

Jakub Roemer*, Paulina Zbyrad, Paweł Paćko, Tadeusz Uhl
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Obrazowanie hiperspektralne w wykrywaniu defektów powłoki cynkowej na powierzchniach wytłoczek elementów karoserii samochodowej

Hyperspectral imaging for zinc layer discontinuity detection for stamped car body parts

ABSTRACT

The paper presents an application of hyperspectral imaging for defect detection in stamped elements of a car body. Measurements were performed on zinc-coated stamped steel sheets. The aim of the experiment was to verify the effectiveness of hyperspectral imaging for detecting discontinuities of the zinc layer. Two-dimensional hyperspectral scanning was performed on prepared steel samples. Experimental results prove the effectiveness of the proposed method for detecting zinc coating damage under laboratory conditions.

Keywords: *Hyperspectral imaging; NDT, automotive; image analysis*

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących elementów karoserii samochodowej metodą obrazowania hiperspektralnego. Eksperymenty przeprowadzono na wytłoczkach z blachy ocynkowanej. Celem badań było sprawdzenie możliwości wykrywania nieciągłości powłoki cynkowej na podstawie analizy odpowiedzi spektralnej pozyskanej drogą skanowania 2D. Wyniki badań potwierdziły przydatność metody do wykrywania defektów w warunkach laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: *Obrazowanie hiperspektralne; badania nieniszczące; przemysł samochodowy; analiza obrazów*

1. Wstęp

Celem prowadzonych badań była analiza możliwości wykorzystania obrazowania hiperspektralnego (HSI) za pomocą kamery hiperspektralnej (skanera) w badaniach jakości powłoki cynkowej w blachach tłoczonych na zimno z przeznaczeniem na elementy karoserii samochodowej. Obrazowanie hiperspektralne to technika polegająca na rejestracji obrazu w wielu długościach fali elektromagnetycznej. Podejście to daje możliwość zebrania i analizowania informacji o badanej próbce w szerokim spektrum światła, w tym również we fragmentach spektrum poza obszarem światła widzialnego. W trakcie pomiaru rejestrowane jest światło odbite od badanej próbki.

Technika HSI łączy konwencjonalne obrazowanie i spektroskopię, dzięki czemu poza przestrzennym obrazem 2D, w trakcie pomiaru otrzymujemy również informacje spektralne, czyli charakterystyczne dla każdej próbki krzywe spektralne (tj. refleksyjność w funkcji długości fali). Własności materiałowe próbki, stan powierzchni oraz długość fali padającej na badany obiekt determinują, jaka część promieniowania ulega odbiciu, absorpcji i transmisji, co znajduje odzwierciedlenie w krzywych spektralnych. Uzyskane charakterystyki spektralne złożone są z setek pojedynczych widm rejestrowanych w różnych fragmentach spektrum (tj. jedna charakterystyka dla pojedynczego piksela obrazu), które zapisywane są w trójwymiarowej strukturze określanej jako „hypercube”.

*Autor korespondencyjny. E-mail: jroemer@agh.edu.pl

Do głównych zalet wykorzystania HSI w opisanym wyżej celu zaliczyć trzeba przede wszystkim nieniszczący charakter badania oraz szybkość uzyskania wyniku pomiaru. Dodatkowo, skanowaniu podlegać mogą próbki o dużej powierzchni, a powtarzanie samych pomiarów nie stanowi problemu. Niewątpliwą zaletą jest również możliwość częściowej automatyzacji pomiarów. To z kolei daje duże pole do potencjalnego zastosowania HSI w kontroli jakości w branży motoryzacyjnej. Wadą obrazowania hiperspektralnego jest natomiast skomplikowana obróbka danych otrzymanych w wyniku skanowania próbki.

Obrazowanie hiperspektralne znajduje zastosowanie w astronomii [3], rolnictwie [4], obrazowaniu biomedycznym [5], geologii [6-7], konserwacji zabytków i sztuce [8-10]. Rozwój oprogramowania uczynił obrazowanie hiperspektralne mniej kosztownym, co pozwala na wykorzystanie tej techniki w przemyśle spożywczym [11-14] i farmaceutycznym [15] w prowadzeniu kontroli jakości [16-17].

