquad J.m^{-2} \tag{1.32}$$

$$E_\rho = \frac{A.E}{\mathrm{V}}, \qquad J.m^{-3} \tag{1.33}$$

В зоната на лазерно въздействие се получава нагряване, топене или изпарение в зависимост от погълнатата енергия от единица обем, която може да бъде пресметната количествено чрез зависимост (1.33).

Коефициента на припокриване k_{nn} е комплексен параметър и от него зависят както параметрите свързани с лазерния източник, така и технологичните [Leone C., 2018].

$$k_{nn} = f\left(f, V, d_f\right) \tag{1.34}$$

$$k_{nn} = \left[1 - \frac{V/f}{d_f + V.\tau_p}\right].100,\% \qquad (1.35)$$

1.7 Лазерни източници за маркиране на текстилни материали

На световния пазар се предлага огромно разнообразие от лазерни източници и лазерни технологични системи с различни характеристики и приложение [Вейко, В., (2007)]. Това налага за всеки конкретен случай да се подбере лазер с добро качество на лъча и с дължина на вълната, която се абсорбира най-добре от конкретния материал.

Таблица 1.4. Характеристики на някои лазерни източници, прилагани за маркиране на органични материали

Параметър		Вид на лазера			
		CuBr	CO2	Fiber	Excimer
Дължина на вълната	$\lambda, \mu m$	0,511-0,578	10,64	1,064	0,193
Средна мощност	P_a, W	10	50	10-40	24
Импулсна мощност	P_p, kW	17-34	10	5,32-17,8	1700
Импулсна енергия	E_p, mJ	0,50-1,02	0,2	0,16-1,33	24
Продължителност на импулсите	τ_p, ns	30	20	30-250	14
Честота на импулсите	f, kHz	1-20	0,20-0,50	20-30	1
Диаметър на мин. фокусно петно	d_f, mm	0,03	0,15	0,15	0,2
Качество на лъча	M^2	1,7	1,5-2	1,1	2
Точност на позициониране	μm	< 2,5	< 10	< 2,5	< 2,5
Коефициент на полезно действие	КПД, %	10	20	40	10

Технологичният процес на лазерно маркиране е сложен и за получаването на добър резултат при икономически оправдани разходи, е необходимо да се намери най-подходящият лазер за съответното производство. Маркировката на текстил изисква лазери с дължина на вълната, която се абсорбира най-добре от материала, с ниска импулсна енергия и по-ниска плътност на мощността, отколкото за маркиране на метали. Основните параметри на някои лазери за маркиране са дадени в табл.1.4. [Ангелов, Н., (2011); Lasers for Materials Processing, (2014), www.sp-laser.com; www.trumpf.com; www.acsys.de; www.rp-photonics.com; www.cemark.bg; www.pulslight.net].

Литература

2D Codes Step By Step, Connecting the dots to understand the verification report , http://barcode-test.com/wp-content/uploads/2012/06/FINAL-VERSION-1- Compiled-Manual-August-2014.pdf

Ashdown, S. P., Loker, S., Schoenfelder, K., & Lyman-Clarke, L. (2004). Using 3D scans for fit analysis. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management, 4, 1–12.

Bosman, J., Processes and strategies for solid state q-switch laser marking of polymers, PhD Thesis, ISBN 90-365-2346-X, Netherlands, 2007

Brown, M., C. Arnold, (2010), Fundamentals of laser – material interaction and application to multiscale surface modification, Laser Precision Microfabrication, Springer Series in Materials Science 135, DOI 10.1007/978-3-642-10523-4_4, p.91-120, 2010.

Chow Y. L., (2011) To study the effect of laser irradiation on the properties of cotton fabric, Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, January 2011.

D'Apuzzo, N. (2007). 3D body scanning technology for fashion and apparel industry. In Electronic Imaging 2007 (vol. 6491, pp. 64910O–649102). International Society for Optics and Photonics.

Esteves, F.; Alonso, H., (2007) Effect of CO2 laser radiation on surface and dyeing properties of synthetic fibres. Res. J. Text. Appar. 2007, 11, 42–47.

Ferrero F, Testore F, Tonin C, (2002). Surface degradation of linen textiles induced by laser treatment: comparison with electron beam and heat source. Autex Res J 2002; 3: 664–668.

Ghoranneviss, M., Shahidi, S., Moazzenchi, B., Anvari, A., Rashidi, A., Hosseini, H., (2007). Comparison between decolorization of denim fabrics with oxygen and argon glow discharge. Surf. Coat. Tech. 201, 4926–4930

Gohl, E., L. Vilensky,(1989), Textile Science, Longman Cheshire, Melbourne, 1989.

https://www.architerials.com/2010/08/3d-printed-fabrics-surprise-theyre-real-and-theyre-sustainable/trackback/index.html

https://www.ctec-sz.com/ - Център за изпитване и европейска сертификация.

https://www.goldenlaser.cc/solutions/laser-cutting-engraving-to-meet-the-unlimited-potential-of-fashion-design/

Hung, O.N.; Chan, C.K.; Kan, C.W., (2016), Introducing variations in colour of cotton fabric-reactive dye systems through irradiation with a carbon dioxide laser. Color Technol. 2016, 132, 35–48

ISO 11145:2006 Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment – Vocabulary and symbols 2006 Preview ISO 11145:2016.

Juciene, M., Urbelis, V., Juchnevičienė, Ž., & Čepukonė, L. (2013). The effect of laser technological parameters on the color and structure of denim fabric. Textile Research Journal. doi:10.1177/0040517513494256.

Kan, C. W. (2014a). CO_2 laser treatment as a clean process for treating denim fabric. Journal of Cleaner Production, 66, 624–631.

Kan, C. W., (2014б), Colour fading effect of indigo-dyed cotton denim fabric by CO2 laser. Fiber. Polym. 15 (2), 426–429

Kan, C., Yuen, C., & Cheng, C. (2010). Technical study of the effect of CO_2 laser surface engraving on the colour properties of denim fabric. Coloration Technology, 126, 365–371.

Kyttänen, J., Fredom of Creation, Milan, 2012.

Laser marking technologies, (2016), Sintec Optronics Technology Pte Ltd, 2016.

Lasers for Materials Processing, (2014) Coherent, Printed in the U.S.A. MC-001-14-0M051-4 Inc, 2014.

Lasers of the 60's. (2010). In WriteWork.com. Retrieved 2023, from https://www.writework.com/essay/lasers-60-s

LATI Industria Termoplastici S.p.A., Italy, Laser Marking of Thermoplastics, 2016.

Lawrence, J.R, Pou J., Low, D.H.Y, Toyserkani E. (2017). Advances in Laser Materials Processing, 2nd edition. Woodhead.Elsevier, Cambrigde.

Lazov L., N. Angelov, (2012), Optimization of the process of laser marking of products made of tool steel. Contemporary Materials, III-1 (2012), 189 – 193.

Lazov, L., E. Teirumnieks, N. Angelov, E. Teirumnieka (2019) Methodology for Automatic Determination of Contrast of Laser Marking for Different Materials, ISSN 1691-5402, Rezekne Higher Education Institution, Rezekne 2019, http://dx.doi.org/10.17770/etr2019vol3.4143.

Lazov, L., Hr. Deneva, P. Narica, (2015), Laser Marking Methods, ISSN 1691-5402, Rezekne Higher Education Institution, Rezekne 2015.

Leone C., E. Bassoli, S. Genna, A. Gatto, (2018), Experimental investigation and optimisation of laser direct part marking of Inconel 718, Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, 2018.

Lerch, T., M. Macgillivary, T. Domina, (2007), 3D Laser Scanning: A Model of Mulidisciplinary Research, JTATM Volume 5 Issue, 4, Fall 2007.

Mallik-Goswami, B., & Datta, A. K. (2000). Detecting defects in fabric with laser-based morphological image processing. Textile Research Journal, 70, 758–762.

Microscan, How to read the ISO/IEC 15415 verification report, http://www.innovarsystems.com/pdf/M120-Verify_IsoFAQ_IsoC15415FAQ.pdf

Mondal, M. I. H., & Khan, M. M. R. (2014). Characterization and process optimization of indigo dyed cotton denim garments by enzymatic wash. Fashion and Textiles, 1(1), 1-12

Mursalin, T. E., Eishita, F. Z., & Islam, R. (2005). Fabric defect inspection system using neural network and microcontroller. Statistics, 50, 100.

Musa E, (2011) “Line-laser-based yarn shadow sensing break sensor,” Opt. Lasers Eng., vol. 49, no. 3, pp. 313–317, Mar. 2011.

Musa E., (2009) “Line laser-based break sensor that detects light spots on yarns,” Opt. Lasers Eng., vol. 47, nos. 7–8, pp. 741–746, Jul. 2009.

Nayak R., R. Padhye, (2016), The use of laser in garment manufacturing: an overview, Fashion and Textiles volume 3, Article number: 5 (2016), https://link.springer.com/article/10.1186/s40691-016-0057-x

Nayak, R., Padhye, R. (2016), The use of laser in garment manufacturing: an overview. Fash Text 3, 5, 2016. https://doi.org/10.1186/s40691-016-0057-x

Nayak, R., Padhye, R., Wang, L., Chatterjee, K., Gupta, S. (2015a). The role of mass customisation in the apparel industry. International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 8, 162–172.

Ortiz-Morales, M. N., Poterasu, M., Acosta-Ortiz, S. E., Compean, I., & Hernandez-Alvarado, M. R. (2003). A comparison between characteristics of various laser-based denim fading processes. Optics and Lasers in Engineering, 39, 15–24.

Ozguney, A.T., Ozcelik, G., Ozkaya, K., (2009). A study of specifying the effect of laser fading process on the colour and mechanical properties of the denim fabrics. Tekst. ve Konfeksi yon 2, 133–138,

Qi J, Wang KL, Zhu YM., (2003), A study on the laser marking process of stainless steel. J Mater Process Technol 2003;139:273–6. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00234-6.

Rasheed, A., Zafar B., Rasheed A., Ali N., Sajid M., Hanif Dar S., Habib U., Shehryar T., Mahmood M., (2020), "Fabric Defect Detection Using Computer Vision Techniques: A Comprehensive Review", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, Article ID 8189403, 24 pages, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/8189403

Ribolzi, S., Merckle, J., Gresser, J., & Exbrayat, P. (1993). Real-time fault detection on textiles using opto-electronic processing. Textile Research Journal, 63, 61–71.

Schuöcker, D., G. Schuöcker ,(2014), Advanced Laser Materials Processing, CO2 Laser, London, OMICS International, 2014.

Schuöcker, D.,(1998), Handbook of the Eurolaser Academy, Chapman & Hall, London, 1998.

Solaiman, Md., J. Saha, (2015), Comparative Analysis of Manual Fading and Laser Fading Process on Denim Fabric, Science Discovery, Vol. 3, No. 6, 2015

Štepánková, M, Wiener J and Rusinova K., (2011), Decolorization of vat dyes on cotton fabric with infrared laser light. Cellulose 2011; 18: 469–478

Štepánková, M., Wiener, J., Dembický, J, Impact of Laser Thermal Stress on Cotton Fabric, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2010, Vol. 18, No. 3 (80)

Tarhan, M., & Sarıışık, M., (2009). A comparison among performance characteristics of various denim fading processes. Textile Research Journal, 79, 301–309.

Textile World Magazine, (2016) - SEI Laser Introduces Digital And Eco Sustainable Laser Solutions at ITMA'15,.

Tong, J., Zhou, J., Liu, L., Pan, Z., & Yan, H. (2012). Scanning 3d full human bodies using kinects. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 18, 643–650.

Tuz L., (2013), Quality of marks on metals made with the use of the Nd:YAG laser engraving method. Metall Foundry Eng. 2013;39(1):55–64. doi: 10.7494/mafe.2013.39.1.55

US6753501 B1, Processing of textile materials using laser beams and material sized in larger widths, 2004.

Wisniowski, M., (2013), Preamble Optical Properties of Fiber Materials, 2013.

www.acsys.de

www.cemark.bg/bg/laser-marking.html

www.dijoprint.com

www.ec.europa.eu/enterprice/polices/single-market-goods/cemarking/

www.pulslight.net/laser-marking/

www.rp-photonics.com/excimer_lasers.html

www.sitopechat.com

www.sp-laser.com

www.tampoprint.com

www.trumpf.com

Yan, N., Zhu L., Yang H., Li N.,Zhang X., (2021), Online Yarn Breakage Detection: A Reflection-Based Anomaly Detection Method, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Vol. 70, 2021

Yuan G., S. Jiang, E. Newton, J. Fan, W. Au, (2013), Fashion Design Using Laser Engraving Technology. 8ISS Symposium-Panel on Transformation. Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, page 65-69, 2013.

Yuan, G. X., Jiang, S. X., Newton, E., Fan, J. T., Au, W. M. (2012). Application of laser treatment for fashion design. Journal of the Textile Institute,103, 48–54

Ангелов, Н., (2019), Влияние на скоростта и честотата на повторение на импулсите при лазерно маркиране на изделия от стомана 41Cr4. Автоматика и информатика, брой 1, 2019, 14-18.

Ангелов, Н.,(2011), Дисертация „Оптимизация на процеса маркиране с лазерно лъчение на образци от инструментална стомана“, 2011г.

Ангелова, Й., (2015а), „Лазерната технология за маркиране – настояще и бъдеще“, Международна научна конференция УНИТЕХ’15, III-160-166.

Ангелова, Й., (2015б), „Фактори, влияещи на процеса лазерно маркиране на някои промишлени материали – I част: Фактори свързани с материала“, Международна научна конференция УНИТЕХ’15, III-167-173.

Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., (2020), Технология лазерного кольорового маркуванная сталей. Вісник ХНАДУ, вип. 88, 2020, т. I, 137-142. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.1.137

Байродин, Ю., (1998), Основы лазерной техники, Киев, изд. Выша школа, 1998.

Василев, Н.,(1973), Промишлено осветление, Техника, София, 1973.

Вейко, В., (2007), Технологические лазеры и лазерное излучение, ГУ ИТМО, Санкт Петербург, 2007.

Вейко, В., А. Петров, (2009), Введение в лазерне технологии, учебно пособие, ИТМО, Санкт-Петербург, 2009.

Григорьянц, А., И. Шиганов, А. Мисюров,(2006), Технологические процесы лазер обработки, изд. МГТУ им. Н. Баумана, Москва, 2006

Динев, Ст., (1993), Лазерите в модерните технологии, Алфа, София, 1993г.

Динев, Ст., (1993), Лазерите в модерните технологии, Алфа, София, 1993г.

Замфиров, М., Н. Вучков,(2011), Нека бъде монохроматична, кохерентна и насочена светлина (50 години от създаването на лазера), стр.32-41, Светът на физиката, 2/2011г.

Иванчев, Н., Ст. Петров, Л. Христов,(1975), „Физика“, Техника, София, 1975.

Кеворкян, А., (1997), Текстилно материалознание и изпитвания, Техника, София, 1977г.

Кожухаров, Хр., Стокознание на промишлените стоки, Университетско издателство „Стопанство“, София, 1997г.

Лазов, Л., Н. Ангелов, (2011), Влияние на някои фактори върху процеса на лазерното маркиране на изделия от метали и сплави, III-527-531, МНК Унитех, Габрово, 2011.

Лилков, В., (2011), Атомна физика, изд. Ив. Рилски, София,2011г.

Милчевски, В., Технологии за дигитален печат върху текстил, Computer Magazine, 2014г.

Михайлова, В., (2005), Основи на физиката, Сиела, София, 2005.

Наредба за етикетирането и наименованията на текстилните продукти, Приета с ПМС №114 от17.05.2006г., Обн. ДВ. бр.44 от 30.05.2006г., изм. и доп. ДВ. бр.31 от 20.04.2012г.

Наредба за маркировката за съответствие със съществените технически изисквания към продуктите, Приета с ПМС № 164 от 03.08.2000г. обн. ДВ. Бр 66 от 11.08.2000г.

Недева, Д., (2014), Дисертация „Изследване на процеса лазерно заваряване на роторни и статорни пакети“, 2014.

Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016а) „Микроскопски анализ на памучни тъкани обработени с лазер“, Известия на Технически университет Габрово, Том 52`2016, стр.58-60, ISSN 1310-6686.

Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016б) „Моден дизайн с помощта на лазерни гравиращи технологии“, Известия на Технически университет Габрово, Том 52, 2016, стр.53-57, ISSN 1310-6686.

2 Текстилни материали и методики за изследване

2.1 Текстилно производство и потребление - тенденции

2.1.1 Световни тенденции в производството и потреблението на текстил

Материалите са навсякъде около нас и имат важна роля във всяка област на промишлеността и живота на хората. Основното приложение на текстилните материали е в класическите технологии (предене, тъкане, плетене, конфекциониране) за производство на прежди, платове, облекла и други изделия. През последните десетилетия обаче, наред с тях, много бързо се развиват иновативни технологии в които текстилните материали се използват за производството на текстил с ново приложение като технически текстил, „смарт“ текстил, медицински текстил, текстилни композити и други.

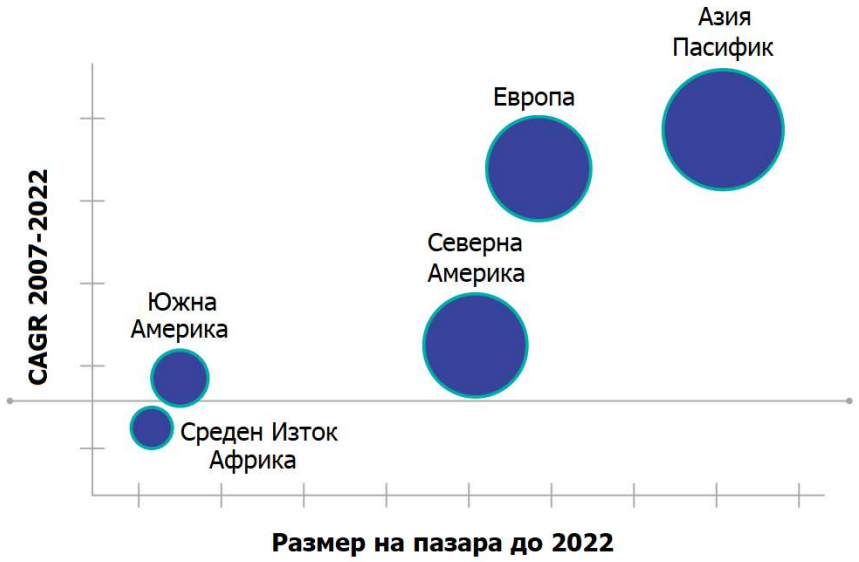
Според последните световни изследвания [www.lenzing.com, www.researchandmarkets.com; www.globenewswire.com], предприятията, изработващи технически текстил, които снабдяват с материали няколко промишлени сегмента, притежават висок иновационен капацитет, като осъществяват над 25% от своя оборот благодарение на нови продукти и се нареждат на трето място след автомобилната и електронната промишленост - фиг.2.1.

Фиг. 2.1. Технически текстил с оборот над 25% е на трето място в ЕС

Глобалният пазар на технически текстил се очаква да нарасне значително през следващия прогнозен период. Очаква се да има комплексен годишен темп на растеж (Compound Annual Growth Rate CAGR) от 6,2% до 2025 г. Техническият текстил е текстил, който се произвежда от синтетични и

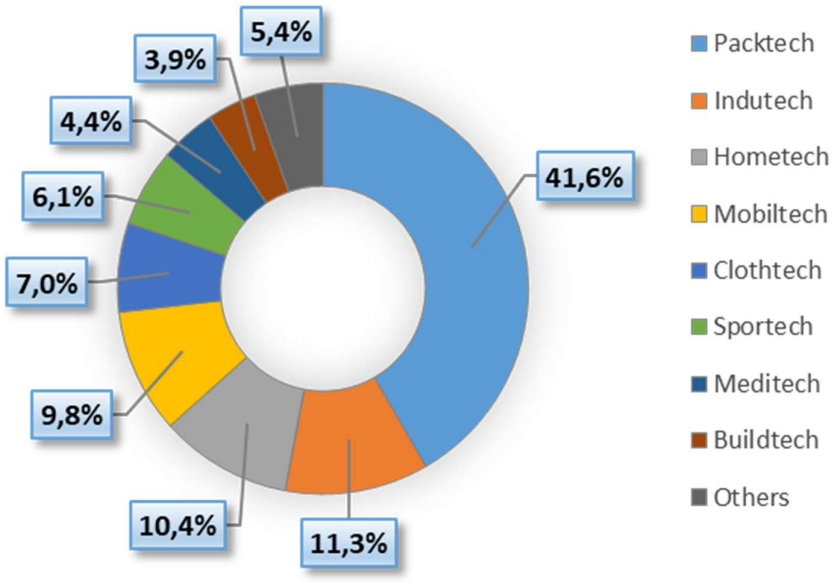
естествени влакна, като се обработва със специфични физични и химични процеси, за да се създаде продукт с подобрени показатели за качество и здравина отколкото традиционните текстилни изделия. Тези текстилни изделия се използват главно за облекло и покрития (облицовки) с подобрен външен вид в други области и приложения, включително мебелно производство, медицина и автомобилна промишленост.

В Европа пазарът на технически текстил се оценява с впечатляващо нарастване на CAGR от 4,8% до 5,2% през 2018 до 2022 г. с направленията Indutech, Mobiltech, Buildtech, Sportech и Oekotech, които стимулират растежа на техническия текстилен сектор [Marketsandmarkets Report (2022)]. По отношение на пазарите в Германия, Франция и Обединеното кралство се очаква те да стимулира растежа на техническия текстил в региона – фиг.2.2.



Фиг. 2.2. Растеж на пазара на технически текстил, по региони, 2022 (млрд. USD) [Marketsandmarkets Report (2022)]

Двигател номер едно за пазара на технически текстил е глобалното повишаване на осведомеността и търсенето на технически текстил. С нарастване на информираността за качеството, функционалността и наличността на техническия текстил се увеличава и търсенето на продукта. Все повече и повече потребители изискват гъвкав, издръжлив, висококачествен и издръжлив текстил. Независимо дали става въпрос за активно облекло, бельо или медицинско облекло, техническият текстил е по-добър от традиционния текстил. Сегментирането на отделните отрасли е показано на фиг.2.3. [Marketsandmarkets Report (2022)].



Фиг. 2.3. Сегментиране на пазара на технически текстил
(в Others са включени Protech, Agrotech, Geotech, Oekotech)

Meditech текстил: използван в медицинската индустрия, като хирургически престилки, маски и друго медицинско оборудване.

Mobiltech текстил: използвани в транспортната индустрия, като гуми и интериори на превозни средства.

Oekotech текстил: е екологично чист или „екологичен“. Тези текстилни изделия могат да бъдат направени от устойчиви материали и проектирани да минимизират въздействието си върху околната среда по време на производство, употреба и изхвърляне.

Packtech текстил: използва се за опаковане, като чанти и опаковки.

Protech текстил: използва се за защита, като защитно облекло, подплата за каски и въздушни възглавници.

Sportech текстил: използвани в спортната индустрия, като спортно оборудване и спортно облекло.

Agrotech текстил: използвани в селското стопанство, като покривки за култури, напоителни системи и покривки за силаж.

Buildtech текстил: използван в приложения в строителството и гражданското инженерство, като контрол на ерозията, дренаж и армировка.

Clothtech текстил: използва се в облекло, като спортно облекло и защитни костюми.

Geotech текстил: използва се в геотехнически приложения, като стабилизиране на склонове и контрол на ерозията на почвата.

Hometech текстил: използва се в домашно обзавеждане, като завеси, спално бельо и тапицерия.

Производителите на технически текстил предлагат текстилни решения с механични, обменни или защитни свойства, подходящи за конкретните нужди на крайните потребители. Техническият текстил е една от най-многообещаващите сфери на дейност за европейските текстилни предприятия с нарастващото значение благодарение на новите приложения в областта на медицината, спорта и отдиха, въздухоплаването, околната среда. Наблюдава се преход от традиционните текстилни технологии като плетене, тъкане и оплитане към по-новите технологии за композитни материали с ръст от 75% и нетъкани материали с ръст от 60% за последното десетилетие [Marketsandmarkets Report (2022)]. Разработват се материали за специални цели или приложения, с нови качества и изисквания, с много висока производителност. При тях могат да се комбинират текстил със стъкло, керамика, метал, или въглерод за да се създадат леки хибриди с невероятни свойства: усъвършенствани облицовки, като силиконови покрития и холограмни ламинати, променящи цвета, текстурата и дори формата. Произвеждат се текстилни материали за всяка нужда: регулиращи влагата и топлообмена, осигуряващи топлинната изолация, „дишащи“ материи, с подобрени експлоатационни качества и защита от различни опасности, с висока/ниска видимост, с повишена устойчивост на триене, за контрол на някой здравни показатели на човешкото тяло, с лесна поддръжка и високи естетически показатели и т.н. „Смарт-интерактивните“ текстили са материали и структури с вградени сензори, който могат да следят и реагират за промяна на налягане, болка, условия на околната среда или дразнители от механични, термични, химически, електрически, магнитни и други източници.

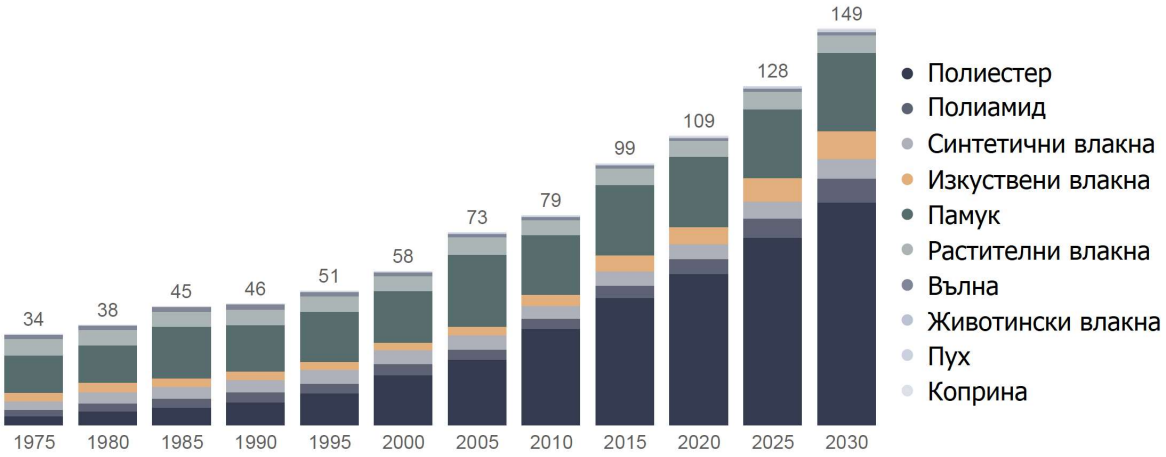
Размерът на пазара на технически текстил е оценяван на 169 млрд. USD през 2021 г. и се очаква да надхвърли 230 млрд. USD до 2028 г., показвайки 4,8% CAGR (комбиниран годишен темп на растеж) от 2022-2028 г. Двигателите на растежа включват главно нарастващото търсене на автомобилен и железопътен транспорт в Азиатско-тихоокеанския регион, медицински материали за еднократна употреба и комплекти за лични предпазни средства, строителна индустрия в Северна Америка и нарастващо търсене от опаковъчната индустрия, според Global Market Insights [employmentnews.gov.in].

Бъдещето на текстилните материали е в прилагането им в иновативни технологии или в разработването на все по-голямо разнообразие от материали с нови свойства за удовлетворяване на настоящите и бъдещите

изисквания: от супер-абсорбиращи пелени, към изкуствени органи и строителни материали за космически станции.

2.1.2 Глобален пазар на текстилни влакна

Производството, употребата и депонирането на влакна и текстилни материали имат значително въздействие върху хората и планета. Световното производство на влакна се увеличава отново [www.textileexchange.org] до рекорд от 113 милиона тона през 2021 г., след дължим лек спад поради COVID-19 през 2020г. През последните 20 години глобалното производство на влакна се е удвоило от 58 милиона тона през 2000г. до 113 милиона тона през 2021 г. и се очаква да нарасне до 149 милиона тона през 2030г. – фиг.2.4.



Фиг. 2.4. Световно производство на влакна, млн. тона [www.textileexchange.org]

Полиестер

Обемът на производство на полиестерни влакна нараства от 57 милиона тона през 2020 г. до 61 милиона тона през 2021 г. С пазарен дял от 54% от глобалните общи влакна производство през 2021 г. полиестерът продължава да е най-широко произвежданото влакно. Пазарният дял на рециклираните полиестерните влакна леко се увеличава от 14,7% в 2020 г. до 14,8% през 2021г. Ангажираността на повече от 132 марки производители на полиестер е да се увеличи дела на рециклиран полиестер до 45% до 2025 г.

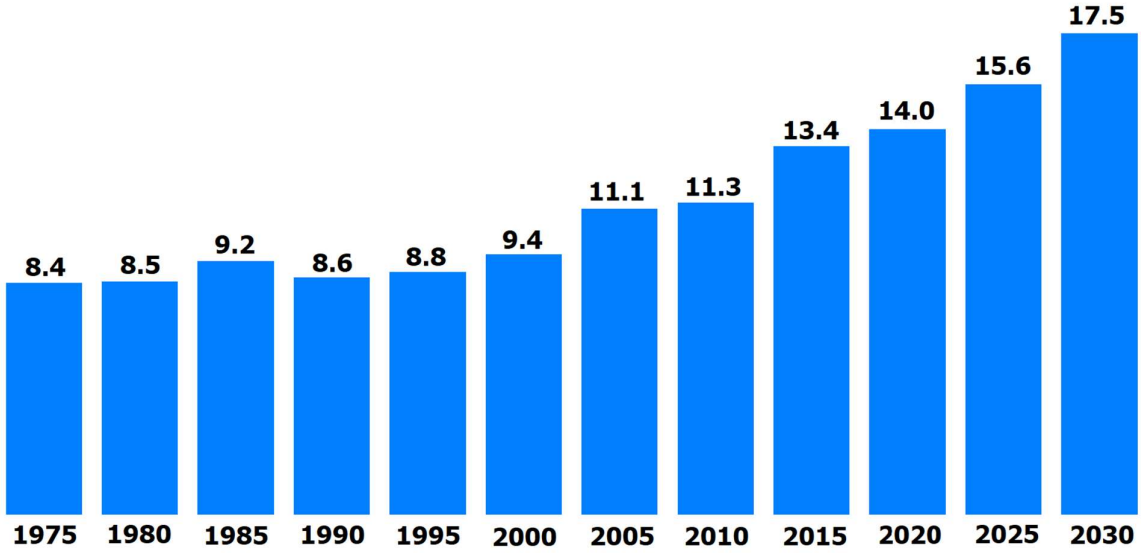
Памук

Памукът е второто най-важно влакно в аспект на пазарен обем. Пазарният дял на „предпочитания“ памук намалява от 27% от общото производство на памук през 2019/20г. до 24% през 2020/21 след години на растеж. Причините се състоят в различни фактори, включително вариации на времето, промени в програмата „Better Cotton“, пазарните условия и социално-политически предизвикателства.[www.textileexchange.org].

Полиамид

Полиамидът има пазарен дял от 5% от световния пазар на влакна през 2021г. Поради технически предизвикателства и ниска цена за полиамид на основата на изкопаеми суровини, пазарният дял на рециклираният полиамид е само 1,94% от всички полиамидни влакна. Полиамидът е второто най-използвано синтетично влакно което има значителен потенциал за въздействие чрез преминаване към рециклиран и биобазиран полиамид.

Световното производство на влакна на човек се е увеличило от 8,4 килограма на човек през 1975г. до 14,3 килограма на човек през 2021г. – фиг.2.5. Нарастването на производството на влакна оказва значително въздействие върху хората и планетата. Осъзнаването на спешната нужда от по-отговорно използване на ресурсите и отделяне на растежа от потреблението на ресурси нараства; промяната обаче все още не се случва в необходимия мащаб и скорост.



Фиг. 2.5. Световно производство на влакна, килограм/човек [www.textileexchange.org]

2.2 Материали за изследване

2.2.1 Класификация на текстилните материали

Текстилните материали спадат към група В на промишлените материали. Тя обединява полимерните материали, които представляват една значителна част от съвременните материали (пластмаси, каучуци, дървесина, текстил и др.). Те са високомолекулни съединения, изградени от голям брой малки повтарящи се единици (мономери), имат огромни по маса и размери макромолекули, наречени полимери. Полимери с молекулна маса над 12000 образуват влакна. Когато тези влакна се използват за производство на текстилни материали, те се наричат текстилни влакна - фиг.2.6.

Сред основните предимства на полимерните материали са: ниска цена, относително лесно производството, висока устойчивост на агресивни среди, ниска плътност, ниска топлопроводимост, добри оптични свойства и др. Някои от недостатъците на полимерите са: ниска устойчивост на топлина, голямо топлинно разширение, лесно деформиране и др. По отношение на нагряването се разделят на термопластични полимери и термореактивни [Стоянов Б., (2008), Sinclair R., (2015)].

В текстилната промишленост намират приложение изключително голям брой текстилни суровини, различни по своя произход, строеж, химичен състав, дължина на влакната, здравина, разтегливост, хигиенни свойства. За улеснение на тяхното изучаване е изградена класификация, при която текстилните влакна са подредени в групи съобразно с техния произход. В нея ясно се открояват двете основни групи – естествени и химични.

Естествените влакнести материали, наречени още класически, са онези текстилни суровини, познати на човечеството от хилядолетия, които се получават от природни продукти.

Химичните влакнести материали са текстилни суровини, получени чрез химична преработка на природни или синтетични високомолекулни съединения.

