International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

CO_2 ЛАЗЕРНО МАРКИРАНЕ НА ПАМУЧЕН ПЛАТ ТИП ДЕНИМ

Йовка Стоянова[1], Ивелин Банев[1], Петър Николов[1], Павлина Маринова[1], Теодора Медарова[1], Борислав Стоянов[1,2]

[1]Катедра „Индустриални технологии и дизайн“, Технически университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, 5300 Габрово, България
[2] Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“, ул. Доктор Илиев Детския 5, 5300 Габрово, България
**кореспондиращ автор: y.stoyanova@tugab.bg*

CO_2 LASER MARKING OF DENIM COTTON FABRIC

Yovka Stoyanova[1], Ivelin Banev[1], Petar Nikolov[1], Pavlina Marinova[1], Teodora Medarova[1], Borislav Stoyanov[1,2]

[1]Department of Industrial Engineering and Design, Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria;
[2]Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies", 5 Doctor Iliev Detskia Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: y.stoyanova@tugab.bg*

Abstract
Laser processing of textiles is a modern and promising method. It has established itself as a reliable and efficient alternative to traditional processing methods for all types of textile materials. It is most commonly applied when marking images, text, logos, or codes directly onto the surface. This study examines the laser processing of Denim cotton fabric, specifically focusing on the effect of processing parameters on the brightness of the resulting mark. A CO2 laser source operating in pulsed mode, with a wavelength of 10,640 nm and a power of 30 W, was used. The process control factors selected were output power and raster density. The ranges for these factors were determined experimentally to ensure practical values for the output parameter while avoiding significant changes to the fabric's physical and mechanical properties. Laser marks were produced, and their image brightness and Weber contrast were measured. The influence of the two factors on the process has been determined, and mathematical modelling was conducted to perform an in-depth analysis. Analytical and graphical relationships have been derived.
Keywords: Denim, cotton, fabric, laser, processing, marking.

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 [1-5]. 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: карбониза-

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

ция, избелване, депигментация, модификация на покритието, топене, изпаряване и др.[6-8].

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 [9-13].

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.

Използването на лазерен източник на основата на газ CO_2 е един от пионерите в текстилното маркиране, както и до днес [9, 11-13]. Положителните страни на тази технология е постоянното и усъвършенстване, като се постигат по-големи изходящи мощности, по-висока плътност на мощността, по-добро бързодействие, респ. скорост на обработка.

За да се проведе правилно процесът на лазерно маркиране на текстилни материали, една от най-важните задачи е да се определят факторите на влияние, както и техния диапазон на въздействие. В статията се разглеждат идентифициране на главните фактори на влияние при лазерно маркиране на текстилни изделия с CO_2 лазер, както и се анализират получените резултати с помощта на регресионния анализ.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обект на изследване. За да се извършат експерименталните изследвания, свързани с маркираното на текстил, е избрана памучна тъкан тип Деним, боядисана в тъмно синьо индиго. Преди определяне на характеристиките на плата, той се кондиционира при температура $20 \pm 2°C$ и относителна влажност $65 \pm 4\%$ за 24 h, съгласно (ISO 139:2000 [14]), чрез апарат BINDER KBF 115.

***Табл. 1**. Характеристики на памучен 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		33 x 1
	- вътък	tex		22,7 x 1
2	Маса на единица площ	$g.m^{-2}$	БДС EN 12127:2000 Везна аналитична електрическа Тип: Precisa Balances Series 320 XT	Тъкан 322,7
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	328
	- вътък	бр./10cm		220

Върху кондиционирания памучен плат, са проведени лабораторни изпитвания, табл.1, за установяване на следните характеристики:

• Линейна плътност по основа и вътък (ISO 7211-5 (метод А):2020 [15]);

• Маса на единица площ (БДС EN 12127:2000[16]);

• Сплитка (БДС 12674:1975[17]);

• Брой на нишките на единица дължина (БДС EN 1049-2:2002, метод А[18]);

• Текстил. Количествен химичен анализ (БДС EN ISO 1833[19]).

