

Wpływ oddziaływania wiązki laserowej na skłonność tkanin poliestrowych do pilingu

Streszczenie. W artykule opisano wpływ modyfikacji powierzchni tkanin poliestrowych z wykorzystaniem wiązki laserowej. Ocenę tendencji do pilingu wykonano w oparciu o analizę obrazów 2D oraz 3D pozyskanych z wykorzystaniem optycznego tomografu koherentnego. Zaobserwowano pozytywny wpływ obróbki laserowej na zmniejszającą się liczbę poluzowanych pojedynczych nitów wystających ponad powierzchnię tkaniny, a w efekcie końcowym na zmniejszenie powstającego niepożądanego pilingu.

Abstract. In the article the effect of surface modification of polyester fabrics using a laser beam has been described. Pilling tendency have been assessed based on the analysis of 2D and 3D images obtained from the optical coherence tomography. A positive effect of laser processing has been observed on the decreasing number of loosened single threads protruding above the surface of the fabric and in the result the reduction of the unwanted piling. (**The impact of the laser beam on the tendency of polyester fabrics for piling.**)

Słowa kluczowe: laserowa modyfikacja powierzchni, piling, tekstylia, optyczna tomografia koherentna.

Keywords: laser surface modification, piling, textiles, optical coherence tomography.

Wstęp

Postęp w technologii i ciągle wzrastający standard życia powoduje konieczność zaspokajania rosnących wymagań klientów w każdej dziedzinie. Dotyczy to również tkanin i dzianin, z których wykonywana jest współczesna odzież. Zaspokajanie rosnących potrzeb obecnie dotyczy nie tylko nowych rozwiązań, z których słynie współczesna tekstylia (ubrania z wbudowanymi sensorami, zasilaniem, np. dla służb działań antykrzysowych [1,2], tkanin z wykończeniem antybakteryjnym [3] itp.) czy produkcji nowych włókien, ale jest też ściśle związane z ulepszaniem jakościowym tkanin już istniejących. O kierunkach ulepszania decydują względy estetyczne i niezmiennosc struktury w długim czasie użytkowania. Poprawa pod tym względem dotyczy takich walorów tkanin jak barwienie (w tym uzyskiwanie pożądanego kolorów bądź wybielanie [4]), połysk, hydrofobowość, wykończenie antyzabrudzeniowe, redukcja tendencji do filcowania wełny [5], zmniejszenie strzępienia przy wykrawaniu, znakowanie lub zdobienie tkanin [6]. Stosowane w tym celu metody opierają się na procesach chemicznych i fizycznych, z czego te drugie ze względów ekologicznych zasługują na większą uwagę. W procesach fizycznych wykorzystywana jest modyfikacja plazmą [5, 7] lub laserem [5].

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu działania wiązki laserowej na strukturę powierzchni podłoża tekstylnego w kontekście poprawy odporności podłoża na piling. Do oceny skuteczności zastosowanej metody modyfikacji wyrobów włókienniczych wykorzystano nowatorską metodę optycznej tomografii koherentnej. Na podstawie otrzymanych obrazów cyfrowych określano podatność tkaniny do pilingu.

Zjawisko pilingu

Zjawisko pilingu polega na powstawaniu, uznawanych za nieestetyczne, małych supełków lub kulek. Ich powstawanie jest skutkiem zwijania się w małe sferyczne wiązki luźnych włókien znajdujących się na powierzchni tkaniny. Część główną kulki, nazwaną głownią, tworzą przede wszystkim włókna wyrobu, odstające od rdzenia przędzy. Włókna te w warunkach użytkowania tworzą samozakleszczające się pętle, które zaciskają się na innych włóknach. Dlatego we wnętrzu głowni znaleźć można również włókna innych materiałów, z którymi tkanina miała kontakt w trakcie procesu tarcia, a także inne drobiny niewłóknistych ciał obcych o niewielkich rozmiarach będące

częścią innych powierzchni. Zjawisko elektryzowania się włókien sprzyja zakleszczaniu innych nitów i różnych drobin. Supełki te są zakotwiczone do wierzchniej warstwy tkaniny. Powstają w wyniku prania, codziennego użytkowania lub innych czynności, w których mamy do czynienia z pocieraniem warstwy wierzchniej tkaniny. Jest to wada powierzchniowa wyrobów tekstylnych. Przy obniżonej estetyce wyroku spowodowanej nadmiernym pilingiem produkt tekstylny może zostać wycofany z użytkowania. W przemyśle włókienniczym wyróżnia się cztery etapy pilingu:

- splątanie włókien,
- tworzenie kłębów,
- zwiększanie się kłębów,
- zużycie [8].

