Czasopismo Naukowo-Techniczne
Wydziału Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy

Scientific-Technical Journal of
Mechanical Engineering Faculty of
UTP University of Science and Technology in Bydgoszcz

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING

11(6)

2018

Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy

ZESPÓŁ REDAKCYJNY
EDITORIAL BOARD

Przewodniczący (redaktor naczelny) – *Editor-in-chief* – Stanisław MROZIŃSKI

Redaktorzy Działowi – *Branch editors*:

Eksploatacja Maszyn *Machine Operating and Maintenance*	Bogdan LANDOWSKI
Inżynieria Biomedyczna *Biomedical Engineering*	Adam MAZURKIEWICZ
Inżynieria Produkcji *Production Engineering*	Marek SZCZUTKOWSKI
Mechanika i Konstrukcja Maszyn *Mechanics and Machinery Design*	Janusz ZACHWIEJA
Maszyny i urządzenia energetyczne *Machines and energetic devices*	Marcin ZASTEMPOWSKI
Transport – *Transport*	Marcin ŁUKASIEWICZ
Sekretarz Zespolu – ***Executive secretary***	Sylwester WAWRZYNIAK

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL PROGRAMME COMMITTEE

Bogdan ŻÓŁTOWSKI – **przewodniczący** – ***chairman*** (PL – UTP)

Maria ČZARNOGURSKÁ (SK)
Friedrich FRANEK (A)
Lidia ILIEVA-MITUTSOVA (BG)
Tomasz KICZKOWIAK (PL – PKo.)
Ivan OBORSKI (Uk)
Manfred PAHL (D)
Jindřich PETRUŠKA (CZ)
Holger SEIDLITZ (D)
Mirosław Jan SKIBNIEWSKI (USA)
Zdeněk TRÁVNIČEK (CZ)
Jurek DUSZCZYK (NL)
Andrzej GOŁĄBCZAK (PL – PŁ)
Marian JANCZAREK (PL– PL)
Tomasz LIPIŃSKI (PL – UWM)
Dariusz OZIMINA (PL – PŚw.)
Kazimierz PESZYŃSKI (PL – UTP)
Raj B.K.N. RAO (GB)
Vasily S. SHEVCHENKO (BL)
Marian SZCZEREK (PL – ITE PIB)

Opracowanie redakcyjne i techniczne – mgr Michał Górecki, mgr Aleksandra Górska, mgr Patrycja Fereni-Morzyńska

Projekt okładki – mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2018

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Praca powstała przy wsparciu projektu „Realizacja II etapu regionalnego Centrum Innowacyjności" współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISSN 2300-3383

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Redaktor Naczelny: prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl http://www.wu.utp.edu.pl
Wyd. I. Nakład 40 egz. Ark. aut. 5,0. Ark. druk. 5,6.
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

SPIS TREŚCI

CONTENTS

Paweł Bukowski, Grzegorz Szala
Bezzałogowe statki powietrzne – geneza, teraźniejszość i przyszłość 5
Unmanned aerial vehicles – genesis, present and future

Radosław Dębała, Agnieszka Sołtysiak
Markowski model procesu eksploatacji ciągników rolniczych 21
Markov model of the operation and maintenance process of farm tractors

Małgorzata Grabowska, Jarosław Mikołajczyk, Sebastian Basiak,
Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w nieniszczących badaniach teowych złączy spawanych..... 31
Application of CAT scanning in non-destructive testing of welded T-joints

Marietta Markiewicz-Patalon
Prawne i organizacyjne aspekty gospodarowania odpadami z tworzyw sztucznych w Polsce 45
Legal and organizational conditions for the manufacture of wastes from plastic waste in Poland

Oleg Polishchuk, Olexsander Burmistenkov, Natalia Pyshcheniuk, Maciej Matuszewski
The increase of efficiency of metal fittings installing operation in light industry products..... 53
Zwiększenie wydajności montażu odzieżowych elementów metalowych w przemyśle lekkim

Łukasz Skowroński, Olaf Strauss
Świetlne właściwości szkieł z kolorowymi interferencyjnymi powłokami typu TiO_2/Ti otrzymanymi metodą magnetronową 69
Luminous properties of glass with interference TiO_2/Ti – based coatings produced by magnetron sputtering

Wojciech Szmyt
Optymalizacja topologiczna dźwigni pedału hamulca 79
Topology optimization of the break pedal lever

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 5–19
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Paweł BUKOWSKI, Grzegorz SZALA

BEZZAŁOGOWE STATKI POWIETRZNE – GENEZA, TERAŹNIEJSZOŚĆ I PRZYSZŁOŚĆ

Streszczenie: W pracy przedstawiono historię oraz zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych, pobudki jakimi kierowali się konstruktorzy i wynalazcy oraz mniej lub bardziej udane wyniki ich poczynań. Opracowanie zawiera zarówno pierwsze projekty, często nieudane, jak i konstrukcje, które wznosiły się w powietrze. Przedstawiono również najnowsze konstrukcje militarne wyposażone w zaawansowane systemy nawigacyjne i bojowe z pełnym sukcesem wykonujące zadane misje. Kierunki rozwoju platform oraz podstystemów BSP zamykają całość publikacji.

Słowa kluczowe: dron, bezzałogowy statek powietrzny

1. WSTĘP

Bezzałogowe statki powietrzne zwane powszechnie dronami powstały w celu realizacji wielu potrzeb; bezpieczeństwa człowieka, gabarytów jednostki latającej, zwiększenia możliwości warunków działania, zasięgu, wielofunkcyjności itp.

Definicja: Bezzałogowy statek powietrzny (ang. *unmanned aerial vehicle*, UAV), bezzałogowy system powietrzny (ang. *unmanned aerial system*, UAS), dron – statek powietrzny, który nie wymaga do lotu załogi obecnej na pokładzie oraz nie ma możliwości zabierania pasażerów, pilotowany zdalnie lub wykonujący lot autonomicznie.

Zapotrzebowanie na tego typu urządzenia jest bardzo szerokie: wojskowe taktyczne i do działań ofensywnych, badania głębinowe, medycyna, służby graniczne i celne, straż pożarna, policja i inne służby porządkowe, straż leśna, transport, monitoring, rolnictwo, geodezja, fotografia, rekreacja i zabawa itp.

2. HISTORIA DRONÓW

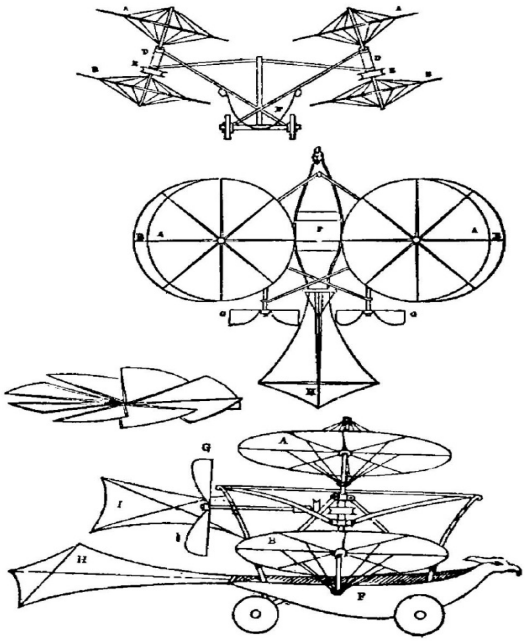
Od czasu kiedy bracia Wright dokonali pierwszego udanego lotu, człowiek chciał wykorzystać samoloty do zastosowań wojennych. Tam gdzie nie było czasu na przygotowywanie pasa startowego potrzebne były pojazdy pionowego startu. Pierwsze tego typu konstrukcje próbował utworzyć Leonardo Da Vinci i to chyba jego powinniśmy okrzyknąć twórcą koncepcji helikoptera. Niestety

[1] Paweł BUKOWSKI, WZL 2 S.A. Bydgoszcz, e-mail: paw_buk@wp.pl
[2] dr hab. inż Grzegorz SZALA, prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Wzornictwa, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: gszala@utp.edu.pl

za czasów Leonarda ówczesne konstrukcję wzbijały się w powietrze jedynie na kilkanaście sekund.

Przez okres przeszło dwóch stuleci koncepcji helikoptera nie zarzucono. Konstrukcje tego typu powstawały, lecz w rzadziej spotykanym niż obecnie układzie koaksjalnym. Taka konstrukcja nie ma ogona i tylnego rotora. Siła powodująca obrót kadłuba pochodząca od jednego głównego wirnika jest równoważona drugim wirnikiem, umieszczonym w jednej tej samej osi, napędzanym tym samym silnikiem, ale obracającym się w przeciwną stronę. Koncept takiego helikoptera powstał już w XVIII wieku, a jego autorstwo przypisuje się Michaiłowi Łomonosowowi – rosyjskiemu uczonemu, twórcy Uniwersytetu Moskiewskiego. Najprawdopodobniej to on po raz pierwszy stworzył model helikoptera o układzie współosiowym i w 1754 roku zaprezentował go przed Rosyjską Akademią Nauk.

W Wielkiej Brytanii w 1796 roku model helikoptera w takim układzie zbudował sir George Cayley, natomiast w 1859 roku projekt helikoptera o takim układzie wirników został opatentowany przez Henry'ego Brighta. Wspomniany sir G. Cayley już w 1843 roku przedstawił koncept wielowirnikowca w układzie hybrydowym, w którym zastosowano 4 śmigła zestawione w parach w układzie koaksjalnym. Nosił nazwę „Aerial Carriage" (rys. 1) [1].



Rys. 1. Aerial Carriage
Fig. 1. Aerial Carriage

Jeśliby nie trzymać się kurczowo dzisiejszej definicji drona, to dalekiego krewnego współczesnych MQ-1 Predator i MQ-9 Reaper znajdziemy już w XIX wieku, kiedy w czasie powstania, jakie w 1848 roku wybuchło we Włoszech, austriackie okręty zablokowały miasto Wenecja od strony morza. Przedsięwzięto wtedy próbę zbombardowania miasta za pomocą balonów na ogrzane powietrze, które miały za zadanie zrzucić nad miastem ładunki wybuchowe. Plan na owe czasy był całkiem dobry, jednak nie uwzględniał w swych założeniach zmienności warunków pogodowych. Wypuszczone z okrętu Vulcano balony początkowo zgodnie z założeniami leciały w stronę miasta, ale wiatr zawrócił je z drogi i w rezultacie akcja zakończyła się fiaskiem [2].

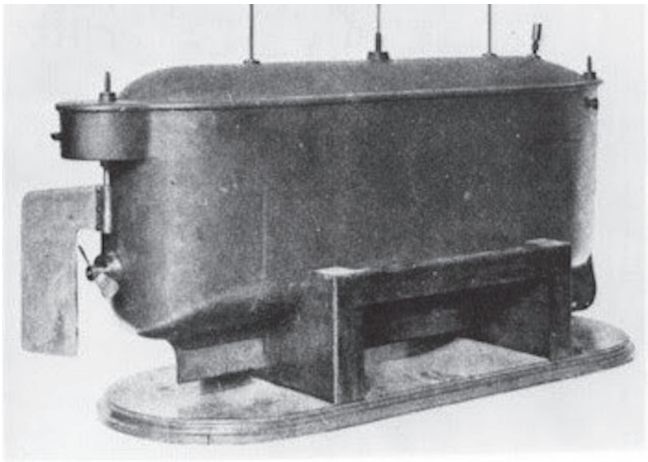
Geneza bezzałogowych statków powietrznych jest znacznie szersza niż można by przypuszczać. Pierwsze wzmianki pochodzą z okresu wojny secesyjnej, kiedy to prof. Thaddeus S. C. Lowe przybywa do Białego Domu na zaproszenie Abrahama Lincolna. 16 lipca 1861 roku nadano tam pierwszy telegram drogą radiową. Fenomen wydarzenia polegał na tym, że profesor znajdował się 160 metrów nad ziemią.

Całość przedsięwzięcia odbyła się w tym samym czasie co przemarsz wojsk Unii w odległości 40 km od Waszyngtonu, gdzie miała stoczyć bitwę z Konfederatami. Thaddeus Lowe miał przekonać prezydenta o użyteczności statków powietrznych jako środków bojowych.

Lincoln nie był pierwszym, który brał pod uwagę statki powietrzne w strategiach wojennych. Już w latach 90. XVIII wieku, Napoleon Bonaparte korzystał z nich do rekonesansu przed bitwą oraz mapowania terenu. Zastosowanie ich było bardzo pragmatyczne, ponieważ pozwoliło uzyskać przewagę wobec przeciwnika w sferze przygotowania zaplecza logistyczno-strategicznego przed manewrami.

Profesor Lowe wraz z operatorem telegrafu, korzystając z łączności przewodowej wysłali z pokładu balonu „Enterprise" pierwszy w historii komunikat z powietrza wysłany drogą elektroniczną. Trzy dni później Lowe przeprowadzał rozpoznanie z powietrza podczas bitwy, zauważając to czego naziemny wywiad nie był w stanie zobaczyć. Pomimo zdobycia tak bardzo przydatnych informacji ze względu na błędy w dowodzeniu Unia poniosła porażkę [3].