Характеристиките на плата са: основна нишка - линейна плътност Tt = 33 *tex*, индиго боядисана в тъмно синьо; плътност на основата 328 *бр/10cm*; вътъчна нишка - линейна плътност Tt = 22,7 *tex*, избелена; плътност на вътъка 220 *бр/10cm*; кепър структура 2./.1; маса на единица площ 322,7 g/m^2. Изследвания плат притежава следния състав: по основа 100%-П; по вътък 96/4%-П/Ел (*П-памук, Ел-еластан*).

Лазерна обработка. Обработката е проведена с помощта на машина „CK Laser 300-500“ с интегриран 300*W* лазерен CO_2 източник. Системата за лазерно маркиране, фиг. 1 и фиг. 2, е реализирана на галванометричен принцип на работа, като включва следните компоненти: персонален компютър (1); монитор (2); клавиатура (3); мишка (4); контролер (5); лазерен източник (6); сканиращо устройство (7); обект за маркиране (8); вертикална механична ос (9) – фиг. 3.

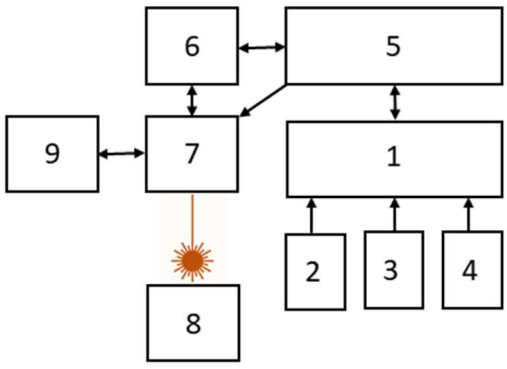
Предимствата на използваната лазерна система са следните: състои се от интегрирана платформа с лят корпус за по-стабилен оптичен път; предоставя най-високо качество при процеси рязане и маркиране, минимално термично въздействие; постига изключителна прецизност при маркиране; минимален размер на светлинното петно; значително по-добра равномерност за голямото работно поле – 500x500 *mm*. Машинните и процесните характеристики, съответно са представени в табл.2 и табл.3. Параметрите на лазерната обработка са представени в табл.4.



Фиг. 1. *Лазерна маркираща система „CK Laser 300-500“*



Фиг. 2. *Работна зона на лазерна маркираща система CK Laser 300-500*



Фиг. 3. *Система за лазерно гравиране - основна блок схема*

***Табл. 2**. Машинни характеристики*

Характеристика	**Стойност**
Източник на лазерно лъчение	CO_2
Номинална мощност	300 *W*
Режим на работа	Modulated
Galvo глава	CK-super300P-V3.0
Маркирано поле	500x500 *mm*
Маркиращ софтуер	3DLASER
Охлаждане	Water

***Табл. 3**. Процесни характеристики*

Характеристика	**Означение**	**Стойност**	**Димензия**
Дължина на вълната	λ	10640	nm
Номинална мощност	Pa	300	W
Честота	f	20 ÷ 100	kHz
Продължителност на импулса	τ_o	50	ns
Енергия на импулса[1]	Ep	15	mJ
Импулсна мощност[2]	Pp	300	kW
Скорост на маркиране	V	1 ÷ 7000	mm/s
Режим на работа	Pulsed	-	-
Качество на лъча	M^2	1,2 ÷ 1,5	-
Диаметър на работното петно[3]	d_f	≈ 200	μm