Podstawowym założeniem prowadzonych i opisanych w ramach niniejszej publikacji badań jest to, że otrzymane charakterystyki zarejestrowane na elementach tłoczonych na zimno mogą być wykorzystane do oceny ich powierzchni oraz wykrywania ewentualnych wad. Problem ten jest aktualnym zagadnieniem branży samochodowej, a wady powłoki cynkowej wykrywane na etapie produkcji elementów karoserii są jednymi z najbardziej uciążliwych, gdyż wiążą się bezpośrednio z aspektem wizualnym oraz są trudne do

usunięcia (ze względu na konieczność wymiany elementów karoserii). Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły, że na podstawie analizy krzywych spektralnych można dokonać oceny jakości powłoki cynkowej półfabrykatów, w tym lokalizacji nieciągłości powłoki. Ocena jakości powłoki zwykle prowadzona jest przez przeszkolonych pracowników. Z jednej strony posiadają oni duże doświadczenie i wprawę, z drugiej strony analiza ta jest zależna od pracownika, jego subiektywnej oceny, zmęczenia i dyspozycji. Ten rodzaj kontroli jest również stosunkowo drogi ze względu na konieczność zatrudniania dobrze wyszkolonych kontrolerów. Z tego powodu systemy kontroli jakości oparte o systemy wizyjne stają się coraz bardziej popularne i są stosowane do wspomagania operatorów. Pozwalają na nieniszczące badania, obiektywną ocenę i pełną kontrolę jakości produkcji [1-2].

Od systemów inspekcyjnych oczekuje się, że umożliwią przeprowadzanie badań w zakresie stuprocentowej kontroli jakości powłoki elementów karoserii w czasie rzeczywistym, podczas procesu produkcyjnego. Systemy te mogą zatem przełożyć się na zwiększenie wydajności procesu produkcji i minimalizację wad produkcyjnych, poprzez szybkie lokalizowanie obszarów, gdzie występuje defekt/uszkodzenie i ewentualne odrzucenie elementu bądź jego ponowne przygotowanie.

W kolejnych sekcjach artykułu przedstawiono wykorzystane w badaniach stanowisko laboratoryjne, próbki w postaci wytlóczek z cynkowanych blach stalowych, procedurę przeprowadzonych badań oraz wyniki w postaci krzywych spektralnych wraz z ich analizą zorientowaną na wykrywanie nieciągłości powłoki cynkowej.



Rys. 1. Stanowisko do badań hiperspektralnych – układ ze standardowym oświetleniem od góry (góra) oraz układ z dodatkowym oświetleniem bocznym (dół).
Fig. 1. Hyperspectral test rig – standard illumination from above (up) and an additional light source (down).

2. Stanowisko laboratoryjne

Na Rysunku 1 przedstawiono zdjęcia stanowiska laboratoryjnego do badań hiperspektralnych. Stanowisko składa się z kamery hiperspektralnej, przesuwnej stołu do pozycjonowania badanych elementów, systemu oświetlenia oraz

komputera pomiarowego klasy PC do rejestracji i obróbki danych. Wykorzystana w stanowisku laboratoryjnym kamera hiperspektralna pozwala na obrazowanie w dwóch zakresach spektralnych: VINIR (Visible and Near-Infrared) 400 – 1000 nm oraz SWIR (Short-Wavelength Infrared) 1000 – 2500 nm. Badania przedstawione w niniejszym artykule obejmują pomiary zrealizowane w paśmie VINIR. Rozdzielczość spektralna wynosiła 370 pasm (4 nm/pasmo) przy rozdzielczości przestrzennej równej 1600 pikseli. Stanowisko wyposażone jest w przesuwny stół z napędami krokowymi umożliwiającymi precyzyjną kontrolę zakresu oraz prędkości skanowania. Oświetlenie próbki realizowane jest poprzez system reflektorów halogenowych o konstrukcji umożliwiającej formowanie wiązki światła w kształt zbliżony do obszaru rejestracji kamery. Podczas badań opisanych w niniejszym artykule wykorzystane zostało dodatkowe oświetlenie boczne realizowane poprzez dwa reflektory halogenowe.