Текстилните влакнести материали, подредени в посочените на фиг.2.6 групи, се характеризират с някой общи свойства. Така например групата на растителните влакна притежава голяма здравина, но по-малка разтегливост, лъскавина, хигроскопичност, ниски термопластични свойства, лоша топлозащита, но добра електроизолационна способност и др. Групата на влакната от животински произход (без естествената коприна) имат по-малка здравина, но по-голяма разтегливост, висока хигроскопичност и топлозащитна способност, по-голяма устойчивост на стареене и др. Свойствата на химичните влакна се определят от структурата и химичния състав на съединението, от което са изградени. Някой от свойствата могат да бъдат изменяеми в определени граници и да наподобяват тези на естествените влакна. Ето защо в практиката се говори за химични влакна памучен тип, вълнен тип и др.

Фиг. 2.6. Класификация на текстилните влакнести материали

2.2.2 Основни свойства на текстилните материали

Текстилните полимери се състоят от органични компоненти. Съществува огромно разнообразие от полимери и то продължава да се увеличава. Свойствата им варират в големи граници, за почти всяко приложение [Kılınç, A., M. (2017), Бояджийски, Г., Е. Кънчев, (2002), Кеворкян, А., (1977)]. Тези материали са многообразни и свойствата, които ги характеризират, са също така много:

Дебелина - зависи от състава и структурата на преждата и на плата, от финишната обработка (кардиране, крепиране и др.) и варира в границите 0,1÷5,0 mm [Кеворкян, А., (1977)]. *Дълбочината на лазерната обработка зависи от дебелината на плата.*

Плътност - характеризира се с броя на вътъчните (вътъчна гъстина $P_в$), респективно броя на основните нишки (основна гъстина P_o) в единица дължина, а за плетените платове: брой бримкови редове (гъстина на редовете $P_р$) и брой бримкови стълбчета (гъстина на стълбчетата $P_{ст}$) в 50 mm. Отношението на гъстините на тъканите ($k_р = P_в/P_o$) най-често е в границите 0,75÷0,90. Тъканите структури са неуравновесени и силно анизотропни, ако $P_в < P_o \rightarrow k_p < 1$. Когато $P_в = P_o \rightarrow k_p = 1$ и структурите имат квадратен строеж с изотропни свойства. Отношението на гъстините на бримките за плетивата ($k_р = P_p/P_{ст}$) е около 0,8 и, ако се отклонява много от тази стойност, означава че плетивото има големи въздушни пространства между нишките. Плътността е пряко свързана със запълването на тъканта или плетивото и определя неговата порьозност. По-плътните структури имат намалена порьозност и просветите между нишките са по-малки. *Оптичните свойства на платовете, а следователно и лазерната обработка, ще се влияят съществено от гъстините на нишките*.

Свиваемост - по ширина или по дължина, зависи от отнасянето на плата към различни въздействия (химическа обработка, омокряне, пране, гладене). *Като резултат от свиваемостта, формата и размерите на маркировката може да се променят*.

Разтегливост - удължението при приложена сила. Удължението на платовете зависи от структурата и може да бъде по ширина или по дължина. *В зависимост от вида на разтегливостта (пластична или еластична), формата и размерите на маркировката ще се променят в различна степен.*

Здравина до скъсване - максималното натоварване, което плата може да издържи преди да се скъса. Лазерната маркировка може да разруши част от влакната и/или нишките и това ще доведе до намаляване на здравината на плата.

Устойчивост на триене - при експлоатация на съответното изделие, възниква триене между отделните му части или с други предмети и материи в резултат на което се променят механичните свойства. Устойчивостта се определя от суровинния състав, от качество на повърхността и структурата на плата. Колкото износоустойчивостта на плата е по-голяма, толкова изделието има по дълъг живот. *Износоустойчивостта на плата има отношение и към трайността на маркировката*.

Естетични свойства - отнасят се до цвят, блясък, релеф, десен, опип, мачкаемост, драпируемост и др. *Тези свойства в голяма степен влияят на контраста на маркировката*.

Хигиенни свойства (устойчивост на микроорганизми, хигроскопичност, топлопроводимост, паро- и въздохопропускливост и т.н.) – определят се от вида на текстилния материал и структурата му. *От тези свойства отношение към маркировката има най-вече топлопроводимостта на материала*.

Горе посочените свойства на текстилните платове имат отношение към маркировката с лазер, но за процеса на лазерно маркиране от най-съществено значение са две групи свойства: *оптични и топлофизични*.

- Оптични свойства на влакната.

Оптичните свойства на платовете зависят от вида, структурата и свойства на: *влакната, преждата и плата.* Те трябва да се вземат под внимание при багрене, печатане, сравняване на цвета, както и при маркиране с лазер [Wisniowski, M., (2013)].

Лъскави или прозрачни влакна. Свойствата „блясък“ и „прозрачност“ на влакната са взаимозависими и затова се срещат заедно. Колкото влакната са по гладки, толкова са по лъскави. В тази категория се включват естествените, синтетичните и изкуствените коприни. Лъскавината е в резултат на високия дял на бяла светлина, която се отразява равномерно от гладката повърхност на влакното.

Матови или непрозрачни влакна. Матови и непрозрачни обикновено са памучните и вълнените влакна. Те отразяват много малка част от бялата светлина, а в по-голяма степен я поглъщат. Следователно липсата на блясък

на памучните и вълнените текстилни материали, в сравнение с техните синтетични еквиваленти се дължи на това поглъщане.

Влакна с различен химичен състав. Когато влакна с различен химически състав, като памук и полиестер например, трябва да бъдат обработени с лазер, те неизменно реагират по различен начин на светлинния лъч. За да се постигне маркировка с еднакво качество (контраст), се изискват различни настройки на параметрите на лазерната система.

- Оптични свойства на нишките.

Коприни или прежди. Коприните се състоят от филаменти и са много по-гладки от преждите, изпредени от щапелни влакна. Коприните отразяват бялата светлина, което ги прави по-лъскави. Преждите, състоящи се от влакна, са с по-неравномерна повърхност от филаментните коприни и поради тази причина не са лъскави.

Силно или слабо пресукани прежди. Силно пресуканите прежди имат по-гладка повърхност в сравнение със слабо пресуканите прежди. Меките и рехави прежди са с по-неравномерна повърхност и с много стърчащи влакънца. От тук следва, че преждите с висок сук отразяват по-голяма част от падаща бяла светлина в сравнение с преждите с нисък сук, и са с по-голям блясък.

Дебели или тънки нишки. Преждите по-голяма линейна плътност (дебелина) са по-скоро по-матови и по-тъмни в сравнение с еквивалентните, но с по-малка линейна плътност (тънки) нишки. Структурата на дебелите прежди води до абсорбиране на повече светлина, което води до по-тъмен цвят в сравнение с тънките нишки.

Текстурирани прежди. Неравномерната повърхност на текстурираните прежди поглъща много светлина и разпръсква по-голяма част от бялата отразена светлина. Така се получава цвят с по-ниска стойност от съответната нетекстурирана прежда.

- Оптичните свойства на платовете.

Оптичните свойства на платовете до голяма степен се определят от оптичните свойства на влакната и преждите от които са изградени. Има и други фактори, които оказват съществено влияние, като: повърхността на плата, структурата, плътността и дебелината на плетените, тъканите и нетъканите платове.

Платове с гладка или грапава повърхност. Колкото повърхността на плата е по-гладка и равномерна, толкова той е по-лъскав, при еднакви други параметри, защото отразява по-голяма част от попадащата бяла светлина. Платовете с грапава повърхност поглъщат по-голяма част от падащата светлина. Цветът на гладките платове ще има по-светли стойности в сравнение с платовете с кардирана, развлачена, мъхеста или друга

неравномерна повърхност. Тъканите с неравномерна повърхност абсорбират повече от падащата светлина, отколкото тези с по-гладки повърхности, и така те са по-матови. *Текстилните платове имат грапава повърхност и това оказва много съществено влияние при лазерното маркиране*.

Непрозрачни и прозрачни материи. Непрозрачните платове имат по-тъмен, по-матов цвят, защото абсорбират повечето от падащата бяла светлина. Полупрозрачните платове имат по-светъл цвят от съответните непрозрачни платове. Цвета на дрехата, изработен от прозрачен плат, ще бъде повлиян от цвета и оптичните свойства на материята, както и от цвета на кожата, върху които се носи плата.

- Отнасяне към нагряване.

При нагряване целулозата, а следователно и памука, се овъглява (карбонизира) без да се стопява. Термичната деструкция настъпва от 150÷180°C и здравината на влакната намалява съществено, променя се и цвета. В резултат от деструкцията полимерната верига се разрушава, като дължината й намалява, респективно намалява и средната й молекулна маса. Около 220°C протича процес на встъкляване при което целулозата преминава от високоеластично в псевдопластично състояние. При 300°C резултата е карбонизация.

2.2.3 Избор на материали за маркиране

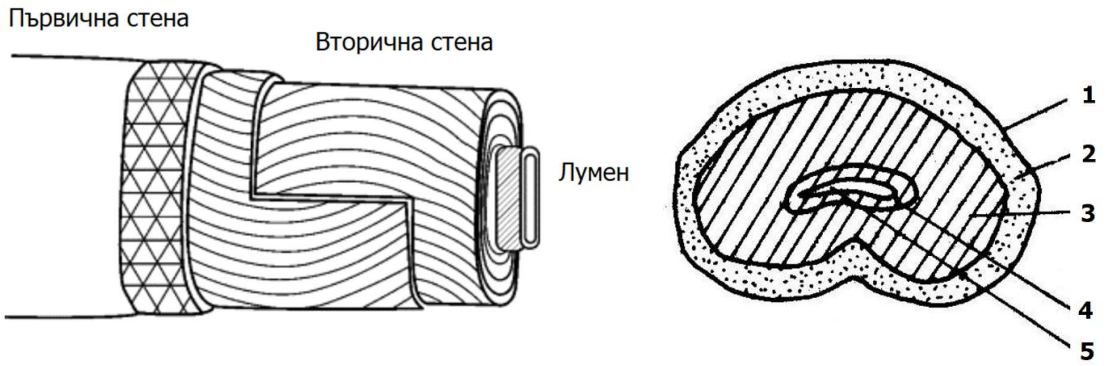
Памукът е безспорният лидер сред естествените влакна, въпреки увеличеното производство на изкуствени тъкани, влаган в облеклото, заради незаменимите му качества като: регулатор на топлината на тялото, приятното му поведение при допир с кожата, не предизвикващо алергии и незаменимия комфорт при носене. Данните за използването на памук са от праисторически времена (Пакистан - 6000г. пр.Хр.; Мексико и долината на река Инд - фрагменти от памучен плат 5000г.пр.Хр.) [en.wikipedia.org/wiki/Cotton; Kılınç, A., M. (2017)].

Памукът се добива от около 2,5% от обработваемата земя в света и световното му производство възлиза на около 25 милиона тона годишно [Marketsandmarkets Report (2022)]. Около 80 държави в света го отглеждат, като шест страни - Китай, Бразилия, Индия, Пакистан, САЩ и Узбекистан - произвеждат повече от 80% от общата продукция. Растението (Gossypium), от което се добива памука, представлява многогодишен храст от влакната на който се правят прежди, платове и изделия. Около 60% от памучно влакно се използва като прежда и конци в широк спектър от дрехи, най-вече в ризи, тениски, дънки, палта, жилетки, и бельо. Памучни са голяма част от изделията с битово и техническо предназначение: като пердета, чаршафи, калъфки за възглавници, кърпи, огнезащитни облекла, респиратори,

бинтове, филтри, и други промишлени продукти. Последните години се наблюдава все по-голям възход в производството на 100% органичен памук наречен още „био памук“ (т.е. екологично чист памук) [Василева, Я., (2011)]. Той отговаря на световните стандарти GOTS (Global Organic Textile Standard) за екологично чисто производство на агенцията Контрол Юниън Сертификейшънс (т.нар. ЕКО текстил), което гарантира чистия му произход. Тази суровина се използва основно в производството на детските продукти. Производството на органичен памук намалява замърсяването на почвата с токсини, той е с несравнимо по-добро качество, производството му спестява енергия и е инвестиция в устойчива икономика.

- Структура и състав на памучното влакно.

Растеж на памучното влакно. Памучните влакна представляват израстъци на памучното семе. При растежа си отделни клетки от повърхностния му слой започват да се удължават и в продължение на 15÷20 дни достигат максималната си дължина. В това състояние влакното се състои от: тънка удължена клетъчна стена 2 (фиг.2.7), наречена първична, ядро и клетъчно съдържание. Започва периодът на узряване. За всяко денонощие клетъчната стена започва да се удебелява, т. е. да се натрупват допълнителни слоеве от първичната стена по посока на ядрото. Образува се т. нар. вторична стена 3. Натрупването на допълнителните слоеве протича бавно (до пълното узряване на влакното), след което започва изсъхването. При това клетъчното съдържание се сгъстява и се отлага по вътрешната страна на вторичната стена - образува се третична стена 4. В нея са включени остатъци от протоплазмата и багрилни вещества. В средата се образува каналът 5, наречен лумен. Повърхностният слой 1 на влакното е покрит с восъчни и пектинови вещества.



Фиг. 2.7. Строеж на текстилно влакно [Dochia, M., Z. Roskwitalski, (2012)]

Ако се направи напречен разрез на памучно влакно, ще се установи, че в процеса на растежа му той има ясно изразено кръгло сечение. При

узряването в резултат на натрупването на допълнителните слоеве влакното започва да се свива и едновременно да се сплесква. Узрялото влакно вече, има сплесната форма. То представлява куха тръбичка с удебеления по ръбовете и заострен връх. Долната му част има следи от разкъсване вследствие на отделянето му от семето. Външната му повърхност е със спиралообразни надлъжни бразди. Влакното е усукано около оста си в различни посоки и има слоеста структура. Напречното сечение на узрялото памучно влакно е бобообразно или бъбрековидно [Dochia, M., Z. Roskwitalski, (2012), Kılınç, A., M. (2017); Стоянов Б., (2008); Кеворкян, А., (1997)].

- Свойства на памучното влакно.

Дължина на влакното. Дължината на памучните влакна е една от важните характеристики, тъй като тя определя предивната им способност, здравината, правилното им протичане на технологичния процес, рандемана.

Памучното влакно е сравнително късо (от 10 до 60 *mm*). Дължината му се изразява в mm с две числа, между които се поставя наклонена черта – например 25/26. Този начин на изразяване се обяснява с разделянето на памучните влакна на дължинни групи в интервал от по 1 *mm*.

Според дължината те се подразделят на:

- късовлакнести – до 24/25 *mm*;
- средновлакнести – от 25/26 до 33/34 *mm*;
- дълговлакнести – над 34/35 *mm*.

Дължината на памучните влакна се изразява със следните характеристики – средноаритметична дължина по брой L_n; модална дължина L_M и щапелна $L_{\text{щ}}$.

Дебелина на влакното. Узрелите влакна имат дебелина 10÷40 μm и широчина до 8 μm . В зависимост от дебелината памучните влакна с нормална зрелост се подразделят на:

- тънко влакно – под 1,66 *dtex*;
- среднодебело влакно – от 1,66 до 2,0 *dtex*;
- грубо влакно – над 2,0 *dtex*.

При недозрелия памук дебелината е по-малка, а при пълно неузрелия - 1 *dtex*.

За характеризиране на дебелината на памучните влакна е въведен комплексен показател, наречен микронерна стойност. Според нея памукът се окачествява, както следва:

- много фин – под 3,0;
- фин – от 3,0 до 3,9;

- среден – от 4,0 до 4,9;
- полугруб – от 5,0 до 5,9;
- груб – над 6.

Зрелост на памука. Външният диаметър *D* на влакното остава непроменен пра двата периода на развитието му, а диаметърът на канала *d* започва да намалява през втория период. Ето защо отношението *D/d* е показател, според който се отчита степента на зрелост.

Колкото по-зрели са влакната, толкова по-голямо е целулозното им съдържание, по-малко са нецелулозните примеси, по-дебели са стените, по-голяма е здравината, но са по-груби влакната. Това е причина прежда, изработена от напълно зрели влакна, да е по-слаба от прежда, изпредена от ненапълно зрели памучни влакна. За първи път това е отбелязано през 1929г. от проф. Федоров, който установява т. нар. памучен парадокс [Кеворкян, А., (1997); Стоянов Б., (2008)]. Намаляването на здравината на преждата се обяснява с факта, че при зрелите влакна специфичната здравина е по-малка от тази на ненапълно зрелите. Освен това в сечението на преждата участват по-малък брой влакна.

Сред памучните влакна се срещат освен неузрели и мъртви влакна. Те се получават вследствие на измръзване и нарушаване на храненето на памуковото растение. Неузрелите влакна са с неоформена вторична стена, а при мъртвите тя липсва. Мъртвите влакна а гладки, бе извивки, крехки, с малка здравина и еластичност; при предачния процес образуват пъпки; багрят се различно от узрелите.

Извитост на влакното. Извитостта на памучните влакна се измерва с броя на усукванията на 180° около оста в дължина 1 *cm*, които достигат 40÷120 извивки. Тя се дължи на спираловидното разположение на фибрилните снопчета. Най-голяма е в средата на влакната, а към краищата намалява. Заостреният край няма извивки. По-тънките влакна имат по-голяма степен на извитост. Този показател има също важно технологично значение. На него се дължат сцеплението, между влакната в преждата и допълнителната разтегливост.

Здравина и разтегливост. Здравината на памучните влакна зависи от сорта на памука, условията, при които е отгледан, и от степента на зрелост. Памучното влакно е сравнително здраво, но с малка еластичност. В мокро състояние здравината му се увеличава с около 15 %. Нараства и разтегливостта. При усукване памучното влакно изменя здравината си. При 26 *сука/ст* здравината се увеличава до 5%, а при по-голямо усукване намалява. При 150÷200 *сука/ст* влакното се къса.

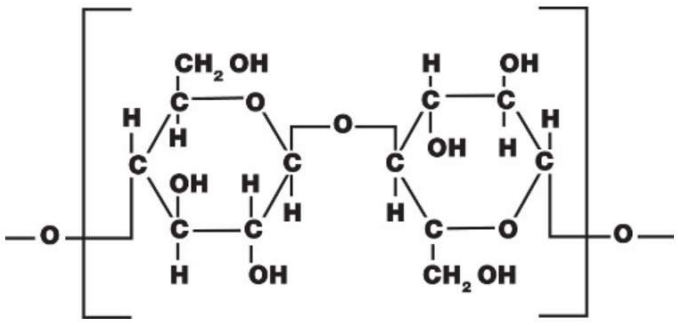
Цвят и лъскавина. Цветът на памучните влакна се дължи на натрупаните в лумена и третичната стена багрилни вещества. Сега са познати различни видове цветен памук — кремав, розов, червен, сив. Влакната се оцветяват в

последния стадий на растежа. Памучните влакна са матови. Само дълговлакнестите сортове - египетският, има копринеподобна лъскавина. Ако влакната презреят, лъскавината им намалява. Те придобиват синкав оттенък. При застудяване преди и по време на беритбата памучните влакна пожълтяват или се покриват с ръждиви петна, които не са отстраними.

Хигроскопичност. Памучното влакно е хигроскопично, но в сравнение с някои други естествени влакнести материали (ликови влакна и вълна) хигроскопичността му е по-ниска. Влагопоемането може да достигне 24÷27 %, без да се чувства влакното влажно.

Термични свойства. Памучните влакна имат способността да провеждат топлинна енергия, минимизирайки всяко разрушително натрупване на топлина. Следователно памучните влакна могат да издържат на горещи температури на гладене. Но прекомерното нагряване на памучните влакна ги овъглява което показва, че памучните влакна не са термопластични. Това не позволява на влакното да заеме новата позиция на полимерите, когато се приложи топлина. Полимерите започват да вибрират при нагряване и постепенно се разпадат. При едновременното въздействие на топлина, влага, натиск то може да запази пластичност, но ефектът не е траен. Във влажно състояние топлопроводността му се увеличава.

Химичният състав на памука е: целулоза 91,00%, вода 7,85%, протоплазма, пектини 0,55%, восък, мазнини 0,40%, минерални соли 0,20% [Chatterjee, A.,(2021); barnhardtcotton.net, en.wikipedia.org/wiki/Cotton www.textileschool.com]. Други автори посочват по-високо съдържание на целулозата до 97%. Този състав не е постоянен и се изменя според сорта на памука и климатичните условия. Целулозата е основното вещество, което изгражда памука и на нея се дължат физичните и химичните свойства като: здравина, еластичност, отнасяне към нагряване и други. Целулозата има фибриларна структура като периодично се редуват аморфни и кристални участъци [Кеворкян, А., (1997)]. Химичната формула на целулозата - фиг.2.8 е $C_6H_{11}O_5(C_6H_{11}O_5)_nC_6H_{11}O_5$, а съотношението на химичните елементи е следното: 44,4%C, 49,4%O и 6,2%H.



Фиг. 2.8. Химична формула на памук

В 21-ви век едни от най-търсените и предпочитани памучни облекла са джинсите по-известни у нас като дънки. Годишно в света се произвеждат близо два милиарда чифта дънки. При сегашния подход са необходими над 9450 литра вода, близо половин

килограм химически продукти и много енергия за производството на един-единствен чифт дънки. Оказва се, че тази индустрия е не само бизнес за милиони долари, но има и значителен принос за производството на отпадни води и парникови газове в природата. Всичко това, заедно с конкурентните условия на пазарите, стимулира производителите да търсят иновативни решения с положителен ефект за околната среда и да създават разнообразни дънкови облекла.

Съвременен икономичен метод за избелване на дънковите изделия е лазерното маркиране което решава много от екологичните проблеми в производството, както и намалява разходите [Ortiz-Morales, et al., (2003); Ondogan, Z., et al. (2005)].

Таблица 2.1. Резултати от лабораторни изпитания на плат Деним

№	Наименование на показателя	Резултати от изпитването		
		Величина	Метод на изпитване Условия на изпитване	Резултат /стойност/
1	Линейна плътност		ISO 7211-5 (метод А):2020 Тестер за измерване CRIMP TESTER	Нишка
	- основа	tex		85,9 x 1
	- вътък	tex		46,9 x 1
2	Маса на единица площ	$g.m^{-2}$	БДС EN 12127:2000 Везна аналитична електрическа Тип: Precisa Balances Series 320 XT	Тъкан 349,0
3	Сплитка	-	БДС 12674:1975	Тъкан кепър 2./.1
4	Брой на нишките на единица дължина		БДС EN 1049-2: (метод А):2002	Тъкан
	- основа	бр./10cm	Измервателна линия	280
	- вътък	бр./10cm		174
5	Максимална сила до скъсване чрез използване на STRIP метод		БДС EN ISO 13934-1:2013 „Zweigle F 427" Скорост: 100mm/min; Междучелюстно разстояние: 200mm; Предварително натоварване: 5 N; Широчина на лента: (50±0,5) mm	Тъкан
	- основа	N		1759
	- вътък	N		514
6	Разтегливост до скъсване чрез използване на STRIP		БДС EN ISO 13934-1:2013 „Zweigle F 427" Скорост: 100mm/min; Междучелюстно разстояние: 200mm; Предварително натоварване: 5 N; Широчина на лента: (50±0,5) mm	Тъкан
	- основа	%		24,60
	- вътък	%		16,96
7	Претриване по метода на Martindale. Разрушаване на образеца	бр. претри-вания	БДС EN ISO 12947-2:2017 MARTINDALE ABRASION AND PILLING TESTERS, Налягане: 9 kPa; Движение: Lissajous	Тъкан 110000
8	Координати на цвета (L*, a*, b*, Cab*, hab, X, Y, Z, x, y)		БДС EN ISO 105 J01:2003 Спектрофотометър DATACOLOR 800; Геометрия d/8; Източник на светлина D65; Бленда USAV- 6.6 mm	Тъкан
	- L*	-		24,10
	- a*	-		0,35
	- b*	-		-5,31

За извършване на експерименталните изследвания свързани с маркирането на текстил е избран памучен плат тип Деним индигоидно обагрен в тъмносиньо. Изборът на материал в състав 100%П се обуславя от

факта, че памукът е сред най-използваните естествени суровини в текстилната индустрия - фиг.2.4. [Стоянов Б., (2008); Sinclair R., (2015)].

Материята е кондиционирана при температура 20±2°C и относителна влажност на въздуха 65±4% в продължение на 24h преди провеждане на експериментите [БДС EN 20139:2000], с помощта на апарат BINDER KBF 115.

Върху кондиционирания памучен плат тип Деним, са проведени лабораторни изпитвания, табл.2.1, за установяване на следните характеристики:

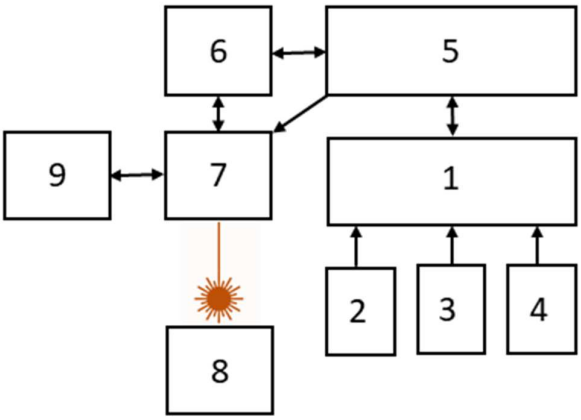
- Линейна плътност по основа и вътък [ISO 7211-5 (метод А):2020].
- Маса на единица площ [БДС EN 12127:2000].
- Сплитка [БДС 12674:1975].
- Брой на нишките на единица дължина [БДС EN 1049-2:2002, метод А].
- Максимална сила до скъсване /основа и вътък/ чрез използване на STRIP метод [БДС EN ISO 13934-1:2013].
- Разтегливост до скъсване /основа и вътък/ чрез използване на STRIP метод [БДС EN ISO 13934-1:2013].
- Претриване по метода на Martindale. Разрушаване на образеца [БДС EN ISO 12947-2:2017].
- Координати на цвета (L*, a*, b*, Cab*, hab, X, Y, Z, x, y) [БДС EN ISO 105 J01:2003].

2.3 Експериментална установка и апаратура

Системата за лазерно маркиране е разработена по проект към Технически университет – Габрово [У1302 – (2013)] – фиг.2.9.

Лазерната система за маркиране е реализирана на галванометричен принцип на действие (фиг.1.22) и включва следните компоненти: 1 – персонален компютър; 2- монитор; 3- клавиатура; 4 – мишка; 5 – контролер; 6 – лазерен източник; 7 – сканиращо устройство; 8 – обект на маркиране; 9 – вертикална механична ос. Принципната схема на лазерната система е представена на фиг. 2.10.

Фиг. 2.9. Лазерна система за маркиране



Фиг. 2.10. Лазерна система за маркиране – принципна блок-схема

Системата се осигурява програмно от персоналния компютър 1, който посредством монитора 2, клавиатурата 3 и мишката 4 осъществява връзката с оператора на системата. Персоналният компютър 1 комуникира двустранно с контролера 5, чрез който се предават управляващи команди и обратни връзки за и от останалите възли на системата. Контролерът 5 взаимодейства с лазерния източник 6, управлявайки параметрите на генерираното лазерно лъчение, като мощност, честота и др., както и следи за статуса на работа на лазерния източник 6 и обработва възникнали грешки. Контролерът 5 взаимодейства със сканиращото устройство 7, което служи за отклоняване на лазерния лъч генериран от източника 6 върху детайла за обработка 8. Сканиращото устройство 7 е твърдо свързано с механично устройство 9 за вертикално движение по вертикална ос Z, което осигурява необходимото разстояние между него и равнината на маркиране на обработвания детайл 8, т.н. фокусировка.

Табл.2.2. Технически характеристики на лазерния източник и сканираща глава [en.raycuslaser.com/; www.chineselaser.com/galvo-scanner-product/]

Характеристика	**Означение**	**Стойност**	**Димeнсия**
Дължина на вълната	λ	1064	nm
Номинална мощност	Pa	20	W
Честота	f	20 ÷ 80	kHz
Продължителност на импулса	τ_p	50	ns
Енергия на импулса[1]	Ep	1	mJ
Импулсна мощност[2]	Pp	20	kW
Скорост на маркиране	V	1 ÷ 2000	mm/s
Режим на работа	Pulsed	-	-
Качество на лъча	M^2	1,2 ÷ 1,5	-
Диаметър на работното петно[3]	d_f	≈ 54	μm

[1] при Pa=20W, f=20kHz

[2] изчислен за Pa=20W, f=20kHz, τp=50ns

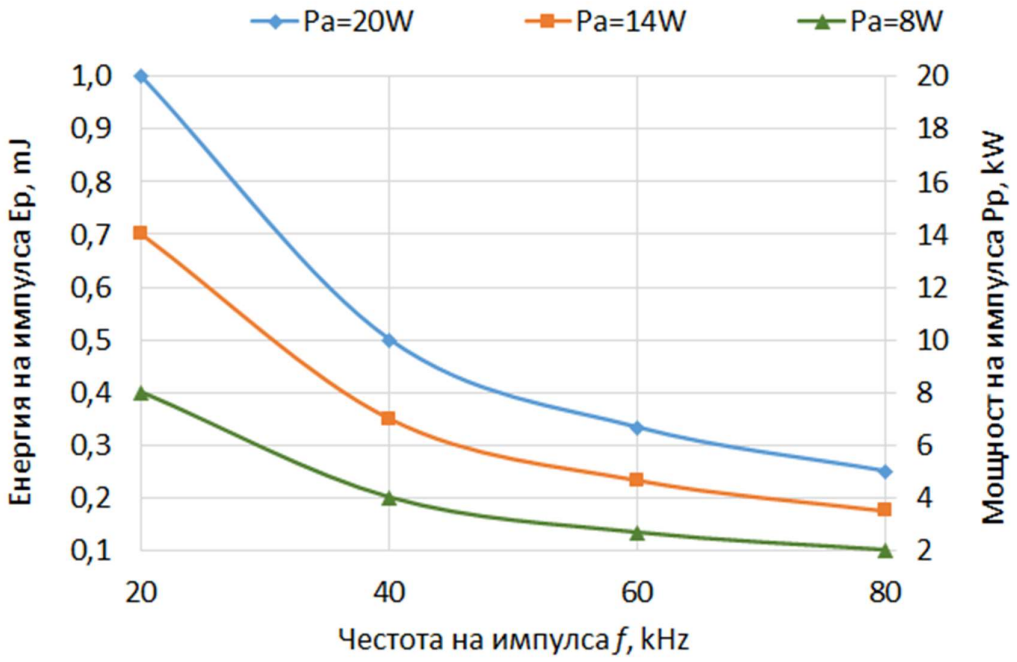
[3] според производителя за оптична леща f-theta lens с работно поле 100x100 mm

Табл.2.3. Работни параметри на лазерната система за маркиране

		f, kHz			
Pa (W)		20	40	60	80
20	Ep (mJ)	1,00	0,50	0,33	0,25
	Pp (kW)	20,0	10,0	6,7	5,0
	qs (W/cm^2)	8,74E+08	4,37E+08	2,91E+08	2,18E+08
14	Ep (mJ)	0,70	0,35	0,23	0,18
	Pp (kW)	14,0	7,0	4,7	3,5
	qs (W/cm^2)	6,12E+08	3,06E+08	2,04E+08	1,53E+08
8	Ep (mJ)	0,40	0,20	0,13	0,10
	Pp (kW)	8,0	4,0	2,7	2,0
	qs (W/cm^2)	3,49E+08	1,75E+08	1,16E+08	8,74E+07
	E*l* (J/mm)	0,5	0,2	0,06	0,03
V при Pa=20W (mm/s)		40	100	333	667
V при Pa=14W (mm/s)		28	70	233	467
V при Pa=8W (mm/s)		16	40	133	267

Система е оборудвана със следния лазерен източник - 20W Ytterbium pulsed fiber laser RFL-P20Q [https://en.raycuslaser.com/].

Основните технически характеристики на използвания лазерен източник, са представени в табл.2.2, както са декларирани от производителя, а работните параметри на процеса са представени на табл.2.3 и на фиг. 2.11.



Фиг. 2.11. Режими на работа на използвания лазерен източник. Маркерите представляват възможните работни състояния с отдадената мощност и енергията на импулса, изчислена според (1.21) и (1.22).

2.4 Методики на експерименталните изследвания

2.4.1 Методика за маркиране на образците

Обект на маркиране е памучен плат тип „Деним“ с характеристики представени в табл.2.1. Проведени са маркировки върху мостри от плата за определяне на здравина и еластичност по основа и вътък, устойчивост на претриване и контраст. Всички мостри са предварително обезскробвани, обезмаслени и изпрани. Материята е кондиционирана при температура 20±2°C и относителна влажност на въздуха 65±4% в продължение на 24h преди провеждане на експерименти с тях [БДС EN 20139:2000]. Използвана е апаратура BINDER KBF 115 (фиг.2.12).

Фиг. 2.12. Кондициониращ апарат

BINDER KBF 115

Фиг. 2.13. Динамометър

Zweigle F 427

2.4.1.1 Подготовка на образци за определяне здравина и еластичност по основа и вътък след лазерно маркиране

От плата се подготвят образци изрязани по основа и вътък [БДС EN ISO 13934-1:2013]. От извършени предварителни измервания са установени абсолютна здравина на необработения плат, както следва – по основа 1759 N, по вътък 514 N и разтегливост до скъсване, както следва – по основа 24,6%, по вътък 16,96%. Използвана е апаратура динамометър Zweigle F 427 (фиг.2.13).

Изпитани образци след лазерно маркиране са представени в Приложение 1.

2.4.1.2 Подготовка на образци за определяне устойчивост на претриване след лазерно маркиране

От плата се подготвят образци съгласно метода на Martindale [БДС EN ISO 12947-2:2017]. От извършени предварителни измервания са получени 110000 претривания до пробиване на необработен плат. Приложено е налягане от 9kPa. Използвана е апаратура Martindale Abrasion And Pilling Tester (фиг.2.14).

Изпитани образци след лазерно маркиране са представени в Приложение 2.