[1] при Pa=300W, f=20kHz

[2] изчислен за Pa=300W, f=20kHz, τp=50ns

[3] според производителя за оптична леща f-theta lens с работно поле 500x500 mm

***Табл. 4**. Параметри на лазерната обработка*

		f, kHz				
Pa (W)		20	40	60	80	100
24	Ep (mJ)	1,20	0,60	0,40	0,30	0,24
	Pp (kW)	24,0	12,0	8,0	6,0	4,8
	qs (W/cm^2)	7,64E+07	3,82E+07	2,55E+07	1,91E+07	1,53E+07
18	Ep (mJ)	0,90	0,45	0,30	0,23	0,18
	Pp (kW)	18,0	9,0	6,0	4,5	3,6
	qs (W/cm^2)	5,73E+07	2,87E+07	1,91E+07	1,43E+07	1,15E+07
12	Ep (mJ)	0,60	0,30	0,20	0,15	0,12
	Pp (kW)	12,0	6,0	4,0	3,0	2,4
	qs (W/cm^2)	3,82E+07	1,91E+07	1,27E+07	9,55E+06	7,64E+06
	E^l (J/mm)	0,100	0,050	0,020	0,010	0,005
V при Pa=24 W (mm/s)		240	480	1200	2400	4800
V при Pa=18 W (mm/s)		180	360	900	1800	3600
V при Pa=12 W (mm/s)		120	240	600	1200	2400

***Табл. 5**. Области на вариране на факторите*

Нива на факторите	X_1, W	X_2, mm	Кодирана стойност
$X_{io} + \Delta X_i$	24	0,5	+1
X_{io}	18	0,4	0
$X_{io} - \Delta X_i$	12	0,3	-1
където: $\Delta X_1 = 6W, \Delta X_2 = 0{,}1\ mm$			

Експериментални изследвания. За да се установи многофакторното влияние на технологични параметри върху качествените показатели на нанесената маркировка на памучен плат тип Деним, посредством лазерен лъч, е проведен планиран експеримент [20].

Избрания параметър на изследване е:

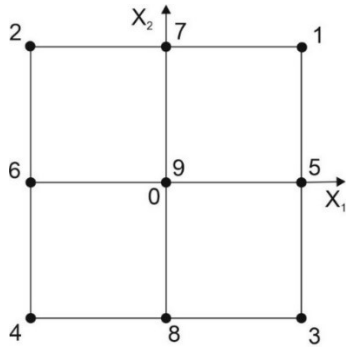
Y - коефициент на изсветляване на маркирания памучен плат (Weber), k^*.

Избраните фактори на влияние са следните:

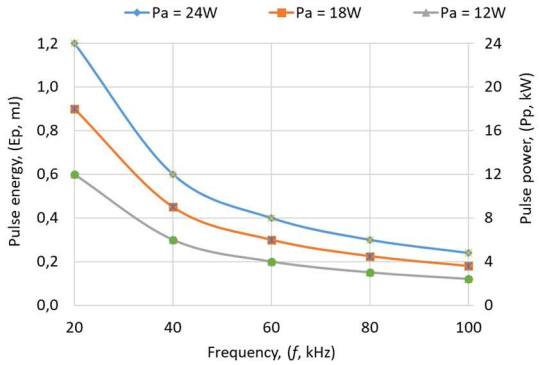
X_1 – мощност на лазерното лъчение, P_a, W;

X_2 – гъстина на растера, $\Delta x, mm$.

Избора на факторите на влияние е направен експертно, а диапазона на изменението им следствие предварително проведени маркировки при различни параметри на лазерното маркиране. Факторите варират в границите представени в табл.5, обезпечаващи получаването на най-добри резултати при маркиране с лазер и формират плана на експеримента – фиг.4.



Фиг. 4. *План на експеримента*

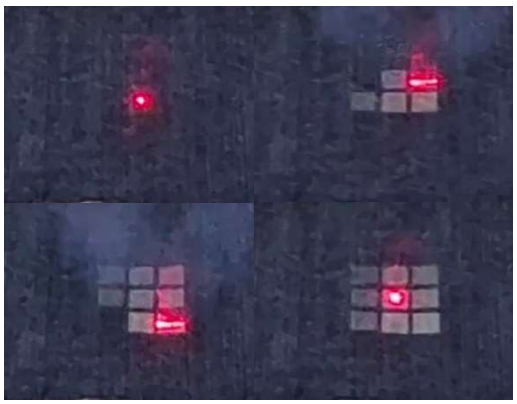


Фиг. 5. *Режими на работа на използвания лазерен CO_2 източник за плана на експеримента*