Początkiem prawdziwej ery dronów można nazwać, pierwsze urządzenie, które świat zobaczył w 1898 roku autorstwa Nikoli Tesli. Na wystawie w Madison Square Garden zaprezentował pierwszy pojazd sterowany drogą radiową, a więc pierwszy dron. Urządzenie Tesli nazwane teleautomatonem (rys. 2) było łodzią. Sterowano nim za pomocą skomplikowanego panelu, poprzez kilka częstotliwości radiowych [4].

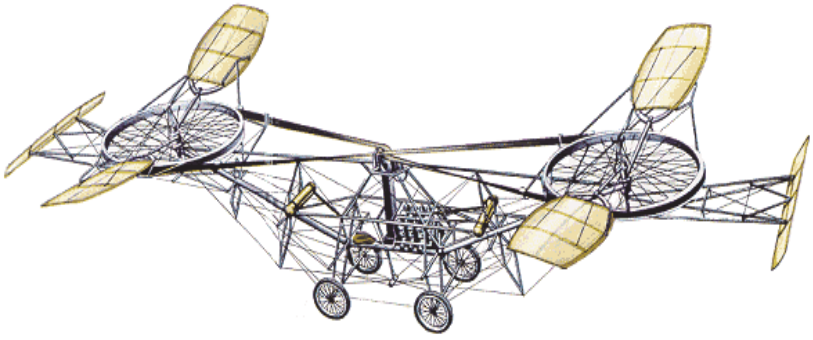


Rys. 2. Teleautomaton
Fig. 2. Teleautomaton

W kolejnych latach rozwijano sposoby zdalnego sterowania. Brytyjczycy podczas I wojny światowej sterowali łodzią strumieniem światła z reflektora. Wynalazcy udało się uruchomić jednostkę z odległości 2,7 km w dzień i z odległości 8 km w nocy. Prac w tym kierunku jednak nie kontynuowano.

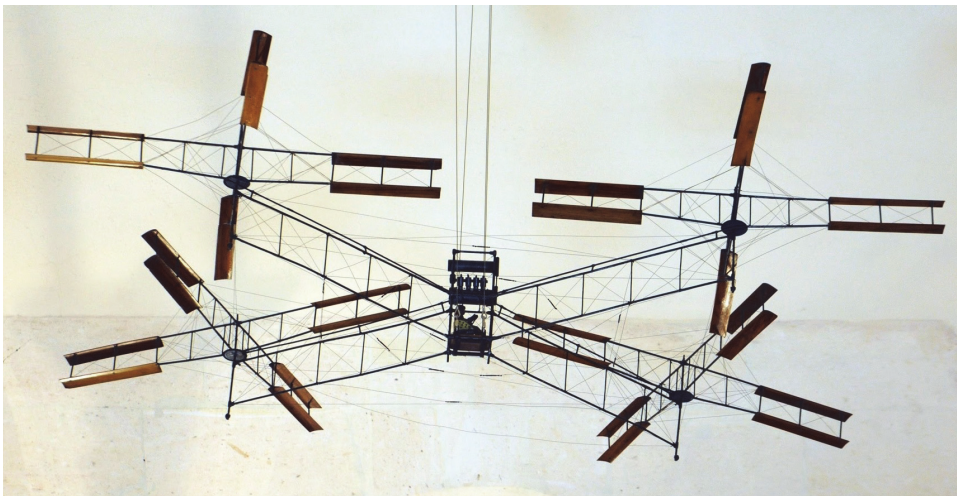
Świat z góry chciał też widzieć George Lawrence w kwietniu 1906 roku, kiedy to trzęsienie o sile 7,8 w skali Richtera zrównało z ziemią San Francisco. Lawrence był ekspertem od latawców, które z powodzeniem wykorzystał w rejestracji panoramy miasta zniszczonego przez żywioł. Za pomocą skomplikowanego układu latawców, przeciwwag oraz 1,5 km kabla Lawrence wyzwolił migawkę w aparacie fotograficznym.

Maszyna Paula Cornu z 1907 roku – dwuwirnikowiec (rys. 3) jest uznawany za pierwszą tego typu maszynę, która uniosła na swoim pokładzie człowieka. Lot trwał 20 sekund i osiągnięto pułap 30 cm. Cornu odbył jeszcze kilka takich lotów, ale bez sukcesów. Ostatecznie konstruktor pierwszego załogowego dwuwirnikowca zajął się produkcją rowerów [1].



Rys. 3. Dwuwirnikowiec Paul`a Cornu
Fig. 3. Paul Cornu helicopter

Bracia Jacques i Louis Bréguet oraz Charles Richet tego samego roku niezależnie od Paula Cornu zbudowali swój pierwszy quadrocopter – projekt nosił nazwę Bréguet-Richet Gyroplane (rys. 4). Maszyna oderwała się od ziemi, lecz niestety była bardzo niestabilna, nie potrafiła utrzymać się w powietrzu na dłużej a dodatkowo musiała być podtrzymywana przez kilka osób. W przeciwieństwie do tworu Paula Cornu – unosiła jedynie swój własny ciężar. Mimo to osiągnięciem i zarazem novum było wykorzystanie aż osobnych 4 wirników.



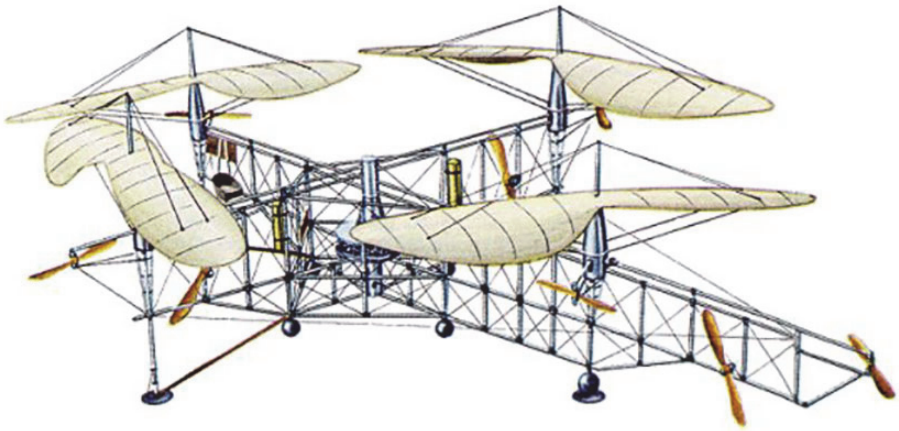
Rys. 4. Bréguet-Richet Gyroplane
Fig. 4. Bréguet-Richet Gyroplane

Już w 1916 roku w Wielkiej Brytanii narodził się pomysł sterowanych radiowo samolotów, mających za zadanie taranowanie niemieckich Zeppelinów. Pomysł niezły, zwłaszcza że zestrzelenie sterowca wcale nie było łatwe. Pojawiły się problemy natury technicznej – technologia nie nadążała za pomysłami konstruktorów. Próby prototypu o nazwie Ruston Proctor AT pokazały jednak, że zdalne kontrolowanie samolotu jest możliwe.

Wraz z zakończeniem pierwszej wojny światowej rozwój zdalnie sterowanych, latających maszyn wyhamował. W ciągu kilku kolejnych lat w USA próbowano rozwijać samolot Hewitt-Sperry. Jednak pomimo postępów najważniejszym problemem było lądowanie samolotu sterowanego radiowo. Po wielu kraksach rozwijanie tego projektu przerwano w 1927 roku.

Z biegiem kolejnych lat zainteresowanie zdobywały maszyny jednorazowego użycia. Brytyjska marynarka wojenna w latach 20. rozpoczęła próby maszyn o nazwie Long Range Gun with Lynx engine, które wystrzeliwane z okrętów miały służyć jako broń dalekiego zasięgu. Odnotowano 7 udanych startów. Sukcesy jednak przyćmiła mizerna celność – najlepszy wynik to niestety kilka kilometrów od wyznaczonego celu.

W 1920 roku powstała maszyna latająca Oehmichen No.2 (rys. 5) projektu Étienne Oehmichen`a, która dawła nadzieję na szersze wykorzystanie wielowirnikowców w lotnictwie. Oehmichen No.2 ustanowił najpierw rekord długości lotu na 360 metrów, a następnie w tym samym roku dystans 1 km po okręgu w czasie 7 minut 40 sekund [1].



Rys. 5. Oehmichen No.2
Fig. 5. Oehmichen No.2

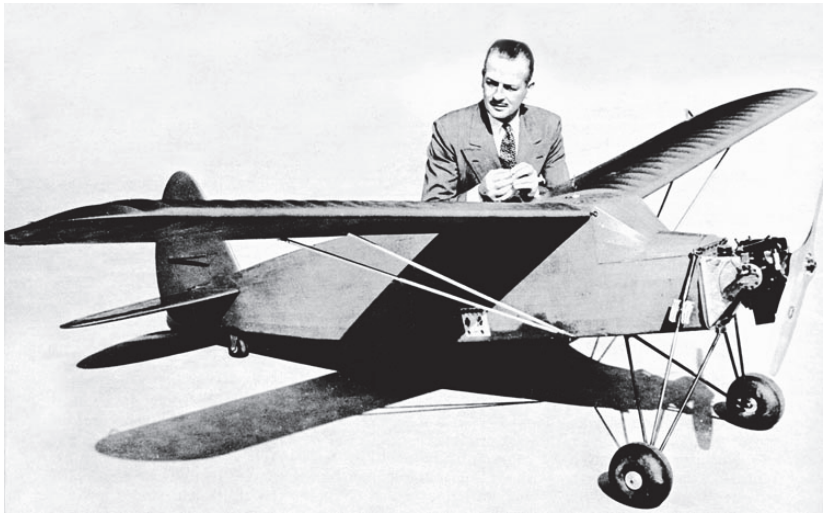
W 1922 roku Georde de Bothezat wraz z Ivan Jerome wykonali pierwsze loty quadrocopterem o nazwie Jerome-de Bothezat Flying Octopus (rys. 6). Mimo kilku udanych lotów próbnych projekt został odrzucony przez wojsko z racji kiepskiej stabilności maszyny podczas lotu.

Rys. 6. Jerome-de Bothezat Flying Octopus
Fig. 6. Jerome-de Bothezat Flying Octopus

W 1933 roku Belg Nicolas Florine wykonał 8-minutowy lot swoim dwuśmigłowym helikopterem, wznosząc się na pułap 6 m.

Lata 30. ubiegłego wieku stały się przełomowymi w historii bezzałogowych statków powietrznych. Wtedy bowiem Brytyjczyk Reginald Denny, aktor któremu niestety nie udała się kariera na wielkim ekranie postanowił zająć się nieco

innym biznesem, mianowicie sprzedażą zabawek. Nie miał jednak na myśli lalek czy drewnianych klocków. Denny oferował dzieciom, a w zasadzie ich bogatym rodzicom najnowsze zdobycze techniki, a wśród nich sterowane radiowo samoloty. Kiedy w 1934 roku zabawkowy interes się rozkręcił, Denny wpadł na pomysł, aby zbudować modele większe, bardziej zaawansowane i zaoferować je armii. Miały one służyć za ruchome cele do szkolenia obsług dział przeciwlotniczych. W 1935 roku firma Reginald Denny Industries zaprezentowała prototypowego drona – RP-1, czyli Radioplane One (rys. 7).



Rys. 7. Radioplane One
Fig. 7. Radioplane One

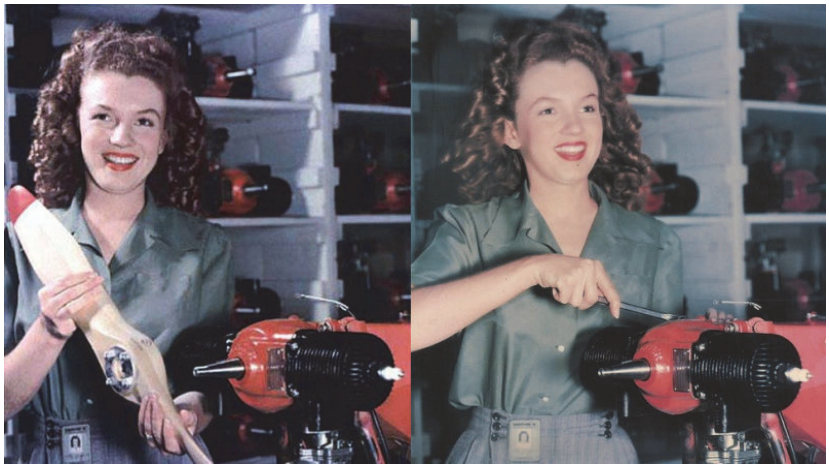
W tej samej roli co Radioplane One występowały samoloty de Havilland Tiger Moth, z czasów pierwszej wojny światowej które po doposażeniu w aparaturę pozwalającą na sterowanie radiowe zyskały nazwę Queen Bee. Zespół konstruktorów udoskonalający te maszyny w 1936 roku po raz pierwszy zaczął nazywać je dronami. Wraz z wybuchem II WŚ postęp technologiczny znów gwałtownie przyspieszył, rosnące potrzeby szkoleniowe spowodowały, że USA, szkoląca załogi jednostek przeciwlotniczych, zaczęła potrzebować znacznie więcej takich właśnie zdalnie sterowanych maszyn.