Pile tworzą się w wyniku zwijania i wiązania się wystających na powierzchni tkaniny włókien. Problem ten dotyczy szczególnie tkanin produkowanych z włókien syntetycznych, zwykle poliestrowych. Na stopień pilingu wpływ mają zarówno skład surowcowy, struktura wykorzystywanej przędzy jak i warunki użytkowania wyrobów tekstylnych.

Badania dotyczące odporności wyrobu tekstylnego na piling polegają na ścieraniu tkaniny bądź dzianiny z wykorzystaniem maszyny Martindale'a. W metodzie tej próbka jest umieszczana w przyrządzie, a następnie pocierana, aż do momentu pojawienia się niepożądanych supełków. Jest to sposób na przyspieszone wywołanie zjawiska pilingu. Po zakończeniu badania, następuje ocena ilości kłębów w skali od 1-5 (zgodnie z ISO-12945-2-200) (rys.1).



Rys.1. Skala oceny pilingu

Według tej skali 1 odpowiada największej liczbie powstałych kulek i jest definiowane jako silne mechacenie pokrywające całą powierzchnię tkaniny. W przypadku osiągnięcia poziomu 2 na powierzchni można zaobserwować pojedyncze supełki o różnej wielkości i

gęstości pokrywające dużą część powierzchni wyrobu tekstylnego. Liczba 3 określa umiarkowany piling powierzchni, co oznacza pętelki o różnej wielkości i gęstości, częściowo pokrywające tkaninę. Kolejny stopień, 4, określa niewielki piling pojawiający się na wierzchniej warstwie, a 5 stopień określa brak zmiany wyglądu tkaniny lub dzianiny pomimo poddania jej procesowi ścierania. Najczęściej wymaga się, aby wyroby tekstylne osiągnęły co najmniej stopień 4.

Odpowiednim stopniom pilingu przyporządkowano kategorie wyrobów tekstylnych i tak:

- Stopień 3 – kategoria D
- Stopień 3-4 - kategoria C
- Stopień 4 – kategoria B
- Stopień $\geq 4-5$ - kategoria A (najwyższa)

Istnieją różne sposoby redukcji podatności na piling, takie jak wybór odpowiedniego włókna poliestrowego lub zastosowanie antypilingowego wykończenia.

Wykończenie przeciwpilingowe wykonywane jest z wykorzystaniem specjalnych chemikaliów, których zadaniem jest zmniejszenie liczby tworzących się kłębów na wyrobach tekstylnych. Metoda ta wykorzystuje specjalny środek chemiczny, którego celem jest powstrzymanie zdolności włókien do złuzowania, a także zmniejszenie mechanicznej odporności włókna. Najczęściej jest to płynny polimer akrylowy do stosowania jako miękki i elastyczny środek do ręcznego wytwarzania. Ten polimer zmniejsza strzępienie oraz mechacenie obrabianych tkanin.

Wykorzystanie lasera w przemyśle tekstylnym

Cięcie laserem zapewni oprócz dobrego wykończenia ciętych brzegów bardzo wysoką precyzję cięcia laserowego, powtarzalność, brak naprężeń i niepożądanych przesunięć tkaniny podczas cięcia. Narzędzie, jakim jest laser, gwarantuje dodatkowo brak konieczności ostrzenia. Te zalety promieniowania laserowego są wykorzystywane również w laserowym projektowaniu, znakowaniu i grawerowaniu tkanin. Laser poprawia podatność tkaniny na farbowanie włókien poliamidowych [9]. Do takich celów używane są lasery impulsowe: laser CO₂, lasery ekscymerowe (promieniowanie UV) lub lasery Nd-YAG, które charakteryzują się długościami fali elektromagnetycznej dobrze absorbowanymi przez używane w tekstyliach włókna. Przeprowadzone badania udowodniły nie tylko poprawę wymaganych czynników, ale także utrzymania wielu wcześniejszych cech, takich jak: stabilność chemiczna, podobna odporność na wyższą temperaturę i podobną wytrzymałość mechaniczną [10].