Фиг. 2.14. Пилинг-тестер Martindale M235 SDL Atlas

2.4.1.3 Подготовка на образци за определяне на контраста след лазерно маркиране

Върху предварително изрязани мостри от плата се маркират с лазер тестови полета, което е показано на фигура 2.15. Тестовото поле се състои от множество малки квадрати, с размери 10x10 mm, които се маркират при различни параметри на лазерната система. Това е бърз и ефективен начин да се установи дали при дадена комбинация от лазерен източник и материал ще се получи добра маркировка. Чрез този вид тестови полета се цели оптимизиране на процеса. Резултатите от оптимизацията може да се използват за сравняване на различни лазерни системи и съответните настройки, като интензитет на лазерното лъчение, импулсна мощност и енергия, скорост на маркиране, честота и др.

Контраста се определя чрез координатите на цвета (L*, a*, b*, Cab*, hab, X, Y, Z, x, y) на всяка от маркировките, сравнена с необработена мостра от същия плат. Изпитването се извършва според БДС EN ISO 105 J01:2003. Използвана е апаратура спектрофотометър DATACOLOR 800 (фиг.2.17).

V=100mm/s ΔW_d=0mm; α=0°; f=20kHz; R=1		P, %								
		20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Δx, mm	0,40	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
	0,35	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
	0,30	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9
	0,25	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9
	0,20	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
	0,15	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9
	0,10	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9

Фиг. 2.15. Тестово поле за маркиране

За маркиране на тестовото поле са подбрани следните параметри на процеса:

- Постоянни параметри:
  - дефокусировка $\Delta W_d = 0mm$, т.е. фокуса е на повърхността на маркирания материал;
  - ъгъл на наклона на стъпката/отместването $\alpha = 0^0$, т.е. щриховката е успоредна на вътъчните нишки на плата;
  - честота на повторение на импулсите - $f = 20\ kHz$;
  - брой на повторенията - $R = 1$.
- Променливи параметри:
  - мощност на лазерното лъчение - $P_{a,max} = 20\ W$, изменя се в интервал от 20÷100%.P със стъпка от 10%;
  - гъстината на щриховката или стъпката на отместване Δx, изменя се в интервал от 0,1÷0,4mm със стъпка от 0,05mm;

- скорост на лазерното лъчение - V, изменя се в интервала от 100÷600 mm/s със стъпка от 100 mm/s.

Получените образци след лазерно маркиране са представени в Приложение 3.

2.4.2 Методика за определяне на критичната плътност на мощността

За определяне на критичната плътност на мощността $q_{s,kp}$ на деструкция, встъкляване, карбонизация, топене и изпарение се прилага следната методика:

- при постоянна скорост се маркират линии върху образците, като се променя мощността със зададена стъпка;
- наблюдават се под микроскоп маркираните полета;
- търси се зоната на въздействие, при която настъпват съответните промени на влакната;
- критичната плътност на мощността $q_{s,kp}$ се изчислява по формула 2.1.

$$q_{s,kp} = \frac{4\,P_i}{\pi d_f^2} \qquad (2.1)$$

където: P_i – мощност, при която се наблюдава разрушаване на влакна;

d_f – диаметър на работното (фокусното) петно.

2.4.3 Методика за определяне на контраста на маркировката

Съществуват различни съвременни методи за определяне на цветовата разлика на текстилни платове, която за краткост се нарича контраст k^*. Първите представляват еталонни карти с които се сравняват изпитваните образци [БДС EN 20105-A02:2001]. Други разчитат на цифрова обработка на изображения за намиране на цветова разлика между еталон и образец. В лабораторни условия се използва спектрофотометричен метод за директно получаване на стойност за цвета, което улеснява сравняването и контрола на текстилни материали в производството.

2.4.3.1 Цифров метод

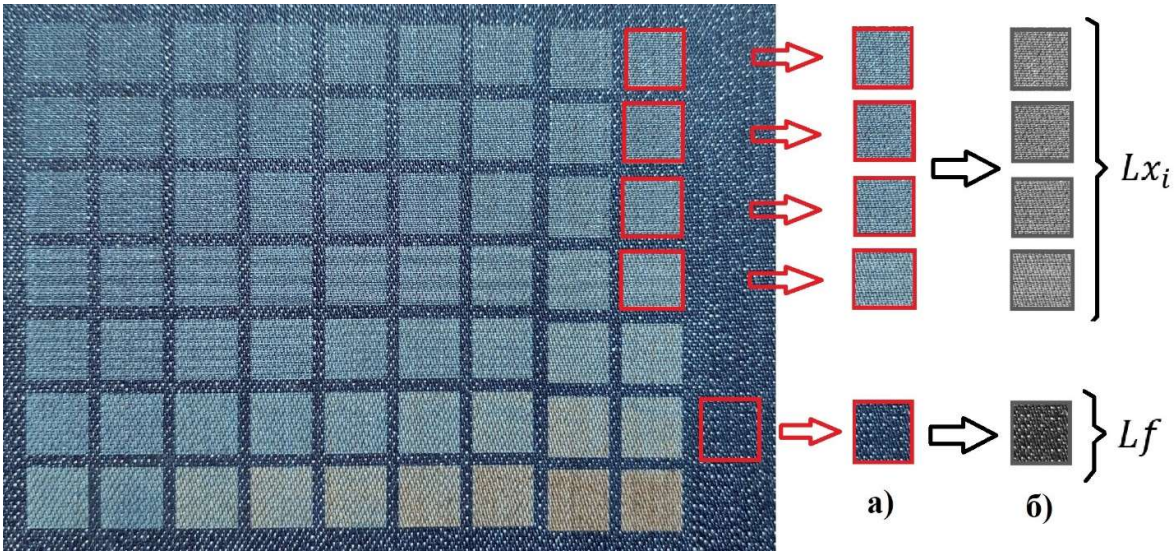
Определянето на контраста изисква първо да се получат мостри от маркираните образци, които да бъдат подготвени за измерване. Подготовката изисква да се изпълнят следните стъпки:

- Получаване на цифрово изображение.

Изображенията на маркировки са получават с помощта на цифрова камера в отразена 90° падаща халогенна светлина без увеличение, с разделителна способност min 1500×1500 пиксела (72 DPI), и препоръчителни параметри на камерата (t = 1/60 s; f = 5,5; ISO 40) – фиг.2.16.

- Цифрова обработка на изображенията

Изображенията от маркираните полета се изрязват (90x90 пиксела) и конвертират в сива скала като ASCII кодова матрица (0 = черно; 255 = бяло), използвайки софтуер за обработка на изображения - фиг.2.16а,б. За отделените пикселни области се изчисляват средните стойности на степента на сивия цвят - Lx_i. Анализира се стойността на фона на изображението - Lf. Използвайки уравнение 1.2 се изчислява контраста на маркировките $k^*, \%$.



Фиг. 2.16. Получаване на цифрово изображение на лазерно маркиран текстилен образец. а)сегментиране на маркираните области; б)конвертиране в сива скала и изчисляване стойността на сивия цвят.

2.4.3.2 Спектрофотометричен метод

Фиг. 2.17. Спектрофотометър Datacolor 800 [sinodevices.com]

Стандартът „БДС EN ISO 105-J03 2009 - Пресмятане на цветни разлики" се отнася за тестове за цветни тъкани. Този стандарт определя метод за изчисляване на разликата в цвета между две мостри от един и същи материал, измерени при еднакви условия, като E_{CMC} е цифровата стойност на общата разлика в количествена степен на цвета. Апарат за измерване на цветови разлики спектрофотометър „Datacolor 800", използван в експерименталната част е показан на фиг.2.17. Методиката на работа е следната: пробата се поставя и се фиксира срещу измервателния отвор на спектрофотометъра, облъчва се от източника на светлина, намиращ се в уреда, и се измерват дължините на вълните на отразената и абсорбираната част от падащата светлина.

Регистрираните данни се обработват на компютър чрез специализиран софтуер „Datacolor Tools v2", след което се използват за изчисляване на стойностите на цветовите параметри - CIELAB Difference: ΔE_{ab} - цветна разлика чрез която се изразява контраста - формула 2.2, ΔL^* – светлинна разлика, Δa^* – червено/зелена разлика, Δb^* – жълто/синя разлика. Софтуерният пакет дава възможност за измерване на цветовите параметри на текстилните материали веднага и елиминира субективните визуални оценки.

$$\Delta E_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \qquad (2.2)$$

Описаната методика дава възможност да се изследва влиянието върху контраста k^* на редица технологични фактори:

- дължина на вълната на лазерното лъчение $\lambda \rightarrow k^* = k^*(\lambda)$;
- повърхнинна плътност на мощността - $q_s \rightarrow k^* = k^*(q_s)$;
- честота на повторение на импулсите - $f \rightarrow k^* = k^*(f)$;
- продължителност на импулсите - $\tau_p \rightarrow k^* = k^*(\tau_p)$;
- скорост на маркиране - $V \rightarrow k^* = k^*(V)$;
- стъпка при растерно маркиране - $\Delta x \rightarrow k^* = k^*(\Delta x)$;
- дефокусировка - $\Delta W_d \rightarrow k^* = k^*(\Delta W_d)$.

2.4.4 Методика за микроскопски и структурен анализ

Техниката "Image analysis" (анализ на изображението) се прилага много често за изследване на текстилни продукти и особено за проучване на техните повърхностни свойства [Drobina, R., M.S. Machnio, (2006)]. В много изследвания са анализирани текстилни влакна и повърхността на тъканите, като са прилагани различни методи в зависимост от преследваните цели: невъоръжено око, оптични и електронни микроскопи и т.н.

2.4.4.1 Микроскопски анализ

За обяснение на промените, настъпили в резултат на третирането с лазерен лъч на образците, се използва невъоръжено око и микроскопски снимки с различно увеличение. Наблюдението се реализира с цел анализ на деформациите на влакната на повърхността на материала. Лазерът причинява визуални и механични модификации (изменения) на влакната от горния слой и в дълбочина. Ако параметрите на лазера не са подбрани правилно, влакната изглеждат като изгорели или срязани. В зависимост от процента на повредените влакна се наблюдава влошаване на физико-механичните показатели на плата [Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016); Kan C.W., et al. (2010б)]. Също така за оценка на морфологията на повърхността на памучни влакна, обработени с CO_2 лазер е използван анализ на изображението от микроскопски снимки [Chow Y. L., et al. (2010, 2011)].

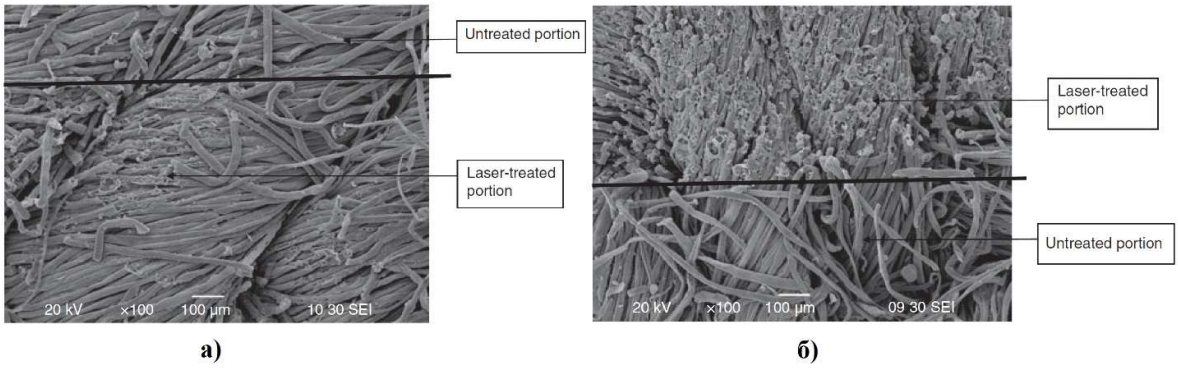
Фиг.2.18. цифров микроскоп INSIZE Vision Measuring System V300A

За извършване на наблюденията е използван цифров микроскоп INSIZE Vision Measuring System V300A със софтуер за обработка INSIZE v2.1.2. Микроскопа позволява наблюдения на мостри с различни увеличения и дигитален запис (фиг.2.18). Получените микроскопски образци след лазерно маркиране са представени в Приложение 4.

2.4.4.2 Scanning Electron Microscopy (SEM) анализ

Сканиращата електронна микроскопия (SEM) е тестов процес, който сканира проба с електронен лъч, за да се получи увеличено изображение за анализ. Методът е известен още като SEM анализ и SEM микроскопия и се използва много ефективно при микроанализ на структурни промени и дефекти, както за твърди неорганични и органични материали. За анализ на широчината и дълбочината на маркираните с лазер линии или на структурните промени в маркировката се правят микрографии с много висока разделителна способност, които дават детайлна информация. Обработените с лазер зони се наблюдават и измерват, като увеличението достига до 3000 пъти. За да се оцени ефекта от въздействието на лазерен лъч върху плат Деним са променяни мощността и скоростта на маркиране [Chow Y. L., et al. (2010); Kan C.W., et al. (2010a)].

Анализ чрез сканиращ електронен микроскоп (SEM) е приложен за изследване на плат Деним в [Ursache, M., (2013)]. За определяне на геометрията на маркировката е използван сканиращ електронен микроскоп (SEM) [Kan, C.W., et al. (2010); Ondogan, Z., et al. (2005)].



Фиг. 2.19. Лазерно обработена плат Деним с CO_2 лазер с увеличение от 100X: а)· (резолюция: 35 dpi; пикселно време: 120 µs); б)· (резолюция: 75 dpi; пикселно време: 150 µs) [Kan, C.W., et al. (2010)]

След процеса на лазерно маркиране, повърхността на плат Деним е анализирана чрез SEM. Фигури 2.19, а) и б) показват изображенията на различни лазерно обработени Деним образци. SEM изображенията показват, че от ефекта на лазерното маркиране морфологията на влакната, присъстващи върху повърхността на тъканта, се променя значително с различните режими на работа.

Фигура 2.19а) показва SEM изображение на повърхността на плат Деним, обработен с лазер с разделителна способност 35 dpi и време на пиксела 120 µs. Комбинацията от тези променливи дава най-малката плътност на

лазерната мощност. В резултат на това само няколко влакна, присъстващи на повърхността на плата, са маркирани и разградени. Когато плътността на мощността на лазера е увеличена, се отбелязва по-очевидно маркиране и влошаване целостта на влакната - Фигура 2.19б). Това SEM изображение на тъканта показва повърхност, обработена с лазер с разделителна способност от 75 dpi и време на пиксел от 150 μs. Проявява се общо явление при което се наблюдава подобна на гъба структура в разградената и маркирано влакно, но този подобен на гъба ефект е ограничен само до повърхностния слой на влакната. По време на процеса на лазерно маркиране топлинната енергия ще се абсорбира от влакната. Образуването на газообразни продукти като водна пара и/или въглероден диоксид ще се осъществи едновременно, което бързо ще доведе до увеличаване на вътрешния обем на влакното. В резултат на това се получава подуване и разширяване на влакната, което води до подобна на гъба структура [Ferrero, F., F. Testore, (2002)].

2.4.5 Методика за оптимизиране на технологични обекти

Качеството на лазерната маркировка на текстилни материали е свързано с осигуряването на оптимални стойности на параметрите на технологичния процес, които да гарантират запазването й както по време на производствения процес, така и през експлоатационния живот на тези материали. За осъществяване на изследването се използват статистически методи и математически модели. Статистическите методи се характеризират с висока достоверност на резултатите и минимални разходи. Математическите модели спомагат за разкриване закономерностите в технологичния процес. Чрез планирани експеримент се получава достатъчен обем информация за изучавания обект при минимален брой опити.

За да се определи влиянието на различни фактори - фиг.1.26 и да се създаде модел, с помощта на който да се определи какви трябва да бъдат съответните параметри на процеса лазерно маркиране, се маркират сравнително малък брои мостри. Получените резултати се обработват статистически с цел да се установят параметрите, при които маркировката ще е с характеристики, удовлетворяващи поставените задачи.

Изборът на метод на провеждане на експеримента е много близък до технологичния процес, протичащ в реални производствени условия [Ангелов И.А., М.С. Петров, (2002)]. Кибернетичен модел на обекта на изследване е показан на фиг.2.20. Математическата обработка на данните от експеримента се провежда в следната последователност:

- определяне на целта и задачите на изследване;
- избор на факторите X_i , влияещи на процеса, и целева функция Y_j ;
- съставяне на модел на изследвания обект;

- избор на основните нива и интервали на вариране на факторите;
- избор на експериментален план за решаване на задачата.

Входните фактори и факторното пространство се избират на базата на проведени предварителни експерименти и анализиране на литературни източници [Ангелов, Н., (2011); Дамянов, Г., (1977); Джонов, Ц., и др., (1995); Божанов, Е., И. Вучков, (1983)], като е взето под внимание и мнението на специалисти в областта на лазерните технологии.

Фиг. 2.20. Кибернетичен модел на обекта на изследване

Определяне на допустимите граници на факторите X_i :

$$X_{1,min} \leq X_1 \leq X_{1,max} \qquad X_{2,min} \leq X_2 \leq X_{2,max}$$

Избор на експериментален план за решаване на задачата:

Въз основа на данните от плана на експеримента се извеждат регресионни математични модели, описващи зависимостта между входящите параметри и целевите функции. Регресионният анализ, базиращ се на най-малките квадрати, определя коефициентите на предварително зададен полином от втора степен. Преди окончателното му избиране е направена оценка и на регресионни модели от първа степен, които са отхвърлени поради неизпълнение на необходимата за изследването точност и адекватност.

За да се проведе регресионен анализ и получените резултати да бъдат достоверни, трябва да са изпълнени следните условия [Попов, Н. и др., (1980)]:

- точността на факторите трябва да е по-висока от точността с която се измерва целевата функция (изходния параметър);
- стойностите на целевата функция Y да са нормално разпределени случайни величини при проведени паралелни опити;
- факторите да бъдат независими помежду си функционално и статистически;

- дисперсиите за изходния параметър да са еднородни - да няма статистически осигурена разлика между дисперсиите на изходния параметър;
- дисперсията на изходния параметър да не е функция на входните параметри;
- опитните стойности на Y да са независими и да са повече от броя на изследваните фактори и от броя на коефициентите на регресия;
- да няма линейна (функционална) зависимост между изучаваните фактори $X_1, X_2 \ldots X_n$ (или функции), но те трябва да имат отношение помежду си и да са логически свързани с параметъра Y.

Регресионен модел

Избран е модел от втори ред (2.3), поради това че този вид модели позволяват при малък брой опити да се изследват технологични процеси в сравнително широка област на изменение на входните параметри. Математическият модел има следния вид [Божанов, Е., И. Вучков, (1983); Попов, Н. и др., (1980)]:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^{m} b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^{m} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{m} b_{ii} x_i^2 \qquad (2.3)$$

където: b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} са коефициенти на регресия;

x_i – входни параметри /фактори/;

m – брой на входните параметри (в случая m=2).

Регресионните коефициентите се пресмятат по метода на най-малките квадрати по следните формули (2.4÷2.7):

$$b_0 = d_1 + \sum_{u=1}^{N} x_{ou} Y_u + d_2 \sum_{i=1}^{m} \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 Y_u \qquad (2.4)$$

$$b_i = d_3 \sum_{u=1}^{N} x_{iu} Y_u \qquad (2.5)$$

$$b_{ij} = d_4 \sum_{u=1}^{N} \left(x_i x_j\right)_u Y_u \qquad (2.6)$$

$$b_{ii} = d_5 \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 Y_u + d_6 \sum_{i=1}^{m} \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 Y_u + d_2 \sum_{u=1}^{N} x_{ou} Y_u \qquad (2.7)$$

където: d_1, d_2 … d_6 са коефициенти, които се изчисляват в зависимост от броят на факторите. При m=2:

$d_1 = 0{,}2$ $d_2 = 0{,}1$ $d_3 = 0{,}125$ $d_4 = 0{,}25$ $d_5 = 0{,}1251$ $d_6 = 0{,}0187$

Намирането на стойностите на регресионните коефициенти обаче не е достатъчно. Необходимо е да се направи оценка за статистическата значимост на тези коефициенти. Проверка за значимостта на регресионните коефициенти се прави по t - критерия на Стюдент. За тази цел техните стойности се съпоставят със средноквадратичните им отклонения. Коефициентите на регресия са статистическите оценки на математическите им очаквания. Техните дисперсии се изчисляват по формулите:

$$S_{b_i}^2 = d_3 S_Y^2 \qquad S_{b_{ij}}^2 = d_4 S_Y^2 \qquad (2.8)$$

$$t_R = \frac{b_i}{S_{\{bi\}}} \qquad (2.9)$$

Коефициентите на регресия са значими според критерия на Стюдент при степени на свобода $\upsilon s = N(n-1)$ и ниво на значимост за проведения експеримент $\alpha = 0{,}95$, когато е изпълнено условието $t_R < t_T$, където t_R е пресметнатата стойност на критерия на Стюдент, а t_T - теоретичната. След отсейване на незначимите коефициенти, коригирания математичен модел за целевата функция Y_i за различните задачи, се записва в окончателен вид.

Проверка за адекватност на модела.

Проверка за адекватност на математичния модел за изходния параметър се осъществява по критерия на Фишер или се използва коефициентът на множествена корелация.

- Когато се прилага критерия на Фишер, моделът е адекватен, ако е изпълнено условие (2.10).

$$F_R \leq F_{tb}(\alpha, \upsilon_1, \upsilon_2) \tag{2.10}$$

където:

$$F_R = \frac{S^2_{\text{ад}}}{S^2_b} \tag{2.11}$$

Стойността на F_{tb} се взема от таблица за критерия на Фишер, където α е избраното ниво на значимост, υ_1 и υ_2 - брой степени на свобода.

- Ако адекватността на модела се оценява чрез коефициента на множествена корелация (R), първо се пресмята стойността му по формула 2.12 и след това се проверява значимостта на коефициента по F-критерия (2.13) [Джонов, Ц., и др., (1995); Божанов, Е., И. Вучков, (1983)]. Коефициента на множествена корелация е значим, ако е изпълнено условието 2.14 и тогава се приема, че избраният модел описва експерименталните данни с необходимата точност.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{u=1}^{N}\left(Y_u - \widehat{Y_u}\right)^2}{\sum_{u=1}^{N}(Y_u - \overline{Y_u})^2}} \tag{2.12}$$

$$F_R = \frac{R^2(N-k)}{(1-R^2)(k-1)} \tag{2.13}$$

където: N – броя на опитите, к – брой коефициенти на модела

$$F_R \geq F_{tb}(\alpha, \upsilon_1 = k-1, \upsilon_2 = N-k) \tag{2.14}$$

Построяване на графични зависимости.

С получените коефициенти на взаимна корелация се построява корелационен граф, на който се вижда влиянието между входящите

величини /управляващите фактори/ X_1, X_2 и изходящата величина /целевия параметър/ Y_i.

Уравненията на математичните модели се представят графично с повърхнини в тримерното пространство за различните условия на входящите величини и изходящия параметър.

Литература

2220M – (2020), " Физико-механични характеристики на плат Деним обработен с лазер", Научно-изследователски договор към ТУ-Габрово

BG3214-U1 – (2019) - Система за лазерно маркиране

BG3564-U1– (2020) - Система за лазерно маркиране на детайли със сложни повърхнини

BG4048-U1– (2021) - Технологична линия за нанасяне на лазерни декоративни надписи върху ротационни детайли

Chatterjee, A.,(2021), Properties of Cotton Fibre (Physical, Chemical and Technical Properties), OCS Team, 2021.

Chow Y. L., (2011) To study the effect of laser irradiation on the properties of cotton fabric, Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, January 2011.

Chow Y. L., C.K Chan, C.W. Kan, (2010), SEM Analysis of CO_2 Laser Treated Cotton Grey Fabric, p.1860-1867, Microscopy: Science, Technology, Applications and Educations, 2010.

Dochia, M., Z. Roskwitalski, (2012), Cotton fibres, Handbook of Natural Fibres: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation, 2012.

Drobina, R., M.S. Machnio, (2006), Application of the image analysis technique for textile identification, AUTEX Research Lournal, Vol No.1, p.40-48, 6, March 2006.

Ferrero, F., F. Testore, (2002), Autex Res. J., 2 (3) (2002) 109.

https://barnhardtcotton.net/technology/cotton-properties/

https://employmentnews.gov.in/NewEmp/MoreContentNew.aspx?n=Editorial&k=80361

https://en.raycuslaser.com/

https://en.wikipedia.org/wiki/Cotton

https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_cotton

https://sinodevices.com/Datacolor-800-800V-850.html

https://www.chineselaser.com/galvo-scanner-product/

https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/12/12/2571644/0/en/Technical-Textiles-Market-Is-Growing-Steadily-With-A-6-2-CAGR-Globally-In-The-Coming-Years-Explore-the-Opportunities-Douglas-Insights.html

https://www.researchandmarkets.com/reports/1946780/cellulosic manmade fibers global market

https://www.textileschool.com/129/cotton-fibers-the-king-of-fibers/

Kan C.W., C.W.M. Yuen, C.W. Cheng, (2010a), Technical study of the effect of CO2 laser surface engraving on the colour properties of denim fabric, Coloration Technology, Wiley-Blackwell, 126, page 365-371, 2010.

Kan, C.W. (2008). Impact On Textile Properties of Polyester with Laser, Optics and Laser Technology, 40(1), 113-119.

Kan, C.W., (2014a), CO2 laser treatment as a clean process for treating denim fabric. J. Clean. Prod. 2014, 66, 624–631.

Kan, C.W., (2014б), Colour fading effect of indigo-dyed cotton denim fabric by CO2 laser. Fiber. Polym. 15 (2), 426–429.

Kan, C.W., Y. Lam, C. Yuen, (2010б), Microscopic study of cotton fibre subjected to different functional treatments, p.1130-1136, 2010.

Kan, C.W.; Yuen, C.W.M.; Cheng, C.W., (2012), Color Fading of Indigo-dyed Cotton Denim Fabric by Laser. Adv. Mater. Res. 2012, 441, 187–191.

Kılınç, A., M. (2017), Seydibeyoğlu, Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, Natural fibers, 2017.

Leone C., E. Bassoli, S. Genna, A. Gatto, (2018), Experimental investigation and optimisation of laser direct part marking of Inconel 718, Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, 2018.

M1409 – (2014), " Изследване технологичните възможности на лазерно маркираща система LMM-06-20", Научно-изследователски договор към ТУ-Габрово

Marketsandmarkets Report (2022) – Technical Textiles Market Report – Global Forecast to 2022.

Ondogan, Z., Pamuk, O., Ondogan, E.N., Ozguney, A., (2005), Improving the apperance of all textile products from clothing to home textile using the laser technology. Opt. Laser Technol. 37 (8), 631–637

Ortiz-Morales, M.; Poterasu, M.; Acosta-Ortiz, S.E.; Compean, I.; Hernandez-Alvarado, M.R., (2003), A comparison between characteristics of various laser-based denim fading processes. Opt. Lasers Eng. 2003, 39, 15–24

Sinclair R., (2015), “Textile and Fashion – Materials, Design and technology”, Woodhead Publiching series in textiles: Number 126, Elsevier, 2015

Ursache, M., (2013), SEM investigation on denim fabric surface after resin based finishing treatment, International Symposium in Knitting and Apparel, ISKA, Iasi, p.337, 06/2013.

Wisniowski, M., (2013), Preamble Optical Properties of Fiber Materials, 2013.

www.lenzing.com (Outlook on Global Fiber Demand and Supply 2030)

www.textileexchange.org (Preferred Fiber & Materials Market Report - Textile Exchange)

Ангелов И.А., М.С. Петров, (2002), Теория на инженерния експеримент, ТУ-Габрово, 2002.

Ангелов, Н., (2011), Дисертация „Оптимизация на процеса маркиране с лазерно лъчение на образци от инструментална стомана“, 2011г.

БДС 12674:1975 – Сплитки. Основни термини и първични сплитки.

БДС EN 1049-2:2002 – Textiles - Woven fabrics - Construction - Methods of analysis - Part 2: Determination of number of threads per unit length (ISO 7211-2:1984 modified) [Текстил.

Тъкани платове. Конструкция. Методи за анализ. Част 2: Определяне броя на нишките на единица дължина (ISO 7211-2:1984, с промени)].

БДС EN 12127:2000 – Материали текстилни. Платове. Определяне масата на единица площ, чрез използване на малки проби.

БДС EN 20105-A02:2001 - Текстил. Изпитвания за устойчивост на обагрянията. Част А2. Сива скала за оценяване промяната в цвета.

БДС EN 20139:2000 - Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing (ISO 139:1973); Текстил. Стандартни атмосферни условия за кондициониране и изпитване [Апаратура BINDER KBF 115]

БДС EN ISO 105 - J01 - Текстил. Изпитвания за устойчивост на цвета. Част С09: Устойчивост на цвета на окислително избелване при пране в домашни и обществени перални при използване на сравнителен детергент без фосфат, съдържащ активатор за избелване при ниска температура (ISO/AWI 105-C09).

БДС EN ISO 105 - J03 - Текстил. Изпитвания за устойчивост на цвета. Изчисление на цветови разлики.

БДС EN ISO 12947-2:2017 – Текстил. Определяне устойчивостта на претриване на платове по метода на Martindale. Част 2: Определяне на точката на разрушаване на образци (ISO 12947-2:2016)

БДС EN ISO 13934-1:2013 – Текстил. Свойства при опън на платове. Част 1: Определяне на максималната сила и разтегливост при максимална сила чрез използване на STRIP метод (ISO 13934-1:2013). [Апаратура Zweigle F427]

БДС EN ISO 7211-5:2020, Textiles — Methods for analysis of woven fabrics construction — Part 5: Determination of linear density of yarn removed from fabric

Божанов, Е., И. Вучков, (1983), Статистически методи за моделиране и оптимизиране на многофакторни обекти, София, Техника, 1983.

Бояджийски, Г., Е. Кънчев, (2002), Текстилна химия, Университетско издателство „В. Априлов“ – Габрово, 2002г.

Василева, Я., (2011), Екология и опазване на околната среда – нови източници на вдъхновение в модната индустрия, 2011

Д1625М – (2016), "Лазерна обработка на платове с участие на синтетични материали", Научно-изследователски договор към ТУ-Габрово

Дамянов, Г., (1977), Математически методи за планиране на експеримента при изследванията в текстилната промишленост, МЛП-Институт по облекло и текстил, София, 1977

Джонов, Ц., Ив. Ангелов, М. Петров, (1995), Математическо моделиране и оптимизация на механичните характеристики на стоманите, монография, ПБ ВМЕИ Габрово, 1995.

Кеворкян, А., (1977), Текстилно материалознание и изпитвания, Техника, София, 1977г.

М1514 – (2015), " Специални ефекти върху изделия от Деним изработени с лазер", Научно-изследователски договор към ТУ-Габрово

Попов, Н., А. Панов, (1980), Експериментални изследвания и автоматизация в текстилното и конфекционно производство, София, Техника, 1980.

Стоянов Б., (2008), „Изпитване на текстилните материали”, Университетско издателство „Васил Априлов”, Габрово, 2008. ISBN 978-683-396-9.

Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016), „Микроскопски анализ на памучни тъкани обработени с лазер“, Известия на Технически университет Габрово, Том 52`2016, стр.58-60, ISSN 1310-6686.

У1302 – (2013), "Проектиране и изработка на лазерно маркираща система", Научно-изследователски договор към ТУ-Габрово

3 Физичен модел на процеса лазерно маркиране

3.1 Физичен модел на процеса

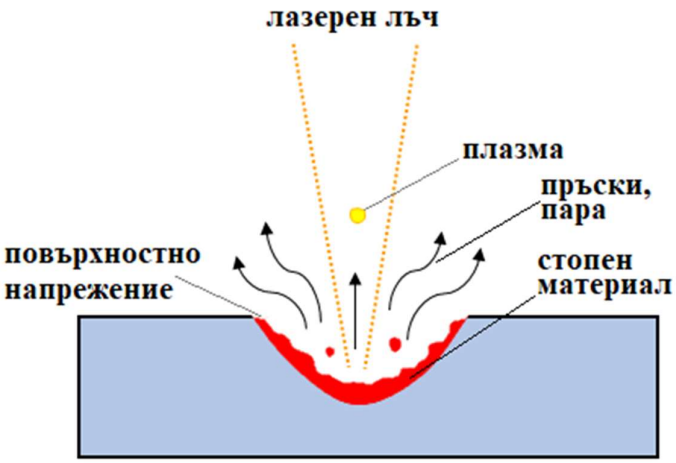
Маркирането с помощта на лазерно лъчение може да се определи като процес при който чрез насочване на концентрирана електромагнитна енергия върху дадена повърхност, тази повърхност се видоизменя. Взаимодействието може да бъде механично (аблация), термо-физическо (промени в кристалната решетка, потъмняване) или химическо (изгаряне, окисляване или други реакции), в зависимост от преработваните материали и параметрите на лазерната система. Въздействието е ефективно, когато лазерният лъч е фокусиран върху повърхността и се премества над нея като инструмент. Полученият отпечатък е с микро размери (20÷200 μm), а за получаването му лазерният лъч се подава на къси импулси, които се повтарят с висока честота.

За разясняване на физическата същност на процеса лазерно маркиране на полимерни материали, в частност на текстилните полимери, тук се анализира взаимодействието на лазерното лъчение с веществото на обработвания материал; оптичните, топлофизичните и технологичните параметри на процеса и механизма на тяхното взаимодействие и се определят границите на приложимост на физичния модел. Целта е да се изведат функционални зависимости между физичните величини и да се направят предварителни пресмятания, за да се анализира тяхното значение за оптимизацията на процеса лазерно маркиране на памучни текстилни материали за постигане на оптимално качество на маркировката.