Trzy lata później, w 1938 roku, przedsiębiorczemu Brytyjczykowi udało się zorganizować pokaz dla amerykańskiej armii. Jednak mimo że jego samolocik po kilkunastu minutach lotu rozbił się, wywarł na tyle dobre wrażenie na obserwatorach, że wojsko podpisało umowę na zbudowanie trzech nowych prototypów. Ponieważ postawione w umowie wymagania co do wysokości i prędkości lotu, których RP-1 nie spełniał, Denny (niemający wykształcenia technicznego) zaprosił do współpracy inżynierów m.in. Waltera Rightera związanego z Lockheedem. I to właśnie Righterowi, który później pracował m.in. przy projekcie

HK-1 Hughes Flying Boat, największego na świecie drewnianego samolotu, udało się skonstruować napęd spełniający zakładane wymagania. Efektem prac był model RP-2 przedstawiony zamawiającemu w marcu 1939 roku. Ponieważ projekt zyskał aprobatę, błyskawicznie, gdyż w nieco ponad rok, powstały dwie ulepszone wersje RP-2, czyli RP-3 i RP-4. Gdy modelowi RP-4 udało się osiągnąć oczekiwaną przez armię prędkość lotu 190 km/h, w 1941 roku US Army zamówiła kilka tysięcy seryjnych dronów, które otrzymały oznaczenie RP-5 (rys. 8). W okresie od 1941 do 1945 roku amerykańska armia odebrała ich prawie 15 tys. sztuk. RP-5, czyli pierwszy seryjnie produkowany wojskowy dron wdrożony do służby, miał silnik o mocy 6 KM, rozpiętość skrzydeł 372 cm i 265 cm długości, ważył 47 kg [2, 5].

Rys. 8. OQ-2 Radioplane RP-5
Fig. 8. OQ-2 Radioplane RP-5

Ciekawostką jest to, że właśnie w fabryce gdzie powstawały OQ-2 (RP-5) fotograf David Conover, wysłany tam przez oficera Ronalda Reagana, przyszłego prezydenta USA, sfotografował przy linii montażowej Normę Jeane (rys. 9). Fotogeniczna brunetka już rok później porzuciła pracę przy montowaniu dronów, przefarbowała włosy na blond i rozpoczęła karierę jako Marilyn Monroe [2].



Rys. 9. Norma Jeane (Marylin Monroe) przy linii montażowej RP-5
Fig. 9. Norma Jeane (Marylin Monroe) at the assembly line RP-5

Okres II wojny światowej to czas, kiedy myśl techniczna była skoncentrowana na utworzeniu szybkich myśliwców, które miały zdecydowanie szersze zastosowanie bojowe. Nie znaczy to, że zrezygnowano z testów maszyn wielowirnikowych. Przykładem są niemieckie hybrydy: samoloto-helikopter z dwoma silnikami – FW-61 z 1937 roku (rys. 10) oraz Fa-223 „Drache" z 1940 roku (rys. 11). Maszyny te brały czynny udział w II wojnie światowej. W tym samym czasie do służby trafiły pierwsze maszyny, które można uznać za odpowiednik współczesnych dronów bojowych. W przeciwieństwie do ówczesnych konstrukcji nie były to cele dla artylerii ani również typowe bomby kierowane, ale pełnoprawne samoloty, wyróżniające się tym, że ich ostatnią misją miał być atak bez załogi na pokładzie (podczas startu na pokładzie byli pilot i mechanik, opuszczali oni jednak samolot na spadochronach po wyprowadzeniu go na określony pułap).

Rys. 10. FW-61
Fig. 10. FW-61

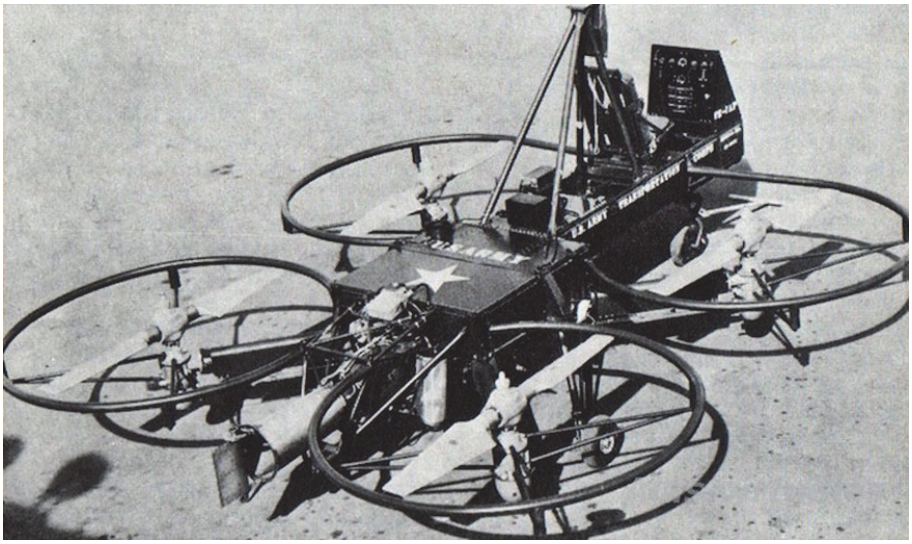
Rys. 11. FA-223 Drache
Fig. 11. FA-223 Drache

W 1944 roku Amerykanie rozpoczęli dwa niezależne, choć bardzo podobne projekty – Afrodyta (projekt amerykańskiego lotnictwa wojskowego) i Anvil (realizowany przez marynarkę wojenną). Oba zakładały podjęły przeprojektowanie wycofanych ze służby bombowców B-17 i B-24 – na latające, zdalnie sterowane bomby. W B-17 nowatorskim rozwiązaniem były dwie kamery transmitujące obraz do lecącego wyżej samolotu bazy. Jedna z nich umieszczona w kabinie, pozwalała na kontrolę przyrządów pokładowych, a druga pokazywała obraz sprzed samolotu. Pomimo odbycia kilku misji bojowych nigdy nie udało się precyzyjnie trafić do celu.

W 1956 roku powstał wojskowy napędzany dwoma silnikami wielowirnikowiec. Jego autorami byli George de Bothezat i Ivan Jerome (ci sami, co w przypadku Jerome-de Bothezat Flying Octopus), a maszyna nosiła nazwę Convertawings Model A Quadrotor (rys. 12). Niestety projekt nie wzbudził zainteresowania armii.

Rys. 12. Convertawings Model A Quadrotor
Fig. 12. Convertawings Model A Quadrotor

Przez krótki okres – od 1958 do 1960 roku – armia amerykańska testowała bardzo interesujący sprzęt o nazwie The Curtiss-Wright VZ-7 "Flying Jeep" (rys. 13).



Rys. 13. The Curtiss-Wright VZ-7 "Flying Jeep"
Fig. 13. The Curtiss-Wright VZ-7 "Flying Jeep"

Prawdziwym protoplastą nowoczesnych dronów w rodzaju Predatora były izraelskie Scout i Pioneer – drony-szybowce z lat 70. i 80. RQ-2 Pioneer (rys. 14) to wspólna inicjatywa Izraela i USA. Produkcję rozpoczęto w 1985 roku. Dziś amerykańskie wojsko nie wyobraża sobie świata bez dronów takich jak Predator (rys. 15) czy Reaper (rys. 16). Są tańsze, bardziej ekonomiczne i łatwiejsze w transporcie niż tradycyjne samoloty. Nie stwarzają zagrożenia dla pilota. Co trzeci amerykański wojskowy samolot to dron – Pentagon ma około 11 tys. takich maszyn różnego typu [4].

Bezzałogowe statki powietrzne (unmanned aerial vehicle – UAV), drony czy po prostu bezzałogowce, mają dziś w wyposażeniu chyba większość armii na świecie. Państwa zamożniejsze mogą się poszczycić konstrukcjami różnych wielkości oraz typów. Od maszyn o masie kilku ton, pułapie kilku kilometrów i czasie lotu nawet kilkanaście godzin, po takie, które ważą zaledwie kilkanaście gramów, mają kamerę i mogą pracować nawet do 30 minut.

Rys. 14. RQ-2 Pioneer
Fig. 14. RQ-2 Pioneer

Rys. 15. MQ-1 Predator
Fig. 15. MQ-1 Predator

Rys. 16. MQ-9 Reaper
Fig. 16. MQ-9 Reaper

Dlaczego na początku XX w. nie zbudowano helikoptera z tylnym rotorem na ogonie? Próby takich konstrukcji oczywiście były podejmowane, ale nie były to spektakularne sukcesy. Składało się na to wiele czynników. Przede wszystkim taki układ był zbyt skomplikowany i mało efektywny. Tylny wirnik na ogonie absorbował do 15% mocy silnika nie tworząc przy tym żadnej siły nośnej, nie powodował również pochylenia maszyny, aby mogła poruszać się do przodu lub do tyłu. Służył tylko do niwelacji rotacji kadłuba. Kolejnym argumentem było to, że główny wirnik w tym układzie tłoczy powietrze wprost na kadłub, przez co znów traci sporo na efektywności. Kolejna niedogodność, która stanowiła spory problem, wynikała z technologii jaka była w tamtych czasach dostępna. Przy zastosowaniu jednego wirnika, jego łopaty musiały być długie, a zatem również dużo cięższe. Trudno było je produkować, problemem stawał się ich napęd. Silnik musiał mieć większą moc, aby móc obracać dużymi ciężkimi łopatami z dużą prędkością. Były to czasy początków lotnictwa, a więc i dostęp do silników nie był wtedy tak szeroki jak dziś. Bracia Wright w 1903 roku do swojego Flyera zastosowali już silnik z dwoma przeciwbieżnymi śmigłami. Był to płatowiec, który główną siłę nośną wytwarzał na skrzydłach. W wielowirnikowcach cała siła nośna musiała zostać wytworzona przez łopaty śmigieł. Dlatego inżynierom lotnictwa, którzy pracowali nad wielowirnikowcami łatwiej było używać mniejszych śmigieł umieszczonych z dala od centrum maszyny. Ówczesne konstrukcje przeważnie były napędzane jednym silnikiem, a moc na rotory przekazywana była poprzez specjalne pasy lub przekładnie.

Podsumowując, pierwsze próby budowy wielowirnikowców w układzie niekoaksialnym – z wirnikami na osobnych osiach, rozmieszczone z dala od siebie – zaczęto prawdopodobnie podejmować we Francji w pierwszej dekadzie XX wieku. Wówczas wielowirnikowce miały jedną, ale znaczącą wadę: były niestabilne i niewiele dało się z tym zrobić. Latać dziś quadrocopterem zdalnie sterowanym bez jakiegokolwiek kontrolera, akcelerometru, kompasu, żyroskopu, barometru czy tak powszechnego dziś systemu GPS to spore wyzwanie. Sto lat wcześniej – maszyna była kilkanaście razy większa, załogowa, napędzająca wszystkie śmigła za pośrednictwem jednego tylko silnika, komputerem pokładowym był pilot, który dzięki prostym przekładniom próbował utrzymać stabilny poziom lotu sterując obrotami każdego z wirników. Mimo że brzmi to jak science fiction, to tamtym pilotom naprawdę udawało się tego dokonywać. Niestety cała uwaga i siły pilota skoncentrowane były stablizowaniu maszyny. Z tego względu przerywano wiele projektów, wykorzystujących pierwsze wielowirnikowce do celów militarnych, a w rezultacie nie przyjęły się, ani w cywilnym ani sportowym czy nawet rekreacyjnym lataniu.

Koncepcja multirotorów ewoluowała w stronę hybryd powstałych w wyniku połączenia śmigłowców z samolotami. Co do klasycznych wielowirnikowców teraz, po kilkudziesięciu latach, postęp technologiczny nareszcie pozwala na zmniejszenie kosztów elektroniki, tworzenie kontrolerów lotów sterujących jednocześnie czterema lub większą liczbą śmigieł oraz miniaturyzację maszyn. Wielowirnikowce wracają do łask i dziś stanowią najpopularniejszą kategorię wśród dronów cywilnych [6].

Od przełomowego momentu nadania sygnału przez Lowe'a bardzo wiele się zmieniło. Usunięto pilota z pokładu, pozbyto się kabla, zredukowano wagę i rozmiar. Jedno co się nie zmieniło to – ludzie dalej chcą oglądać świat z lotu ptaka. Lawrence potrzebował aż kilku tygodni, aby uzyskać zadowalającej jakości ujęcie. Dziś w kilka chwil możemy uwiecznić praktycznie każde wydarzenie z każdej perspektywy. Drony wyewoluowały, dając nam to, o czym Lawerence, Lowe i inni pionierzy awioniki mogli tylko marzyć.