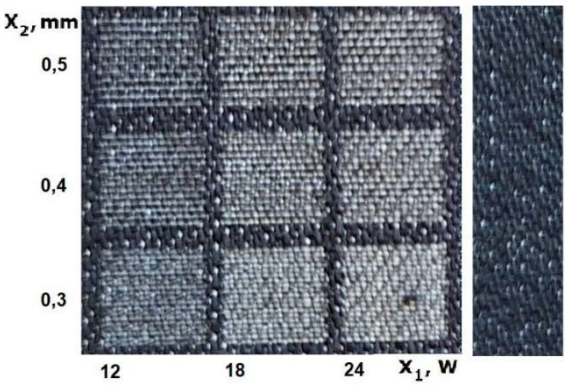
Режимите на работа на лазерния CO_2 източник за избрания план на експеримента и нива на вариране на факторите са показани на фиг.5.

Постоянните фактори на процеса лазерно маркиране са: дефокусировка $\Delta Wd = 0$ *mm*; ъгъл на наклона на растера $\alpha = 0^o$; честота на повторение на импулсите $f = 20$ *kHz*; брой на повторенията – $R = 1$; скорост на лазерното лъчение $V = 1000$ *mm/s*.

Провеждането на лазерната маркировка е показана на фиг. 6, а схемата на изпълнения експериментален план е показана на фиг. 7.



Фиг. 6. *Провеждане на лазерно маркиране на памучен плат Деним*



Фиг. 7. *Лазерно маркиран памучен плат Деним*

Подбран е диапазон за използване на максималната мощност на лазерното лъчение, диапазон на нарастване на гъстината на растера, при която се постига равномерност на покритието на маркировката и скорост, при която няма места от плата с карбонизирани участъци

или слаб контраст. Областите на маркиране имат размер 10x10 mm и са обработени върху памучния плат с различни стойности на управляващите параметри, за да се оцени промяната на цвета.

Измерване на цвета - контрастен метод на Weber. Качеството на лазерното маркиране се определя в най-голяма степен от контраста на Weber - k*. Той представлява осветеността на елементите и фона на изображението в относителни единици. За оценка на промените в повърхностните цветови характеристики на тъканите са направени снимки с помощта на цифрова камера в отразена 90° падаща халогенна светлина без увеличение, с резолюция от мин. 1500 × 1500 пиксела (72 DPI), и препоръчителни параметри на камерата: t = 1/60 s; f = 5,5; ISO 40. В зоната на измерване цифровото изображение се конвертира в черно-бяло, за да се измери контрастът [6, 11]. Чрез сравняване на полученото изображение с еталонна скала се избира стойност на 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 област). Контрастът се определя от съотношението между яркостта на изображението Lx и фоновата яркост Lf, измерено в %, показано в уравнение 1 [6, 11].

$$k^*, \% = \frac{Lx-L}{Lx,max-Lf}.100 \qquad (1)$$

Необработеният памучен плат тип Деним притежава следната фонова яркост $Lf = 91{,}7$. Физическото явление, свързано с лазерната обработка на синьо индигово багрило, което се отстранява от повърхността на памучния плат, е процесът на изпаряване. Материалът, отстранен с лазер, често може да бъде прост процес на изпаряване, с абсорбиране на лазерна енергия върху непрекъснато третирана повърхност. С увеличение на лазерната енергия, материала може да достигне до бързо изпаряване и по този начин изпареният материал може да се разпръсне в заобикалящата атмосфера без допълнително взаимодействие с лъча.

Числените резултати от измерения контраст на образците са представени обобщено в табл.4., където факторите x_1 и x_1 са дадени в кодирани стойности, а фактора X_3 и целевите функции в натурални стойности.