W przypadku pillingu pierwsze doniesienia o poprawie odporności na mechacenie tkanin poliestrowych pojawiły się w 2018 roku [11]. Do tej pory laser spełniał w przypadku pillingu rolę narzędzia pomiarowego [12- 14].

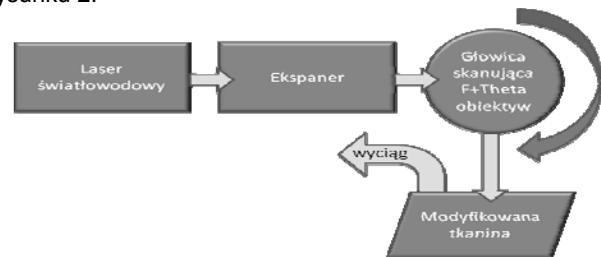
Ostatnio przeprowadzone badania dowiodły możliwości zmniejszania pillingu za pomocą laserowego osadzania nanocząstek na powierzchni tkaniny (pulse laser deposition PLD). Użyto do tego celu lasera CO₂, gdyż większość włókien dobrze absorbuje promieniowanie o tej długości fali 10,6 μm . Dzięki metodzie PLD osadzone cząstki ZnO lub Ag (o rozmiarach rzędu 30 nm) na powierzchni poliestru zapobiegają mechaceniu i wyciąganiu pojedynczych włókienek, które zbijałyby się w nieestetyczne pile [12].

Modyfikacja laserowa wyrobów tekstylnych

Do badań wykorzystano dzianinę poliestrową typu single jersey o gęstości powierzchniowej 240 g/m². Była to dzianina jednoczęściowa z lewoskrętnym splotem, ogólnie dostępna w obrocie rynkowym.

W poniższym artykule zaprezentowano metodę zmniejszenia tendencji do pillingu konkurencyjną do już

znanych. Do modyfikacji włókien poliestrowych użyto ablacji impulsowym laserem światłowodowym SPI 20W o długości fali 1,06 μm . Laser emitował promieniowanie w postaci wiązki gaussowskiej TEM₀₀. Promieniowanie o długości 1,06 μm jest również dobrze absorbowane przez włókna poliestrowe. Wykorzystane stanowisko zaprezentowano na rysunku 2.



Rys.2. Laserowe stanowisko do obróbki tkanin poliestrowych, długość fali $\lambda = 1064 \text{ nm}$,

Skłonność do pillingu zmniejsza się, gdy włókna tkaniny są dobrze związane ze sobą. Można to zapewnić przez pokrycie nanocząstkami lub indukowanie nanokrystaliczności włókien na powierzchni [10, 15]. W rozważanym przez autorów przypadku źródłem nanocząstek jest sama tkanina, której powierzchnię poddaje się ablacji laserowej. Energia impulsów promieniowania odpowiada fluencji progowej zjawiska ablacji. Nanocząstki generowane w tym procesie i generowana nanokrystaliczność nie powodują ubytków materiału, więc tym samym wytrzymałość tkanin nie zmienia się. Zjawiska te są jednak wystarczające do zespojenia włókien w wyniku osadzenia powtórnego nanocząstek, wygenerowanych w procesie ablacji na powierzchni tkaniny. Szczególne znaczenie ma sposób skanowania wiązki promieniowania laserowego po powierzchni tkaniny, jak również dobór częstotliwości powtarzania generowanych impulsów w stosunku do prędkości skanowania. Przy średnicy wiązki promieniowania laserowego 26 μm prawidłowe nakładanie się śladów kolejnych impulsów zapewnia dobór częstotliwości ich powtarzania 80 kHz i prędkości skanowania rzędu 600 mm/s. Parametry te należy wybierać stosownie dla każdego rodzaju tkaniny, jak również odległości między kolejnymi ścieżkami skanowania (hatching). Energia zaabsorbowanego impulsu lasera również powinna być wybierana bardzo precyzyjnie [16,17]. Parametry testowe zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry ablacji laserem światłowodowym.

zmienna	jednostka	wartość
czas trwania impulsu	ns	220-15 (55)
hatching	mm	0.02 - 0.04
energia pojedynczego impulsu laserowego	μJ	77 -220
częstotliwość	kHz	1- 90 (80)
prędkość skanowania	mm/s	100- 6000 (400)