3. PODSUMOWANIE

Jak można zauważyć, historia drona (we współczesnej postaci) jest względnie krótka, ale uniwersalność i możliwości zastosowań bezzałogowych statków powietrznych są bardzo szerokie i wraz ze światowym rozwojem technologicznym stale rosną. Firmy prześcigają się na polu zdalnego sterowania i łączności, powstają systemy, których dokładności pozycjonowania oraz jakość przesyłanych sygnałów są na poziomie, o którym jeszcze nie dawno mogliśmy tylko pomarzyć. Produkowane są coraz to doskonalsze materiały konstrukcyjne, lżejsze i wytrzymalsze, a na przestrzeni kilku ostatnich lat zauważyć można ogromny skok w dziedzinie napędów stosowanych w konstrukcjach bezzałogowców, produkuje się silniki o większej sprawności, baterie czy ogniwa paliwowe o coraz lepszych parametrach. Ciągły rozwój konstrukcji dronów, postęp techno-

logiczny i dążenie człowieka do ulepszania istniejących już rozwiązań wieszczy, iż już w kilku najbliższych latach spodziewać się możemy dalszego poszerzania spektrum zastosowań, dalszej minimalizacji masy, zwiększenia długotrwałości i bezpieczeństwa lotu.

4. LITERATURA I INNE ŹRÓDŁA

[1] http://www.swiatdronow.pl/krotka-historia-wielowirnikowcow.
[2] https://gadzetomania.pl/3846,drony-cz-1-od-pierwszych-konstrukcji-do-drugiej-wojny-swiatowej.
[3] https://www.dronlandia.pl/historia-dronow-cz-1.
[4] https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/drony-historia-zastosowania-wojskowe-i-cywilne/t6m8sd6.
[5] http://aviation24.pl/index.php/component/k2/item/3165-jak-wygladaly-pierwsze-drony-poznajcie-historie-ich-powstania.
[6] LEŚNIKOWSKI W.: Drony. Bezzałogowe aparaty latające od starożytności do współczesności. Wydawnictwo Adam Marszałek. Toruń, 2016.

UNMANNED AERIAL VEHICLES – GENESIS, PRESENT AND FUTURE

Summary: This elaboration shortly presents the use and history of unmanned aerial vehicles, the motivations of designers and inventors, and the more or less successful results of their actions. The study contains both the first projects, often unsuccessful, and structures that got up into the sky. The whole study is closed by the latest military constructions equipped with advanced navigational and combat systems which perform assigned missions successfully. The development directions of UAV platforms and sub-systems close the entire publication.

Key words: drone, unmanned aerial vehicle

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 21–29
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Radosław DĘBAŁA, Agnieszka SOŁTYSIAK

MARKOWSKI MODEL PROCESU EKSPLOATACJI CIĄGNIKÓW ROLNICZYCH

Streszczenie: Efektywna i racjonalna analiza złożonych procesów eksploatacji obiektów technicznych wymaga zastosowania różnego rodzaju metod modelowania, w tym modeli matematycznych i symulacyjnych. W badaniach do opisu rzeczywistego procesu eksploatacji ciągników rolniczych opracowano zdarzeniowy model procesu eksploatacji, a następnie zbudowano model matematyczny z zastosowaniem teorii procesów Markowa. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy rozpatrywanego procesu eksploatacji obiektów technicznych.

Słowa kluczowe: proces eksploatacji, procesy Markowa, ciągniki rolnicze

1. WPROWADZENIE

Ciągniki rolnicze przystosowane są do wykonywania wielu zróżnicowanych zadań. Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań w układach hydraulicznych umożliwia współpracę z maszynami towarzyszącymi. W wielu przypadkach ciągnik rolniczy jako źródło energii mechanicznej odpowiednio zagregowany z osprzętem lub maszyną towarzyszącą zastępuje wiele innych maszyn użytkowanych w różnych gałęziach gospodarki.

Efektywność eksploatacji obiektów technicznych określana jest jako stopień spełniania wymagań niezawodnościowych, jakościowych, ekonomicznych i innych, w określonym czasie, w stosunku do poniesionych nakładów [5]. Dla zapewnienia wysokiej efektywności działania systemów eksploatacji obiektów technicznych, np. ciągników rolniczych konieczne jest sterowanie procesami eksploatacji w sposób racjonalny [6]. Racjonalne sterowanie systemami eksploatacji obiektów technicznych możliwe jest na podstawie rzetelnej analizy i oceny realizowanych procesów eksploatacji. W tym celu stosowane są różnego rodzaju modele i narzędzia matematyczne ułatwiające analizę i ocenę realizowanych procesów eksploatacji, a w konsekwencji proces podejmowania decyzji sterujących, np. markowskie i semi-markowskie modele procesu oraz modele decyzyjne [1, 2, 4, 7]. W badaniach do analizy procesu eksploatacji ciągników rolniczych opracowano matematyczny model tego procesu – model Markowa.

[1] mgr inż. Radosław DĘBAŁA, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, e-mail: raddeb002@utp.edu.pl
[2] mgr inż. Agnieszka SOŁTYSIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Eksploatacji i Transportu, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: agnieszka.soltysiak@utp.edu.pl

2. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Badania eksploatacyjne zostały przeprowadzone na podstawie rzeczywistego systemu eksploatacji obiektów technicznych, którymi są ciągniki rolnicze. W zakresie działalności badanego systemu eksploatacji znajdują się następujące zadania:

- przygotowanie obszarów rolnych pod siew nasion,
- siew nasion roślin uprawnych na wskazanej przez zleceniodawcę powierzchni,
- prowadzenie zabiegów agrotechnicznych na wskazanych uprawach,
- zbiór płodów rolnych,
- transport płodów rolnych do magazynów znajdujących się na terenie gospodarstwa zleceniodawcy.

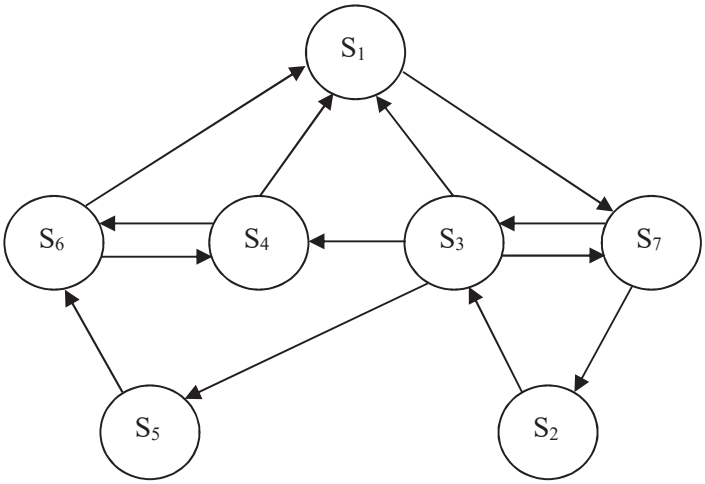
Obiektami technicznymi użytkowanymi w badanym systemie eksploatacji są ciągniki rolnicze wyprodukowane w latach 2011–2012. W badanym systemie użytkowanych jest 6 ciągników rolniczych tego samego typu. Dane techniczne ciągnika rolniczego zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne ciągnika rolniczego
Table 1. Technical data of the agricultural tractor

pojemność silnika (cm^3)	6728
moc znamionowa (kW/KM)	168/228
prędkość minimalna ($km \cdot h^{-1}$)	0,03
prędkość maksymalna ($km \cdot h^{-1}$)	50
promień skrętu (mm)	6100
masa pojazdu (kg)	7300
długość całkowita (mm)	5733
szerokość minimalna (mm)	2470
wysokość od środka osi tylnej do dachu (mm)	2140
wysokość całkowita (mm)	3165
rozstaw osi (mm)	2884
rozstaw kół (mm)	min. 1806 / max. 2236
prześwit (mm)	523

3. MODEL ZDARZENIOWY PROCESU EKSPLOATACJI

Model zdarzeniowy procesu eksploatacji został zbudowany na podstawie analizy przestrzeni stanów oraz zdarzeń eksploatacyjnych dotyczących obiektów technicznych, którymi są ciągniki rolnicze eksploatowane w analizowanym rzeczywistym systemie. W wyniku identyfikacji procesu eksploatacji obiektów technicznych, wyznaczono istotne stany eksploatacyjne tego procesu oraz możliwe przejścia między wyróżnionymi stanami. Na tej podstawie zbudowano graf zmian stanów procesu eksploatacji, przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Graf skierowany odwzorowania procesu eksploatacji ciągników rolniczych: S_1 – postój obiektu technicznego, S_2 – realizacja obsługi w dniu użytkowania, S_3 – użytkowanie, S_4 – realizacja obsługi technicznej, S_5 – diagnozowanie, S_6 – naprawa, S_7 – zmiana osprzętu (przezbrajanie)

Fig. 1. A directed graph depicting operation and maintenance process of agricultural tractors: S_1 – stopover, S_2 – service on the day of use, S_3 – carrying out of task, S_4 – carrying out of technical service, S_5 – diagnosis, S_6 – repair, S_7 – change of accessories (retooling)

4. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU EKSPLOATACJI

Mając na uwadze cel opracowania, dokładność odwzorowania rozpatrywanego procesu eksploatacji obiektów technicznych (ciągników rolniczych) oraz możliwość pozyskania danych eksploatacyjnych, w pracy do budowy matematycznego modelu procesu eksploatacji zastosowano jednorodne procesy Markowa *X(t)* [3].

W wyniku identyfikacji procesu eksploatacji ciągników rolniczych wyznaczono możliwe zmiany wyróżnionych stanów eksploatacyjnych. Założono, że łańcuch utworzony z kodów kolejnych stanów eksploatacyjnych jest jednorodnym łańcuchem Markowa. Prawdopodobieństwa zmiany stanów eksploatacyjnych wyznaczono zakładając, że każdemu łukowi grafu (rys. 1), łączącemu dwa stany odpowiada wartość prawdopodobieństwa p_{ij} zmiany stanu S_i do S_j w czasie obserwacji T, według wzorów.

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \qquad i,j = 1,2,\dots,7, \qquad i \neq j \tag{1}$$

$$p_{ii} = 0, \qquad i = 1,2,\dots,7 \tag{2}$$

gdzie:

n_{ij} – liczba zmian stanu S_i do stanu S_j w czasie obserwacji T,

n_i – sumaryczna liczba wyjść ze stanu S_i w czasie T.

4.1. Wyznaczenie prawdopodobieństw granicznych dla łańcucha Markowa

Na podstawie grafu skierowanego odwzorowania procesu eksploatacji została wyznaczona macierz P prawdopodobieństw zmian stanów dla łańcucha Markowa.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{17} \\ 0 & 0 & p_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} & p_{35} & 0 & p_{37} \\ p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{56} & 0 \\ p_{61} & 0 & 0 & p_{64} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{72} & p_{73} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych π_i, i=1,2,…,7, włożonego w proces łańcucha Markowa został zbudowany układ równań.

$$P^T \cdot \Pi = \Pi \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{17} \\ 0 & 0 & p_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} & p_{35} & 0 & p_{37} \\ p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{56} & 0 \\ p_{61} & 0 & 0 & p_{64} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{72} & p_{73} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Następnie układ równań (5) został zastąpiony układem równań liniowych.

$$\sum_{i=1}^{7} p_{ij} \cdot \pi_i = \pi_j, \quad j = 1,2,\dots,7 \tag{6}$$

czyli:

$$\begin{cases} p_{31} \cdot \pi_3 + p_{41} \cdot \pi_4 + p_{61} \cdot \pi_6 = \pi_1 \\ p_{72} \cdot \pi_7 = \pi_2 \\ p_{23} \cdot \pi_2 + p_{73} \cdot \pi_7 = \pi_3 \\ p_{34} \cdot \pi_3 + p_{64} \cdot \pi_6 = \pi_4 \\ p_{35} \cdot \pi_3 = \pi_5 \\ p_{46} \cdot \pi_4 + p_{56} \cdot \pi_5 = \pi_6 \\ p_{17} \cdot \pi_1 + p_{37} \cdot \pi_3 = \pi_7 \end{cases} \tag{7}$$

W celu rozwiązania układu równań liniowych (7), jedno z równań układu, np. równanie pierwsze, zostało zastąpione warunkiem normalizacyjnym postaci

$$\sum_{i=1}^{7} \pi_i = 1 \tag{8}$$

Wówczas układ równań liniowych (7) przedstawiono poniżej

$$\begin{cases} \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 + \pi_7 = 1 \\ p_{72} \cdot \pi_7 = \pi_2 \\ p_{23} \cdot \pi_2 + p_{73} \cdot \pi_7 = \pi_3 \\ p_{34} \cdot \pi_3 + p_{64} \cdot \pi_6 = \pi_4 \\ p_{35} \cdot \pi_3 = \pi_5 \\ p_{46} \cdot \pi_4 + p_{56} \cdot \pi_5 = \pi_6 \\ p_{17} \cdot \pi_1 + p_{37} \cdot \pi_3 = \pi_7 \end{cases} \tag{9}$$