3. Badane elementy - opis

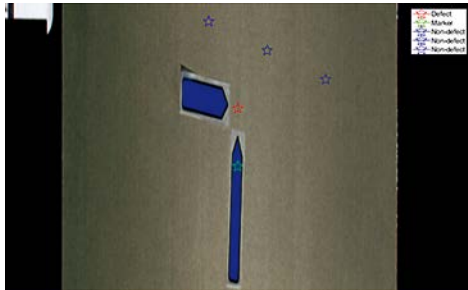
Eksperymenty laboratoryjne przeprowadzone zostały na trzech próbkach stalowych będących fragmentami różnych elementów karoserii samochodowej. Próbki wykonane były metodą tłoczenia na zimno z blach ocynkowanych stalowych o grubościach 0.80 mm. Grubość powłoki cynkowej, nakładanej metodą galwaniczną wnosila 5-10 um. W kolejnym etapie wytwarzania komponentów karoserii – niebadanym w ramach niniejszej pracy – wytłoczki podlegają procesowi nakładania powłoki lakierniczej. Wady powłoki cynkowej, powstałe na etapie tłoczenia (lub etapach wcześniejszych), uwydatnione w procesie lakierniczym, kwalifikują wytłoczkę jako brak. Standardowa procedura wykrywania defektów powłoki cynkowej polega na inspekcji wizualnej prowadzonej przez wykwalifikowanego operatora. Analizowane w ramach niniejszej pracy wady są słabo lub bardzo słabo widoczne gołym okiem. Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja skuteczności obrazowania hiperspektralnego do wykrywania trudno widzialnych uszkodzeń powłoki cynkowej elementów karoserii.

4. Eksperymenty laboratoryjne

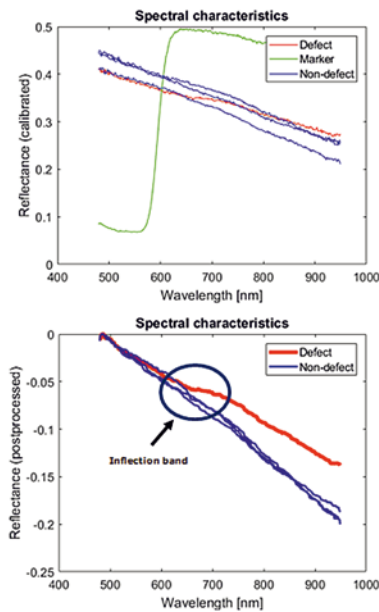
Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym opisanym w rozdziale 2. Procedura pomiarowa obejmowała kolejno umieszczenie próbki na przesuwnej stole, zdefiniowanie parametrów skanowania, takich jak: punkt początkowy, końcowy oraz szybkość przesuwu, ilość zarejestrowanych w czasie pomiaru klatek oraz długość naświetlania pojedynczej klatki. Przed każdym z kolejnych pomiarów przeprowadzana była kalibracja kamery polegająca na kompensacji wpływu oświetlenia oraz kompensacji nieregularności detektora („white and black reference”). Wszystkie badania opisane w niniejszym artykule przeprowadzono przy następujących parametrach: liczba linii w pojedynczym skanie: 1000, liczba pasm: 374, liczba pikseli w pojedynczej linii: 1600 Czas pojedynczej ramki: 9.997 ms, czas naświetlania (pojedynczej ramki): 8.003 ms, odległość kamery od obiektu: 1 m.

Na Rysunku 2 przedstawiono reprezentację graficzną (obraz RGB) skanu pierwszej przebadanej próbki. Markerami (gwiazda) zaznaczono na nim pięć obszarów odpowiadających

kolejno: defektowi (kolor czerwony), znacznikowi (kolor zielony) oraz trzem obszarom bez defektów (kolor niebieski). Dane z obszarów bez defektów wykorzystane zostały jako referencja dla późniejszych metod przetwarzania sygnałów. Dodatkowo obszar defektu zaznaczono niebieskimi strzałkami (markerami) fizycznie przyklejonymi do próbki.