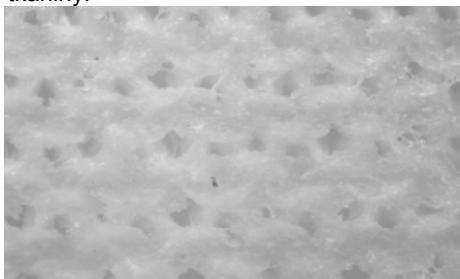
W nawiasach podano parametry optymalne. Doboru dokonano na podstawie obserwacji mikroskopowych próbek po ablacji laserowej i prowadzonej metody pomiarowej - OCT. Wyciąg powietrza z nad powierzchni poddawanej ablacji ma regulowaną prędkość wyciągu od 0 do 10 l/sekundę. Najlepsze wyniki otrzymano przy szybkości odsysania powietrza rzędu 3 l/sekundę.

Współczynnik absorpcji dla promieniowania laserowego ściśle zależy od barwy tkaniny. Jest zdecydowanie większy przy kolorach ciemnych i kilkakrotnie mniejszy przy kolorach jasnych. Jest to czynnik, który również trzeba brać pod uwagę przy doborze parametrów optymalnych (dla

barwy żółtej np. wymagana energia jest dwukrotnie większa niż dla tkanin o barwie czarnej).

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że indukowane na powierzchni tkanin modyfikacje w wyniku ablacji laserem nanosekundowym pozwalają na modyfikację tkanin pod kątem zwiększenia odporności na zjawisko pillingu.

Tak jak i w innych dziedzinach nauk [18-23] tak i w tym przypadku optymalizacja parametrów wiązki laserowej wykorzystywanej w procesie modyfikacji jest zagadnieniem bardzo istotnym. Przy zbyt dużej energii impulsu powierzchnia została uszkodzona, jak to przedstawiono na rysunku 3. Stopień powierzchni ma negatywny wpływ na trwałość tkaniny.

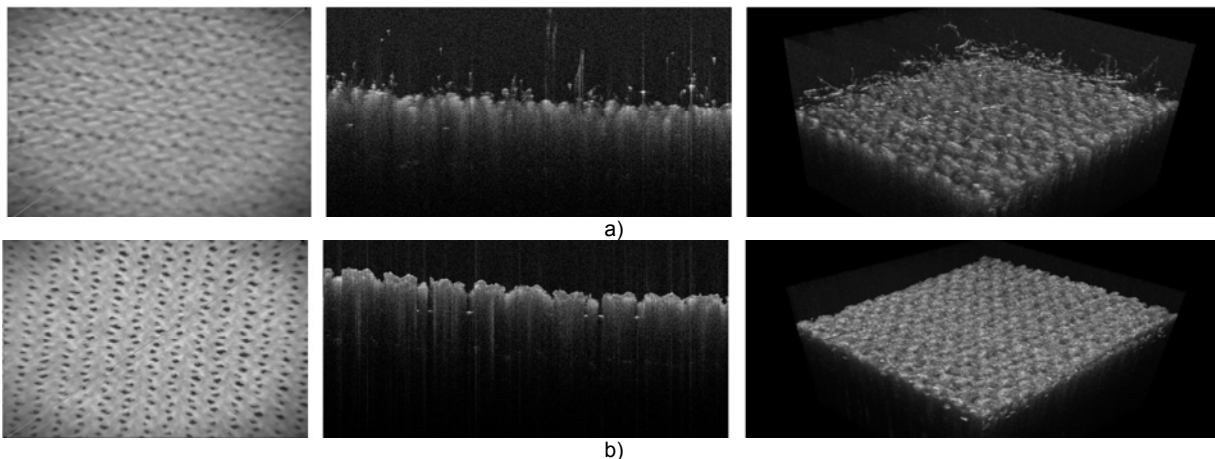


Rys.3. Uszkodzenia powierzchni tkaniny po ablacji laserem światłowodowym impulsami o energii powyżej 400 μ J.