W wyniku rozwiązania układu równań (9) otrzymano wartości prawdopodobieństw granicznych π_i włożonego w proces łańcucha Markowa:

$$\begin{gathered} \pi_1 = \left(\frac{1 - a \cdot p_{37}}{p_{17}}\right) \cdot \pi_7 \\ \pi_2 = p_{72} \cdot \pi_7 \\ \pi_3 = a \cdot \pi_7 \\ \pi_4 = a \cdot (p_{34} + b \cdot p_{64}) \cdot \pi_7 \\ \pi_5 = a \cdot p_{35} \cdot \pi_7 \\ \pi_6 = ab \cdot \pi_7 \\ \pi_7 = \frac{1}{1 + \frac{1}{p_{17}} + p_{72} + a\left[1 + p_{34} + p_{35} - \frac{p_{37}}{p_{17}} + b(1 + p_{64})\right]} \end{gathered} \tag{10}$$

gdzie:

$$a = p_{23}p_{72} + p_{73} \tag{11}$$

$$b = \frac{p_{46}p_{34} + p_{56}p_{35}}{1 - p_{46}p_{64}} \tag{12}$$

Następnie dla danych uzyskanych z badań rzeczywistego procesu eksploatacji wyznaczono wartości macierzy P

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}7257 & 0 & 0 & 0{,}0048 & 0{,}0314 & 0 & 0{,}2381 \\ 0{,}75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0{,}9143 & 0 & 0 & 0{,}0857 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}7619 & 0{,}2381 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

oraz wyznaczono wartość prawdopodobieństw granicznych π_i dla łańcucha Markowa. Wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości prawdopodobieństw granicznych π_i dla łańcucha Markowa
Table 2. Limit probability values π_i for the Markov chain

π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
0,211864	0,211864	0,278072	0,002119	0,008739	0,009269	0,278072

4.2. Wyznaczenie prawdopodobieństw granicznych procesu Markowa X(t)

Na podstawie grafu skierowanego odwzorowania procesu eksploatacji zbudowano macierz Λ intensywności zmian stanów procesu Markowa X(t).

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{17} \\ 0 & -\lambda_{22} & \lambda_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{31} & 0 & -\lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & 0 & \lambda_{37} \\ \lambda_{41} & 0 & 0 & -\lambda_{44} & 0 & \lambda_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{55} & \lambda_{56} & 0 \\ \lambda_{61} & 0 & 0 & \lambda_{64} & 0 & -\lambda_{66} & 0 \\ 0 & \lambda_{72} & \lambda_{73} & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{77} \end{bmatrix} \tag{13}$$

gdzie:

λ_{ii} – intensywność wyjścia ze stanu S_i procesu $X(t)$, według wzoru

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{T_i} \tag{14}$$

T_i – średni czas przebywania w i-tym stanie procesu $X(t)$

λ_{ij} – intensywność przejścia ze stanu S_i do stanu S_j procesu $X(t)$, według wzoru:

$$\lambda_{ij} = p_{ij} \cdot \lambda_i \tag{15}$$

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych p_i^*, i =1,2,…,7 dla procesu Markowa $X(t)$ został zbudowany układ równań

$$\Lambda^T \cdot P^* = 0 \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} -\lambda_{11} & 0 & \lambda_{31} & \lambda_{41} & 0 & \lambda_{61} & 0 \\ 0 & -\lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{72} \\ 0 & \lambda_{23} & -\lambda_{33} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{73} \\ 0 & 0 & \lambda_{34} & -\lambda_{44} & 0 & \lambda_{64} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{35} & 0 & -\lambda_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{46} & \lambda_{56} & -\lambda_{66} & 0 \\ \lambda_{17} & 0 & \lambda_{37} & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^* \\ p_2^* \\ p_3^* \\ p_4^* \\ p_5^* \\ p_6^* \\ p_7^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

Następnie układ równań (17) został zastąpiony układem równań liniowych

$$\sum_{i=1}^{7} \lambda_{ij} \cdot p_i^* = 0, \; j = 1, 2, \ldots, 7 \tag{18}$$

$$\begin{cases} -\lambda_{11}\cdot p_1^*+\lambda_{31}\cdot p_3^*+\lambda_{41}\cdot p_4^*+\lambda_{61}\cdot p_6^*=0 \\ -\lambda_{22}\cdot p_2^*+\lambda_{72}\cdot p_7^*=0 \\ \lambda_{23}\cdot p_2^*-\lambda_{33}\cdot p_3^*+\lambda_{73}\cdot p_7^*=0 \\ \lambda_{34}\cdot p_3^*-\lambda_{44}\cdot p_4^*+\lambda_{64}\cdot p_6^*=0 \\ \lambda_{35}\cdot p_3^*-\lambda_{55}\cdot p_5^*=0 \\ \lambda_{46}\cdot p_4^*+\lambda_{56}\cdot p_5^*-\lambda_{66}\cdot p_6^*=0 \\ \lambda_{17}\cdot p_1^*+\lambda_{37}\cdot p_3^*-\lambda_{77}\cdot p_7^*=0 \end{cases} \tag{19}$$

W celu rozwiązania układu równań (19) jedno z równań układu, równanie pierwsze zostało zastąpione warunkiem normalizacyjnym postaci

$$\sum_{i=1}^{7} p_i^* = 1 \tag{20}$$

Wówczas układ równań liniowych (19) przedstawiono poniżej

$$\begin{cases} p_1^*+p_2^*+p_3^*+p_4^*+p_5^*+p_6^*+p_6^*=1 \\ -\lambda_{22}\cdot p_2^*+\lambda_{72}\cdot p_7^*=0 \\ \lambda_{23}\cdot p_2^*-\lambda_{33}\cdot p_3^*+\lambda_{73}\cdot p_7^*=0 \\ \lambda_{34}\cdot p_3^*-\lambda_{44}\cdot p_4^*+\lambda_{64}\cdot p_6^*=0 \\ \lambda_{35}\cdot p_3^*-\lambda_{55}\cdot p_5^*=0 \\ \lambda_{46}\cdot p_4^*+\lambda_{56}\cdot p_5^*-\lambda_{66}\cdot p_6^*=0 \\ \lambda_{17}\cdot p_1^*+\lambda_{37}\cdot p_3^*-\lambda_{77}\cdot p_7^*=0 \end{cases} \tag{21}$$

W wyniku rozwiązania układu równań (21) otrzymano wzory opisujące prawdopodobieństwa graniczne p_i^* dla procesu Markowa $X(t)$

$$\begin{gathered} p_1^* = \frac{\lambda_{77}-\lambda_{37}c}{\lambda_{17}}\,p_7^* \\ p_2^* = \frac{\lambda_{72}}{\lambda_{22}}\,p_7^* \\ p_3^* = c\cdot p_7^* \\ p_4^* = \frac{(\lambda_{34}+\lambda_{64}\,d)c}{\lambda_{44}}\,p_7^* \\ p_5^* = \frac{\lambda_{35}}{\lambda_{55}}\,c\,p_7^* \\ p_6^* = c\,d\,p_7^* \\ p_7^* = \frac{1}{1+\frac{\lambda_{77}}{\lambda_{17}}+\frac{\lambda_{72}}{\lambda_{22}}+c\left[1+\frac{\lambda_{34}}{\lambda_{44}}+\frac{\lambda_{35}}{\lambda_{55}}-\frac{\lambda_{37}}{\lambda_{17}}+d\left(1+\frac{\lambda_{64}}{\lambda_{44}}\right)\right]} \end{gathered} \tag{22}$$

gdzie:

$$c = \frac{\lambda_{23}\frac{\lambda_{72}}{\lambda_{22}}+\lambda_{73}}{\lambda_{33}} \tag{23}$$

$$d = \frac{\lambda_{46}\lambda_{34}+\lambda_{56}\lambda_{44}\frac{\lambda_{35}}{\lambda_{55}}}{\lambda_{66}\lambda_{44}-\lambda_{64}\lambda_{46}} \tag{24}$$

Następnie na podstawie danych eksploatacyjnych uzyskanych z badań rzeczywistego procesu eksploatacji ciągników rolniczych przedstawionych w tabeli 3 wyznaczono wartość prawdopodobieństw granicznych p_i^* dla procesu Markowa *X(t)*. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 3. Wartości średnich czasów przebywania obiektów technicznych w poszczególnych stanach analizowanego procesu eksploatacji w [h]
Table 3. Limit values of residence times of technical facilities in particular states of the analyzed operation process in [h]

T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
14,3	0,5	6,0	8,0	1,5	32,0	0,75

Tabela 4. Wartości prawdopodobieństw granicznych p_i* dla procesu Markowa *X(t)*
Table 4. Limit probability values p_i* for the Markov process *X(t)*

p_1*	p_2*	p_3*	p_4*	p_5*	p_6*	p_7*
0,567432	0,01984	0,312484	0,003174	0,002455	0,055553	0,039061

5. WNIOSKI

Zbudowanie modelu zdarzeniowego oraz modelu matematycznego z zastosowaniem procesów Markowa umożliwiło przeprowadzenie analizy realizacji poszczególnych procesów eksploatacji w systemie użytkowania ciągników rolniczych. Największą wartość prawdopodobieństw granicznych π_i wyznaczonych dla łańcucha Markowa (wejścia do poszczególnych stanów procesu) otrzymano dla stanu S_3 – użytkowanie (0,278072), S_7 – zmiana osprzętu (0,278072), S_1 – postój obiektu technicznego (0,211864) oraz S_2 – realizacja obsługi w dniu użytkowania (0,211864). Na tej podstawie można stwierdzić, że badane ciągniki rolnicze najczęściej wchodzą do stanów eksploatacyjnych związanych bezpośrednio z realizacją zadania. Jednocześnie prawdopodobieństwo wejścia badanych obiektów technicznych do stanów niezdatności jest niewielkie i wynosi 0,020127.

W przypadku analizy wartości prawdopodobieństw granicznych p_i^* wyznaczanych dla procesu Markowa można zauważyć, że największe prawdopodobieństwo przebywania obiektów technicznych dotyczy stanów S_1 – postój obiektu technicznego (0,567432) oraz S_3 – użytkowanie (0,312484). Zakładając, że stany S_2 – realizacja obsługi w dniu użytkowania oraz S_7 – zmiana osprzętu, są stanami zdatności obiektu technicznego, wówczas prawdopodobieństwo przebywania obiektu technicznego w stanach zdatności (S_1, S_2, S_3, S_7) wynosi 0,938817. Jednocześnie można zauważyć, że prawdopodobieństwo przebywania obiektu technicznego w stanach niezdatności: S_4 – realizacja obsługi technicznej, S_5 – diagnozowanie, S_6 – naprawa, wynosi 0,061182. Opracowanie markowskiego modelu stanowi pierwszy etap budowy matematycznego modelu procesu eksploatacji ciągników rolniczych. W modelu markowskim przyjęto uproszczone założenie,

że zmienne losowe opisujące czasy przebywania w stanach modelowanego procesu mają rozkład wykładniczy. Kolejnym krokiem będzie opracowanie semimarkowskiego modelu procesu, w którym czasy przebywania w poszczególnych stanach procesu będą opisane dowolnymi rozkładami. Tak opracowany model procesu eksploatacji ciągników rolniczych będzie zastosowany do oceny efektywności działania systemu eksploatacji np. oceny gotowości systemu do realizacji przydzielonych zadań.

6. LITERATURA

[1] GRABSKI F., JAŹWIŃSKI J.: Niektóre Problemy Modelowania Systemów Transportowych, Monografia. ITE. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Warszawa – Radom, 2003.
[2] GRABSKI F., JAŹWIŃSKI J.: Funkcje o losowych argumentach w zagadnieniach niezawodności, bezpieczeństwa i logistyki, 2009.
[3] IOSIFESCU M.: Skończone procesy Markowa, PWN Warszawa, 1988.
[4] KNOPIK L., MIGAWA K.: Multi-state model of maintenance policy Wielostanowy model decyzji eksploatacyjnych. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 20(1), 2018, 125-130.
[5] STASZAK Ż., GRZEŚ Z., RYBACKI P.: A method of comparative studies on checkup sets to evaluate the technical condition of tractors Metoda badań porównawczych zbiorów sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągników. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 20(3), 2018, 450-454.
[6] WOROPAY M.: Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. ATR Bydgoszcz, 1996.
[7] WOROPAY M., SZUBARTOWSKI M., MIGAWA K.: Model oceny i kształtowania gotowości operacyjnej podsystemu wykonawczego w systemie transportowym. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2003.