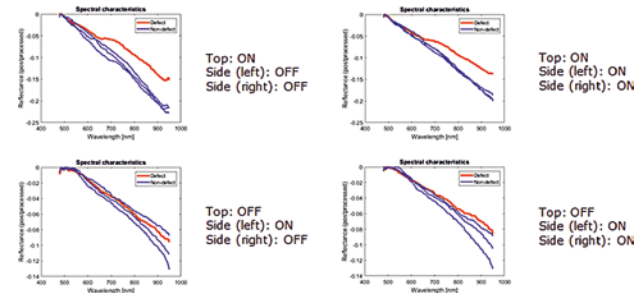
Rys. 2. Próbkę nr 1. Obraz RGB. Obszar nad defektem (czerwony marker), obszary wolne od defektów (niebieskie markery), obszar testowy (zielony marker).
Fig. 2. Sample 1. RGB view. Defected area (red marker), defect-free area (blue marker), test area (green marker).



Rys. 3. Próbkę nr 1. Charakterystyki spektralne; surowe dane (góra) oraz po wstępnej obróbce (dół).
Fig. 3. Sample 1. Spectral characteristic for raw (up) and processed data (down).

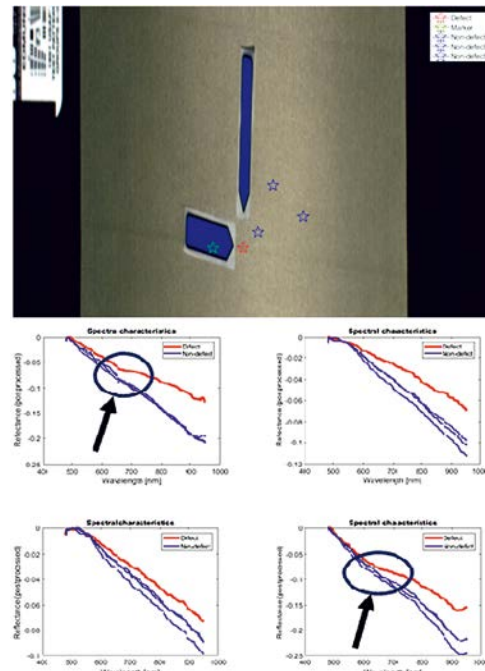
Na Rysunku 3 przedstawiono charakterystyki spektralne dla obszarów opisanych na Rysunku 2. Każda krzywa przedstawia uśrednione dane zebrane z obszaru obejmującego 9x9 pikseli. Rysunek po lewej przedstawia surowe dane (bez obróbki), natomiast rysunek po prawej przedstawia dane poddane wstępnemu przetwarzaniu, polegającemu na ustaleniu zerowego przesunięcia krzywych dla początku zakresu pomiarowego. Podejście to pozwala na porównanie dynamiki każdej z charakterystyk. Na rysunku prezentującym dane surowe przedstawiono dodatkowo charakterystykę refleksyjną zarejestrowaną na przyklejonym do próbki markerze. Analiza uzyskanych krzywych spektralnych pozwala zauważyć odmienną charakterystykę odpowiadającą defektowi. Wyraźne

różnice w uśrednionych charakterystykach dla obszarów uszkodzonych i nieuszkodzonych widoczne są w paśmie powyżej 680 nm. W kolejnych pomiarach analizie poddano wpływ oświetlenia na uzyskane charakterystyki spektralne.