Ocena tendencji wyrobów tekstylnych do pilingu

Dotychczas najczęstszym sposobem oceny tendencji materiałów do pilingu jest porównanie próbek poddanych procesowi mechacenia ze wzorcami lub subiektywne przyporządkowanie wyrobu do jednego z poziomów skali pilingu podanej we wcześniejszej części artykułu. Wiele ośrodków badawczych pracuje nad innymi metodami obiektywnej oceny tendencji do mechacenia tkanin lub dzianin. Jednym z najlepszych rozwiązań jest technika

analizy obrazów. Naukowcy wykorzystują cyfrową analizę obrazów lub metody skanowania laserowego w celu identyfikacji i charakteryzowaniu pili. W technologiach laserowych stosuje się technikę triangulacji laserowej, w której mierzy się wysokość powierzchni tkaniny z wykorzystaniem obrazowania 3D identyfikując powstałe kłębki włókien jako zmianę jej grubości. Kolejne rozwiązanie techniczne pozwalające na identyfikację pojawiających się niepożądanych supełków na powierzchni wyrobów tekstylnych to system obrazowania CCD/CMOS. Wg Jing [24] jest to sposób tani, prosty i łatwy w implementacji, do jego wad należy zwiększona czułość na kolor i fakturę tkanin. Konda wraz z zespołem [8] jako pierwsi wykorzystali techniki przetwarzania obrazów do oceny pillingowania tkanin. Kolejnym zespołem pracującym nad problemem oceny wyglądu mechacenia tkaniny i jej scharakteryzowanie był zespół pod kierownictwem Xu. Przedstawił procedury związane z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT) i inne techniki korygowania defektów obrazu, takie jak niejednolite tło i niski kontrast [25]. Inne zespoły badaczy również oceniając ilość powstałych węzłków opierają swoje badania na metodzie obrazowania 2D opartej na analizie Fouriera lub transformacie falkowej [26,27], metodzie obrazowania 2D opartej na progowaniu [28], metodzie obrazowania 3D [13,14] lub metodzie sztucznej inteligencji [29,30]. Analiza obrazu jest jedną z głównych metod analizy powierzchni lub obrazów pozyskanych w drodze zastosowań tomografów [31-34]. W niniejszej pracy przedstawiono ocenę tendencji powierzchni tkaniny do pillingowania z wykorzystaniem koherentnej tomografii procesowej. W przeciwieństwie do dotychczas spotykanych metod ocenie podlega nie ilość wytworzonych pilli na tkaninie po procesie mechacenia, tylko ilość włókien wystających ponad powierzchnię badanej tkaniny.



Rys. 4. Obrazy powierzchni tkaniny a) nie zmodyfikowanej laserem po procesie pilingowania, b) zmodyfikowanej laserowo wiązką o mocy 14 W po procesie pilingowania. Kolumna lewa - obrazy powierzchni, kolumna środkowa - OCT B-scan, kolumna prawa - OCT C-scan

Optyczna tomografia koherencyjna (OCT) to nowatorska metoda pozyskiwania obrazów, która umożliwia badanie próbek w sposób bezdotykowy i nieniszczący [33,34]. Metoda ta oparta jest na zjawisku interferometrii światła białego i jest bardzo wrażliwa na niewielkie zmiany współczynnika załamania światła próbki. Promienie bliskiej podczerwieni są częściowo odbijane na różnych głębokościach w próbce, a czasy ich dotarcia do detektora są interferometrycznie porównywane z falą odniesienia. Rejestrowany sygnał zawiera informacje o położeniu niejednorodności na badanej powierzchni, ich współczynnika odbicia i polaryzacji. Zasada pozyskiwania obrazu w OCT jest analogiczna do tej stosowanej w ultrasonografii. Do badań wykorzystano system Spark OCT

1300 nm zaprojektowany przez Wasatch Photonics Inc. Został on wykorzystany do uzyskania zarówno obrazów 2D (B-skan) jak i obrazów 3D (C-skanów) powierzchni tkaniny. Standardowy obszar skanowania przez głowicę OCT wynosi 5 x 5 mm. Uzyskane obrazy zostały zaprezentowane na rys. 4. Rysunek 4a dotyczy niemodyfikowanej tkaniny poliestrowej natomiast rysunek 4b tkaniny poddanej modyfikacji laserowej z wykorzystaniem wiązki lasera o mocy 14W. Analizując przedstawione zdjęcia można zauważyć, że modyfikacja powierzchni tkaniny prowadzi do zmniejszenia liczby wystających włókien, a co za tym idzie zmniejszenie możliwości ich splątania, a w konsekwencji powstawania pili.