3.1.1 Взаимодействие на лазерния лъч с веществото

В резултат на лазерното третиране на текстилните материали, 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 [Sarkar J., M. Rashaduzzaman, (2014a)]. Механизмът на лазерното взаимодействие с текстилния материал е показан на фигура 3.1.

Лазерът действа с високи плътности на мощността от $10^8 \div 10^{11}, W.m^2$ и продължителност на импулсите между $10ns \div 10\mu s$, върху определена област от материала, като в резултат от фокусирането на лъча, нагряването е много интензивно в малка зона (няколко десетки квадратни микрометра).



Фиг. 3.1. Механизъм на взаимодействие на лазерен лъч с текстилен материал [Sarkar J., M. Rashaduzzaman, (2014a)]

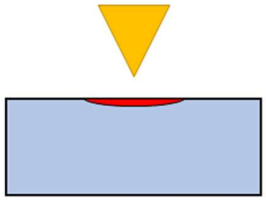
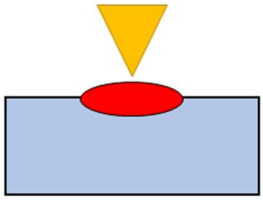
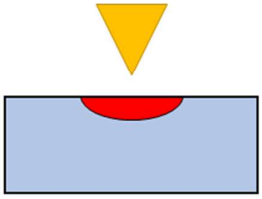
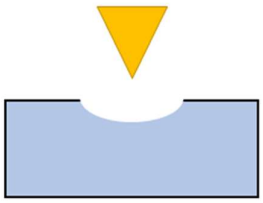
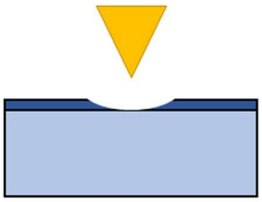
Много важен параметър е дълбочината на проникване δ във веществото, където се абсорбира почти цялата енергия на лазерния лъч и го загрява. Дълбочината на проникване зависи от оптичните и топлофизичните свойства на материала: разстояние от $\delta = 10nm$ светлинният лъч изминава за време от порядъка на $1ps$ за метали, $10ps$ за керамични материали, а за полимери - $1ns$ [Meijer, J., (2014)].

Тази погълнатата енергия се превръща в топлина за време от $t < 10^{-9}s$, 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. Следват 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 загрява 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 [Делоне, Н., (1989); Dubey, A.K., V. Yadava, (2008); Chow Y. L., et al. (2012)].

3.1.2 Етапи на процеса лазерно маркиране

За органичните полимери, топлинното действие на лазерното лъчение се изразява в увеличаване на температурата на текстилните влакна до температура, при която протичат едни или други процеси, които предизвикват изменения в химичните и/или физичните им свойства - Таблица 3.1.

Таблица 3.1. Етапи на процеса лазерно маркиране

Процес	Схема	Резултат	Механизъм
Размекване - нагряване под T° на топене		Промяна на структурата, на цвета, потъмняване, избелване	Деструкция на полимерната верига, фото-разграждане, оксидация
Пяноподобна 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 основния материал	Отнемане на слоеве, нанесени върху основния материал, аблация

Деструкцията е процес на разрушаване на полимерната верига на целулозата, която изгражда памучните влакна, предизвикана от термичното действие на лазерното лъчение [Бояджийски, Г., Е.Кънчев, (2002)]. От разкъсването на глюкозидните и въглерод-въглеродните връзки намалява дължината на макромолекулата. В резултат на деструкцията се променя структурата, което променя отражението на повърхността и следователно се променя и цвета на материала. За памука деструкцията настъпва от 150°C до 180°C. Образуването на пяно-подобна структура е частично разграждане на материала и създаване на газови мехурчета. Тези мехурчета стават видими поради различното пречупване на светлината. Те са с дълбочина до

100μm в материала и до 50 μm във височина над повърхността на материала [LATI Industria Termoplastici S.p.A, (2016)]. Повърхността на мехурчетата може да бъде същата, като полимера или с променена структура. Вътрешността на газовите мехурчета е запълнена с въздух или газообразни мономери. Те не са затворени, защото полимерната структура не е твърда. Ако се добавят цветни пигменти, те придават цветен отпечатък и добър контраст. Този ефект е характерен за пластмасите и се формира самостоятелно или в комбинация с други ефекти. Резултата е добра маркировка. Като недостатък може да се отчете ниската устойчивост на маркировката.

Обезцветяването, наречено още депигментация, е друг метод в резултат на термо ефекта от въздействието на лазера, оставяйки видима разлика спрямо необработената повърхност. Избледняването на цвета или пълното му отстраняване, в резултат на контролирано действие на лъча върху текстилните багрени материали, при определени параметри на лъчението, се предизвиква от фото-разпадане на оцветителя, без да се повреждат влакната на основния текстилен материал. По време на този процес лазерното лъчение прониква в полимера на дълбочина до 100μm и се абсорбира от цветните пигменти [Han, Ad., D. Gubencu, (2008); Laser marking technologies, (2016)]. Разгражда се само багрилото и се отделят пари и други отпадъци, които се извеждат от работната зона. Размерът на цветните частици намалява, като под действието на светлината, те се раздробяват и цвета избледнява, а когато размерът им стане по-малък от видима дължина на вълната, цветът напълно изчезва. Излагането на пигментните частици на лазерната светлина води до обезцветяване, оставяйки текстилните влакна незасегнати и повърхността остава почти невредима. Ако интензивността стане твърде висока, това ще доведе до аблация на материала. Дължината на вълната на лазера трябва да се избере така, че да се абсорбира от багрилото, но не и от текстилния материал. Ефектът на промяна на цвета и/или избелване е възможен само за полимери и зависи в най-голяма степен от дължината на вълната на лазера. Други фактори, които са важни за степента на фото-разграждането и не допускане на разрушаване на основния материал, са: импулсната енергия, средната мощност, скоростта на маркиране, повърхнинната плътност на мощността и състава на обработвания материал. В промишлени условия този метод може да се прилага върху движеща се лента от текстилен плат или върху готови изделия [US 5567207 A, (1996)].

Рекристализацията е процес на фазово превръщане на материала от твърдо в течно (стопено) и отново в твърдо състояние. Модификацията на повърхността в резултат на рекристализацията предизвиква физическа промяна в текстилния материал, изразяваща се в промяна на цвета. При текстилните влакна протича процес на встъкляване и от високоеластично те

преминават в псевдо-пластично състояние. Например за памук температурата на встъкляване е около 220°C, а за полиестер - 80÷90°C. При 260°C полиестерните влакна се стопяват.

Изпарението (аблация) настъпва при нагряване на материала над температурата на изпарение, когато започва фазово превръщане на повърхностния слой (с дебелина от части от микрона до няколко стотин микрона) от течно или твърдо (сублимация) в газообразно състояние. Като резултат се формират канали с определена дълбочина и се наблюдава релефност. Маркирането чрез отстраняване на материал се състои от три стъпки. Първо фотоните от лъчението се абсорбират от най-горния слой с дебелина около 0,2μm, след това дългите верижни молекули в този слой се разрушават на части и накрая те се отстраняват от зоната за обработка под формата на пара и малки частици. Чрез скрайбиране се получава плитка бразда в обработвания материал от изпаряване.

Продължителността на импулса на лазера има значителен ефект върху динамиката на процеса на аблация - колкото импулса е по-кратък, толкова енергията се предава по-бързо на материала. Този начин на маркиране винаги дава нисък контраст на маркировката, но има добра трайност. Възможно е каналите да се запълнят с контрастно вещество и ще се получи и цветен ефект. Ако върху плата има допълнително нанесен слой (напр. промазване), чрез лазерната обработка може да се отстрани само този слой и да се формират канали с цвят различен от цвета на основния материал. Полиестерните влакна се разрушават (изпаряват) при достигане на 350°C.

Карбонизацията е един лесен и ефектен начин за лазерно маркиране при която става прегаряне на повърхността на памучните текстилни изделия. Памучните влакна се овъгляват при 300°C. Маркировката има жълто-кафяв цвят [Bosman, J., (2007)]. Маркирането чрез карбонизация образува изображения с висок и ясен контраст, но има и нежелани резултати: част от повърхността на материала може да се разруши и това намалява устойчивостта им при носене. Поради тази причина е необходимо много точно да се определят параметрите на процеса, като се определят границите на областта за прилагането му.

В зависимост от вида на материала и достигнатата температура, лазерната маркировка се случва в резултат на един или няколко от по-горе разгледаните процеси: структурни промени, депигментация, промяна на цвета, изгаряне (карбонизация), топене и изпарение. Лазерното маркиране е приложим процес за почти всички видове промишлени материали - таблица 3.2.

Таблица 3.2. Процеси на лазерно маркиране в зависимост от вида на материала [Bosman, J., (2007)]

Процеси	Материал				
	метал	стъкло	силикон	керамика	полимери
Аблация	R+	R+	R+	R-	R-
Фрагментация		R+			
Окисляване	C++				R-
Топене	R+	R+	R+	R-	R-
Деструкция		C+		C+	C++
Пяна					C++
Избелване					C+
Промяна на цвета		C++			C++
Карбонизация					C++
Дехидратация					C++
R - промяна в отразяването; C - промяна в цвета - нисък контраст; + нормален контраст; ++ много добър контраст					

3.1.3 Уравнение на енергийния баланс

Процесите, протичащи в материала, зависят основно от плътността на мощността - q_S, и времето на въздействие на лазерното лъчение - t_a, както и от оптичните и топлофизичните характеристики на обработвания материал. Интензитета на падащото лъчение намалява в дълбочина - формула 1.9, след като премине през слой вещество с определена дебелина. Една част от светлинният поток - F, на падащия върху обработвания материал лазерен лъч се отразява от повърхността му - F_R, друга се поглъща - F_A, а трета преминава през него - F_D, като е в сила равенството – 3.1. Ако тази зависимост се изрази чрез енергията, то тя ще има следния вид:

$$E = E_A + E_R + E_D \tag{3.1}$$

където: E – енергията на падащото лъчение;

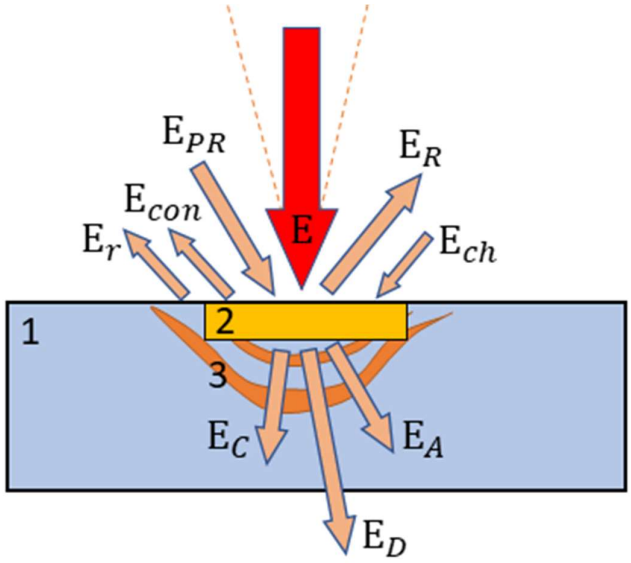
E_A – енергията на погълнатото лъчение;

E_R – енергията на отразеното лъчение;

E_D – енергията на пропуснатото лъчение.

Поради порестата структура на текстилните платове и сравнително малката им дебелина, енергията на пропуснатото лъчение - E_D, не трябва да се пренебрегва. При взаимодействието на лазерният лъч с материала на образеца 1 - фиг.3.2, 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 работната 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) [Schuöcker, D. (1998)].



Фиг. 3.2. Физичен модел на процеса на лазерно маркиране на текстилен материал - енергиен баланс [Schuöcker, D. (1998)]

При маркиране, енергията на лазерният лъч - E, която попада върху текстилния материал, се трансформира в различни енергии и може да се запише уравнението на енергийния баланс:

$$E = E_A + E_R + E_D + E_{PR} + E_{ch} + E_C + E_r + E_{con} \qquad (3.2)$$

Загубите на енергия от конвекция - E_{con}, и радиационно излъчване - E_r, са пренебрежимо малки, тъй като нагряването на материала става за много кратко време, последвано от почти същото като време охлаждане. В резултат на топлопроводността на материала, топлината се разпространява и в дълбочина на изделието, 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 й през плата - E_D. Като се отчетат загубите на енергии, за енергията, необходима за маркиране на материала, може да се запише следното равенство:

$$E_A + E_{ch} = E_{PR} + E_C \tag{3.3}$$

Ефективността на процеса на предаване на енергията на лазерното лъчение в плата се оценява чрез коефициент ξ_{ef} [Григорьянц, А., и др. (2006)], който се изчислява от отношението на погълнатата лазерна енергия към общото количество падаща върху материала енергия:

$$\xi_{ef} = \frac{E_A}{E} \tag{3.4}$$

Когато маркирането се осъществява чрез топене или карбонизация, не протича процес на оксидация ($E_{ch} = 0$), а енергията (E_C), която се предава в материала чрез топлопроводност не участва при топенето (за полиестерните материали) и карбонизирането (за памучните материали). Тогава приемаме, че $E_A = E_{PR}$ и можем да въведем нов коефициент, който характеризира ефективността на процеса на маркиране чрез топене и карбонизация на текстилни материали, който ще има следния вид:

$$\xi_{m,ef} = \frac{E_{PR}}{E} \tag{3.5}$$

Коефициентът на ефективност на технологичния процес на маркиране на практика е равен на коефициента на полезно действие (КПД) на процеса маркиране (η):

$$\eta = \xi_{m,ef} \tag{3.6}$$

3.2 Граници на приложимост на модела

Процеса лазерно маркиране на изделия от текстилни полимери е сложен и при реализацията му влияят в различна степен множество технологични фактори и физични величини - фиг. 1.26. За да се направи оценка на степента на влиянието на всеки от тях и да се оптимизира технологичния процес, е необходимо да се анализират тези фактори и величини, връзките между тях, както и техните корелации. Основните фактори са разгледани и анализирани в т.1.6. Тук ще бъдат представени най-съществените връзки между тях.

За обработка на текстилни материали с цел маркиране, не е необходимо мощно лазерно лъчение. Необходимо е да се постигане оптимален режим на технологичния процес, като се е зададат стойности на параметрите на лазерната система, при които ще се получи маркировка с видим контраст без да бъде повреден материала (текстилните влакна няма да бъдат разрушени) при минимални разходи.

3.2.1 Повърхнинна плътност на мощността

Повърхнинната плътност на мощността q_S, е основен технологичен параметър, който има определящо значение за качеството на процеса на лазерно маркиране и контраста на маркировката. За лазерите, работещи в импулсен режим, този параметър е най-важния за определяне на топлинното въздействие. Както се вижда от формула 1.23, той е в пряка функционална зависимост от средната мощност на лазерния източник P и обратно пропорционална зависимост от площта, върху която пада лъча. За всеки лазер максималната мощност е определена от производителя и не може да се променя.

Следователно оптимизацията на този параметър ще зависи от големината на кръга, формиран от лазерният лъч, наречен фокусно петно. Промяната на диаметъра на фокусното петно ще предизвика промяна на повърхнинната плътност на мощността. При една и съща средна мощност на лъчението, колкото лъчът е фокусиран в по-малка площ, толкова q_S ще има по-голяма стойност.

$$q_S = f\left(P, d_f\right) \tag{3.7}$$

Температурата на обработваната повърхност зависи от мощността - P, която се абсорбира от единица площ S. Връзката между температурата - T и повърхнинната плътност на мощността - q_S, може да се получи от уравнението на топлопроводността 3.8, което е частно диференциално уравнение от втори ред - параболичен вид [Вейко, В., (2007)]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha . \Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho . c} \tag{3.8}$$

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{3.9}$$

където: Δ – оператор на Лаплас;

α – коефициент на топлопроводност;

c – специфичен топлинен коефициент;

ρ – плътност на материала.

За решаването на 3.8 е необходимо да се знае едно начално условие, шест гранични 3.10 и 3.11 и да се определи $Q(x, y, z, t)$ чрез 3.12.

$$T_{x,y,z,0} = T_0,\ T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_0, \tag{3.10}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial y_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial z_{0,t}} = 0 \tag{3.11}$$

$$Q = q_S(1 - R)\alpha e^{\alpha x} \tag{3.12}$$

След решаване на системата, се извежда връзката между температурата T и плътността на мощността q_S:

$$T = f\begin{bmatrix} q(1-R) \\ \rho, c, a, R, \alpha \\ x, y, z, t \end{bmatrix} 0$$

- погълнатата мощност;
- топлофизични и оптични параметри;
- аргументи.

(3.13)

Решението на уравнение 3.8 при условията 3.10 за източник на топлина (лазерен лъч) с радиус на фокусното петно r_0, ще бъде:

$$T = \frac{2q_S(1-R)\sqrt{a.t_{vd}}}{k}\left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - ierfc\frac{r_0}{2\sqrt{a.t_{vd}}}\right) + T_0 \tag{3.14}$$

Когато лазерът работи в импулсен режим, може да се запише следната формула:

$$r_0 \gg \sqrt{a.t_{vd}} \rightarrow ierfc\frac{r_0}{2\sqrt{at_{vd}}} = 0 \tag{3.15}$$

$$T = \frac{2q_S(1-R)\sqrt{a.t_{vd}}}{k\sqrt{\pi}} + T_0 \tag{3.16}$$

От уравнение 3.16 се извежда зависимостта 3.17 за $q_{S,kp}$:

$$q_{S,kp} = \frac{(T-T_0)k\sqrt{\pi}}{2q_S(1-R)\sqrt{a.t_{vd}}} + T_0 \tag{3.17}$$

където: t_{vd} – времето на въздействие за импулсен режим на лазера;

k – коефициент на топлопроводност;

v – скорост на маркиране;

d – диаметър на фокусното петно.

$$t_{vd} = \frac{d}{\mathrm{v}}\tau f \tag{3.18}$$

$$q_{S,kp} = \frac{(T-T_0)k}{2A}\sqrt{\frac{\pi.\mathrm{v}}{a.d.\tau.f}} \tag{3.19}$$

$$q_{S,kp} = f(T, A, k, a, d, \tau, f, \mathrm{v}) \tag{3.20}$$

Ако в уравнение 1.23 се замести P и d_f от 1.21 и 1.20 съответно, за q_s ще се получи 3.21:

$$q_S = \frac{\pi.P_p.f.\tau.D^2}{4(M^2)^2.\lambda^2.W_d^2} \tag{3.21}$$

$$q_S = f\left(D, \tau, f, P_p, \mathrm{M}^2, \lambda, W_d\right) \tag{3.22}$$

От 3.7, 3.20 и 3.22 се вижда, че повърхностната плътност на мощността на лазерното лъчение - q_S, е свързана със: средната мощност - P; импулсната

мощност - P_p; честотата на повторение на импулсите - f; продължителността на импулсите - τ; дължината на вълната - λ; фокусното разстояние - W_d ; диаметъра на лазерния лъч, падащ върху обектива - D; качеството на лазерното лъчение - M^2, коефициентите на температуропроводност - a; и на топлопроводност - k; специфичния топлинен капацитет - c, температурата на материала в зоната на обработка - T, времето на въздействие - t_{vd}; поглъщателната способност на материала - A и скоростта на маркиране - v. Следователно повърхностната плътност на мощността - q_S, за процеса на лазерно маркиране, е свързана с всички параметри на системата.

Друг много важен параметър за процеса лазерно маркиране на текстилни материали е обемната плътност на погълнатата енергия - E_ρ, който отчита температурата на нагряване в зоната на въздействие на лазерния лъч върху материала. Като се вземе предвид, че $E = P.t$ и $V = d.\text{v}.t.\delta$, а q_S от формула 1.23 и P от 1.21 и ги заместим в равенство 1.33, се получават следните зависимости 3.23÷3.25, чрез които може да се пресметне стойността на обемната плътност на погълнатата енергия:

$$E_\rho = \frac{A.P}{d.\text{v}.\delta} \tag{3.23}$$

$$E_\rho = \frac{A.P_p.f.\tau}{d.\text{v}.\delta} \tag{3.24}$$

$$E_\rho = q_S \frac{\pi.A.d}{4.\text{v}.\delta} \tag{3.25}$$

Формула 3.25 показва линейната зависимост на обемната плътност на погълнатата енергия от повърхностната плътност на мощността. Обемната плътност на погълнатата енергия, подобно на повърхностната плътност на мощността, се явява функция на основните параметри на технологичния процес лазерно маркиране - формула 3.26 и най-пълно отчита енергетичното въздействие на лазерното лъчение върху маркирания материал, а следователно и върху контраста на маркировката.

$$E_\rho = f\left(P, P_p, q_S, \text{v}, f, \tau, d, A, \delta\right) \tag{3.26}$$

Максималната стойност на повърхностната плътност на мощността може лесно да се определи по формула 1.23, т.к. горната граница на мощността е зададена от производителя на всеки лазерен източник. За различните материали трябва да се определи експериментално диапазона на изменение на основните параметри за работа на лазерната система, при който се постига оптимален контраст и качество на лазерната маркировка.

3.2.2 Определяне на критичните стойности на повърхнинната плътност на мощността

Критичните стойности на повърхнинната плътност на мощността са важни за разграничаване на протичащите процеси при:

- различни скорости на маркиране - V_i;
- различни лазери - L_i;
- различни видове текстилни материали.

Таблица 3.3. Минимален диаметър на фокусното петно

D, mm	d_f, μm (W_d=180mm)			
	M^2			
	1,2	1,3	1,4	1,5
6	48,8	52,8	56,9	61,0
7	41,8	45,3	48,8	52,3
8	36,6	39,6	42,7	45,7
9	32,5	35,2	37,9	40,6
10	29,3	31,7	34,1	36,6

Преди да се определи максималната стойност на плътността на мощността, трябва да е известен минималния диаметър на фокусното петно - d_f. Той е пресметнат по формула 1.20, при $W_d = 180mm$ и различни стойности в декларирания от производителя диапазон на параметъра M^2. Резултатите са обобщени в таблица 3.3.

Максималната стойност на плътността на мощността $q_{S,max}$ на лазерното лъчение за използваните лазери е пресметната по формула 1.23, като диаметъра на работното петно d е заместен с диаметъра на минималното фокусно петно $d_f = 54\mu m$ от табл. 2.2.

$$q_{S,max} = \frac{4.P_a}{\pi.d_f^2} = 87{,}3.10^8, \qquad W.m^{-2}$$

За да се отчете влиянието на температурата, която се предава на обработвания материал от лазерния лъч, критичната плътност на мощността се пресмята по формула 3.19, при фокусно разстояние $W_d = 180mm$, за маркиране на:

Памучните материали (П) чрез:

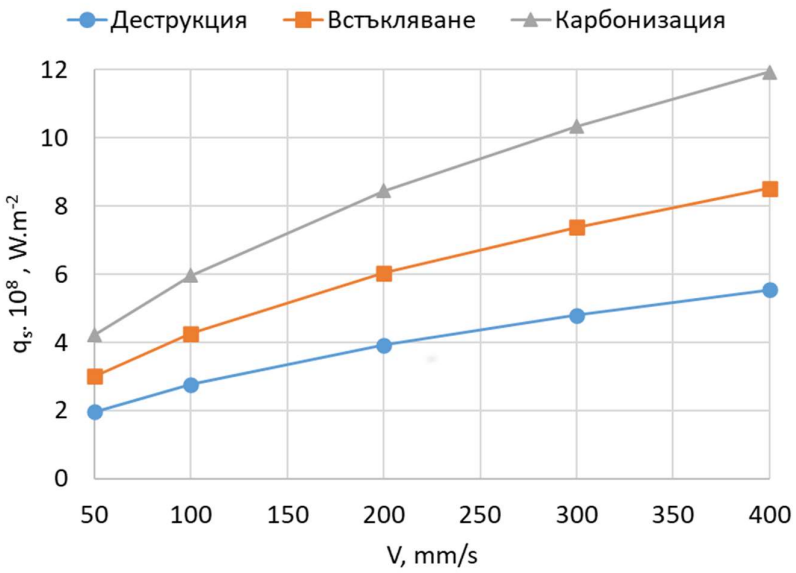
- деструкция $q_{S\text{кр,д}}$ – при $t_{\text{кр,д}} \geq 150℃$;
- встъкляване $q_{S\text{кр,в}}$ – при $t_{\text{кр,в}} \geq 220℃$;
- карбонизация $q_{S\text{кр,к}}$ – при $t_{\text{кр,к}} \geq 300℃$.

От пресметнатите стойности за критичната плътност на мощността и максималната плътност на мощността $q_{S,max}$ се получават интервали за плътността на мощността при маркиране използвания лазер, чрез различните етапи на процеса, за памучни материали показани в таблица 3.4. Стойностите са пресметнати при постоянна честота на лазерното лъчение $f = 20\ kHz$.

Таблица 3.4. Интервали за плътността на мощността за обработка на памучни материали $q_{S,\text{кр},i} = f(V_i)$ при различни етапи на процеса

V, mm/s	$q_s.10^8$, $W.m^{-2}$		
	Деструкция	Встъкляване	Карбонизация
50	1,96÷3,01	3,01÷4,22	4,22÷87,3
100	2,77÷4,26	4,26÷5,97	5,97÷87,3
200	3,92÷6,03	6,03÷8,44	8,44÷87,3
300	4,80÷7,38	7,38÷10,34	10,34÷87,3
400	5,54÷8,52	8,52÷11,93	11,93÷87,3

На фиг.3.3 са представени получените графични зависимости $q_{S,\text{кр},i} = f(V_i)$, които са почти линейни. Наблюдава се че с увеличаване на скоростта на маркиране се увеличава и повърхнинната плътност на мощността.

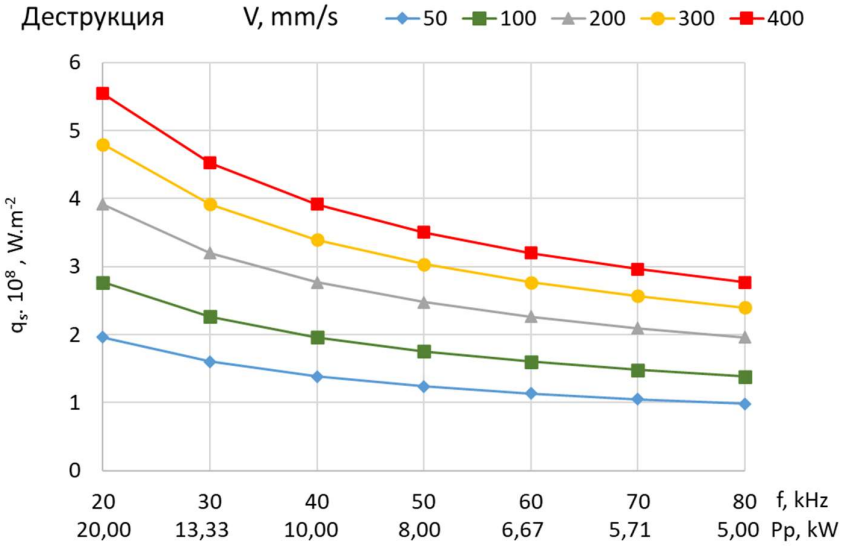


Фиг. 3.3. Зависимост на плътността на мощността от скоростта на маркиране $q_{S,\text{кр},i} = f(V_i)$

Резултатите от изменението на повърхнинната плътност на мощността при промяна на честотата на лъча в интервала $f = 20 \div 80\,kHz$ при различни скорости са показани от фиг.3.4 до фиг.3.6, а в таблици от 3.5 до 3.7 са дадени числените стойности от пресмятанията по формула 3.19, като пресмятането на стойностите на импулсната мощност при съответната честота е извършено по формула 1.21. От формулите се вижда, че връзката между импулсната мощност и честотата на импулсите е обратно пропорционална, което позволява дори при ниска импулсна мощност, честотата да достига значителни стойности.

Таблица 3.5. Зависимост на плътността на мощността от честотата на импулсите на лазера и скорост на лъча за настъпване на деструкция

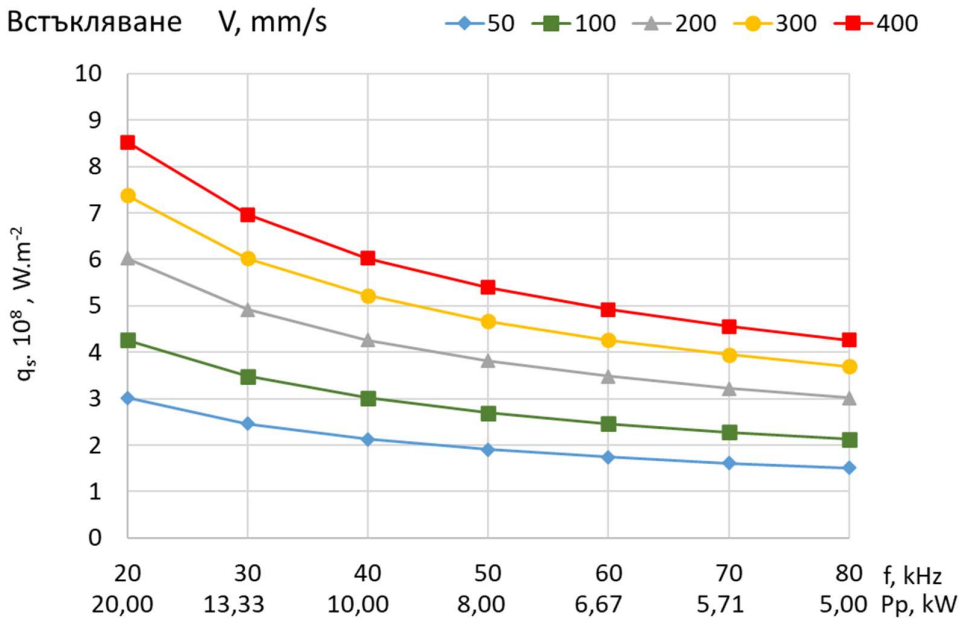
f, kHz	*Pp, kW*	$q_s.10^8$, $W.m^{-2}$ (деструкция)				
		V, mm/s				
		50	100	200	300	400
20	20,00	1,96	2,77	3,92	4,80	5,54
30	13,33	1,60	2,26	3,20	3,92	4,52
40	10,00	1,39	1,96	2,77	3,39	3,92
50	8,00	1,24	1,75	2,48	3,03	3,50
60	6,67	1,13	1,60	2,26	2,77	3,20
70	5,71	1,05	1,48	2,09	2,56	2,96
80	5,00	0,98	1,39	1,96	2,40	2,77



Фиг. 3.4. Зависимост на плътността на мощността от честотата на импулсите на лазера и скорост на лъча за настъпване на деструкция в материала, $q_{S,\text{кр}} = f(f, V)$.

Таблица 3.6. Зависимост на плътността на мощността от честотата на импулсите на лазера и скорост на лъча за настъпване на встъкляване

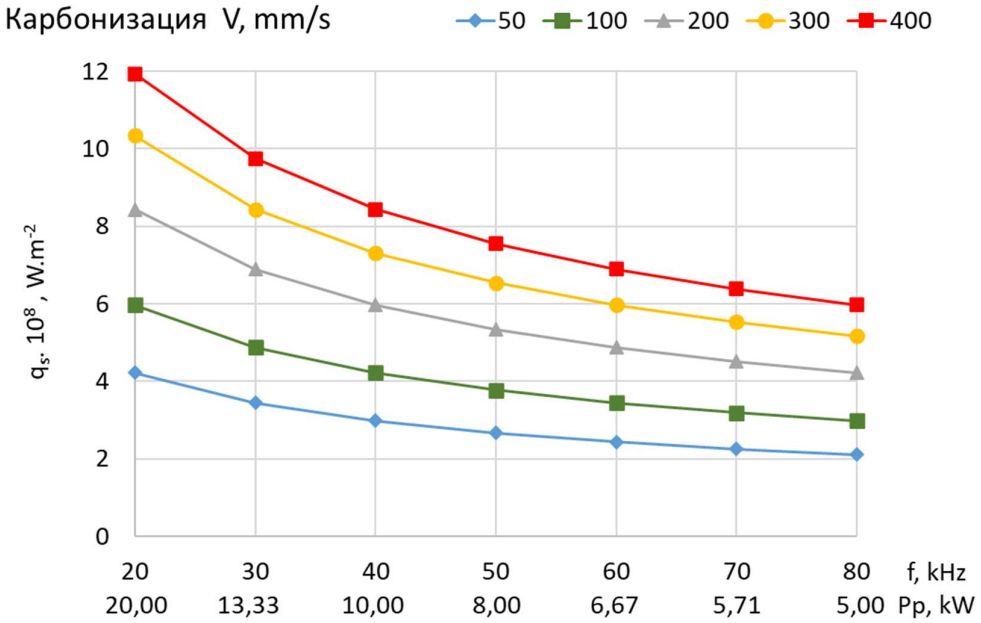
f, kHz	*Pp, kW*	$q_s.10^8$, $W.m^{-2}$ (встъкляване)				
		V, mm/s				
		50	100	200	300	400
20	20,00	3,01	4,26	6,03	7,38	8,52
30	13,33	2,46	3,48	4,92	6,03	6,96
40	10,00	2,13	3,01	4,26	5,22	6,03
50	8,00	1,91	2,70	3,81	4,67	5,39
60	6,67	1,74	2,46	3,48	4,26	4,92
70	5,71	1,61	2,28	3,22	3,95	4,56
80	5,00	1,51	2,13	3,01	3,69	4,26



Фиг. 3.5. Зависимост на плътността на мощността от честотата на импулсите на лазера и скорост на лъча за настъпване на встъкляване в материала, $q_{S,\text{кр}} = f(f, V)$.