Rys. 4. Próbkę nr 1. Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.
Fig. 4. Sample 1. Spectral characteristic for different illumination scenarios

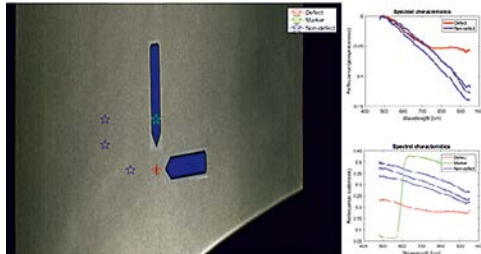
Na Rysunku 4 przedstawiono wyniki badań dla różnych scenariuszy oświetlenia próbki. Na kolejnych wykresach przedstawiono dane otrzymane dla oświetlenia z góry, jednoczesnego wykorzystania oświetlenia z góry i oświetlenia bocznego oraz dwie charakterystyki dla oświetlenia z boku realizowanego przez jedną oraz dwie lampy równocześnie. Dane przedstawione na wykresie zostały poddane wstępnej obróbce mającej na celu wyrównanie poziomów refleksyjności. Analiza danych pozwala stwierdzić, że największy wpływ na możliwość detekcji uszkodzenia zależy od oświetlenia górnego. Wpływ oświetlenia bocznego jest pomijalny.



Rys. 5. Próbkę nr 1 (obrócona o 90 stopni). Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.
Fig. 5. Sample 1 (rotated by 90 degrees). Spectral characteristic for different illumination scenarios

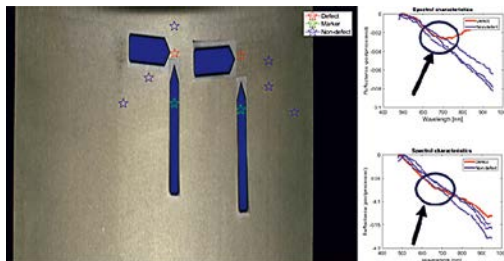
W celu oceny wpływu konfiguracji oświetlenia na zdolność systemu do wykrywania wad, przeprowadzono badania dla tego samego zestawu próbek obróconych względem systemu

oświetlenia o kąt 90 stopni (Rysunek 5). Podobnie jak w przypadku poprzednich badań, tutaj również zaobserwowano wyraźną różnicę w charakterystykach spektralnych dla obszarów obejmujących defekt. Co więcej, charakter krzywych jest jakościowo i ilościowo zbliżony do tych zarejestrowanych w poprzedniej konfiguracji. Wskazuje to na niewielką wrażliwość uzyskanych wyników na orientację oświetlenia.



Rys. 6. Próbkę nr 2. Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.

Fig. 6. Sample 2. Spectral characteristic for different illumination scenarios.



Rys. 7. Próbkę nr 3. Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.

Fig. 7. Sample 3. Spectral characteristic for different illumination scenarios

Podobne badania przeprowadzono dla dwóch kolejnych próbek zawierających defekty powłoki (Rysunek 6 oraz 7). W obu przypadkach możliwe było zaobserwowanie różnic w charakterystykach spektralnych dla obszarów uszkodzonych względem obszarów wolnych od defektów.

5. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszego artykułu przedstawione zostały wyniki badań elementów karoserii samochodowej. Poddanymi badaniom próbkami były wytloczki z blach ocynkowanych, w których warstwa cynku została uszkodzona w procesie tłoczenia na zimno lub na skutek przygotowania przed procesem kształtowania. W celu analizy obszarów uszkodzonych wykorzystane zostało stanowisko badawcze wyposażone w kamerę hiperspektralną. Każda z próbek została przeskanowana w różnych warunkach oświetleniowych, a otrzymane wyniki poddane obróbce umożliwiającej porównanie charakterystyki spektralnej uszkodzeń oraz obszarów wolnych od defektów. Zrealizowane badania potwierdzają skuteczność metody wykrywania uszkodzeń powłoki cynkowej wytłoczek karoserii samochodowej. Badania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych wskazują na umiarkowaną wrażliwość uzyskanych charakterystyk spektralnych i zawartych w nich cech uszkodzeń na oświetlenie próbek. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość jednoznacznego odróżnienia obszarów uszkodzonych

i nieszkodzonych, nawet dla bardzo słabo widocznych defektów powłoki cynkowej w oparciu o długości fal powyżej 650 nm.

W przyszłości planowane jest przeprowadzenie operacyjnych badań hiperspektralnych w warunkach odpowiadającym linii produkcyjnej.