Podsumowanie:

Jedną z niepożądanych właściwości tkanin jest ich zdolność do tworzenia na ich powierzchni nieestetycznych supeków. Na rynku dostępne są chemiczne apretury, które utrudniają mechaniczne się tkanin. Ich użycie wymaga niekiedy przestrzegania skomplikowanych procedur. Autorzy artykułu proponują zastosowanie wiązki laserowej jako alternatywnego sposobu zwiększenia odporności tkanin poliestrowych na piling. Użycie światłowodowego lasera do modyfikacji warstwy wierzchniej wyrobu tekstylnego spowodowało zmniejszenie liczby wystających włókien ponad powierzchnię tkaniny, co jednocześnie zmniejsza tendencję do tworzenia się pili. Wpływ oddziaływania wiązki laserowej oceniono na podstawie obrazów uzyskanych z optycznego tomografu koherentnego. Potwierdzony wynikami sposób modyfikacji został zgłoszony do objęcia ochroną patentową.

Autorzy: dr inż. Ewa Korzeniewska, dr inż. Maria Walczak, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ewa.korzeniewska@p.lodz.pl; maria.walczak@p.lodz.pl
dr Joanna Sekulska-Nalewajko, dr inż. Jarosław Gocławski Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, Stefanowskiego 18/22, 90-924, mail: joanna.sekulska-nalewajko@p.lodz.pl; jaroslaw.goclawski@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Korzeniewska E., Szczyński A.: Parasitic parameters of thin film structures created on flexible substrates in PVD process; *Microelectronic Engineering* Vol. 193, 2018, 62-64
- [2] Pawlak, R., Lebioda, M., Tomczyk, M., Rymaszewski J., Korzeniewska, E., Walczak, M. Modelling and applications of conductive elements on textile materials 2018 COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 37 Issue: 5, pp.1645-1656, <https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2018-0023>
- [3] Rivero P. J., Urrutia A., Goicoechea J., Arregui F.J.; *Nanomaterials for Functional Textiles and Fibers*; *Nanoscale Res Lett*, v.10; 2015, 501
- [4] Montazer M., Harifi T.: *Nanofinishing of Textile Materials- 2017*
- [5] Chi-wai Kan: "CO₂ laser treatment as a clean process for treating denim fabric", *Journal of Cleaner Production* 66 (2014) 624 - 631
- [6] Angelova Y., Mežinska S., Lazov L. *Innovative Laser Technology In Textile Industry: Marking And Engraving*, Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Volume III, 2017, DOI: 10.17770/etr2017vol3.2610
- [7] Morent R., De Geyter N., Verschuren J., De Clerck K., Kiekens P., Leys C. - Non-thermal plasma treatment of textiles - Surface & Coatings Technology (2008) 202, p. 3427 - 3449
- [8] Konda A., Liang C.X., Takadera M., Okoshi Y., Toriumi K.: Evaluation of pilling by computer image analysis. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan* 36(3), 96-107 (1988)
- [9] Bahtiyari M.I.: Laser modification of polyamide fabrics February 2011, *Optics & Laser Technology* 43(1):114-118
- [10] Yip, J., Chan, K., Sin, K.M., Lau, K.S., "Comprehensive study of pulsed UV-laser modified polyamide fibers", *Mat. Res. Innovat.*, 7, 302-307, 2003
- [11] Korzeniewska E.; Sekulska-Nalewajko J.; Gocławski J.; Walczak M.: Assessment of pilling effect on the laser modified textile substrates, 2018 Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE), 129 - 132, *IEEE Explore* 10.1109/PTZE.2018.8503229
- [12] Techniková, L. Tunak, M Comparison of Two Different Principles of 3D Fabric Surface Reconstruction 2016 *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2016 No 5 (119), pp.38-43
- [13] Saharkhiz S., Abdorazaghi M., "The Performance of Different Clustering Methods in the Objective Assessment of Fabric Pilling", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2012, 7(4), pp. 35-41.
- [14] Techniková L., Tunák M., Janáček J., "Determination and Comparison of Fabric Pills Distribution Using Image Processing and Spatial Data Analysis Tools", *Journal of Information Science and Engineering*, 2013, 7(10), pp. 4-9.