Таблица 3.7. Зависимост на плътността на мощността от честотата на импулсите на лазера и скорост на лъча за настъпване на карбонизация

f, kHz	*Pp, kW*	$q_s.10^8$, $W.m^{-2}$ (карбонизация)				
		V, mm/s				
		50	100	200	300	400
20	20,00	4,22	5,97	8,44	10,34	11,93
30	13,33	3,45	4,87	6,89	8,44	9,74
40	10,00	2,98	4,22	5,97	7,31	8,44
50	8,00	2,67	3,77	5,34	6,54	7,55
60	6,67	2,44	3,45	4,87	5,97	6,89
70	5,71	2,26	3,19	4,51	5,52	6,38
80	5,00	2,11	2,98	4,22	5,17	5,97

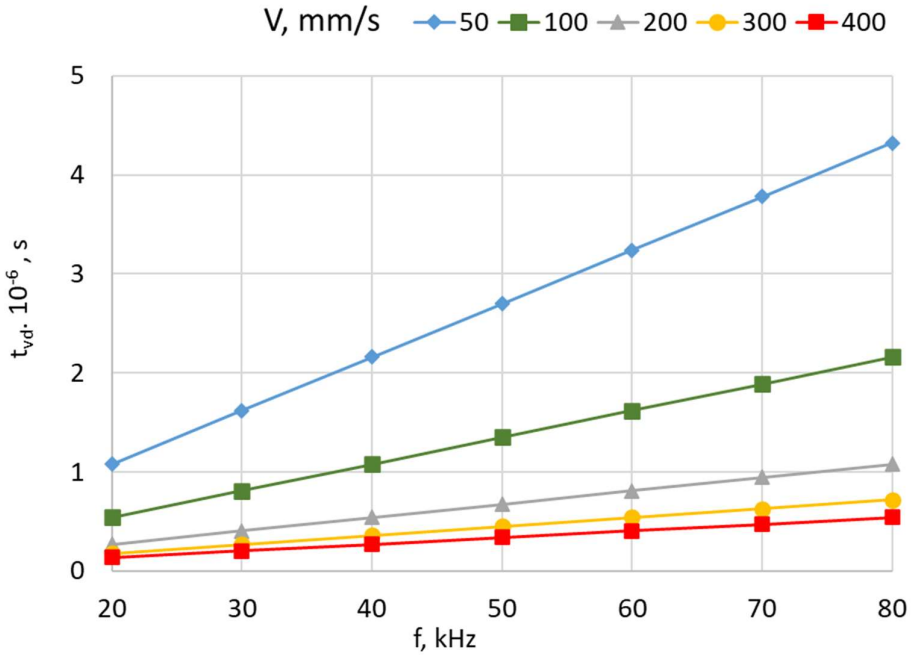


Фиг. 3.6. Зависимост на плътността на мощността от честотата на импулсите на лазера и скорост на лъча за настъпване на карбонизация в материала, $q_{S,\text{кр}} = f(f, V)$.

Графиките на фиг.3.7 показват зависимостта на времето на въздействие - t_{vd}, на лазерния лъч от честотата на импулсите и скоростта му. Числените пресмятания са направени по формула 3.18 и са представени в таблица 3.8.

Таблица 3.8. Време на въздействие t_{vd} *на лазерния лъч от честотата на импулсите и скоростта му*

f, *kHz*	$t_{vd}.10^{-6}$, s				
	V, mm/s				
	50	100	200	300	400
20	1,08	0,54	0,27	0,18	0,14
30	1,62	0,81	0,41	0,27	0,20
40	2,16	1,08	0,54	0,36	0,27
50	2,70	1,35	0,68	0,45	0,34
60	3,24	1,62	0,81	0,54	0,41
70	3,78	1,89	0,95	0,63	0,47
80	4,32	2,16	1,08	0,72	0,54



Фиг. 3.6. Зависимост на времето на въздействие на лазерния лъч от честотата на импулсите и скоростта му, $t_{vd} = f(f, V)$.

Сравнявайки графиките се вижда, че зависимостта на времето на въздействие от честота на лазерния лъч, при промяна на скоростта на движение е линейна и правопропорционална. С увеличаване на скоростта на маркиране, времето на въздействие намалява. Колкото скоростта е по-голяма, толкова по-малко зависи от честота поради по-малката стръмност на графиките. Ясно се вижда, че необходимото време за въздействие върху обработвания материал се постига при минимална скорост на маркиране и максимална честота, където се очаква производителността на процеса да бъде най-висока. Разликата е от 4 пъти при запазване на скоростта и до 8

пъти при запазване на честотата. Максималната разлика възлиза на 30 пъти при намаляване и на двете променливи.

Литература

Bosman, J., (2007), Processes and strategies for solid state q-switch laser marking of polymers, PhD Thesis, ISBN 90-365-2346-X, Netherlands, 2007.

Chow Y. L., C. K. Chan, C. W. Kan, (2012), Effect of CO2 laser irradiation on the properties of cotton fabric, Textile Research Journal, 82(12) 1220-1234, 2012.

Dubey, A.K., V. Yadava, (2008), Laser beam machining – A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48, p.609-628, 2008.

Han, Ad., D. Gubencu, (2008), Analysis of the laser marking technologies, Nonconventional Technologies Review, p.17-22, 4/2008.

Laser marking technologies, Sintec Optronics Technology Pte Ltd, 2016.

LATI Industria Termoplastici S.p.A., Italy, Laser Marking of Thermoplastics, 2016.

Meijer, J., (2014), Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities, JMATPROCTEC, Elsevier, 149, p.2-17, 2004.

Sarkar J., M. Rashaduzzaman, (2014a), Laser fading technology: facts and opportunities, Bangladesh Textile Today, 7(8), https://www.researchgate.net/publication/348960038.

Sarkar, J., E. Khalil, (2014б), Effect of Industrial Bleach Wash and Softening on the Physical, Mechanical and Color Properties of Denim Garments. IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering, 1(3), 46-49.

Sarkar, J., E. Khalil, M. Solaiman, (2014в). Effect of Enzyme Washing Combined With Pumice Stone on the Physical, Mechanical and Color Properties of Denim Garments. International Journal of Research in Advent Technology, 2(9), 65-68.

Štepánková, M., Wiener, J., Dembický, J, (2010), Impact of Laser Thermal Stress on Cotton Fabric, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2010, Vol. 18, No. 3 (80).

US 5567207 A, Method for marking and fading textiles with lasers – 1996.

Ангелова, Й., (2016), Дисертация „Изследване на процеса на лазерно маркиране на промишлени материали “, 2016г.

Бояджийски, Г., Е.Кънчев, (2002), Текстилна химия, Университетско издателство „Васил Априлов“ – Габрово, 2002

Вейко, В., (2007), Технологические лазеры и лазерное излучение, ГУ ИТМО, Санкт Петербург, 2007.

Григорьянц, А., И. Шиганов, А. Мисюров, (2006), Технологические процесы лазер обработки, изд. МГТУ им. Н. Баумана, Москва, 2006.

Делоне, Н., (1989), Взаимодействие лазерного излучения с веществом, изд. „Наука“, Москва, 1989г.

Замфиров, М., Н. Вучков, (2011), Нека бъде монохроматична, кохерентна и насочена светлина (50 години от създаването на лазера), стр.32-41, Светът на физиката, 2/2011г.

Иванчев, Н., Ст. Петров, Л. Христов, (1975), Физика, Техника, София, 1975.

Лазов, Л., Н. Ангелов, (2011), Влияние на някои фактори върху процеса на лазерното маркиране на изделия от метали и сплави, III-527-531, МНК Унитех, Габрово, 2011.

Лилков, В., (2011), Атомна физика, изд. Ив. Рилски, София,2011г.

4 Изследване и оценяване на влиянието на технологичните фактори върху качеството на лазерната маркировка и физико-механичните свойства на плат Деним

4.1 Експериментално изследване

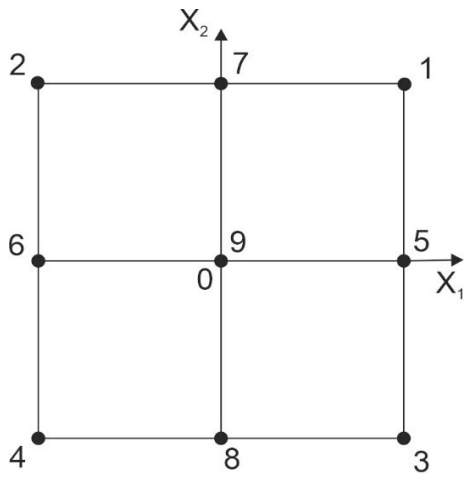
4.1.1 Провеждане на изследването

За да се установи многофакторното влияние на технологични параметри върху физико-механичните свойства на памучен плат тип Деним (табл.2.1) и качествените показатели на нанесената маркировка, облъчени с лазерен лъч, е проведеното експериментално изследване. Подготвените образци от плата се обработват и изпитват според методиката описана в глава 2.4.1.

Поставените цели и параметри на оптимизация са:

- Y_1 - здравина на опън по основа, N;
- Y_2 – разтегливост до скъсване по основа, %.
- Y_3 - здравина на опън по вътък, N;
- Y_4 – разтегливост до скъсване по вътък, %.
- Y_5 – устойчивост на претриване, cycle;
- Y_6 – коефициент на избелване, L^*.

За решаване на поставената задача е проведен планиран експеримент, за получаване на нелинеен многофакторен модел, чрез оптимално композиционно планиране от типа B_{m} – фиг.4.1. Избраните фактори на влияние са следните:



Фиг.4.1 План на експеримента

- X_1 – мощност на лазерното лъчение, P_a, W;
- X_2 – стъпка/отместване на лъча, $\Delta x, mm$.

Факторите варират в границите - табл.4.1, обезпечаващи получаването на най-добри резултати при маркиране с лазер [Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016а)]. Постоянните параметри на процеса лазерно маркиране са: дефокусировка $\Delta W_d = 0mm$; ъгъл на наклона на стъпката/отместването $\alpha = 0^{\mathrm{o}}$; честота на повторение на импулсите $f = 20\ kHz$; брой на повторенията - $R = 1$; скорост на лазерното лъчение $V = 300mm/s$ (виж Приложение П3.3). Избора на мострата за изследване е

направена експертно въз основа на предварително проведени изследвания при различни параметри на лазерното маркиране. Подбран е диапазон за използване на максималната мощност на лазерното лъчение, диапазон на стъпката/отместването на лъча при която се постига равномерност на покритието на маркировката и скорост при която няма места от плата с карбонизирани участъци или слаб контраст.

За всяка от поставените цели се построява матрицата на експеримента съгласно (табл.4.2).

Табл.4.1 Област на вариране на факторите

Нива на факторите	X_1, W	X_2, mm	Кодирана стойност
$X_{io} + \Delta X_i$	20	0,35	+1
X_{io}	14	0,25	0
$X_{io} - \Delta X_i$	8	0,15	-1
където $\Delta X_1 = 6\ W$ и $\Delta X_2 = 0{,}10\ mm$			

Табл.4.2 Матрица на експеримента

№	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	$\overline{Y_l}$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$\overline{Y_{l,1}}$
2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	$\overline{Y_{l,2}}$
3	+1	+1	-1	-1	+1	+1	$\overline{Y_{l,3}}$
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	$\overline{Y_{l,4}}$
5	+1	+1	0	0	+1	0	$\overline{Y_{l,5}}$
6	+1	-1	0	0	+1	0	$\overline{Y_{l,6}}$
7	+1	0	+1	0	0	+1	$\overline{Y_{l,7}}$
8	+1	0	-1	0	0	+1	$\overline{Y_{l,8}}$
9	+1	0	0	0	0	0	$\overline{Y_{l,9}}$

Резултатите от проведените експерименти са представени обобщено в табл.4.3., където факторите са дадени в кодирани стойности, а целевите функции в натурални стойности.

Табл.4.3 Резултати от проведените експерименти

x_1	x_2	Y_1, N	Y_2, %	Y_3, N	Y_4, %	$Y_5.10^3$, $cycles$	Y_6
+1	+1	1282,0	22,27	540,4	17,42	90	29,38
-1	+1	1556,7	23,00	581,2	18,12	110	27,10
+1	-1	946,1	20,83	542,0	16,44	70	33,95
-1	-1	1329,0	22,27	536,0	17,25	80	31,16
+1	0	1076,3	22,20	546,0	17,30	90	30,83
-1	0	1459,0	23,60	591,5	17,46	90	28,81
0	+1	1386,0	23,47	566,2	17,89	100	27,83
0	-1	1056,3	21,80	535,7	17,10	90	31,24
0	0	1326,7	23,20	583,0	17,70	100	29,57

4.1.2 Математическо моделиране

Статистическата обработка на експерименталните данни е реализирана с програмния продукт „QstatLab-v6“. С помощта на програмата се извеждат полиномни модели от 2^{-pa} степен (4.1) и се изчисляват статистическите характеристики на получените модели по въведените експериментални данни на базата на метода на регресионния анализ.

$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \qquad (4.1)$$

Математичният модел за решаваната задача се получава след заместване на числените стойности на регресионните коефициенти (табл.4.4) в уравнение 4.1, като е представен в табл.4.5. Значимостта на коефициентите е определена за ниво $p = 0.05$.

Табл.4.4 Числени стойности на регресионните коефициенти на модела в кодиран вид (виж Приложение 4)

Модел	*Значими коефициенти на модела изчислени при* $p=0{,}05$					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Y_1	1268,678	-173,383	148,883	0	0	0
Y_2	23,000	-0,595	0,640	0	0	-0,727
Y_3	573,500	-13,383	12,350	-11,700	0	-23,250

Y_4	17,409	-0,278	0,440	0	0	0
Y_5	96,667	0	10,000	0	-8,333	0
Y_6	29,986	1,182	-2,007	0	0	0

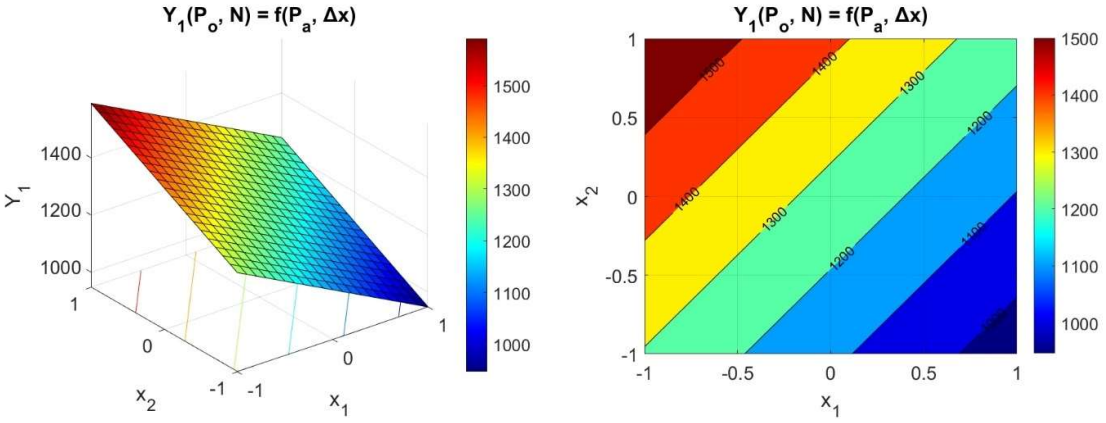
Табл.4.5 Математичен модел на целевата функция в кодиран вид

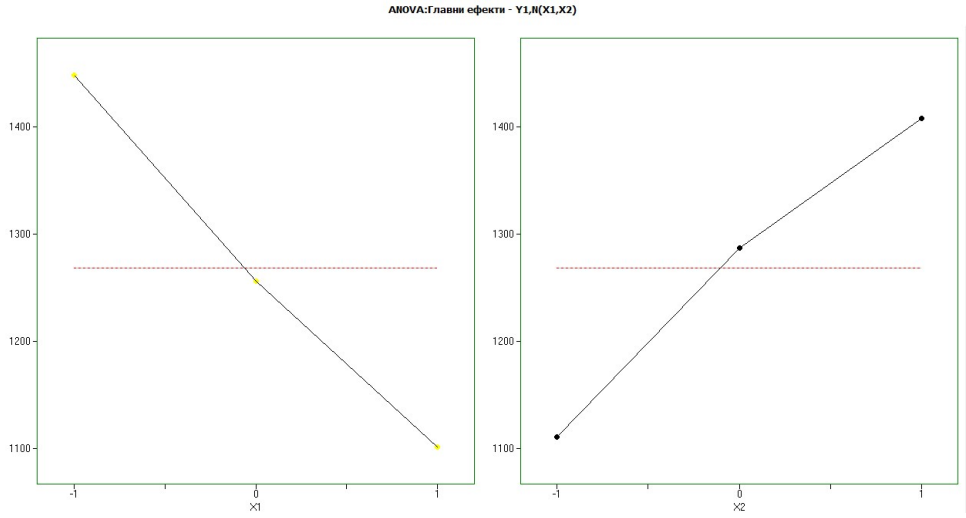
$Y_1 = 1268{,}678 - 173{,}383x_1 + 148{,}883x_2$
$Y_2 = 23{,}000 - 0{,}595x_1 + 0{,}640x_2 - 0{,}727x_2^2$
$Y_3 = 573{,}500 - 13{,}383x_1 + 12{,}350x_2 - 11{,}700x_1x_2 - 23{,}250x_2^2$
$Y_4 = 17{,}409 - 0{,}278x_1 + 0{,}440x_2$
$Y_5 = 96{,}667 + 10{,}000x_2 - 8{,}333x_1^2$
$Y_6 = 29{,}986 + 1{,}182x_1 - 2{,}007x_2$

Резултатите от направения регресионен и дисперсионен анализ е подробно представен в Приложение 4, съдържащо статистическа информация за избраните модели, доказващи адекватността им.

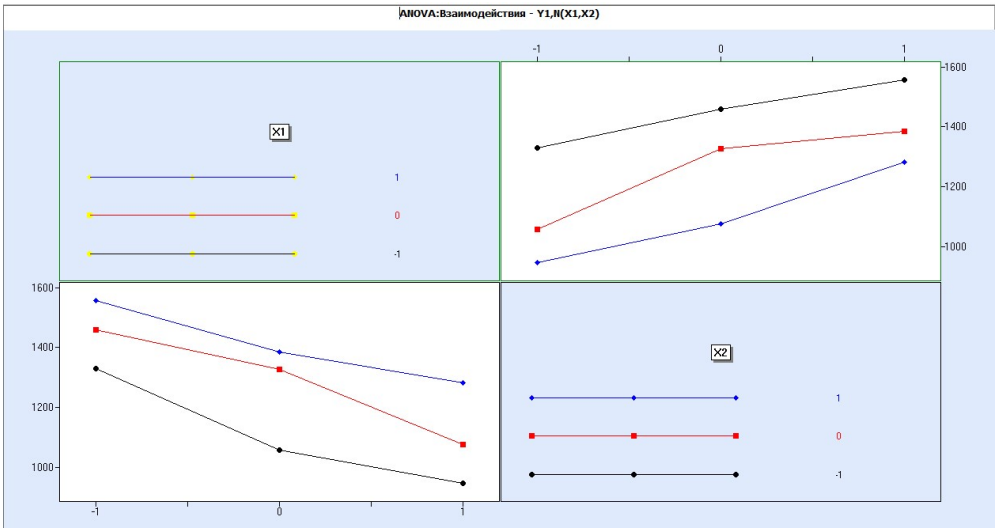
4.1.3 Графично представяне на резултатите

За графичното представяне на аналитичното уравнение от математичния модел (табл.4.5) е използван програмния продукт MatlabR2022a. Получените криви са представени в тримерно и двумерно пространство на фиг.4.2 до фиг.4.7. На тях са обозначени координатна система с кодирани стойности на входните фактори и натурални за изходните параметри.



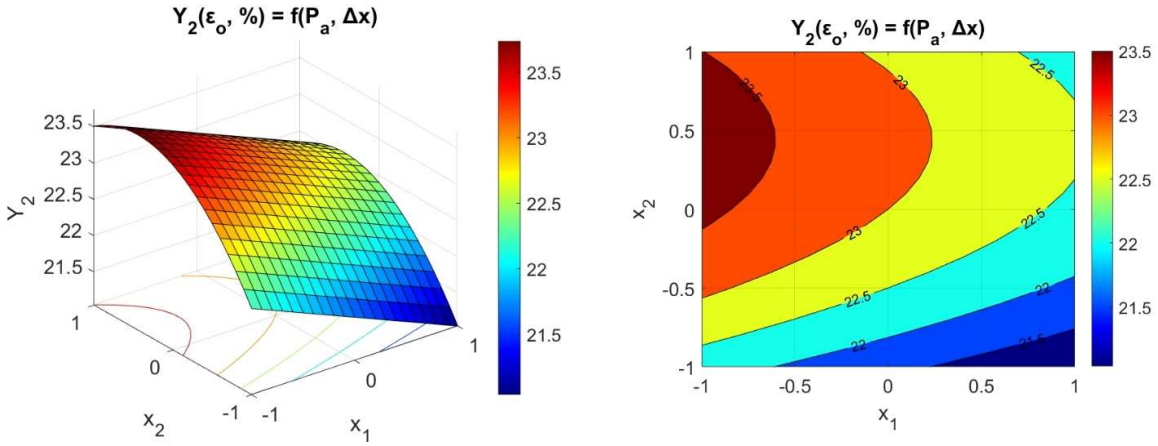


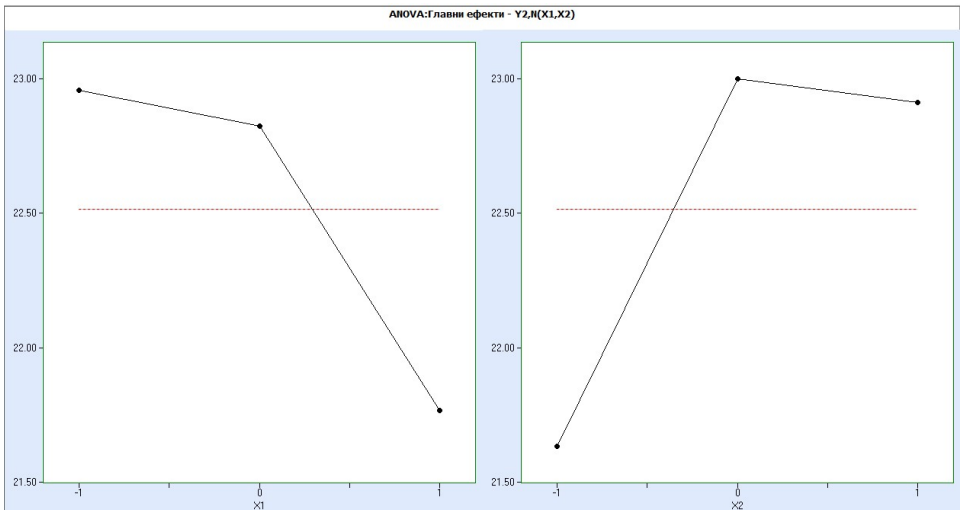
б)



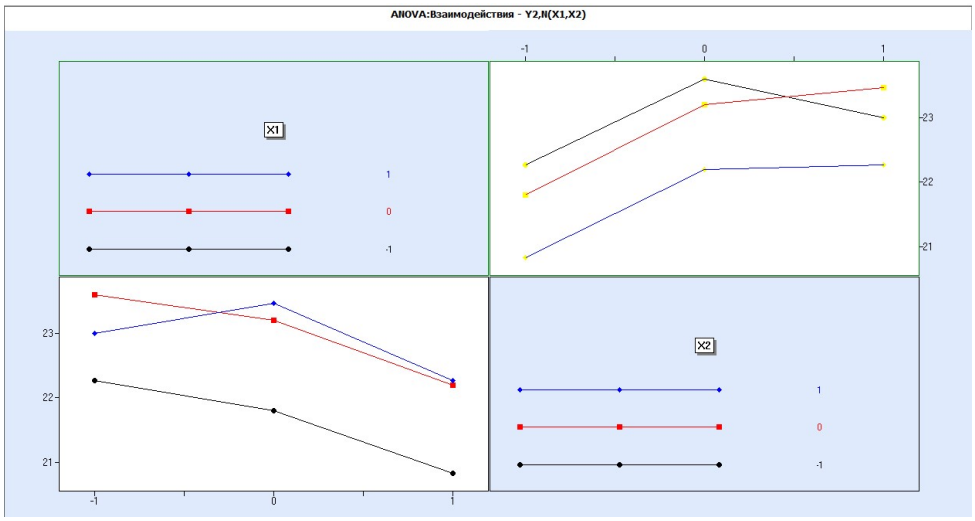
в)

Фиг.4.2. Здравина на опън по основа Y_1, N; б)главни ефекти; в)взаимодействия



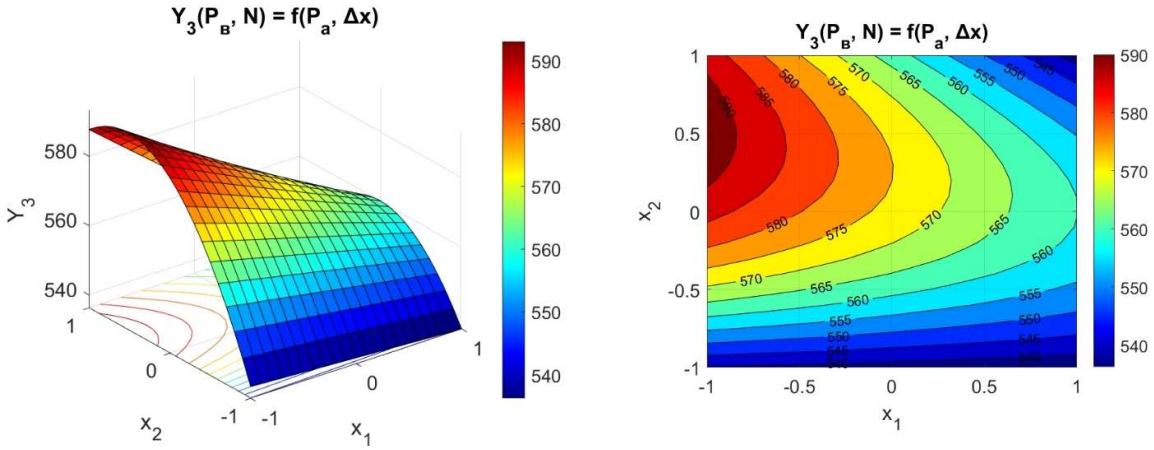


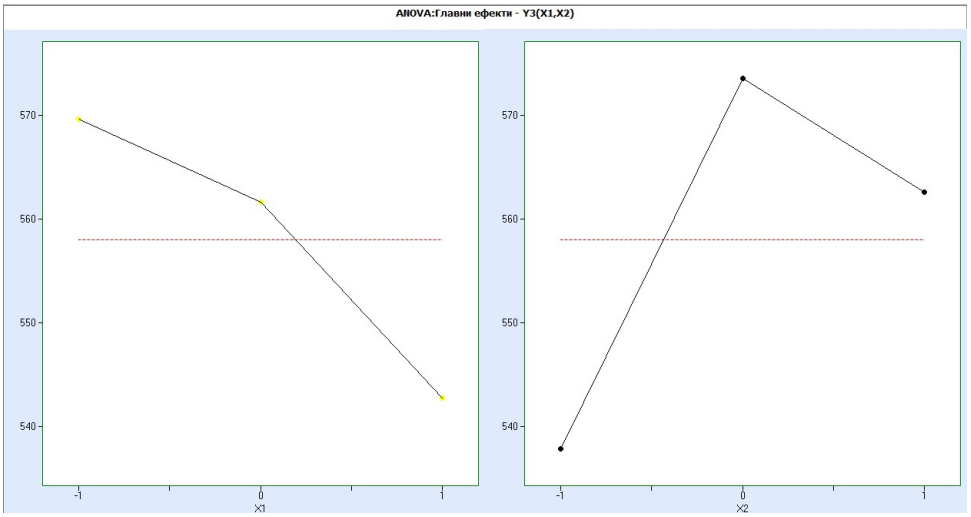
б)



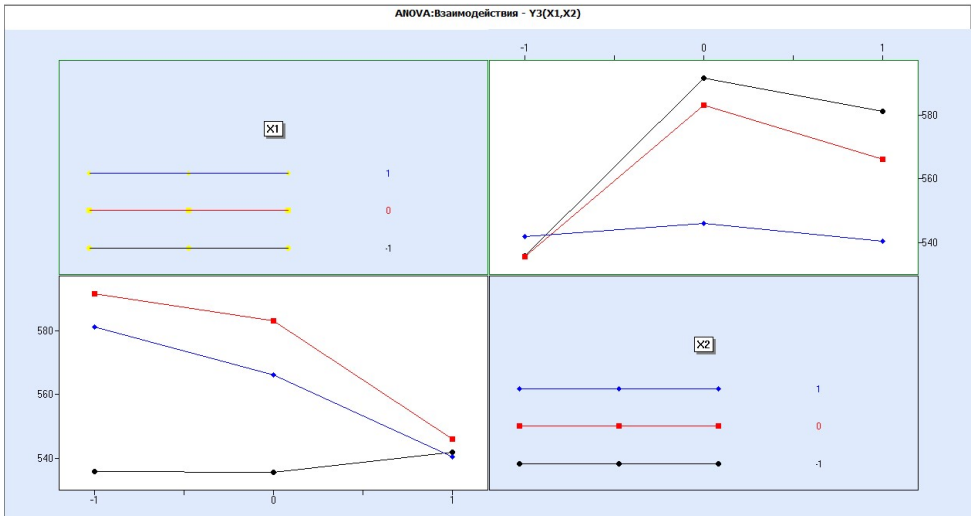
в)

Фиг.4.3. Разтегливост до скъсване по основа Y_2,%; б)главни ефекти; в)взаимодействия



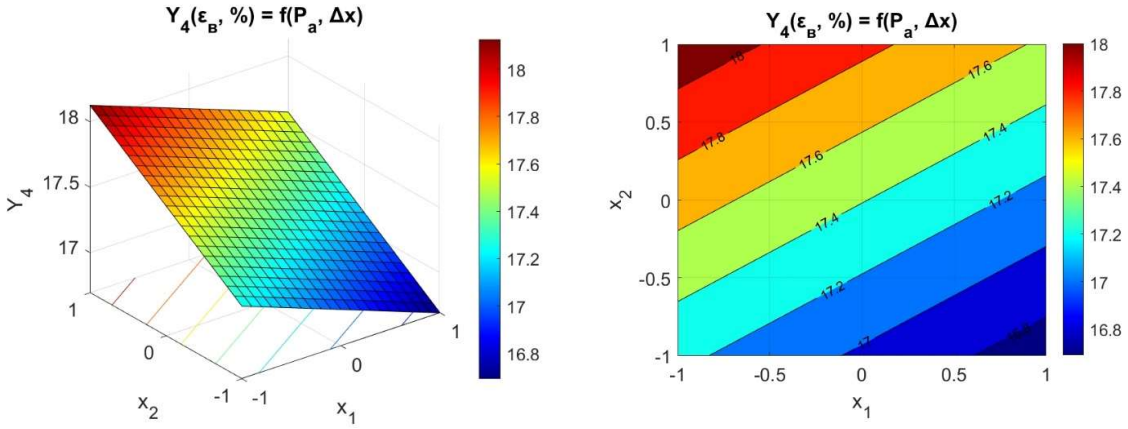


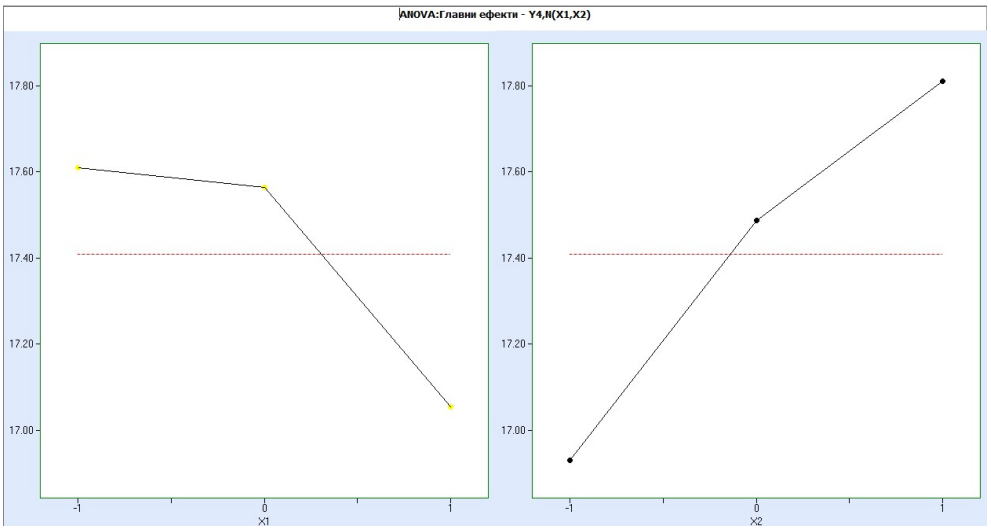
б)



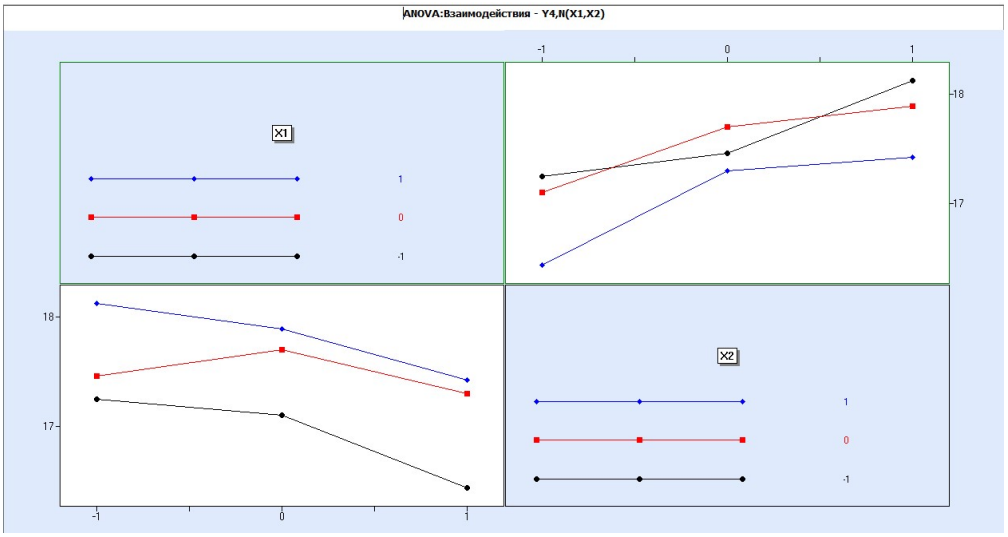
в)