MARKOV MODEL OF THE OPERATION AND MAINTENANCE PROCESS OF FARM TRACTORS

Summary: An effective and rational analysis of complex processes of technical object operation and maintenance requires the use of various types of modeling methods, including mathematical and simulation models. In this paper, in order to describe the actual process of farm tractor operation and maintenance, an event model of the operation and maintenance process was developed, and then a mathematical model of this process was built using the theory of Markov processes. On the basis of the obtained results, the considered operation and maintenance process was analyzed.

Key words: operation and maintenance process, Markov processes, farm tractors.

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 31–44
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Małgorzata GRABOWSKA, Jarosław MIKOŁAJCZYK, Sebastian BASIAK

ZASTOSOWANIE TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ CAT W NIENISZCZĄCYCH BADANIACH TEOWYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań nieniszczących z wykorzystaniem tomografu komputerowego Somaton Definition AS firmy Siemens. Próbkami były złącza teowe wykonane w pozycji podolnej PA. Jako materiał próbek zastosowano stal węglową konstrukcyjną C45. Spoiny wykonano dla poziomu jakości C (wymagania średnie).

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa CAT, tomograf

1. WSTĘP

Do grupy niekonwencjonalnych metod nieniszczących badań jakości złączy spawanych zaliczamy tomografię komputerową. Tomografia komputerowa jest nowoczesną dziedziną, której rozwój jest praktycznie ściśle zintegrowany z innymi naukami, m.in. z matematyką, informatyką, elektroniką, medycyną, fizyką. Umożliwia ona wykonywanie zdjęć warstwowych, czyli tomogramów. Na podstawie tomogramów możliwe jest zbudowanie trójwymiarowego modelu praktycznie dowolnego badanego obiektu. Podstawowa zasada tomografii brzmi: zdjęcia warstwowe uzyskuje się wówczas, gdy dwa z trzech zasadniczych elementów układu – lampa/źródło promieniowania, film/układ detektorów, przedmiot badany – w czasie ekspozycji znajdują się w ruchu, przy czym kierunek ruchu każdego z elementów jest przeciwny, lecz tory ich ruchu są homotetyczne. Obecnie produkowane tomografy bardzo często mają kilka źródeł promieniowania i kilka układów detektorów. Dzięki temu otrzymywane modele trójwymiarowe są jeszcze bardziej dokładne.

Próby zastosowania metody CAT, metody dedykowanej głównie do celów medycznych, do badań wewnętrznej struktury materiałów jest pomysłem oryginalnym, jednak prawdopodobnie nie dla wszystkich rodzajów materiałów ma ona zastosowanie [4, 6, 7, 11, 15].

[1] mgr Małgorzata GRABOWSKA, Zakład Rezonansu Magnetycznego, Wojewódzki Szpital Zespolony w Toruniu, e-mail: gragosia@op.pl
[2] dr inż. Jarosław MIKOŁAJCZYK, PWSZ im. S. Staszica w Pile, e-mail: jmikolajczyk@pwsz.pila.pl
[3] inż. Sebastian BASIAK, Exalo Drilling S.A., Oddział Piła, e-mail: basiaksebastian@gmail.com

Tomografy komputerowe powstały zaraz po rozpowszechnieniu się w latach 80. ubiegłego wieku komputerów typu PC i rejestrowały natężenie promieniowania rentgenowskiego przechodzącego przez dany obiekt lub obiekty przy różnych kątach pochylenia wokół nieruchomej osi obrotu źródło-detektor w pewnym zakresie i z pewnym zadanym krokiem. Dla obrazów rentgenowskich kontrast obrazów obiektu/ obiektów zależy głównie od wartości współczynnika absorpcji materiału obiektu, przez który przechodzi promieniowanie X [6, 7, 11].

Podjęto próbę zastosowania tomografii komputerowej CAT, dedykowanej głównie diagnostyce medycznej, do badań spoin złączy teowych w pozycji PA wykonanej metodą MAG 135. Jako tworzywo konstrukcyjne zastosowano stal C45 spawaną w temperaturze 18°C. Spoiny wykonano dla poziomu jakości C (wymagania średnie).

Stal C45 jest stalą trudnospawalną. Po to, aby prawidłowo wykonać połączenie spawane elementów z tego materiału, konieczne jest ich podgrzanie do temperatury ok. 150°C. W badaniach świadomie nie wykonano podgrzania łączonych elementów w celu uwypuklenia potencjalnych wad powstałego złącza spawanego. Badania tak powstałego nieprawidłowego złącza zostały uzupełnione następującymi metodami badań [1–3, 10, 12]:

- magnetyczno-proszkową (fluoroscencyjną) MT,
- penetracyjną PT,
- ultradźwiękową UT,
- wizualną VT.

Zastosowanie dodatkowych metod badawczych miało na celu potwierdzenie lub wykluczenie powstałych ewentualnych wad w złączu z wykorzystaniem metody CAT.

Badanie za pomocą metody magnetyczno-proszkowej (fluoroscencyjnej) MT przeprowadzono, namagnesowując za pomocą defektoskopu powstałe złącze spawane, po naniesieniu na nim zawiesiny kontrolnej typu 14A oraz użyciu lampy ultrafioletowej UV K+D Flux-Technic.

Badanie za pomocą metody penetracyjnej PT przeprowadzono, odtłuszczając złącze z użyciem zmywacza MR 79 firmy Marker oraz po naniesieniu na złącze penetrantu. Po upływie ok. 30 minut usunięto z powierzchni badanych penetrant i na tak oczyszczoną spoinę naniesiono wywoływacz MR 70.

Badanie za pomocą metody ultradźwiękowej UT wykonano za pomocą urządzenia USM 25 firmy Krautkramer.

Badania wizualne VT przeprowadzono za pomocą wzrokowych oględzin spoin, jak również spoinomierza oraz suwmiarki. Zmierzona grubość spoin spoinomierzem uniwersalnym wynosiła 7 mm i była prawidłowa dla tej grubości łączonych elementów.

Badania nieniszczące metodą CAT wykonano z wykorzystaniem dwurzędowego 128-detektorowego tomografu komputerowego Somaton Definition AS firmy Siemens.

Do wykonania próbek połączeń zastosowano stal węglową konstrukcyjną wyższej jakości C45 (PN-75/H-8401945). Tworzywo to charakteryzuje się łatwą obrabialnością, dobrą zgrzewalnością, a równocześnie jest trudnospawalna. Stal C45 stosowana jest m.in. na korpusy przyrządów czy też form dla przetwórstwa tworzyw sztucznych. Charakteryzuje się dużą wytrzymałością oraz ciągliwością.

Podstawowe właściwości mechaniczne zastosowanego gatunku stali (C45) są następujące:

- twardość ≤ 229 HB,
- granica plastyczności Re: 275÷490 MPa,
- przewężenie Z: 35%÷45%,
- wytrzymałość na rozciąganie: 560÷860 MPa,
- wydłużenie A5: 14÷17%.

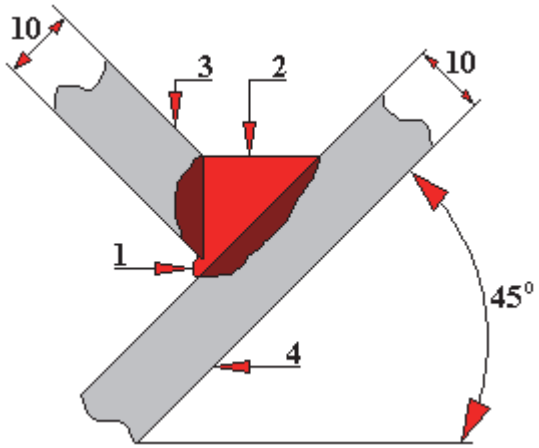
Po to, aby uzyskać poprawne spoiny dla tego materiału, norma wymaga jego podgrzania przed spawaniem do temperatury 150°C. W celu jednak uwypuklenia wewnętrznych wad powstałej spoiny złącza świadomie zostały wykonane bez podgrzewania łączonych elementów (w temperaturze 18°C).

W celu wykonania próbek, arkusz blachy o grubości 10 mm został pocięty na elementy o wymiarach 125 mm x 200 mm. Charakterystyka wykonanego złącza teowego jest następująca:

- pozycja spawania: podolna (PA),
- napięcie łuku spawalniczego: 23,5 [V],
- natężenie prądu spawania: 230 [A],
- temperatura otoczenia: 18°C,
- natężenie przepływu gazu osłonowego: 12 [litr/min],
- średnica drutu elektrodowego: 1,2 [mm],
- prędkość spawania: 7,5 [m/min].

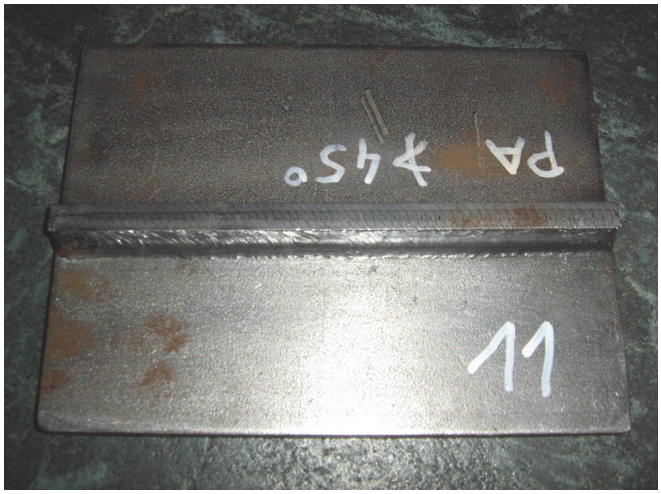
Do spawania użyto spawarki Esab mig 4000i feed 3004 oraz drutu spawalniczego OK AristoRod 12.50. Jest to niemiedziowany lity drut elektrodowy z dodatkiem manganu i krzemu, klasy G3Si1/ER70S-6. Drut ten jest przeznaczony do spawania metodą MIG/MAG stali niestopowych, które są używane głównie w przemyśle motoryzacyjnym, okrętowym oraz w budowie zbiorników ciśnieniowych.

Grubość spoiny zmierzona spoinomierzem w złączu teowym spawanym w pozycji podolnej PA wynosiła 7 mm (rys. 1).



Rys. 1. Pozycja podolna (PA) wykonanego spawanego złącza teowego. 1 – grań spoiny, 2 – lico spoiny, 3 – element (blacha) nr 1, 4 – element (blacha) nr 2
Fig. 1. Welded T-joint in a downhand position (PA). 1 – weld ridge, 2 – face of the weld, 3 – element no. 1 (steel plate), 4 – element no. 2 (steel plate)

Fotografię badanej próbki przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Widok badanej próbki nr 11 (fot. J. Mikołajczyk)
Fig. 2. View on the sample no. 11

2. WYNIKI BADAŃ

Badania wizualne VT odnośnie wartości granicznej niezgodności spawalniczej dla wymagań średnich złącz teowych dotyczącej grubości spoiny wykazały wartość grubości spoiny wynoszącą 7 mm, co dla grubości łączonych elementów jest wartością prawidłową. Poza tym badania wizualne przeprowadzone na próbkach złącz teowych nie wykazały żadnych wad ani niezgodności występują-

cych w złączach. Badanie polegało na oględzinach wzrokowych, pomiarze spoinomierzem, jak i również za pomocą suwmiarki.

Badania nieniszczące z wykorzystaniem metody magnetyczno-proszkowej MT (fluoroscencyjnej) nie wykazały żadnych niezgodności występujących w spoinach badanych złączy teowych, co było wynikiem nieoczekiwanym, biorąc pod uwagę warunki wykonania złącz.

Badania nieniszczące z wykorzystaniem metody penetracyjnej PT również nie wykazały żadnych niezgodności znajdujących się w badanych złączach.