- [15] Yip, J., Chan, K., Sin, K.M., Lau, K.S., "Comprehensive study of polymer fiber surface modifications-Part 1: high-fluence UV-excimer-laser-induced structure", *Polymer International*, 53, 627
- [16] Domagalski P.; Dziubinski M.; Pawlak R., Tomczyk M.: "Measurement of the average shear rate around a microparticle in the shear thinning medium with laser tweezers" *Particulate Science And Technology* 2018 Vol.: 36 No: 5 pp.529-533
- [17] Pawlak R.; Tomczyk M.; Walczak M. Durability and Reliability Enhancement of Selected Electronic Components Achieved by Laser Technologies Conference MIXDES 2017 *IEEE Explore* pp: 459-462
- [18] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., The distribution of an electromagnetic and optimization computation of electrical systems by using multi-core processors, *Przegląd Elektrotechniczny* 2011 87 (12b) 82-85
- [19] Kasprzyk L., Bednarek K., Speeding up of electromagnetic and optimization calculations by the use of the parallel algorithms, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2009) 85 (1) 65-68
- [20] Duraj A., Chomątek Ł., Supporting Breast Cancer Diagnosis with Multi-objective Genetic Algorithm for Outlier Detection, *Advanced Solutions in Diagnostics and Fault Tolerant Control* 2018, 304-315 DOI: 10.1007/978-3-319-64474-5_25,
- [21] Drzymała P., Welfle H: Szacowanie strat dodatkowych w uzwojeniach transformatorów z wykorzystaniem numerycznych metod polowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 91 No 1, 2015 pp.133-135
- [22] Czechowska J., Gliniak M., Drózd T., Nawara P., Oziembłowski M., Drózd M., Kiełbasa P.: The use of lasers in medical imaging techniques; *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 93, No 12, 2017, pp 83-86
- [23] Lebioda, M., Rymaszewski, J.: Dynamic properties of cryogenic temperature sensors; *Przegląd Elektrotechniczny* 2015 91(2), pp. 225-227
- [24] Jing, J., Kang, X., "Fabric pilling image segmentation based on mean shift", *Communications in Computer and Information Science*, 2011, 143 CCIS (PART 1), pp. 80-84.
- [25] Xu B., Instrumental Evaluation of Fabric Pilling, *Journal of the Textile Institute* 2015, 88(4):488-500 doi: 10.1080/00405000.1997.11090899
- [26] Deng, Z., Wang, L., Wang, X., "An integrated method of feature extraction and objective evaluation of fabric pilling", *Journal of the Textile Institute*, 2011, 102 (1), pp. 1-13.
- [27] Zhang, J., Wang, X., Palmer, S., "The robustness of objective fabric pilling evaluation method", *Fibers and Polymers*, 2012, 10 (1), pp. 108-115.
- [28] Gao W., Wang S., Pan R., Liu J., "Automatic location of pills in woven fabric based on Gabor filter", *Key Engineering Materials*, 2011, 464, pp. 745-748.
- [29] Xin B., "Characterization of fabric appearance based on image analysis", *Institute of Textiles & Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*, 2009.
- [30] Furferi R., Governi L., Volpe Y., Machine Vision-Based Pilling Assessment: A Review, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 2015 Volume 10, Issue 3, 79-93
- [31] Rymarczyk, T., Kłosowski, G. & Kozłowski, E. A Non-Destructive System Based on Electrical Tomography and Machine Learning to Analyze the Moisture of Buildings, *Sensors*, (18) 2018, 2285
- [32] Rymarczyk T., Tchórzewski P., Adamkiewicz P., Duda K., Szumowski J., Sikora J., Practical Implementation of Electrical Tomography in a Distributed System to Examine the Condition of Objects, *IEEE Sensors Journal*, 17 (2017), no. 24, 8166-8186
- [33] Gocławski J., Sekulska-Nalewajko J., Korzeniewska E., Piekarska A. The use of optical coherence tomography for the evaluation of textural changes of grapes exposed to pulsed electric field; *Computers and Electronics in Agriculture* Vol. 142 pp.29-40 Part: A 2017
- [34] Gocławski J.; Korzeniewska E.; Sekulska-Nalewajko J., Sankowski R., Pawlak R.: Extraction of the Polyurethane Layer in Textile Composites for Textronics Applications Using Optical Coherence Tomography *Polymers* Vol. 10 (5): 469, 2018