Фиг.4.4. Здравина на опън по вътък Y_3, N; б)главни ефекти; в)взаимодействия



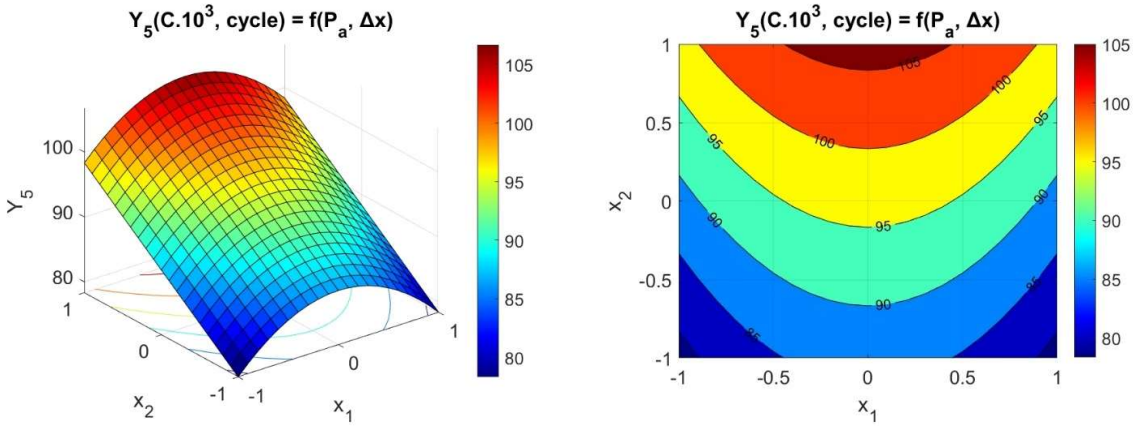


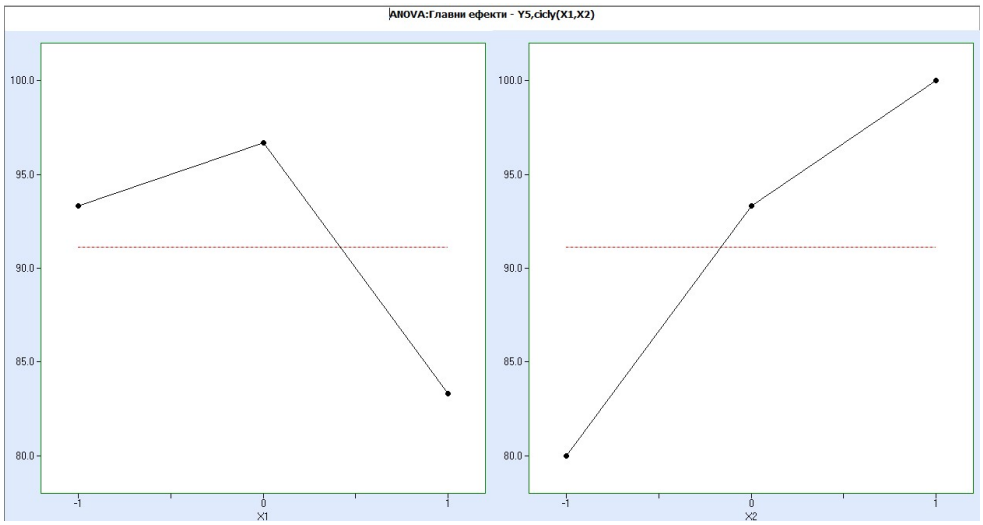
б)



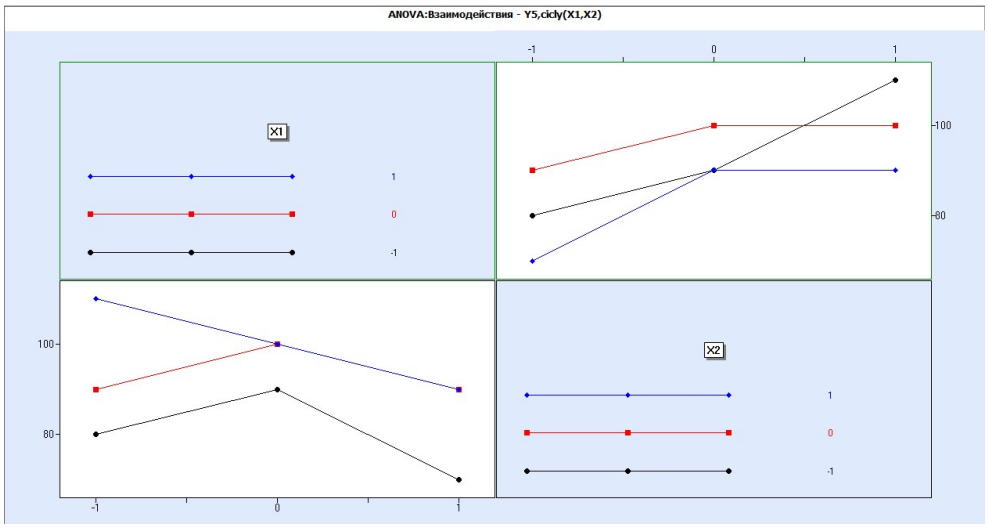
в)

Фиг.4.5. Разтегливост до скъсване по вътък Y_4, %; б)главни ефекти; в)взаимодействия



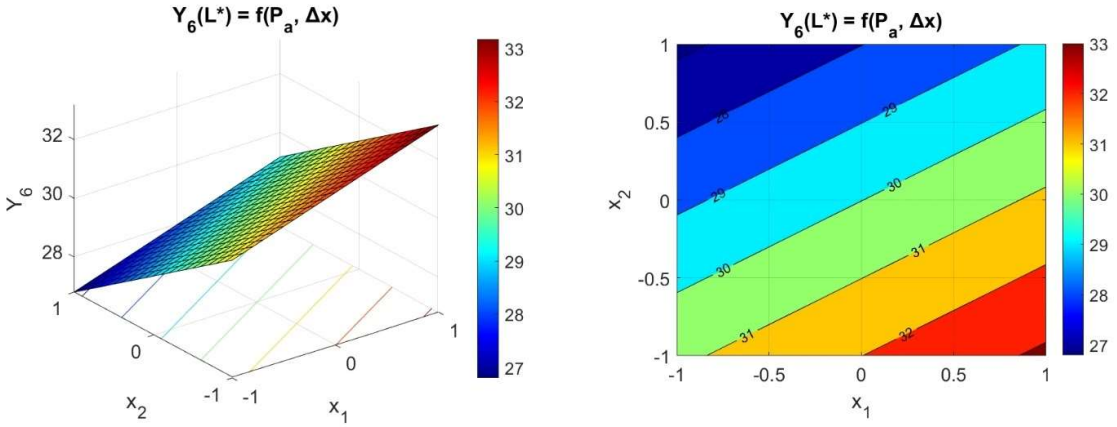


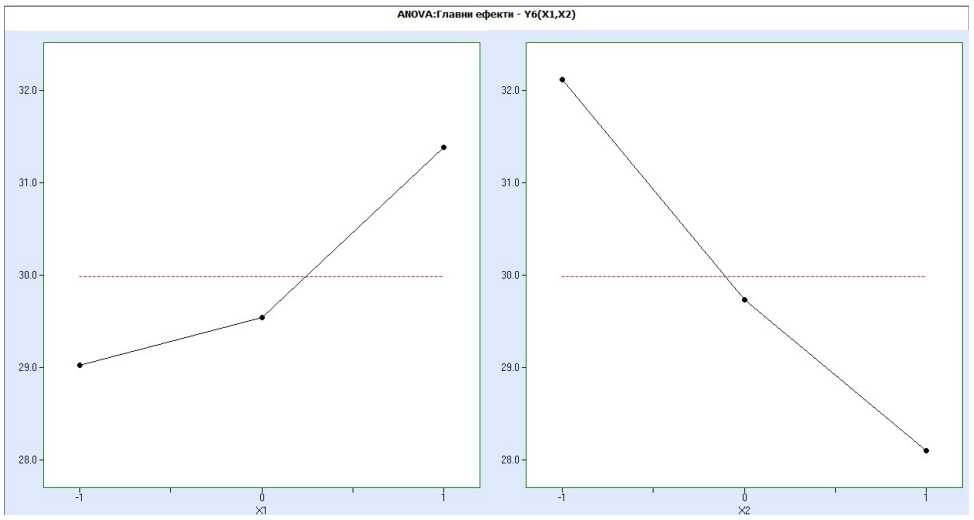
б)



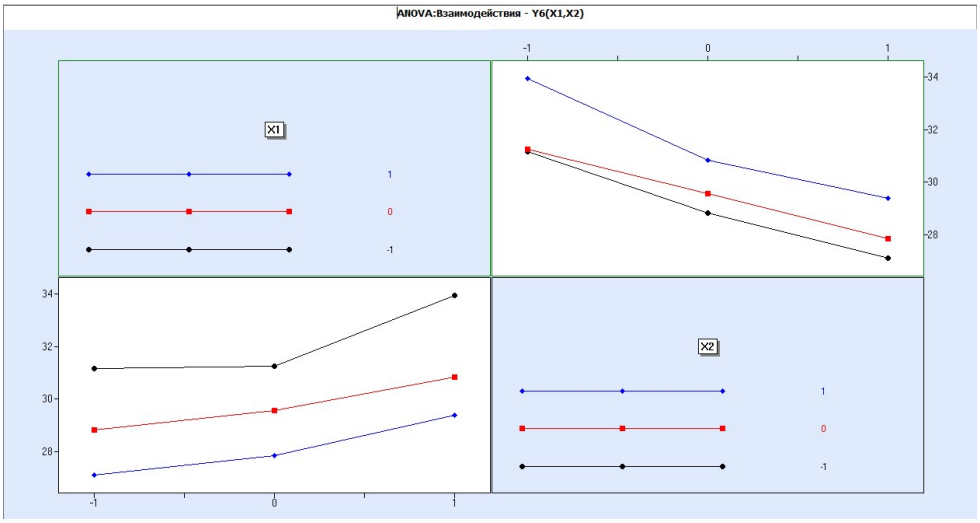
в)

Фиг.4.6. Устойчивост на претриване $Y_5.10^3, cycle$; б)главни ефекти; в)взаимодействия





б)



в)

Фиг.4.7. Коефициент на избелване Y_6; б)главни ефекти; в)взаимодействия

4.1.4 Анализ на експерименталните данни

4.1.4.1 Здравина на опън по основа Y_1, N

Степента на влияние на изчислените коефициенти на математичния модел е както следва - b_0, b_1 и b_2. Изпълнено е условието $F_R = 72{,}7 > F_T(0{,}050; 2; 6) = 5{,}1$, което доказва адекватността на получения модел. Коефициента на множествена корелация е $R^2 = 0{,}96$.

Математичния модел предсказва намаляване на здравината на опън по основа при увеличаване стойността на фактора $X_1(P_a, W)$ и при намаляване на стойността на фактора $X_2(\Delta x, mm)$ и съответно най-големи стойности при минимална стойност на фактора X_1 и максимална стойност на фактора X_2.

Фактора X_1 въздейства обратнопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_2, стойността на изходящия параметър също нараства. Фактора X_1 оказва най-голямо влияние при минимални стойности на фактора X_2, което представлява промяна на изходящия параметър с 28,8%.

Фактора X_2 въздейства правопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_1, стойността на изходящия параметър намалява. Фактора X_2 оказва най-голямо влияние при максимални стойности на фактора X_1, което представлява промяна на изходящия параметър с 26,2%.

4.1.4.2 Разтегливост до скъсване по основа $Y_2, \%$

Степента на влияние на изчислените коефициенти на математичния модел е както следва - b_0, b_{22}, b_2 и b_1. Изпълнено е условието $F_R = 12{,}9 > F_T(0{,}050; 3; 5) = 5{,}4$, което доказва адекватността на получения модел. Коефициента на множествена корелация е $R^2 = 0{,}89$.

Математичния модел предсказва намаляване на разтегливостта до скъсване по основа при увеличаване стойността на фактора $X_1(P_a, W)$ и при намаляване на стойността на фактора $X_2(\Delta x, mm)$ и съответно най-големи стойности при минимална стойност на фактора X_1 и близки до максималната стойност на фактора X_2.

Фактора X_1 въздейства обратнопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_2, стойността на изходящия параметър също нараства. Фактора X_1 оказва най-голямо влияние при минимални стойности на фактора X_2, което представлява промяна на изходящия параметър с 6,5%.

Фактора X_2 въздейства правопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_1, стойността на изходящия параметър намалява.

Фактора X_2 оказва най-голямо влияние при максимални стойности на фактора X_1, което представлява промяна на изходящия параметър с 7,1%.

4.1.4.3 Здравина на опън по вътък Y_3, N

Степента на влияние на изчислените коефициенти на математичния модел е както следва - b_0, b_{22}, b_1, b_2 и b_{12}. Изпълнено е условието $F_R = 8{,}5 > F_T(0{,}050; 4; 4) = 6{,}4$, което доказва адекватността на получения модел. Коефициента на множествена корелация е $R^2 = 0{,}89$.

Математичния модел предсказва намаляване на здравината на опън по вътък при увеличаване стойността на фактора $X_1(P_a, W)$ и при намаляване на стойността на фактора $X_2(\Delta x, mm)$ и съответно най-големи стойности при минимална стойност на фактора X_1 и средни по стойност на фактора X_2.

Фактора X_1 въздейства обратнопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_2, стойността на изходящия параметър също нараства, като се наблюдава леко пропадане на изходящия параметър в края на областта. Фактора X_1 оказва най-голямо влияние при средни стойности на фактора X_2, което представлява промяна на изходящия параметър с 7,7%.

Фактора X_2 въздейства правопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_1, стойността на изходящия параметър намалява. Фактора X_2 оказва най-голямо влияние при минимални стойности на фактора X_1, което представлява промяна на изходящия параметър с 9,4%.

4.1.4.4 Разтегливост до скъсване по вътък $Y_4, \%$

Степента на влияние на изчислените коефициенти на математичния модел е както следва - b_0, b_2 и b_1. Изпълнено е условието $F_R = 18{,}1 > F_T(0{,}050; 3; 5) = 5{,}4$, което доказва адекватността на получения модел. Коефициента на множествена корелация е $R^2 = 0{,}89$.

Математичния модел предсказва намаляване на разтегливостта до скъсване по вътък при увеличаване стойността на фактора $X_1(P_a, W)$ и при намаляване на стойността на фактора $X_2(\Delta x, mm)$ и съответно най-големи стойности при минимална стойност на фактора X_1 и максимална стойност на фактора X_2.

Фактора X_1 въздейства обратнопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_2, стойността на изходящия параметър също нараства. Фактора X_1 оказва най-голямо влияние при минимални стойности на фактора X_2, което представлява промяна на изходящия параметър с 4,7%.

Фактора X_2 въздейства правопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_1, стойността на изходящия параметър намалява.

Фактора X_2 оказва най-голямо влияние при максимални стойности на фактора X_1, което представлява промяна на изходящия параметър с 5,6%.

4.1.4.5 Устойчивост на претриване $Y_5, cycle$

Степента на влияние на изчислените коефициенти на математичния модел е както следва - b_0, b_2 и b_{11}. Изпълнено е условието $F_R = 6{,}3 > F_T(0{,}050; 2; 6) = 5{,}1$, което доказва адекватността на получения модел. Коефициента на множествена корелация е $R^2 = 0{,}68$.

Математичния модел предсказва намаляване на устойчивостта на претриване при увеличаване стойността на фактора $X_1(P_a, W)$ и при намаляване на стойността на фактора $X_2(\Delta x, mm)$ и съответно най-големи стойности при средна стойност на фактора X_1 и максимална стойност на фактора X_2.

Фактора X_1 въздейства обратнопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_2, стойността на изходящия параметър също нараства. Фактора X_1 оказва най-голямо влияние при минимални стойности на фактора X_2, което представлява промяна на изходящия параметър с 22,2%.

Фактора X_2 въздейства правопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_1, стойността на изходящия параметър намалява. Фактора X_2 оказва най-голямо влияние при минимални и максимални стойности на фактора X_1, което представлява промяна на изходящия параметър с около 22,3%.

4.1.4.6 *Коефициент на избелване* Y_6

Степента на влияние на изчислените коефициенти на математичния модел е както следва - b_0, b_2 и b_1. Изпълнено е условието $F_R = 56{,}1 > F_T(0{,}050; 2; 6) = 5{,}1$, което доказва адекватността на получения модел. Коефициента на множествена корелация е $R^2 = 0{,}95$.

Математичния модел предсказва увеличаване на коефициента на избелване при увеличаване стойността на фактора $X_1(P_a, W)$ и при намаляване на стойността на фактора $X_2(\Delta x, mm)$ и съответно най-големи стойности при максимална стойност на фактора X_1 и максимална стойност на фактора X_2.

Фактора X_1 въздейства правопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_2, стойността на изходящия параметър намалява. Фактора X_1 оказва най-голямо влияние при минимални стойности на фактора X_2, което представлява промяна на изходящия параметър с 8,2%.

Фактора X_2 въздейства обратнопропорционално на изходящия параметър. С нарастване на фактора X_1, стойността на изходящия параметър също нараства. Фактора X_2 оказва най-голямо влияние при максимални стойности на фактора X_1, което представлява промяна на изходящия параметър с около 13,5%.

4.1.5 Оптимизиране на параметрите на процеса лазерно маркиране

Освен определяне на двуфакторните зависимости, следствие от регресионния анализ на експерименталните данни от процеса лазерно маркиране (табл.4.5), интерес представлява решаването на оптимизационна задача, свързана с провеждане на изследване за откриване на такива стойности на управляващите фактори, при които се удовлетворяват максимални стойности на повече от една целеви функции едновременно.

Следствие на извършеното дотук математическо моделиране на процеса лазерно маркиране, може да се дефинират следните оптимизационни задачи:

- $Y_1 \rightarrow max;\ Y_3 \rightarrow max;\ Y_6 \rightarrow max$;
- $Y_2 \rightarrow max;\ Y_4 \rightarrow max;\ Y_6 \rightarrow max$;
- $Y_5 \rightarrow max;\ Y_6 \rightarrow max$.

Управляващите фактори повтарят предходните:

- X_1 – мощност на лазерното лъчение, P_a, W;
- X_2 – стъпка/отместване на лъча, Δx, mm.

Поставените задачи по своята същност представляват:

- Намиране на стойности на управляващите фактори, удовлетворяващи постигането на максимална здравина на плата по основа и вътък при максимална степен на коефициента на избелване;
- Намиране на стойности на управляващите фактори, удовлетворяващи постигането на максимална еластичност до скъсване на плата по основа и вътък при максимална степен на коефициента на избелване;
- Намиране на стойности на управляващите фактори, удовлетворяващи постигането на максимална устойчивост на претриване на плата при максимална степен на коефициента на избелване.

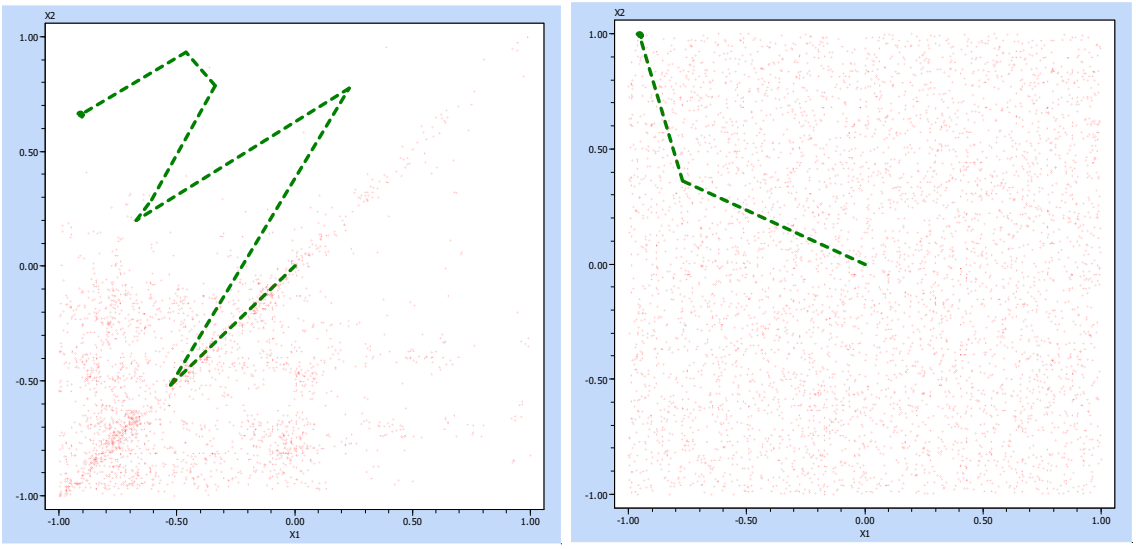
Така формулираните задачи отговарят на реални технологични изисквания към процеса лазерно маркиране за постигане на най-добри резултати за коефициента на избелване, при запазване физическите параметри на плата, здравина на опън и разтегливост до скъсване, в допустими граници, дефинирани от стандарт или техническо задание.

Решаването на тази задача се осъществява чрез използване на определените от регресионния анализ аналитични уравнения и последвалата им статистическата обработка с извършено с приложната програма QstatLab-v6. Оптимизацията може да се проведе чрез случайно търсене с нарастваща плътност (генетичен алгоритъм) и последвал избор от Парето оптимални решения.

Резултатите от оптимизацията е представена в табличен вид – табл.4.6, табл.4.7 и табл.4.8. Графично представяне на оптимизационния процес е изобразено на фиг.4.8 до фиг.4.10.

Табл.4.6. Резултати от оптимизация за $Y_1 \rightarrow max;\ Y_3 \rightarrow max;\ Y_6 \rightarrow max$

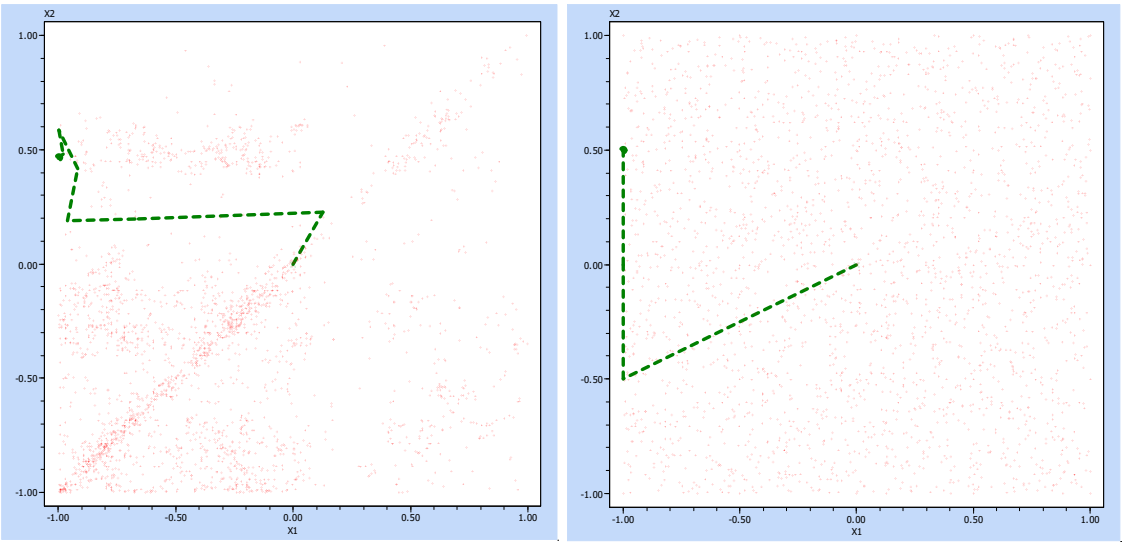
No	VAR1(X1)	VAR2(X2)	OK?	Y1	Y3	Y6
2552	-0,9101	0,6606	Да	1524,8308	27,5845	590,7264



Фиг.4.8 – Генетичен механизъм на търсене на максимума на функциите $Y_1,\ Y_3$ *и* Y_6

Табл.4.7. Резултати от оптимизация за $Y_2 \rightarrow max;\ Y_4 \rightarrow max;\ Y_6 \rightarrow max$

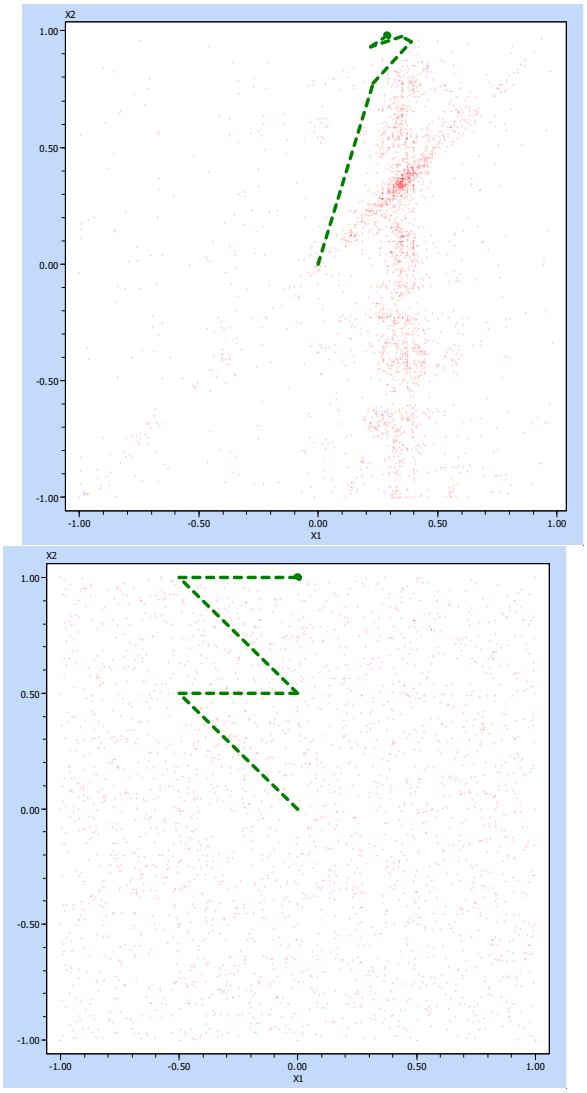
No	VAR1(X1)	VAR2(X2)	OK?	Y2	Y4	Y6
2552	-0,9988	0,4657	Да	23,7347	17,8918	27,8708



Фиг.4.9 – Генетичен механизъм на търсене на максимума на функциите Y_2, Y_4 и Y_6

Табл.4.8. Резултати от оптимизация за $Y_5 \rightarrow max$; $Y_6 \rightarrow max$

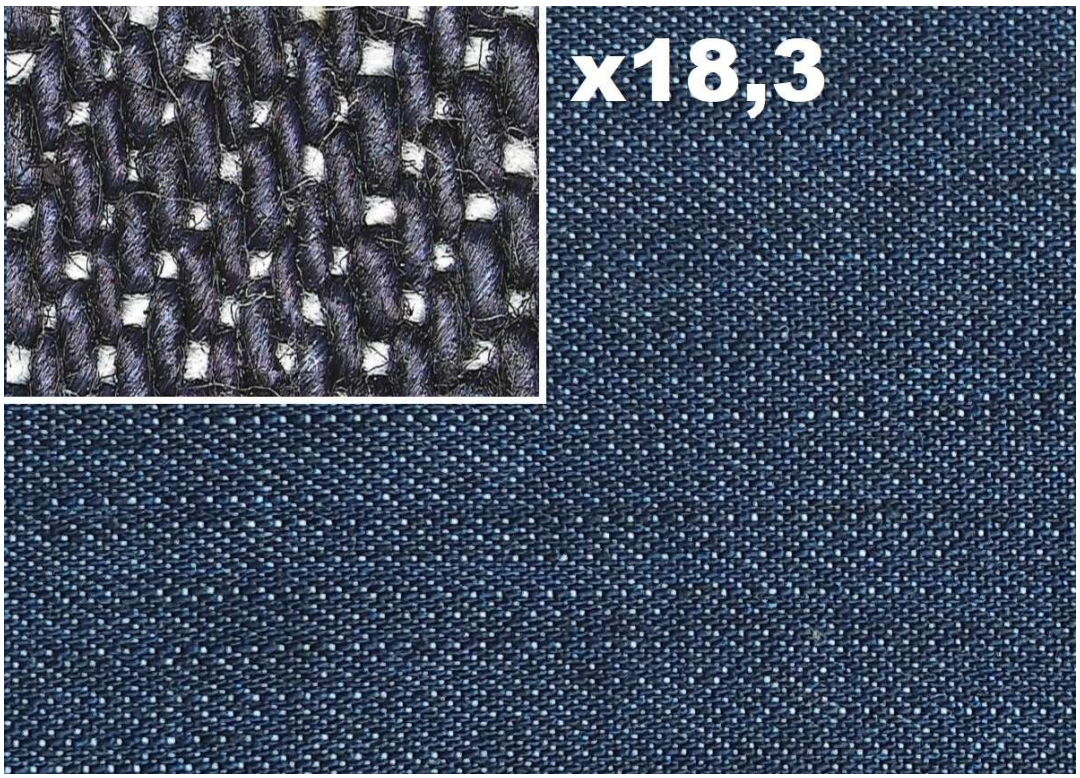
No	VAR1(X1)	VAR2(X2)	OK?	Y5	Y6
2552	0,2890	0,9792	Да	105,7630	28,3620



Фиг.4.10 – Генетичен механизъм на търсене на максимума на функциите Y_5 и Y_6

4.2 Микроскопски анализ

За изясняване на процеса на маркиране с лазерен лъч на текстилни материали, мострите се наблюдават с невъоръжено око и с микроскоп. Прилага се методът "анализ на изображението" за оценка на настъпилите промени, като след третирането на пробите с лазер се правят микроскопски снимки. Така се визуализира обработваната зона и се изследва промяната на повърхността на тъканите. Сравнява се обработената спрямо необработената част по отношение на качеството на маркировката за различните суровини и цветове. Резултатите са подредени под формата на микроскопски снимки с различно увеличение, които показват промените в повърхността на тъканта до ниво влакна.



Фиг. 4.11. Изглед на лицевата повърхност на плат Деним

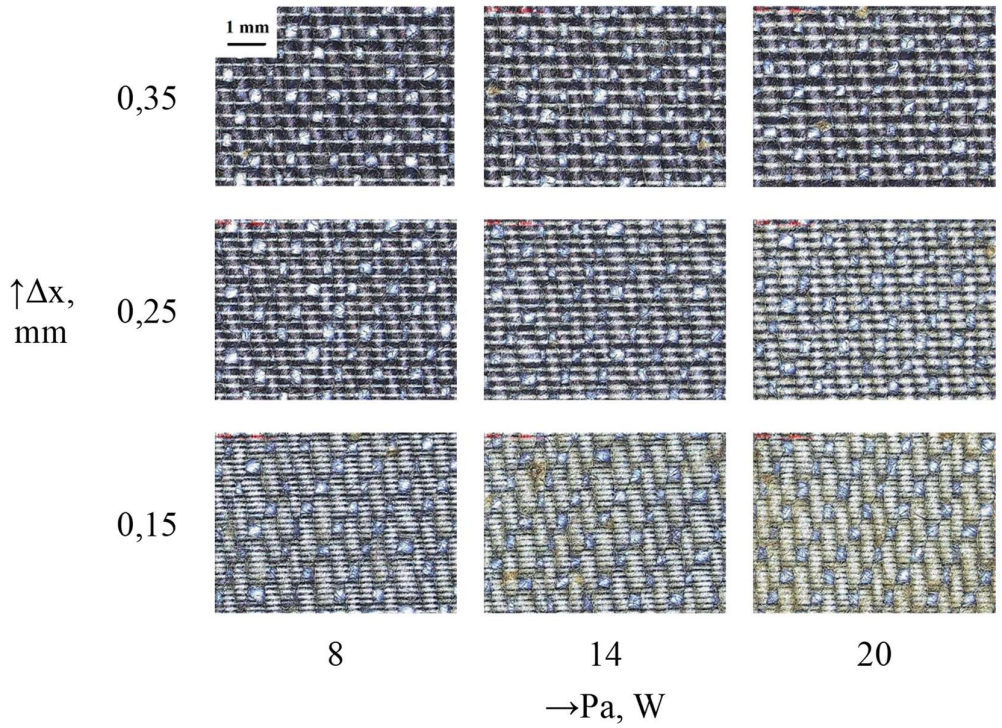
Наблюдавана е пробата от Приложение П.3.3, с изработени тестови полета маркирани съгласно изменението на факторите от фиг.2.15. Същата е обект на математическото моделиране за определяне на коефициент на избелване - L^*. Както се вижда маркировките са нанесени с лазерен лъч на лицевата страна на плат Деним (фиг.4.11), като изображения на тестовите полета са представени последователно с различно увеличение от фиг.4.12 до 4.16. С помощта на микроскопа се наблюдават структурите на маркираните мостри за проследяване на настъпилите промени под

действието на лазера на ниво текстура при микроскопско увеличение до 100 пъти.