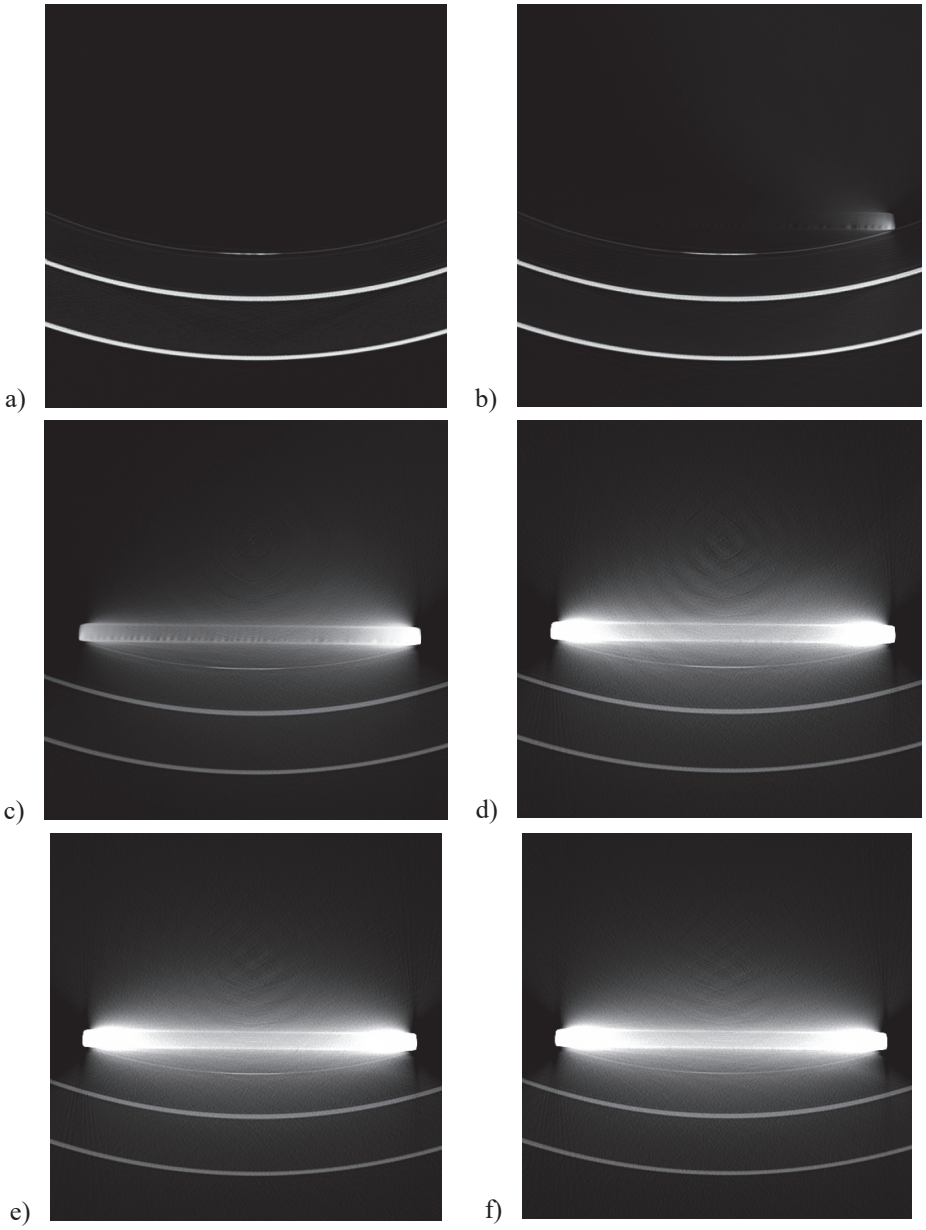
Ostatni rodzaj klasycznych badań nieniszczących z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej UT wykazały, że żadna z wykonanych spoin teowych nie jest prawidłowa. Na ekranie defektoskopu widoczne były linie (impulsy) wykraczające poza krzywą wzorcową. We wszystkich wykonanych w temperaturze 18ºC złączach teowych na całej długości spoin widoczny był brak wtopienia się spoiwa w rodzimy materiał. Wyżej wymienione badania przeprowadzone przez kontrole jakości dały wynik negatywny.

Na rysunku 3 przedstawiono pierwsze 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki o numerze 11. Na tomogramie (rys. 3a) płaszczyzna przejścia promieni X przechodzi przez powietrze, dlatego jej tło jest koloru czarnego. Na tomogramach 3b oraz 3c widać wyraźnie, z której strony jest wykonana spoina – od strony dolnej. Jednak przejście koloru tła w miejscu spoiny oglądane na tych tomogramach przy powiększeniu ok. 10x nie jest stopniowe, a raczej skokowe w porównaniu z krawędzią górną (na której nie ma spoiny). Świadczyć to może o pewnych nieciągłościach w strukturze wewnętrznej badanego materiału. Tomogramy 3d, 3e oraz 3f ze względu na silne promieniowanie (świecenie) utrudniają czytelność. Podobna sytuacja występuje również na kolejnych tomogramach (rys. 4). Zaistniała intensywna zmiana barwy na obrazach otrzymanych z tych tomogramów uniemożliwia określenie, z której strony została wykonana spoina.

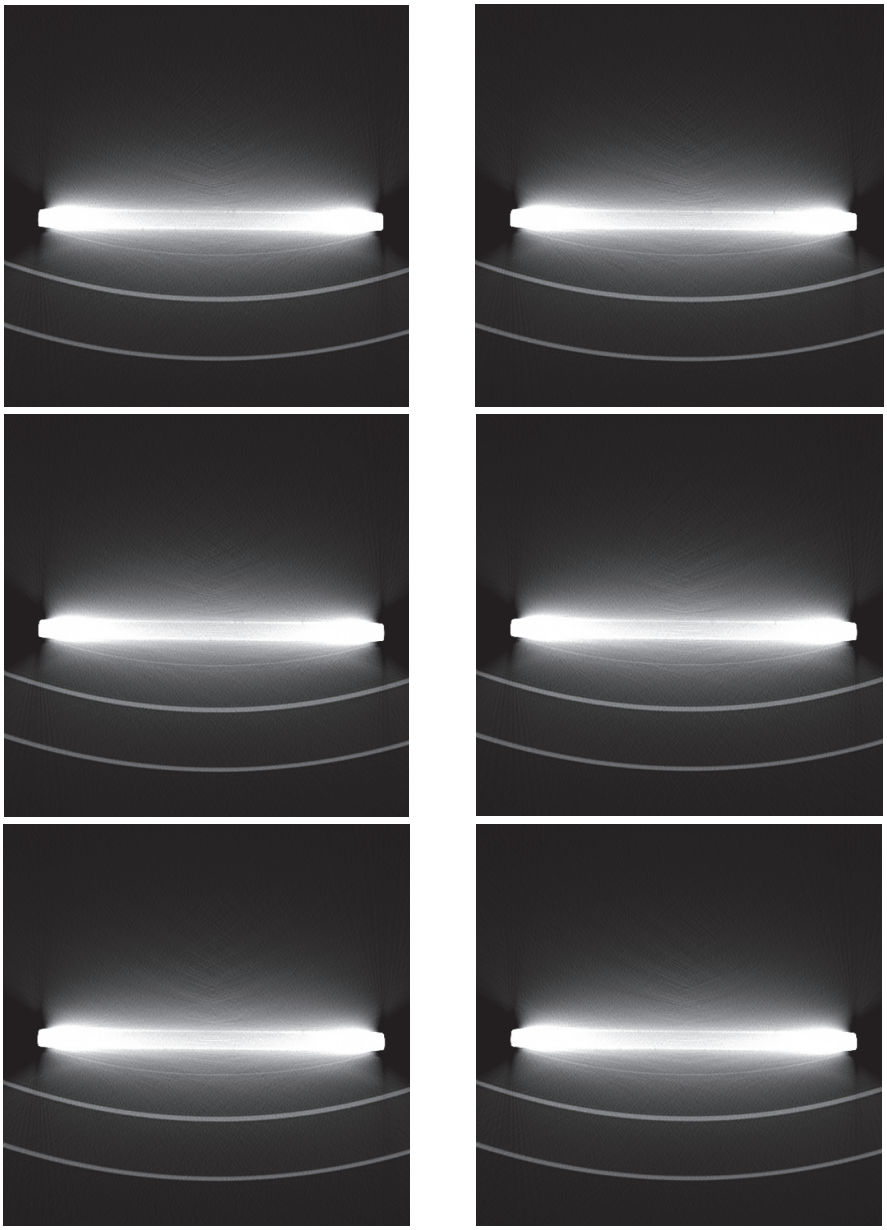
Na rysunku 5 przedstawiono ostatnie 6 tomogramów dla próbki nr 11 wykonanych już przy wychodzeniu z obszaru spoiny. Praktycznie na przedostatnim z tych tomogramów (dolny lewy) widoczne są od strony dolnej złącza jego wady – brak ciągłości przetopu.

Rysunek 6 przedstawia widok złącza od strony blachy poziomej (niejako od spodu). Wizualnie patrząc na próbkę z tego kierunku praktycznie nie jesteśmy nic w stanie powiedzieć o badanym złączu, pamiętając, że łączone blachy mają grubość 10 mm. Natomiast na rekonstrukcji zbudowanej z wykonanych tomogramów można stwierdzić, że spoina jest położona od strony dolnej krawędzi blachy pionowej. Jednak czytelność tak otrzymanej rekonstrukcji jest niewielka.

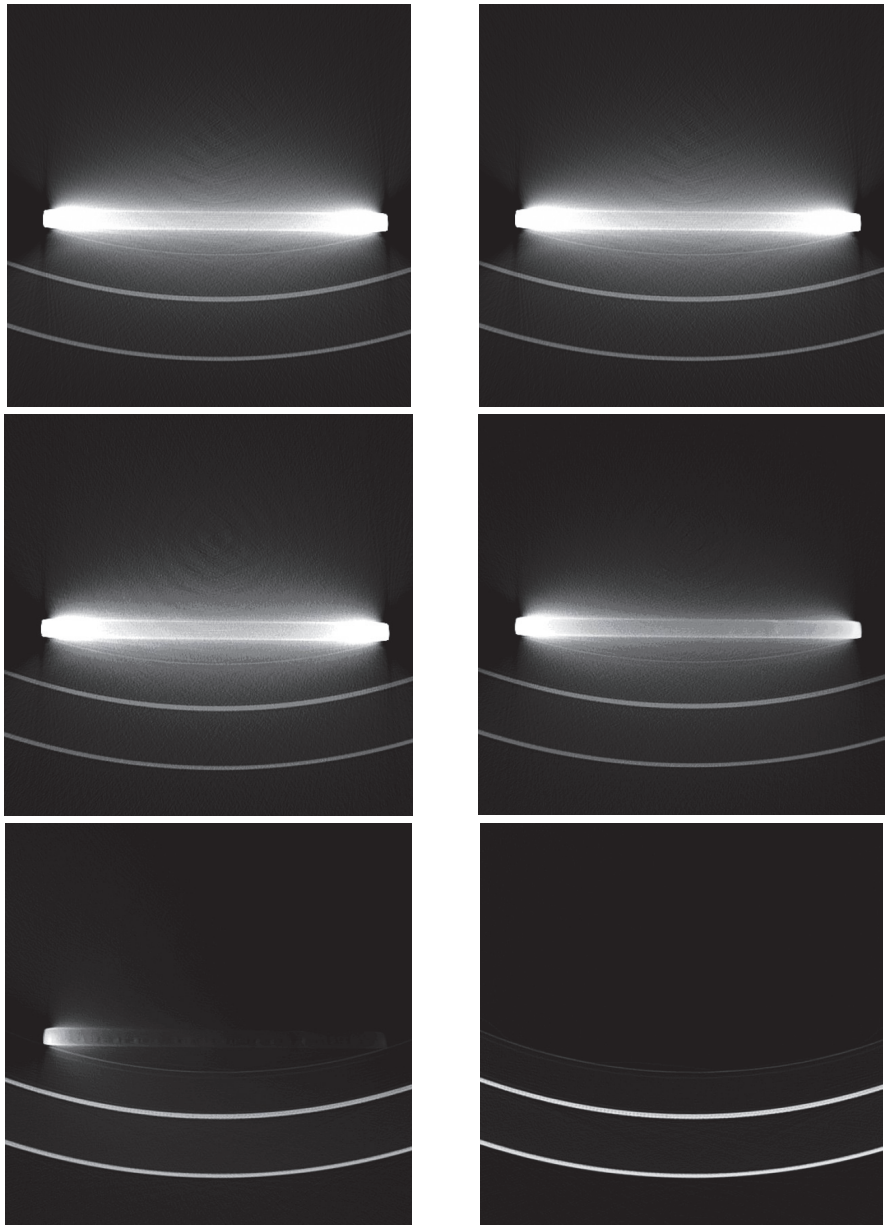
Rysunek 7 przedstawia tę samą spoinę od strony jej lica (z góry). Rozłożenie spoiny jest nierównomierne – jest przesunięta bardziej na blachę poziomą niż pionową mimo, że spoina wykonana została przy ustawieniu łączonych elementów pod kątem 45º (rys. 1). Przyczyną mogło być złe (niesymetryczne) prowadzenie spoiwa względem łączonych krawędzi.