***Табл. 6**. Измерени стойности за яркост на маркировката и изчислен контраст*

x_1	x_2	L_x	k*, %
1	1	134,60	65,79
-1	1	113,10	32,82
1	-1	156,90	100,00
-1	-1	127,30	54,60
1	0	139,90	73,92
-1	0	119,20	42,17
0	1	130,00	58,74
0	-1	154,10	95,70
0	0	140,20	74,38

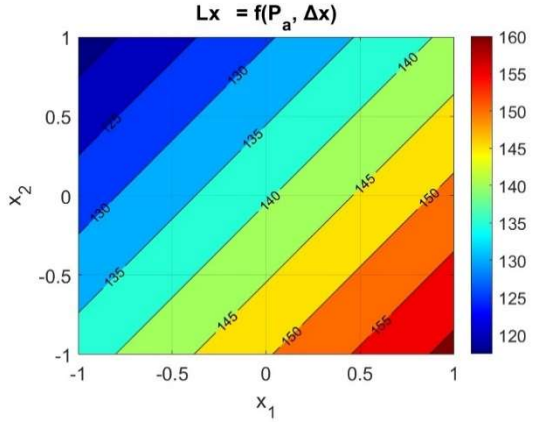
Математическо моделиране.

Резултатите са анализирани с помощта на статистически софтуер QstatLab-v6. Представени са полиноминалните коефициенти на математическите модели, получени от въведените експериментални данни на базата на метода на регресионния анализ. Получените коефициенти, съгласно уравнение (2), са представени в табл.7 в кодирани стойности. Резултатите за Lx и k^* са показани графично на фиг.8 и фиг.9.

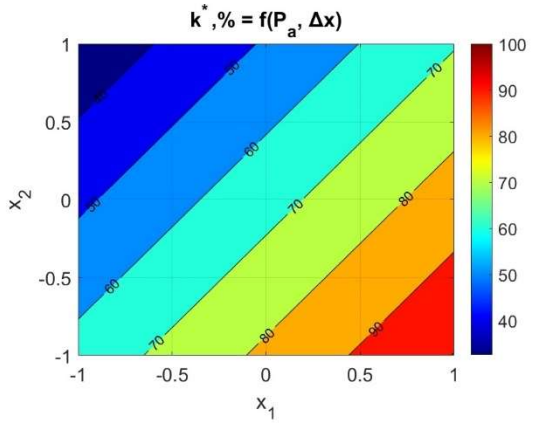
$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \qquad (2)$$

***Табл. 7**. Коефициенти на мат. модел*

	b_0	b_1	b_2
L_x	139,50	11,97	-10,1
k*, %	66,46	18,35	-15,49



***Фиг. 8**. Яркост на лазерната маркировка Lx*



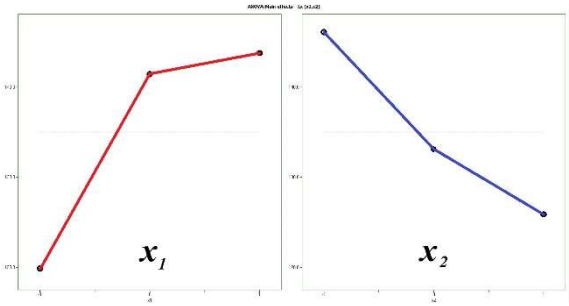
***Фиг. 9**. Контраст на маркировката - k**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характера на изменение на контраста на лазерно маркиран плат тип Деним показва предсказуеми характеристики в областта на избраните фактори на влияние. Очаквано при максимален интензитет на лазерното лъчение и максимална гъстина на растера се получават максимални стойности за измерения контраст на Weber. В конкретното изследване изходящата мощност е $P_a = 24\,W$ и гъстина на растера е $\Delta x = 0{,}3\,mm$. Получените експериментални стойности, както и проведеното математическо моделиране най-добре се описват с линеен регресионен модел. Това опростява провеждането на анализ на получените резултати и дефиниране на оптималните стойности на изходния параметър.

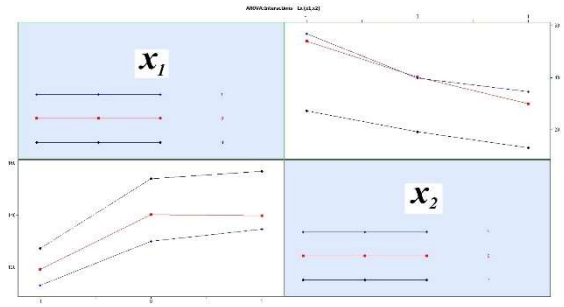
Разсейването на стойностите за всяко установено ниво на двата входни параметъра за яркост на изображението Lx средно е 15,14%.