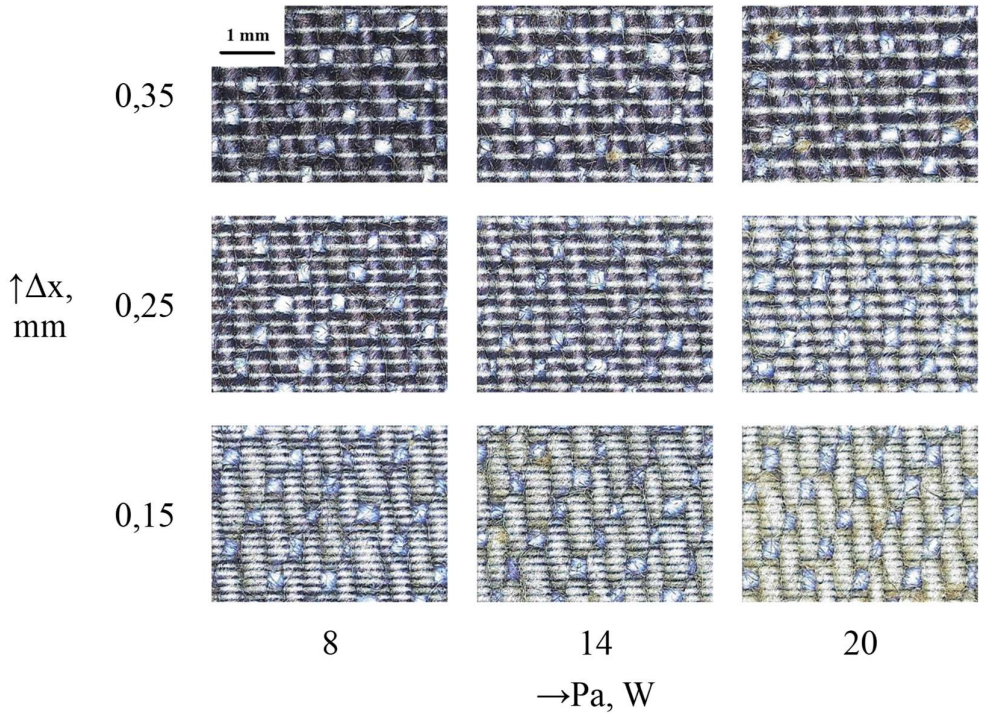
При малките увеличения се придобива представа за общото избледняване на цвета на плата от незначително при обработка с малка мощност и голяма стъпка на лъча, до пълно обезцветяване на мострата при максимална мощност и минимална стъпка.

Наблюденията на маркировките извършени при стъпка на лъча 0,35mm демонстрират чиста следа от обезцветяване в целия диапазон на използваните мощности. При най-малката мощност широчината на повлияния участък е с размер приблизителен с диаметъра на фокусирания лазерен лъч. При увеличение на мощността се увеличава широчината на обработения участък.

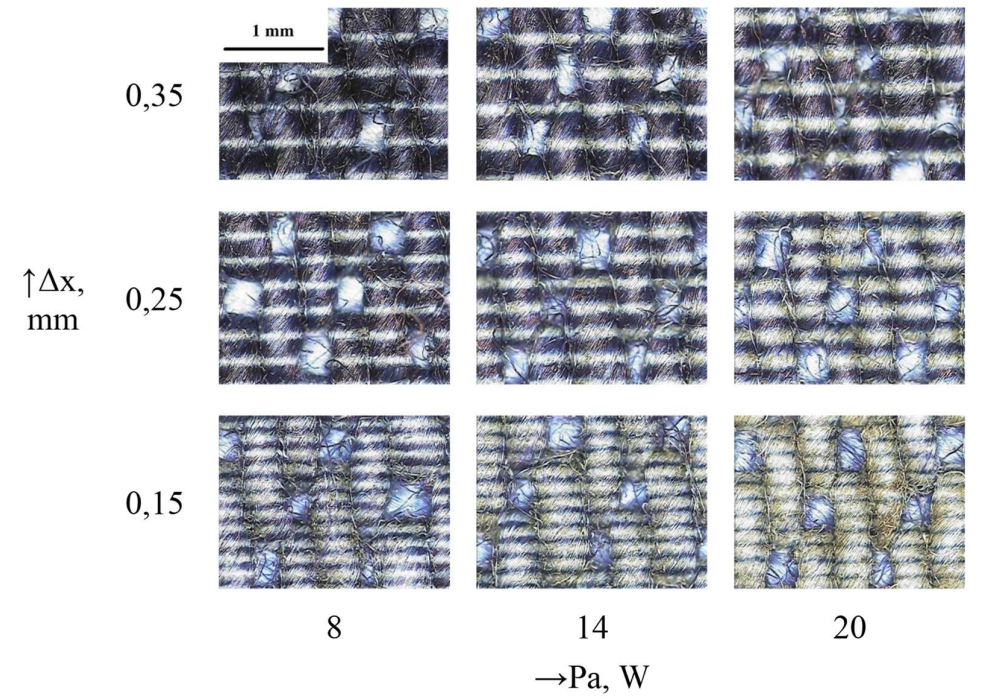
Наблюденията на маркировките извършени при стъпка на лъча 0,25mm демонстрират също чиста следа от обезцветяване в целия диапазон на използваните мощности. По-малката стъпка на отместване на лъча води до осезателно увеличение на обезцветените участъци и съответно до по-голям коефициент на избелване.



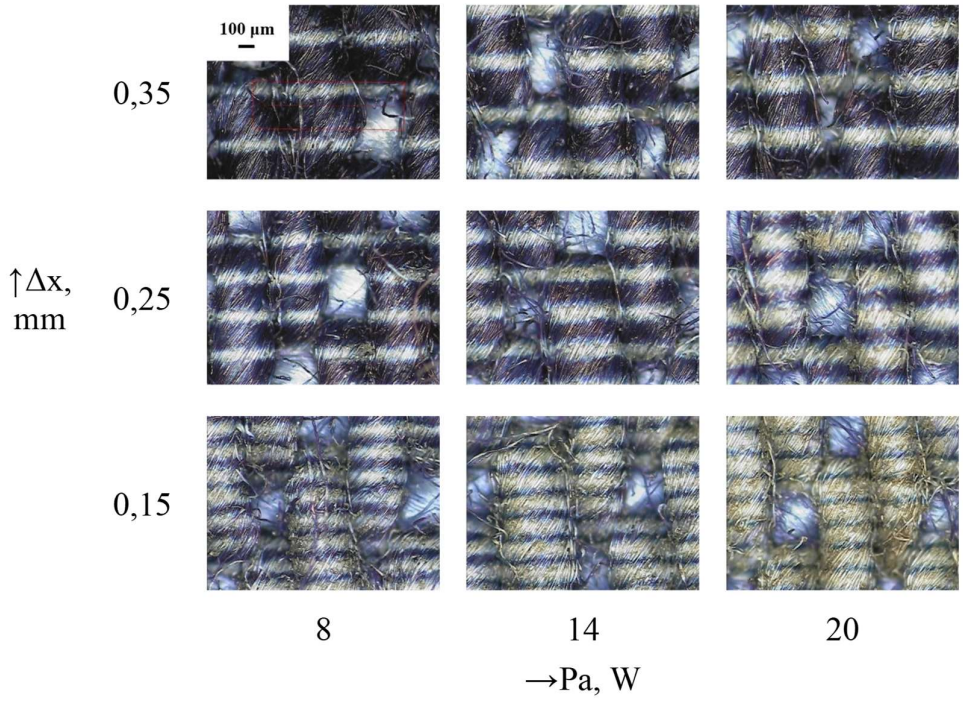
Фиг. 4.12. Тестови полета на маркиране според П.3.3 и увеличение x18,3



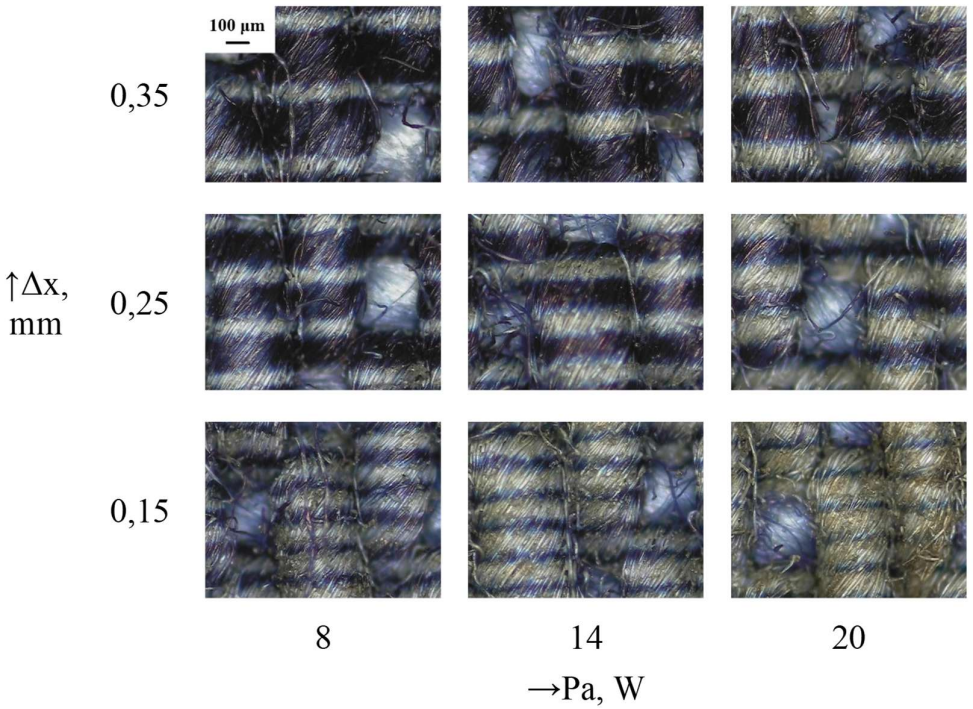
Фиг. 4.13. Тестови полета на маркиране според П.3.3 и увеличение x26,2



Фиг. 4.14. Тестови полета на маркиране според П.3.3 и увеличение x52,4



Фиг. 4.15. Тестови полета на маркиране според П.3.3 и увеличение x78,6



Фиг. 4.16. Тестови полета на маркиране според П.3.3 и увеличение x104,8

Наблюденията на маркировките извършени при стъпка на лъча 0,15mm показват почти пълно обезцветяване на багрилното вещество. Пробите изглеждат напълно избелени, като в мострата обработена с максимална

мощност се наблюдават прогаряния на отделни влакна от повърхностния слой на основните нишки. Като цяло се наблюдават участъци в които мострата пожълтява вследствие от наличието на обгорени краища на влакната. След прилагане на последваща ензимна обработка на плата, или пране, ефекта на пожълтяване отслабва или напълно се елиминира.

Литература

Chow Y. L., (2011a), To study the effect of laser irradiation on the properties of cotton fabric, Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, January 2011.

Chow Y. L., C. K. Chan, C. W. Can, (2010), SEM Analysis of CO2 Laser Treated Cotton Grey Fabric, Microscopy: Science, Technology, Applications and Education, Formatex 2010.

Chow Y. L., C. K. Chan, C. W. Kan, (2011б), Effect of CO2 laser treatment on cotton surface, Vol. 18, Issue 6, pages 1635-1641, Dec. 2011

Dascalu T, et al., (2000), Removal of the indigo color by laser beam–denim interaction. Opt Lasers Eng, 2000;34:179–89

Hung O., C. Kan, (2017a), A Study of CO2 Laser Treatment on Colour Properties of Cotton-Based Fabrics, Coatings, 2017, 7, 131

Hung, O.N.; Chan, C.K.; Kan, C.W.; Yuen, C.W.M., (2017б), Microscopic study of the surface morphology of CO2 laser-treated cotton and cotton/polyester blended fabric. Text. Res. J. 2017, 87, 1107–1120.

Juciene M., V. Urbelis, Z. Juchneviciene, L. Cepukone, (2014), The effect of laser technological parameters on the color and structure of denim fabric, Textile Research Journal 2014, Vol. 84(6) 662–670.

Kan C.W., at al., (2010), Technical study of the effect of CO2 laser surface engraving on the colour properties of denim fabric, Coloration Technology, Wiley-Blackwell, 126, page 365-371, 2010

Kan, C.W.; Yuen, C.W.M.; Cheng, C.W., (2012), Color Fading of Indigo-dyed Cotton Denim Fabric by Laser. Adv. Mater. Res. 2012, 441, 187–191

Martin O. M., (2003), A comparison between characteristics of various-based denim fading processes. Optics and Lasers in Engineering 39, Elsevier, page 15-24, 2003

Ortiz-Morales M, Poterasu M, Acosta-Ortiz S.E, Compan I, Hernandex-Alvarado M.R., (2003), A comparison between characteristics of various laser-based denim fading processes. Optics and Lasers in Engineering. 2003;39:15-34

Yuan G., S. Jiang, E. Newton, J. Fan, W. Au, (2013), Fashion Design Using Laser Engraving Technology. 8ISS Symposium-Panel on Transformation. Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, page 65-69, 2013

Ангелов И.А., М.С. Петров, (2002), Теория на инженерния експеримент, ТУ-Габрово, 2002.

БДС EN 20139:2000 - Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing (ISO 139:1973); Текстил. Стандартни атмосферни условия за кондициониране и изпитване [Апаратура BINDER KBF 115]

БДС EN ISO 105 - J01 - Текстил. Изпитвания за устойчивост на цвета. Част C09: Устойчивост на цвета на окислително избелване при пране в домашни и обществени перални при използване на сравнителен детергент без фосфат, съдържащ активатор за избелване при ниска температура (ISO/AWI 105-C09).

БДС EN ISO 105 - J03 - Текстил. Изпитвания за устойчивост на цвета. Изчисление на цветови разлики.

БДС EN ISO 12947-2:2017 – Текстил. Определяне устойчивостта на претриване на платове по метода на Martindale. Част 2: Определяне на точката на разрушаване на образци (ISO 12947-2:2016)

БДС EN ISO 13934-1:2013 – Текстил. Свойства при опън на платове. Част 1: Определяне на максималната сила и разтегливост при максимална сила чрез използване на STRIP метод (ISO 13934-1:2013). [Апаратура Zweigle F427]

Божанов, Е., И. Вучков, (1983), Статистически методи за моделиране и оптимизиране на многофакторни обекти, София, Техника, 1983.

Дамянов, Г., (1977), Математически методи за планиране на експеримента при изследванията в текстилната промишленост, МЛП-Институт по облекло и текстил, София, 1977.

Налимов В.В., Н.А. Чернова, (1965), „Статистические методы планирования экспериментов“, Москва, 1965.

Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016а), „Моден дизайн с помощта на лазерни гравиращи технологии“, Известия на Технически университет Габрово, Том 52`2016, стр.53-57, ISSN 1310-6686.

Стоянов Б., Кр. Друмев, Д. Генов, (2016б), „Микроскопски анализ на памучни тъкани обработени с лазер“, Известия на Технически университет Габрово, Том 52`2016, стр.58-60, ISSN 1310-6686

Съдържание

Contents

Списък на използваните означения 3
Въведение 8
1 Маркиране на текстилни материали – състояние на проблема 10
1.1 Електрофизични технологии за обработка на материали 10
1.2 Светлиннолъчева (лазерна) обработка 12
1.3 Световно потребление на лазерни технологии – тенденции 14
1.4 Приложение на лазерните технологии в текстилната индустрия 17
1.4.1 Контрол 18
1.4.2 Маркиране (гравиране) 19
1.4.3 Рязане (кроене) 22
1.4.4 Съединяване (заваряване) 23
1.4.5 3D сканиране 25
1.4.6 3D принтиране (синтероване) 26
1.5 Маркиране на текстилни материали 27
1.5.1 Видове маркировки 27
1.5.2 Методи на маркиране 29
1.5.2.1 Ситопечат 29
1.5.2.2 Тампонен печат 30
1.5.2.3 Термопринтиране 30
1.5.2.4 Бродерия 31
1.5.2.5 Етикетиране 31
1.5.2.6 Лазерно маркиране 32
1.5.2.7 Обобщени характеристики на методите за маркиране 36
1.5.3 Класификация на маркировките 38
1.5.4 Оценка на качеството на маркировките 40
1.5.4.1 Weber контраст 41
1.5.4.2 Четивност 43
1.6 Фактори които влияят на контраста на лазерната маркировка 43
1.6.1 Фактори, отнасящи се до материала 44
1.6.1.1 Оптични характеристики 44

1.6.1.2 Топлофизични характеристики 50
1.6.2 Фактори свързани с лазерния източник 53
1.6.2.1 Дължина на вълната на лазерното лъчение 53
1.6.2.2 Диаметър на минималното фокусно петно 54
1.6.2.3 Средна мощност, Импулсна мощност, Импулсна енергия 54
1.6.2.4 Повърхнинна плътност на мощността 55
1.6.2.5 Качество на лазерното лъчение 56
1.6.3 Фактори свързани с технологичния процес 57
1.6.3.1 Скорост на маркиране 57
1.6.3.2 Дефокусировка 58
1.6.3.3 Стъпка/отместване 58
1.6.3.4 Брой на повторенията 58
1.6.3.5 Ъгъл на наклона на стъпката/отместването 58
1.6.4 Фактори с комплексно влияние 59
1.7 Лазерни източници за маркиране на текстилни материали 60
Литература 61
2 Текстилни материали и методики за изследване 66
2.1 Текстилно производство и потребление - тенденции 66
2.1.1 Световни тенденции в производството и потреблението на текстил 66
2.1.2 Глобален пазар на текстилни влакна 70
2.2 Материали за изследване 71
2.2.1 Класификация на текстилните материали 71
2.2.2 Основни свойства на текстилните материали 73
2.2.3 Избор на материали за маркиране 76
2.3 Експериментална установка и апаратура 83
2.4 Методики на експерименталните изследвания 86
2.4.1 Методика за маркиране на образците 86
2.4.1.1 Подготовка на образци за определяне здравина и еластичност по основа и вътък след лазерно маркиране 87
2.4.1.2 Подготовка на образци за определяне устойчивост на претриване след лазерно маркиране 88

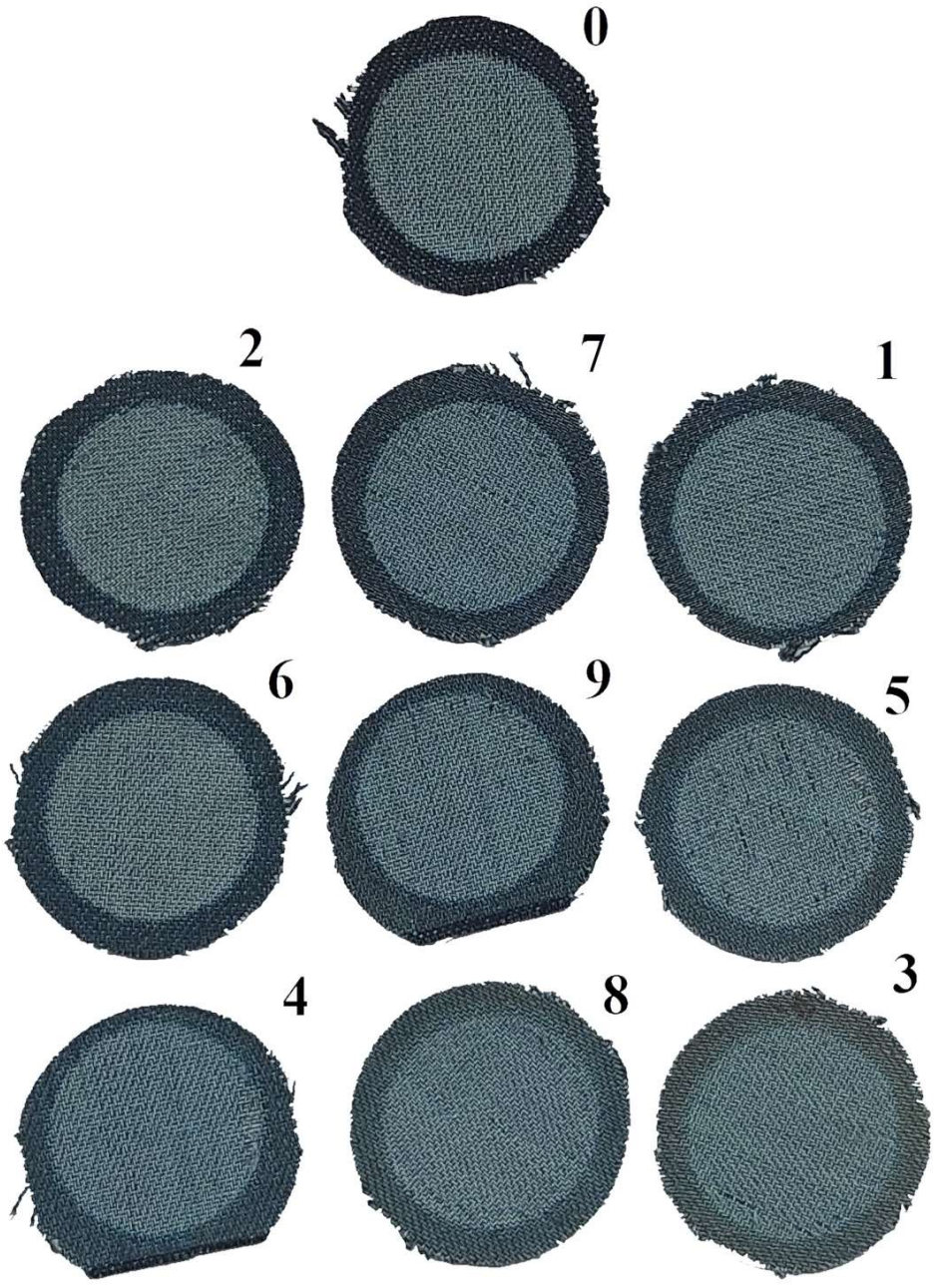
2.4.1.3 Подготовка на образци за определяне на контраста след лазерно маркиране 88
2.4.2 Методика за определяне на критичната плътност на мощността 90
2.4.3 Методика за определяне на контраста на маркировката 90
2.4.3.1 Цифров метод 90
2.4.3.2 Спектрофотометричен метод 91
2.4.4 Методика за микроскопски и структурен анализ 93
2.4.4.1 Микроскопски анализ 93
2.4.4.2 Scanning Electron Microscopy (SEM) анализ 94
2.4.5 Методика за оптимизиране на технологични обекти 95
Литература 100
3 Физичен модел на процеса лазерно маркиране 104
3.1 Физичен модел на процеса 104
3.1.1 Взаимодействие на лазерния лъч с веществото 104
3.1.2 Етапи на процеса лазерно маркиране 105
3.1.3 Уравнение на енергийния баланс 109
3.2 Граници на приложимост на модела 111
3.2.1 Повърхнинна плътност на мощността 112
3.2.2 Определяне на критичните стойности на повърхнинната плътност на мощността 116
Литература 123
4 Изследване и оценяване на влиянието на технологичните фактори върху качеството на лазерната маркировка и физико-механичните свойства на плат Деним 125
4.1 Експериментално изследване 125
4.1.1 Провеждане на изследването 125
4.1.2 Математическо моделиране 127
4.1.3 Графично представяне на резултатите 128
4.1.4 Анализ на експерименталните данни 135
4.1.4.1 Здравина на опън по основа $Y1, N$ 135
4.1.4.2 Разтегливост до скъсване по основа $Y2, \%$ 135
4.1.4.3 Здравина на опън по вътък $Y3, N$ 136
4.1.4.4 Разтегливост до скъсване по вътък $Y4, \%$ 136

4.1.4.5 Устойчивост на претриване $Y5, cycle$ 137
4.1.4.6 Коефициент на избелване $Y6$ 137
4.1.5 Оптимизиране на параметрите на процеса лазерно маркиране 138
4.2 Микроскопски анализ 142
Литература 146
Съдържание 148
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 152
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 153
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 154
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 157
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 165

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

П1. Образци от плат „Деним“, обработени с лазер, след изпитване за определяне на здравина и разтегливост според БДС EN ISO 13934-1:2013.

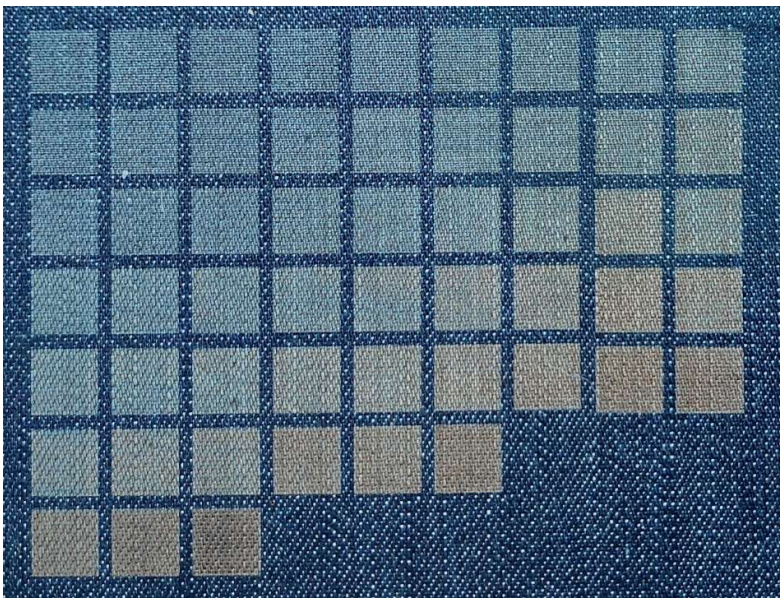
ПРИЛОЖЕНИЕ 2



П2. Образци от плат „Деним“, обработени с лазер, след изпитване за определяне на устойчивост на претриване по метода Martindale според БДС EN ISO 12947-2:2017, съгласно плана на експеримента фиг.4.1.

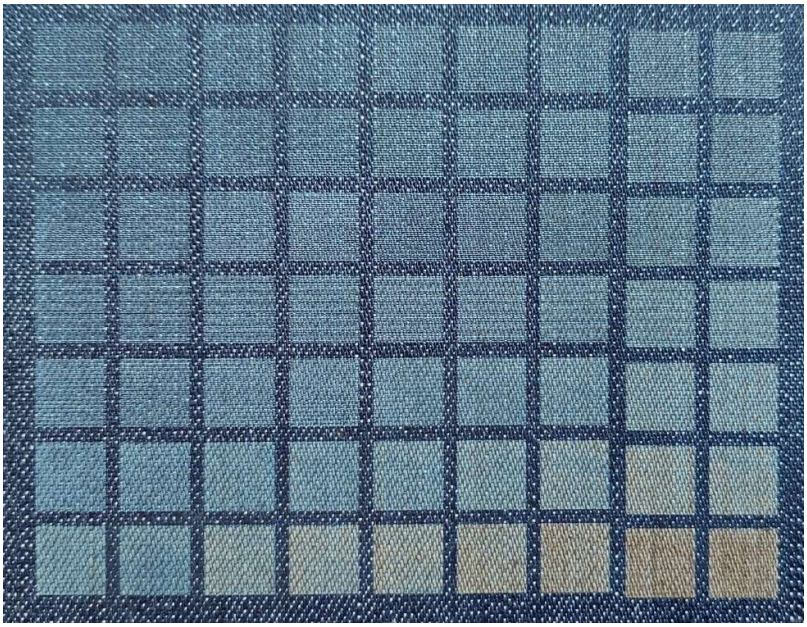
ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Образци от плат „Деним“, обработени с лазер, за определяне координатите на цвета (L*, a*, b*, Cab*, hab, X, Y, Z, x, y) според БДС EN ISO 105 J01:2003, съгласно тестово поле за маркиране от фиг.2.12.



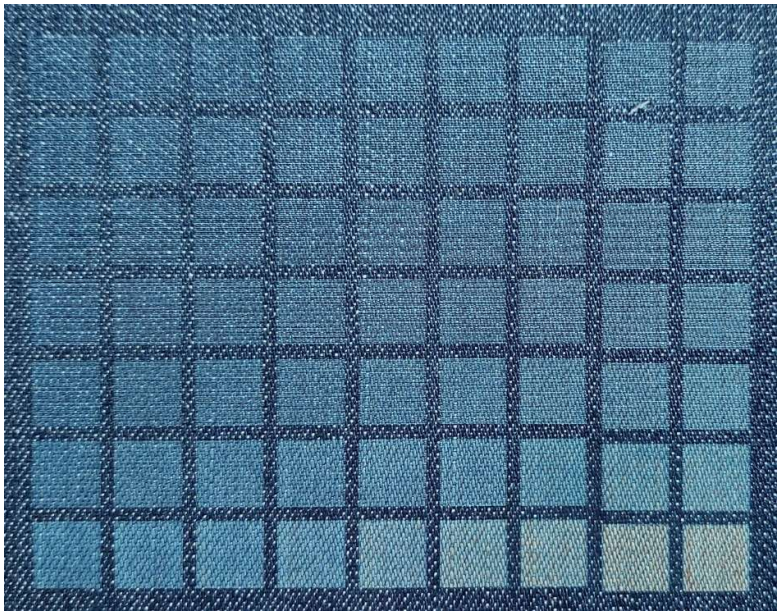
П3.1. Обработена мостра при следните параметри: **V=100 mm/s**, P=20÷100%, $\Delta x = 0{,}1 \div 0{,}4$mm, $\Delta W_d = 0mm$, $\alpha = 0^o$, $f = 20\ kHz$, $R = 1$.

П3.2. Обработена мостра при следните параметри: **V=200 mm/s**, P=20÷100%, $\Delta x = 0{,}1 \div 0{,}4$mm, $\Delta W_d = 0mm$, $\alpha = 0^o$, $f = 20\ kHz$, $R = 1$.



П3.3. Обработена мостра при следните параметри: **V=300 mm/s**, P=20÷100%, $\Delta x = 0{,}1 \div 0{,}4$mm, $\Delta W_d = 0mm$, $\alpha = 0^o$, $f = 20\ kHz$, $R = 1$.

П3.4. Обработена мостра при следните параметри: **V=400 mm/s**, P=20÷100%, $\Delta x = 0{,}1 \div 0{,}4$mm, $\Delta W_d = 0mm$, $\alpha = 0^o$, $f = 20\ kHz$, $R = 1$.



П3.5. Обработена мостра при следните параметри: **V=500 mm/s**, P=20÷100%, $\Delta x = 0{,}1 \div 0{,}4$mm, $\Delta W_d = 0mm$, $\alpha = 0^o$, $f = 20\ kHz$, $R = 1$.

П3.6. Обработена мостра при следните параметри: **V=600 mm/s**, P=20÷100%, $\Delta x = 0{,}1 \div 0{,}4$mm, $\Delta W_d = 0mm$, $\alpha = 0^o$, $f = 20\ kHz$, $R = 1$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

П4.1. Регресионен и дисперсионен анализ на фактора здравина на опън по основа

```
Y1 = 1268,6778-173,38333x1+148,88333x2
-------------------------------------------------------------------------------
--
   Регресор       Коеф    Ст.Откл          t          p   Значимост    VIF
         0    1268,678     15,473     81,993   2,22E-10       +
         1    -173,383     18,951     -9,149    9,59E-5       +      1,000
         2     148,883     18,951      7,856   0,000225       +      1,000
    Значимостта на коефициентите е определена при ниво = 0,05
-------------------------------------------------------------------------------
--
-                        Дисперсионен анализ (ANOVA)
-
-------------------------------------------------------------------------------
--
      Източник    Сума квадр.  Ст.Своб.   Дисперсия           F         P
         Модел   313368,16333      2   156684,08167      72,71582
0,00006
       Остатък    12928,47222      6     2154,74537
          Общо   326296,63556      8
-------------------------------------------------------------------------------
--
-                     Предсказани стойности и остатъци
-
-------------------------------------------------------------------------------
--
   N          y          yp        y-yp    PRESS(i)    SE pred. Ст. остатък
   1    1282,0000  1244,1778    37,8222    68,0800    30,9462     1,0932
   2    1556,7000  1590,9444   -34,2444   -61,6400    30,9462    -0,9898
   3     946,1000   946,4111    -0,3111    -0,5600    30,9462    -0,0090
   4    1329,0000  1293,1778    35,8222    64,4800    30,9462     1,0354
   5    1076,3000  1095,2944   -18,9944   -26,3000    24,4651    -0,4815
   6    1459,0000  1442,0611    16,9389    23,4538    24,4651     0,4294
   7    1386,0000  1417,5611   -31,5611   -43,7000    24,4651    -0,8001
   8    1056,3000  1119,7944   -63,4944   -87,9154    24,4651    -1,6095
   9    1326,7000  1268,6778    58,0222    65,2750    15,4731     1,3258
-------------------------------------------------------------------------------
--
 T(0,025,6)=2,44691; F(0,050,2,6)=5,14325
 Остатъчно СКО=46,419; R-sq=0,96038; Radj-sq=0,94717
 PRESS = 27733,76338; R-sq(pred)=0,91500


            Дисперсионен анализ (ANOVA) за Y1,N - (X1; X2)
-------------------------------------------------------------------------
   Означение                        Име   Бр. нива     Нива
         x1                          X1          3     -1; 0; 1
         x2                          X2          3     -1; 0; 1
-------------------------------------------------------------------------
    Източник        Суми  Ст. свобода   Дисперсия           F           P
         x1 181056,41556           2 90528,20778    33,91648     0,00310
         x2 134563,61556           2 67281,80778    25,20719     0,00540
     Остатък 10676,60444           4  2669,15111
-------------------------------------------------------------------------
        Общо326296,63556           8
```

Остатъчно СКО = 51,66383 R-sq = 0,96728 R-sq (adj) = 0,93456

Доверителни интервали за средната стойност по всяко факторно ниво:
Доверителните интервали са построени на база на стандартното отклонение за всяко ниво на факторите.