6. Literatura/References

- [1] J. J. Liu, M. H. Bharati, K.G. Dunn, J.F. MacGregor, "Automatic masking in multivariate image analysis using support vector machines" *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 79, 42–54, 2015.
- [2] F. Gruber, P. Wollmann, B. Schumm, W. Grählert, S.Kaskel, "Quality control of slot-die coated aluminum oxide layers for battery applications using hyperspectral imaging" *Journal of Imaging*, vol. 2, pp. 12, 2016.
- [3] E.K. Hege, D. O'Connell, W. Johnson, S. Basty, E.L. Dereniak, "Hyperspectral imaging for astronomy and space surveillance" *Imaging Spectrometry IX. International Society for Optics and Photonics*, vol. 5159, pp. 380-391, 2004.
- [4] T. Adão, J. Hruška, L. Pádua, J. Bessa, E. Peres, R. Morais, J. Sousa, "Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry" *Remote Sensing*, vol. 9(11), pp. 1110, 2017.
- [5] S. V. Panasyuk, S. Yang, D. V. Faller, D. V. Ngo, R.A. Lew, J.E. Freeman, A.E. Rogers, "Medical hyperspectral imaging to facilitate residual tumor identification during surgery" *Cancer biology & therapy*, vol. 6(3), pp. 439-446, 2007.
- [6] F.A. Kruse, J. W. Boardman, J. F. Huntington, "Comparison of EO-1 Hyperion and airborne hyperspectral remote sensing data for geologic applications" *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, vol. 3, pp. 3-3, 2002.
- [7] R.G. Resmini, M.E. Kappus, W.S. Aldrich, J.C. Harsanyi, M. Anderson, "Mineral mapping with hyperspectral digital imagery collection experiment (HYDICE) sensor data at Cuprite, Nevada, USA" *Int. J. Remote Sens.*, vol. 18(7), pp. 1553-1570, 1997.
- [8] C. Cucci, J. K. Delaney, M. Picollo, "Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: old master paintings and illuminated manuscripts" *Accounts of chemical research*, vol. 49(10), pp. 2070-2079, 2016.
- [9] F. Daniel, A. Mounier, J. Pérez-Arategui, C. Pardos, N. Prieto-Taboada, S. F. O. de Vallejo, K. Castro, "Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain)" *Microchemical Journal*, vol. 126, 113-120, 2016.
- [10] R. Pillay, J. Y. Hardeberg, S. George, "Hyperspectral imaging of art: Acquisition and calibration workflows" *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 58(1-2), 3-15, 2019.
- [11] H. Huang, L. Liu, M. Ngadi, "Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety" *Sensors*, vol. 14(4), pp. 7248-7276, 2014.
- [12] Z. Xiong, D. W. Sun, H. Pu, A. Xie, Z. Han, M. Luo, "Non-destructive prediction of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value for freshness evaluation of chicken meat using hyperspectral imaging" *Food chem.*, vol. 179, 175-181, 2015.
- [13] A. Xie, D.W. Sun, Z. Xu, Z. Zhu, "Rapid detection of frozen pork quality without thawing by Vis-NIR hyperspectral imaging technique" *Talanta*, vol. 139, pp. 208-215, 2015.
- [14] W. H. Su, H. J. He, D.W. Sun, "Non-destructive and rapid evaluation of staple foods quality by using spectroscopic techniques: a review" *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 57(5), pp. 1039-1051, 2017.
- [15] A.A. Gowen, C.P. O'donnell, P.J. Cullen, S. E. J. Bell, "Recent applications of chemical imaging to pharmaceutical process monitoring and quality control" *European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics*, vol. 69(1), pp. 10-22, 2008.
- [16] R. Gosselin, D. Rodrigue, R. González-Núñez, C. Duchesne, "Potential of hyperspectral imaging for quality control of polymer blend films" *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48(6), pp. 3033-3042, 2009.
- [17] W. Devesse, D. De Baere, P. Guillaume, "High resolution temperature measurement of liquid stainless steel using hyperspectral imaging" *Sensors*, vol. 17(1), pp. 91, 2017