Факторът изходяща мощност влияе правопропорционално на реализираната яркост на маркировката, докато гъстината на растера влияе обратно-пропорционално (фиг.10).



***Фиг. 10**. Главни ефекти на факторите на влияние върху яркостта на маркировката*

Взаимодействието на факторите на влияние показва по-стръмна зависимост при изменение на изходящата мощност в сравнение с гъстината на растера (фиг.11). При различни нива на единия фактор резултатите показват близки по изменение характеристики.



***Фиг. 11**. Взаимодействие на ф-рите на влияние върху яркостта на маркировката*

Представеното изследване демонстрира подход за анализиране на влиянието на лазерното маркиране върху контраста на текстилни площни изделия. Подхода е приложим за различни по вид материали, лазерни източници, фактори на влияние, граница на вариране на факторите, като получените резултати могат да бъдат критерии за оценка на влиянието на различни параметри на процеса лазерно маркиране.

Докладът е финансиран от Българското министерство на науката и образованието и Технически университет – Габрово по договор №НИП2026-2.

Това изследване е подкрепено от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Yuan G., S. Jiang, E. Newton, J. Fan, W. Au, 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. https://8iss.files.wordpress.com/2016/05/5-panel-on-transformation.pdf (2023)

[2] Nayak, R., Padhye, R., The use of laser in garment manufacturing: an overview. Fash Text 3, 5, 2016.

[3] Stoyanov B., Kr. Drumev, D. Genov, “Fashion design using laser engraving technology”, Journal of the Technical university of Gabrovo, Vol.52’2016, page 53-57, ISSN 1310-6686.

[4] Dascalu T., S. Ortiz, M. Morales, I. Compean, Removal of the indigo color by laser beam-denim interaction, Optics and Lasers in Engineering, 2000; 34:179–89, DOI:10.1016/S0143-8166(00)00087-7, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816600000877 (2023).

[5] Ozguney A, Ozcelik G and Ozkaya K 2009 A study of specifying the effect of laser fading process on the colour and mechanical properties of the denim fabrics Tekst. Konfeksiyon. 19(2) 133–8

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

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

[8] Stoyanov B T, Drumev K I and Genov D N 2016 Microscope analysis of laser treated cotton fabrics Journal of the Technical university of Gabrovo 52 58–60.

[9] Kan C.W., at al., 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, DOI:10.1111/j.1478-4408.2010.00270.x, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1478-4408.2010.00270.x (2023)

[10] Sakib A, Islam T, Islam S, Ahmed M and Ali S 2019 Analysis the physical properties of laser fading on denim fabric J. Textile Eng. Fashion Technol. 5(6) 288–90

[11] Dolchinkov N T 2020 Practical research of marking and cutting of textiles with increased resistance, using CO2 laser J. Phys.: Conf. Ser. 1681 1–5

[12] Venkatraman P D and Liauw C M 2018 Use of a carbon dioxide laser for environmentally beneficial generation of distressed/faded effects on indigo dyed denim fabric: Evaluation of colour change, fibre morphology, degradation and textile properties Opt. Laser Technol. 111 701–13

[13] Shterev Y et al. 2018 Examining the possibility of marking and engraving of textile using CO2 laser Mach. Technol. Mater 12(12) 491–3.

[14] ISO 139, Textiles – Standards atmospheres for conditioning and testing.

[15] ISO 7211-5:2020 - Textiles — Methods for analysis of woven fabrics construction — Part 5: Determination of linear density of yarn removed from fabric.

[16] EN 12127:2000 - Textiles - Fabrics - Determination of mass per unit area using small samples.

[17] BDS 12674:1975, Weaves. Basic terms and primary weaves.

[18] EN 1049-2:2002, Textiles - Woven fabrics - Construction - Methods of analysis - Part 2: Determination of number of threads per unit length.

[19] ISO 1833-1:2020, Textiles - Quantitative chemical analysis - Part 1: General principles of testing (ISO 1833-1:2020).

[20] Angelov I.A., M.S. Petrov, Teoria na inzhenernia eksperiment, TU-Gabrovo, 2002.