Ниво	Брой	Средно	Дисперсия	95% Доверителен интервал
X1				
-1	31448,23333	13048,76333	1164,4673 <= 1448,2333 <= 1731,9993	
0	31256,33333	30889,12333	819,7386 <= 1256,3333 <= 1692,9280	
1	31101,46667	28682,22333	680,7574 <= 1101,4667 <= 1522,1759	
X2				
-1	31110,46667	38853,62333	620,8103 <= 1110,4667 <= 1600,1231	
0	31287,33333	37777,12333	804,5079 <= 1287,3333 <= 1770,1587	
1	31408,23333	19235,76333	1063,7007 <= 1408,2333 <= 1752,7660	

П4.2. Регресионен и дисперсионен анализ на фактора разтегливост до скъсване по основа

Y2 = 23-0,595x1+0,64x2-0,72666667x2x2

Регресор	Коеф	Ст.Откл	t	p	Значимост	VIF
0	23,000	0,220	104,575	1,52E-9	+	
1	-0,595	0,156	-3,826	0,012	+	1,000
2	0,640	0,156	4,115	0,009	+	1,000
22	-0,727	0,269	-2,698	0,043	+	1,000

Значимостта на коефициентите е определена при ниво = 0,05

Дисперсионен анализ (ANOVA)

Източник	Сума квадр.	Ст.Своб.	Дисперсия	F	P
Модел	5,63784	3	1,87928	12,95013	0,00857
Остатък	0,72558	5	0,14512		
Общо	6,36342	8			

Предсказани стойности и остатъци

N	y	yp	y-yp	PRESS(i)	SE pred.	Ст. остатък
1	22,2700	22,3183	-0,0483	-0,0967	0,2694	-0,1794
2	23,0000	23,5083	-0,5083	-1,0167	0,2694	-1,8871
3	20,8300	21,0383	-0,2083	-0,4167	0,2694	-0,7734
4	22,2700	22,2283	0,0417	0,0833	0,2694	0,1547
5	22,2000	22,4050	-0,2050	-0,4100	0,2694	-0,7610
6	23,6000	23,5950	0,0050	0,0100	0,2694	0,0186

```
   7      23,4700    22,9133     0,5567     0,8350     0,2199     1,7897
   8      21,8000    21,6333     0,1667     0,2500     0,2199     0,5358
   9      23,2000    23,0000     0,2000     0,3000     0,2199     0,6430
-------------------------------------------------------------------------
--
 T(0,025,5)=2,57058; F(0,050,3,5)=5,40945
 Остатъчно СКО=0,38094; R-sq=0,88598; Radj-sq=0,81756
 PRESS = 2,24144; R-sq(pred)=0,64776


            Дисперсионен анализ (ANOVA) за Y2,N - (X1; X2)
-------------------------------------------------------------------------
   Означение                        Име   Бр. нива     Нива
          x1                         X1          3     -1; 0; 1
          x2                         X2          3     -1; 0; 1
-------------------------------------------------------------------------
    Източник         Суми  Ст. свобода   Дисперсия           F           P
          x1     2,55042            2     1,27521    17,04195     0,01103
          x2     3,51369            2     1,75684    23,47851     0,00616
     Остатък     0,29931            4     0,07483
-------------------------------------------------------------------------
        Общо     6,36342            8

Остатъчно СКО = 0,27355      R-sq = 0,95296      R-sq (adj) = 0,90593

Доверителни интервали за средната стойност по всяко факторно ниво:
Доверителните интервали са построени на база на стандартното отклонение
за всяко ниво на факторите.
      Ниво   Брой    Средно   Дисперсия       95% Доверителен интервал
X1
        -1      3  22,95667     0,44363     21,3021 <= 22,9567 <= 24,6112
         0      3  22,82333     0,80363     20,5964 <= 22,8233 <= 25,0503
         1      3  21,76667     0,65923     19,7497 <= 21,7667 <= 23,7836
X2
        -1      3  21,63333     0,53923     19,8092 <= 21,6333 <= 23,4575
         0      3  23,00000     0,52000     21,2087 <= 23,0000 <= 24,7913
         1      3  22,91333     0,36563     21,4112 <= 22,9133 <= 24,4154
```

П4.3. Регресионен и дисперсионен анализ на фактора здравина на опън по вътък

```
Y3 = 573,5-13,383333x1+12,35x2-23,25x2x2-11,7x1x2
-------------------------------------------------------------------------
--
   Регресор       Коеф    Ст.Откл          t          p   Значимост    VIF
         0    573,500      5,953     96,336    6,96E-8       +
         1    -13,383      4,210     -3,179      0,034       +      1,000
         2     12,350      4,210      2,934      0,043       +      1,000
        22    -23,250      7,291     -3,189      0,033       +      1,000
        12    -11,700      5,156     -2,269      0,086       -      1,000
    Значимостта на коефициентите е определена при ниво = 0,05
-------------------------------------------------------------------------
--
-                        Дисперсионен анализ (ANOVA)
-
```

Източник	Сума квадр.	Ст.Своб.	Дисперсия	F	P
Модел	3618,50167	4	904,62542	8,50855	0,03085
Остатък	425,27833	4	106,31958		
Общо	4043,78000	8			

Предсказани стойности и остатъци

N	y	yp	y-yp	PRESS(i)	SE pred.	Ст. остатък
1	540,4000	537,5167	2,8833	11,5333	8,9297	0,5593
2	581,2000	587,6833	-6,4833	-25,9333	8,9297	-1,2575
3	542,0000	536,2167	5,7833	23,1333	8,9297	1,1218
4	536,0000	539,5833	-3,5833	-14,3333	8,9297	-0,6950
5	546,0000	560,1167	-14,1167	-28,2333	7,2911	-1,9362
6	591,5000	586,8833	4,6167	9,2333	7,2911	0,6332
7	566,2000	562,6000	3,6000	5,4000	5,9531	0,4276
8	535,7000	537,9000	-2,2000	-3,3000	5,9531	-0,2613
9	583,0000	573,5000	9,5000	14,2500	5,9531	1,1284

T(0,025,4)=2,77645; F(0,050,4,4)=6,38823
Остатъчно СКО=10,311; R-sq=0,89483; Radj-sq=0,78966
PRESS = 2671,63917; R-sq(pred)=0,33932

Дисперсионен анализ (ANOVA) за Y3,N - (X1; X2)

Означение	Име	Бр. нива	Нива
x1	X1	3	-1; 0; 1
x2	X2	3	-1; 0; 1

Източник	Суми	Ст. свобода	Дисперсия	F	P
x1	1134,08667	2	567,04333	2,48313	0,19902
x2	1996,26000	2	998,13000	4,37089	0,09855
Остатък	913,43333	4	228,35833		
Общо	4043,78000	8			

Остатъчно СКО = 15,11153 R-sq = 0,77411 R-sq (adj) = 0,54823

Доверителни интервали за средната стойност по всяко факторно ниво:
Доверителните интервали са построени на база на стандартното отклонение за всяко ниво на факторите.

Ниво	Брой	Средно	Дисперсия	95% Доверителен интервал
X1				
-1	3	542,80000	8,32000	535,6347 <= 542,8000 <= 549,9653
0	3	561,63333	574,96333	502,0677 <= 561,6333 <= 621,1990
1	3	569,56667	871,56333	496,2293 <= 569,5667 <= 642,9040
X2				
-1	3	537,90000	12,63000	529,0717 <= 537,9000 <= 546,7283
0	3	573,50000	585,25000	513,4039 <= 573,5000 <= 633,5961

```
         1      3 562,60000   425,88000     511,3352 <= 562,6000 <=
613,8648
```

П4.4. Регресионен и дисперсионен анализ на фактора разтегливост до скъсване по вътък

```
Y4 = 17,408889-0,27833333x1+0,44x2
-------------------------------------------------------------------------
--
   Регресор       Коеф    Ст.Откл          t          p   Значимост    VIF
         0     17,409      0,071    246,440   3,01E-13       +
         1     -0,278      0,087     -3,217      0,018       +      1,000
         2      0,440      0,087      5,086      0,002       +      1,000
    Значимостта на коефициентите е определена при ниво = 0,05
-------------------------------------------------------------------------
--
-                          Дисперсионен анализ (ANOVA)
-
-------------------------------------------------------------------------
--
      Източник    Сума квадр.  Ст.Своб.   Дисперсия           F         P
         Модел        1,62642      2        0,81321      18,10669
0,00287
       Остатък        0,26947      6        0,04491
          Общо        1,89589      8
-------------------------------------------------------------------------
--
-                      Предсказани стойности и остатъци
-
-------------------------------------------------------------------------
--
   N          y          yp        y-yp    PRESS(i)    SE pred. Ст. остатък
   1    17,4200    17,5706    -0,1506    -0,2710      0,1413    -0,9531
   2    18,1200    18,1272    -0,0072    -0,0130      0,1413    -0,0457
   3    16,4400    16,6906    -0,2506    -0,4510      0,1413    -1,5862
   4    17,2500    17,2472     0,0028     0,0050      0,1413     0,0176
   5    17,3000    17,1306     0,1694     0,2346      0,1117     0,9408
   6    17,4600    17,6872    -0,2272    -0,3146      0,1117    -1,2616
   7    17,8900    17,8489     0,0411     0,0569      0,1117     0,2283
   8    17,1000    16,9689     0,1311     0,1815      0,1117     0,7280
   9    17,7000    17,4089     0,2911     0,3275      0,0706     1,4570


           Дисперсионен анализ (ANOVA) за Y4,N - (X1; X2)
-------------------------------------------------------------------------
   Означение                    Име   Бр. нива     Нива
         x1                      X1          3     -1; 0; 1
         x2                      X2          3     -1; 0; 1
-------------------------------------------------------------------------
    Източник        Суми  Ст. свобода   Дисперсия          F           P
         x1     0,57216            2     0,28608     8,48196     0,03641
         x2     1,18882            2     0,59441    17,62379     0,01039
     Остатък     0,13491            4     0,03373
-------------------------------------------------------------------------
        Общо     1,89589            8

Остатъчно СКО = 0,18365      R-sq = 0,92884      R-sq (adj) = 0,85768

Доверителни интервали за средната стойност по всяко факторно ниво:
```

```
Доверителните интервали са построени на база на стандартното отклонение
за всяко ниво на факторите.
      Ниво   Брой    Средно   Дисперсия       95% Доверителен интервал
X1
        -1      3  17,61000     0,20610     16,4822 <= 17,6100 <= 18,7378
         0      3  17,56333     0,17003     16,5390 <= 17,5633 <= 18,5877
         1      3  17,05333     0,28573     15,7255 <= 17,0533 <= 18,3812
X2
        -1      3  16,93000     0,18570     15,8595 <= 16,9300 <= 18,0005
         0      3  17,48667     0,04053     16,9865 <= 17,4867 <= 17,9868
         1      3  17,81000     0,12730     16,9237 <= 17,8100 <= 18,6963
```

П4.5. Регресионен и дисперсионен анализ на фактора устойчивост на претриване

```
Y5 = 96,666667+10x2-8,3333333x1x1
-------------------------------------------------------------------------------
--
   Регресор       Коеф    Ст.Откл          t          p   Значимост    VIF
         0     96,667      4,410     21,922    5,89E-7       +
         2     10,000      3,118      3,207      0,018       +      1,000
        11     -8,333      5,401     -1,543      0,174       -      1,000
    Значимостта на коефициентите е определена при ниво = 0,05
-------------------------------------------------------------------------------
--
-                          Дисперсионен анализ (ANOVA)
-
-------------------------------------------------------------------------------
--
      Източник    Сума квадр.  Ст.Своб.   Дисперсия           F          P
         Модел      738,88889      2      369,44444       6,33333
0,03321
       Остатък      350,00000      6       58,33333
          Общо     1088,88889      8
-------------------------------------------------------------------------------
--
-                     Предсказани стойности и остатъци
-
-------------------------------------------------------------------------------
--
   N          y          yp        y-yp    PRESS(i)    SE pred. Ст. остатък
   1      90,0000    98,3333    -8,3333   -12,5000      4,4096    -1,3363
   2     110,0000    98,3333    11,6667    17,5000      4,4096     1,8708
   3      70,0000    78,3333    -8,3333   -12,5000      4,4096    -1,3363
   4      80,0000    78,3333     1,6667     2,5000      4,4096     0,2673
   5      90,0000    88,3333     1,6667     2,0000      3,1180     0,2390
   6      90,0000    88,3333     1,6667     2,0000      3,1180     0,2390
   7     100,0000   106,6667    -6,6667   -13,3333      5,4006    -1,2344
   8      90,0000    86,6667     3,3333     6,6667      5,4006     0,6172
   9     100,0000    96,6667     3,3333     5,0000      4,4096     0,5345
-------------------------------------------------------------------------------
--
 T(0,025,6)=2,44691; F(0,050,2,6)=5,14325
 Остатъчно СКО=7,6376; R-sq=0,67857; Radj-sq=0,57143
 PRESS = 880,22222; R-sq(pred)=0,19163
```

```
           Дисперсионен анализ (ANOVA) за Y5,cicly - (X1; X2)
------------------------------------------------------------------------------
   Означение                       Име   Бр. нива     Нива
          x1                        X1          3     -1; 0; 1
          x2                        X2          3     -1; 0; 1
------------------------------------------------------------------------------
    Източник        Суми  Ст. свобода   Дисперсия           F           P
          x1   288,88889            2   144,44444     3,25000     0,14512
          x2   622,22222            2   311,11111     7,00000     0,04938
     Остатък   177,77778            4    44,44444
------------------------------------------------------------------------------
        Общо  1088,88889            8

Остатъчно СКО = 6,66667      R-sq = 0,83673      R-sq (adj) = 0,67347

Доверителни интервали за средната стойност по всяко факторно ниво:
Доверителните интервали са построени на база на стандартното отклонение
за всяко ниво на факторите.
      Ниво   Брой    Средно   Дисперсия       95% Доверителен интервал
X1
        -1      3  93,33333   233,33333     55,3875 <= 93,3333 <= 131,2792
         0      3  96,66667    33,33333     82,3245 <= 96,6667 <= 111,0088
         1      3  83,33333   133,33333     54,6490 <= 83,3333 <= 112,0177
X2
        -1      3  80,00000   100,00000     55,1586 <= 80,0000 <= 104,8414
         0      3  93,33333    33,33333     78,9912 <= 93,3333 <= 107,6755
         1      3 100,00000   100,00000     75,1586 <= 100,0000 <= 124,8414
```

П4.6. Регресионен и дисперсионен анализ на фактора коефициент на избелване

```
Y6 = 29,985556+1,1816667x1-2,0066667x2
------------------------------------------------------------------------------
--
   Регресор       Коеф    Ст.Откл          t          p   Значимост    VIF
          0     29,986      0,179    167,106    3,1E-12          +
          1      1,182      0,220      5,377      0,002          +      1,000
          2     -2,007      0,220     -9,131     9,7E-5          +      1,000
    Значимостта на коефициентите е определена при ниво = 0,05
------------------------------------------------------------------------------
--
-                         Дисперсионен анализ (ANOVA)
-
------------------------------------------------------------------------------
--
      Източник    Сума квадр.  Ст.Своб.   Дисперсия           F         P
         Модел       32,53828       2       16,26914      56,14118
0,00013
       Остатък        1,73874       6        0,28979
         Общо       34,27702       8
------------------------------------------------------------------------------
--
-                     Предсказани стойности и остатъци
-
------------------------------------------------------------------------------
--
   N          y          yp        y-yp    PRESS(i)    SE pred. Ст. остатък
```

1	29,3800	29,1606	0,2194	0,3950	0,3589	0,5469
2	27,1000	26,7972	0,3028	0,5450	0,3589	0,7546
3	33,9500	33,1739	0,7761	1,3970	0,3589	1,9343
4	31,1600	30,8106	0,3494	0,6290	0,3589	0,8709
5	30,8300	31,1672	-0,3372	-0,4669	0,2837	-0,7371
6	28,8100	28,8039	0,0061	0,0085	0,2837	0,0134
7	27,8300	27,9789	-0,1489	-0,2062	0,2837	-0,3255
8	31,2400	31,9922	-0,7522	-1,0415	0,2837	-1,6443
9	29,5700	29,9856	-0,4156	-0,4675	0,1794	-0,8188

--

T(0,025,6)=2,44691; F(0,050,2,6)=5,14325
Остатъчно СКО=0,53832; R-sq=0,94927; Radj-sq=0,93237
PRESS = 4,36425; R-sq(pred)=0,87268

Дисперсионен анализ (ANOVA) за Y6 - (X1; X2)

Означение	Име	Бр. нива	Нива
x1	X1	3	-1; 0; 1
x2	X2	3	-1; 0; 1

Източник	Суми	Ст. свобода	Дисперсия	F	P
x1	9,24482	2	4,62241	31,17049	0,00364
x2	24,43902	2	12,21951	82,40033	0,00056
Остатък	0,59318	4	0,14829		

Общо	34,27702	8

Остатъчно СКО = 0,38509 R-sq = 0,98269 R-sq (adj) = 0,96539

Доверителни интервали за средната стойност по всяко факторно ниво:
Доверителните интервали са построени на база на стандартното отклонение за всяко ниво на факторите.

Ниво	Брой	Средно	Дисперсия	95% Доверителен интервал
X1				
-1	3	29,02333	4,15503	23,9597 <= 29,0233 <= 34,0870
0	3	29,54667	2,90743	25,3109 <= 29,5467 <= 33,7824
1	3	31,38667	5,45363	25,5855 <= 31,3867 <= 37,1879
X2				
-1	3	32,11667	2,52243	28,1713 <= 32,1167 <= 36,0620
0	3	29,73667	1,04093	27,2022 <= 29,7367 <= 32,2711
1	3	28,10333	1,35563	25,2110 <= 28,1033 <= 30,9957

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

П5.1. Оптимизиране на целевите функции $Y_1 \rightarrow max$; $Y_3 \rightarrow max$; $Y_6 \rightarrow max$, при управляващи фактори $X_1(P_a, W)$ и $X_2(\Delta x, mm)$

Y1 max; Y3 max; Y6 max

```
*** Генетичен алгоритъм (GA);
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto1  Y1
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6  Y6
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto7  Y3
regression(MAX);regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 2500;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..1]

*** Оптимално решение :
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto1
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto7
   No       VAR1       VAR2  OK?       OBJ1       OBJ2       OBJ3
 2552    -0,9101     0,6606   Да  1524,8308    27,5845   590,7264       1525


*** Сканиране (SCAN);
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto1 - Y1
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6 - Y6
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto7 - Y3
regression(MAX);regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 27;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..0,5..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..0,5..1] ----------------------------------------------
*** Намерен парето фронт :
   No       VAR1       VAR2  OK?       OBJ1       OBJ2       OBJ3
    1    -0,9101     0,6606   Да  1524,8308    27,5845   590,7264
    2    -1,0000    -1,0000   Да  1293,1778    30,8106   539,5833
    3    -0,5000    -1,0000   Да  1206,4861    31,4014   538,7417
    4     0,0000    -1,0000   Да  1119,7945    31,9922   537,9000
    5     0,5000    -1,0000   Да  1033,1028    32,5831   537,0583
    6     1,0000    -1,0000   Да   946,4111    33,1739   536,2167
    7    -1,0000    -0,5000   Да  1367,6195    29,8072   569,0458
    8    -0,5000    -0,5000   Да  1280,9278    30,3981   565,2792
    9     0,0000    -0,5000   Да  1194,2361    30,9889   561,5125
   10     0,5000    -0,5000   Да  1107,5445    31,5797   557,7458
   11     1,0000    -0,5000   Да  1020,8528    32,1706   553,9792
   12    -1,0000     0,0000   Да  1442,0611    28,8039   586,8833
   13    -0,5000     0,0000   Да  1355,3695    29,3947   580,1917
   14     0,0000     0,0000   Да  1268,6778    29,9856   573,5000
   15     0,5000     0,0000   Да  1181,9861    30,5764   566,8083
   16     1,0000     0,0000   Да  1095,2945    31,1672   560,1167
   17    -1,0000     0,5000   Да  1516,5028    27,8006   593,0958
   22    -1,0000     1,0000   Да  1590,9445    26,7972   587,6833


*** Случайно търсене (RND);
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto1 - Y1
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6 - Y6
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto7 - Y3
regression(MAX);regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 25;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..1]
```

*** Намерен парето фронт :

No	VAR1	VAR2	OK?	OBJ1	OBJ2	OBJ3
1	-0,9538	0,9942	Да	1582,0689	26,8634	586,6556
2	-0,7021	-0,2244	Да	1356,9995	29,6062	577,1101
3	-0,6139	-0,3602	Да	1321,4896	29,9829	571,6643
5	-0,1628	-0,7093	Да	1191,2942	31,2166	553,8691
9	0,7429	-0,5927	Да	1051,6252	32,0528	553,2212
10	0,0982	-0,4294	Да	1187,7150	30,9633	563,0886
12	-0,0787	-0,5532	Да	1199,9703	31,0025	560,0982
14	0,3515	-0,3694	Да	1152,7358	31,1422	562,5795
15	-0,6341	-0,0896	Да	1365,2762	29,4161	580,0276
17	0,7818	-0,5379	Да	1053,0414	31,9888	554,5866
18	0,4162	-0,9093	Да	1061,1441	32,3020	541,9045
19	-0,8101	-0,1541	Да	1386,1973	29,3375	580,4267
20	-0,9343	-0,9415	Да	1290,5002	30,7708	543,4769
21	-0,0286	-0,8256	Да	1150,7217	31,6084	547,5632
23	0,6468	-0,8607	Да	1028,4009	32,4769	543,5056
25	-0,8011	-0,4976	Да	1333,4818	30,0375	567,6540

П5.2. Оптимизиране на целевите функции $Y_2 \rightarrow max$; $Y_4 \rightarrow max$; $Y_6 \rightarrow max$, при управляващи фактори $X_1(P_a, W)$ и $X_2(\Delta x, mm)$

Y2 max; Y4 max; Y6 max

```
*** Генетичен алгоритъм (GA);
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto2 - Y2
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto4 - Y4
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto6 - Y6
regression(MAX);regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 2500;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..1]

*** Оптимално решение :
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto2
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto4
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto6
   No       VAR1       VAR2   OK?       OBJ1       OBJ2       OBJ3
 2552    -0,9988     0,4657   Да      23,7347    17,8918    27,8708


*** Сканиране (SCAN);
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto2 - Y2
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto4 - Y4
OBJ3 --> regression1.model.txt.auto6 - Y6
regression(MAX);regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 27;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..0,5..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..0,5..1]

*** Намерен парето фронт :
   No       VAR1       VAR2  OK?       OBJ1       OBJ2       OBJ3
    1     0,0000     0,0000   Да    23,0000    17,4089    29,9856
    2    -1,0000    -1,0000   Да    22,2283    17,2472    30,8106
    3    -0,5000    -1,0000   Да    21,9308    17,1081    31,4014
    4     0,0000    -1,0000   Да    21,6333    16,9689    31,9922
    5     0,5000    -1,0000   Да    21,3358    16,8297    32,5831
    6     1,0000    -1,0000   Да    21,0383    16,6906    33,1739
    7    -1,0000    -0,5000   Да    23,0933    17,4672    29,8072
    8    -0,5000    -0,5000   Да    22,7958    17,3281    30,3981
    9     0,0000    -0,5000   Да    22,4983    17,1889    30,9889
   10     0,5000    -0,5000   Да    22,2008    17,0497    31,5797
   11     1,0000    -0,5000   Да    21,9033    16,9106    32,1706
   12    -1,0000     0,0000   Да    23,5950    17,6872    28,8039
   13    -0,5000     0,0000   Да    23,2975    17,5481    29,3947
   14     0,0000     0,0000   Да    23,0000    17,4089    29,9856
   15     0,5000     0,0000   Да    22,7025    17,2697    30,5764
   16     1,0000     0,0000   Да    22,4050    17,1306    31,1672
   17    -1,0000     0,5000   Да    23,7333    17,9072    27,8006
   18    -0,5000     0,5000   Да    23,4358    17,7681    28,3914
   19     0,0000     0,5000   Да    23,1383    17,6289    28,9822
   20     0,5000     0,5000   Да    22,8408    17,4897    29,5731
   21     1,0000     0,5000   Да    22,5433    17,3506    30,1639
   22    -1,0000     1,0000   Да    23,5083    18,1272    26,7972
   23    -0,5000     1,0000   Да    23,2108    17,9881    27,3881
   24     0,0000     1,0000   Да    22,9133    17,8489    27,9789
   25     0,5000     1,0000   Да    22,6158    17,7097    28,5697
   26     1,0000     1,0000   Да    22,3183    17,5706    29,1606


*** Случайно търсене (RND);
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto2 - Y2
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto4 - Y4
```

OBJ3 --> regression1.model.txt.auto6 – Y6
regression(MAX);regression(MAX);re - gression(MAX);
Итерации: 25;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..1]
**** Намерен парето фронт :*

No	VAR1	VAR2	OK?	OBJ1	OBJ2	OBJ3
1	-1,0000	0,5000	Да	23,7333	17,9072	27,8006
2	0,4475	-0,1098	Да	22,6547	17,2360	30,7346
4	-0,3995	0,2187	Да	23,3429	17,6163	29,0747
5	-0,2342	0,4297	Да	23,2802	17,6631	28,8465
6	0,1251	-0,3448	Да	22,6185	17,2224	30,8253
7	0,9446	-0,0565	Да	22,3995	17,1211	31,2150
8	-0,0119	-0,5928	Да	22,3723	17,1514	31,1611
9	0,7220	0,0874	Да	22,6208	17,2464	30,6634
10	-0,1604	0,5731	Да	23,2236	17,7057	28,6460
11	-0,6648	-0,7257	Да	22,5484	17,2746	30,6563
12	-0,6156	-0,6211	Да	22,6885	17,3070	30,5044
13	-0,0814	0,6938	Да	23,1427	17,7368	28,4973
14	-0,3440	-0,0819	Да	23,1474	17,4686	29,7433
15	-0,9251	-0,4597	Да	23,1027	17,4641	29,8149
16	-0,9676	-0,3891	Да	23,2166	17,5070	29,6231
17	-0,9508	0,2594	Да	23,6829	17,7877	28,3415
18	-0,6579	-0,8965	Да	22,2337	17,1976	31,0071
19	0,1002	0,7796	Да	22,9977	17,7240	28,5395
20	0,8995	0,8262	Да	22,4976	17,5221	29,3906
21	0,1632	-0,7998	Да	21,9263	17,0116	31,7832
22	-0,1824	0,9271	Да	23,0772	17,8676	27,9096
23	-0,6031	0,9024	Да	23,3446	17,9738	27,4622
24	-0,5612	-0,1971	Да	23,1796	17,4784	29,7179
25	-0,2906	0,5526	Да	23,3047	17,7329	28,5333
26	0,2286	0,9430	Да	22,8213	17,7602	28,3634

П5.3. Оптимизиране на целевите функции $Y_5 \rightarrow max$; $Y_6 \rightarrow max$, при управляващи фактори $X_1(P_a, W)$ и $X_2(\Delta x, mm)$

Y5 max; Y6 max

**** Генетичен алгоритъм (GA);**

```
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto5 - Y5
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6 - Y6
regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 2500;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..1]

*** Оптимално решение :
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto5
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6
   No       VAR1       VAR2   OK?       OBJ1       OBJ2
 2552     0,2890     0,9792   Да     105,7630     28,3620
```

***** Сканиране (SCAN);**

```
OBJ1 --> regression1.model.txt.auto5
OBJ2 --> regression1.model.txt.auto6
regression(MAX);regression(MAX);
Итерации: 27;
Променлива 1: X1
Обхват :[-1..0,5..1]
Променлива 2: X2
Обхват :[-1..0,5..1]

*** Намерен парето фронт:
   No       VAR1       VAR2  OK?       OBJ1       OBJ2
    1     0,0435     0,9992   Да   106,6432    28,0319
    4     0,0000    -1,0000   Да    86,6667    31,9922
    5     0,5000    -1,0000   Да    84,5833    32,5831
    6     1,0000    -1,0000   Да    78,3333    33,1739
    9     0,0000    -0,5000   Да    91,6667    30,9889
   10     0,5000    -0,5000   Да    89,5833    31,5797
   14     0,0000     0,0000   Да    96,6667    29,9856
   15     0,5000     0,0000   Да    94,5833    30,5764
   19     0,0000     0,5000   Да   101,6667    28,9822
   20     0,5000     0,5000   Да    99,5833    29,5731
   24     0,0000     1,0000   Да   106,6667    27,9789
   25     0,5000     1,0000   Да   104,5833    28,5697
```

Борислав Цонев Стоянов

ЛАЗЕРНО МАРКИРАНЕ НА ТЕКСТИЛНИ МАТЕРИАЛИ

Рецензенти
проф. д-р инж. Христо Михайлов Петров
доц. д-р инж. Сашо Петров Александров

Българска
Първо издание

Печат: Университетско издателство „Васил Априлов“ – Габрово
ISBN: ……

Съдържание

Списък на използваните означения 3
Въведение 8
1 Маркиране на текстилни материали – състояние на проблема 10
1.1 Електрофизични технологии за обработка на материали 10
1.2 Светлиннолъчева (лазерна) обработка 12
1.3 Световно потребление на лазерни технологии – тенденции 14
1.4 Приложение на лазерните технологии в текстилната индустрия 17
1.4.1 Контрол 18
1.4.2 Маркиране (гравиране) 19
1.4.3 Рязане (кроене) 22
1.4.4 Съединяване (заваряване) 23
1.4.5 3D сканиране 25
1.4.6 3D принтиране (синтероване) 26
1.5 Маркиране на текстилни материали 27
1.5.1 Видове маркировки 27
1.5.2 Методи на маркиране 29
1.5.2.1 Ситопечат 29
1.5.2.2 Тампонен печат 30
1.5.2.3 Термопринтиране 30
1.5.2.4 Бродерия 31
1.5.2.5 Етикетиране 31
1.5.2.6 Лазерно маркиране 32
1.5.2.7 Обобщени характеристики на методите за маркиране 36
1.5.3 Класификация на маркировките 38
1.5.4 Оценка на качеството на маркировките 40
1.5.4.1 Weber контраст 41
1.5.4.2 Четивност 43
1.6 Фактори които влияят на контраста на лазерната маркировка 43
1.6.1 Фактори, отнасящи се до материала 44
1.6.1.1 Оптични характеристики 44

1.6.1.2 Топлофизични характеристики 50
1.6.2 Фактори свързани с лазерния източник 53
1.6.2.1 Дължина на вълната на лазерното лъчение 53
1.6.2.2 Диаметър на минималното фокусно петно 54
1.6.2.3 Средна мощност, Импулсна мощност, Импулсна енергия 54
1.6.2.4 Повърхнинна плътност на мощността 55
1.6.2.5 Качество на лазерното лъчение 56
1.6.3 Фактори свързани с технологичния процес 57
1.6.3.1 Скорост на маркиране 57
1.6.3.2 Дефокусировка 58
1.6.3.3 Стъпка/отместване 58
1.6.3.4 Брой на повторенията 58
1.6.3.5 Ъгъл на наклона на стъпката/отместването 58
1.6.4 Фактори с комплексно влияние 59
1.7 Лазерни източници за маркиране на текстилни материали 60
Литература 61
2 Текстилни материали и методики за изследване 66
2.1 Текстилно производство и потребление - тенденции 66
2.1.1 Световни тенденции в производството и потреблението на текстил 66
2.1.2 Глобален пазар на текстилни влакна 70
2.2 Материали за изследване 71
2.2.1 Класификация на текстилните материали 71
2.2.2 Основни свойства на текстилните материали 73
2.2.3 Избор на материали за маркиране 76
2.3 Експериментална установка и апаратура 83
2.4 Методики на експерименталните изследвания 86
2.4.1 Методика за маркиране на образците 86
2.4.1.1 Подготовка на образци за определяне здравина и еластичност по основа и вътък след лазерно маркиране 87
2.4.1.2 Подготовка на образци за определяне устойчивост на претриване след лазерно маркиране 88

2.4.1.3 Подготовка на образци за определяне на контраста след лазерно маркиране 88
2.4.2 Методика за определяне на критичната плътност на мощността 90
2.4.3 Методика за определяне на контраста на маркировката 90
2.4.3.1 Цифров метод 90
2.4.3.2 Спектрофотометричен метод 91
2.4.4 Методика за микроскопски и структурен анализ 93
2.4.4.1 Микроскопски анализ 93
2.4.4.2 Scanning Electron Microscopy (SEM) анализ 94
2.4.5 Методика за оптимизиране на технологични обекти 95
Литература 100
3 Физичен модел на процеса лазерно маркиране 104
3.1 Физичен модел на процеса 104
3.1.1 Взаимодействие на лазерния лъч с веществото 104
3.1.2 Етапи на процеса лазерно маркиране 105
3.1.3 Уравнение на енергийния баланс 109
3.2 Граници на приложимост на модела 111
3.2.1 Повърхнинна плътност на мощността 112
3.2.2 Определяне на критичните стойности на повърхнинната плътност на мощността 116
Литература 123
4 Изследване и оценяване на влиянието на технологичните фактори върху качеството на лазерната маркировка и физико-механичните свойства на плат Деним 125
4.1 Експериментално изследване 125
4.1.1 Провеждане на изследването 125
4.1.2 Математическо моделиране 127
4.1.3 Графично представяне на резултатите 128
4.1.4 Анализ на експерименталните данни 135
4.1.4.1 Здравина на опън по основа Y1,N 135
4.1.4.2 Разтегливост до скъсване по основа Y2,% 135
4.1.4.3 Здравина на опън по вътък Y3,N 136
4.1.4.4 Разтегливост до скъсване по вътък Y4,% 136

4.1.4.5 Устойчивост на претриване Y5,cycle 137
4.1.4.6 Коефициент на избелване Y6 137
4.1.5 Оптимизиране на параметрите на процеса лазерно маркиране 138
4.2 Микроскопски анализ 142
Литература 146
Съдържание 148
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 152
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 153
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 154
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 157
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 165