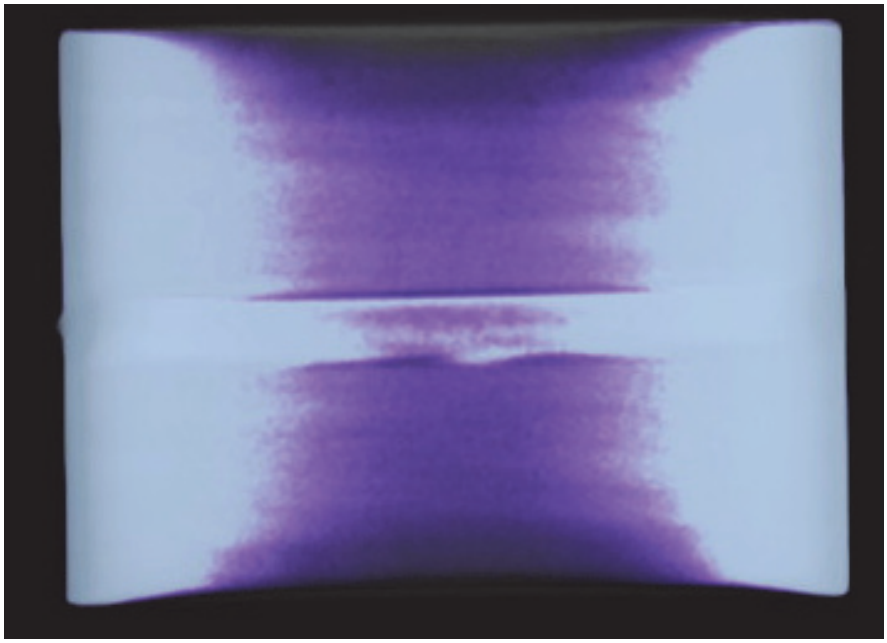
Rys. 3. Pierwsze 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki nr 11 przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 5,0 mm, algorytm skanowania B60s
Fig. 3. The series of tomograms no. 1-6 out of total 37 tomograms made for sample no. 11 with the following parameters: image layers of thickness 5.0 mm, scanning algorithm B60s



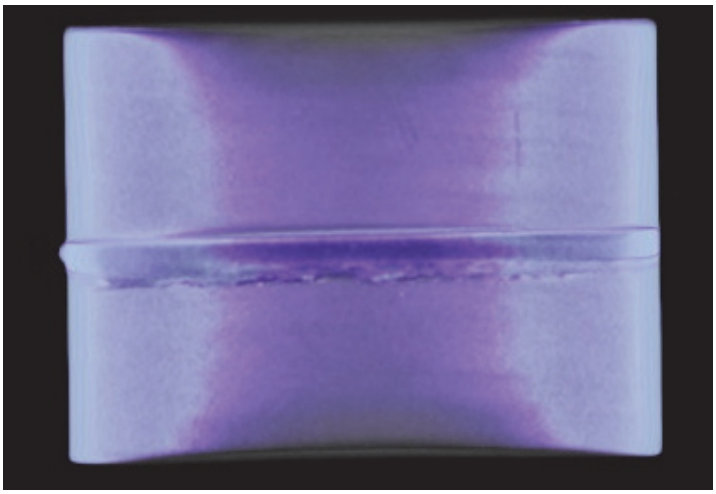
Rys. 4. Drugie 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki nr 11 przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 5,0 mm, algorytm skanowania B60s
Fig. 4. The series of tomograms no. 7-12 out of total 37 tomograms made for sample no. 11 with the following parameters: image layers of thickness 5.0 mm, scanning algorithm B60s



Rys. 5. Ostatnie 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki nr 11 przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 5,0 mm, algorytm skanowania B60s
Fig. 5. The series of tomograms no. 32-37 out of total 37 tomograms made for sample no. 11 with the following parameters: image layers of thickness 5.0 mm, scanning algorithm B60s



Rys. 6. Rekonstrukcja spawanego złącza teowego wykonana dla próbki nr 11. Widok od spodu
Fig. 6. The reconstruction of a welded T-joint made for sample no. 11. Bottom view



Rys. 7. Obraz rekonstrukcji próbki stalowej nr 11. Widok z góry
Fig. 7. Image of the reconstructed steel sample no. 11. Top view

Rysunek 8 przedstawia przestrzenny obraz próbki nr 11, otrzymany na podstawie wcześniej wykonanych tomogramach. Na pierwszym planie widoczna powierzchnia przeciwległa do spoiny. Przekrój w miejscu łączenia obu blach praktycznie jest nieczytelny. Przyczyną może być silne odbicie promieni X od

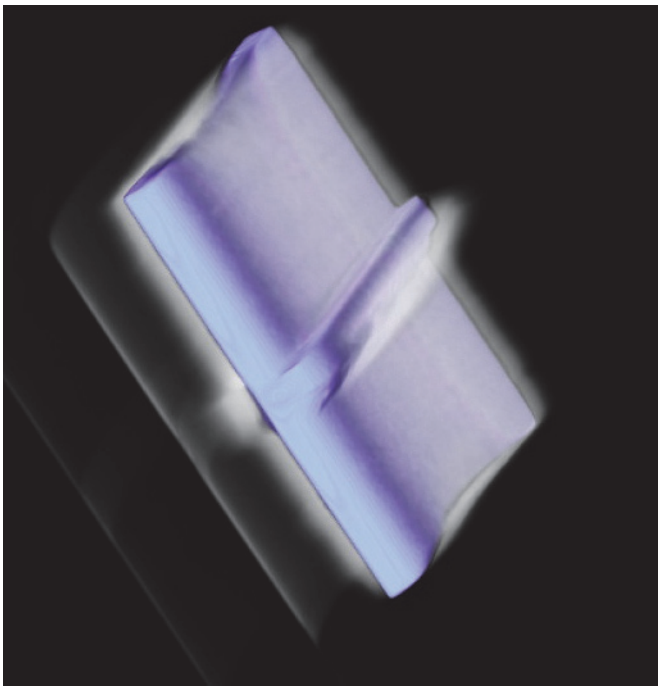
powierzchni metalu i/lub nieodpowiedni dobór kontrastu dla łączonych elementów przez operatora tomografu, w celu uwypuklenia struktury wewnętrznej łączonych blach.

Rysunek 9 przedstawia również obraz próbki nr 11 w 3D, ale w widoku od strony wykonanej spoiny.

Rysunek 10 – rekonstrukcja próbki w widoku z boku.

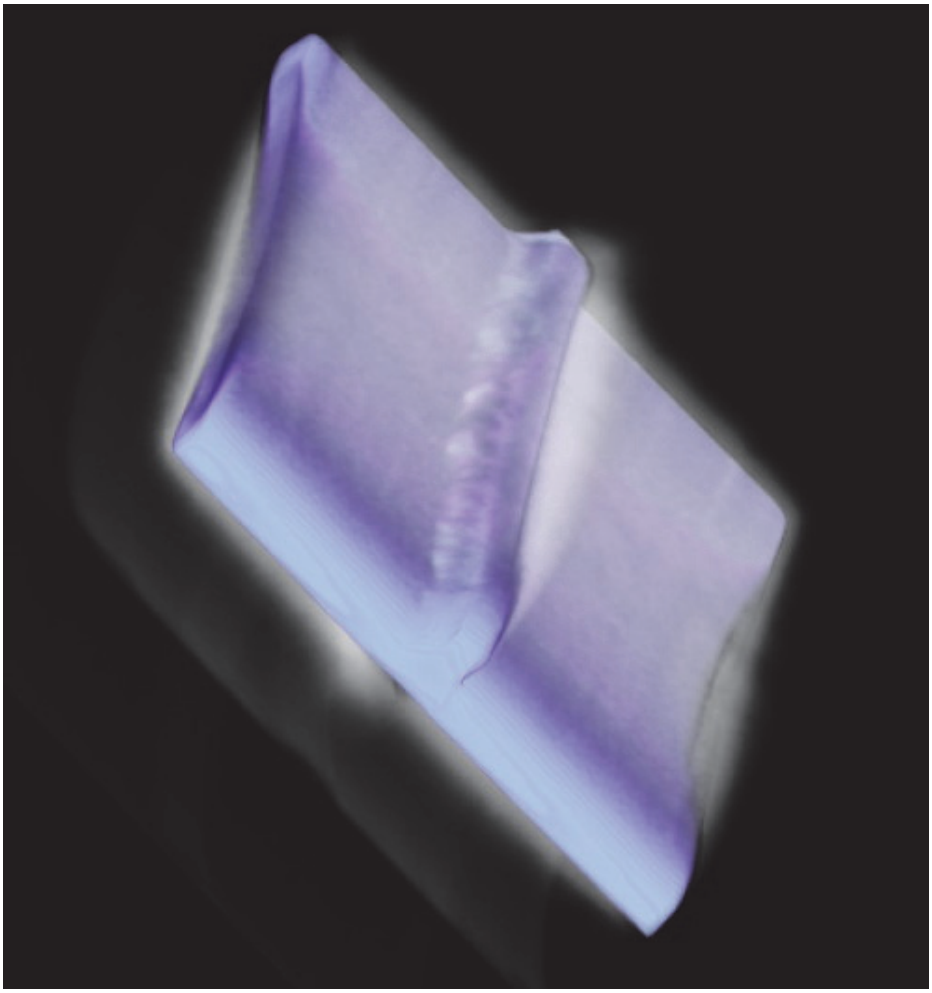
Zastanawiając się nad możliwością zwiększenia czytelności otrzymanych tomogramów wykonano rekonstrukcję dla innej grubości skanowania (0,6 mm) oraz innego algorytmu skanowania (T80f), co przedstawiono na rysunku 11. Wynik jednak nie jest zadawalający.

Zjawisko silnego odbicia promieniowania X od powierzchni metalu próbki zniekształca w pewien sposób obraz badanego obiektu. Wielkość grubości łuny odbicia tego promieniowania może znacznie przekraczać grubość badanego obiektu.



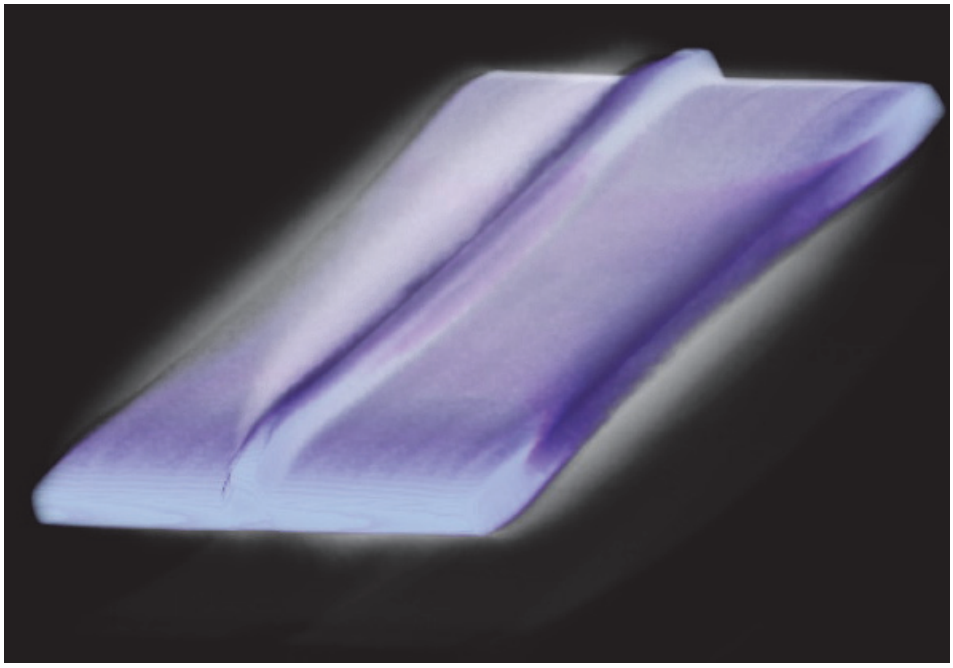
Rys. 8. Obraz jak wyżej z wyraźnie widoczną łuną odbicia promieniowania X oraz zniekształceniami powierzchni spowodowanymi tym zjawiskiem

Fig. 8. Image as above with clearly visible x-ray reflection glow and distortions of the surface caused by that phenomenon



Rys. 9. Rekonstrukcja próbki nr 11 zbudowana z tomogramów wykonanych na urządzeniu Somaton Definition AS firmy Siemens (tomograf dwurzędowy 128-detektorowy). Widok od strony spoiny

Fig. 9. The reconstruction of the sample no. 11 on the basis of tomograms made by the device Somaton Definition AS Siemens (double row tomograph with 128 detectors). View from the side of the weld



Rys. 10. Rekonstrukcja próbki nr 11 otrzymana na podstawie tomogramów
Fig. 10. The reconstruction of the sample no. 11 on the basis of tomograms

Rys. 11. Rekonstrukcja próbki nr 11 wykonana przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 0,6 mm, algorytm skanowania T80f
Fig. 11. The reconstruction of the sample no. 11 made with the following parameters: image layers of thickness 0.6 mm, scanning algorithm T80f

3. PODSUMOWANIE

Zastosowanie tomografii komputerowej CAT umożliwia otrzymywanie obrazów struktury badanych próbek bez konieczności ich niszczenia. Na podstawie tych obrazów możliwe jest stwierdzenie, czy w budowie wewnętrznej badanych części, elementów konstrukcyjnych ukryte są wady materiałowe np. obszary nieciągłości. W badaniach podjęto próbę oceny jakości spawanej spoiny teowej pod względem jej jakości za pomocą tomografii CAT. Rodzaj materiału próbek (w tym przypadku stali) niestety wpływa wyjątkowo niekorzystnie na otrzymane obrazy, dla której występuje zjawisko silnego odbicia promieni X od metalu. W badanych złączach teowych wykorzystano tylko jeden rodzaj materiału, nie można więc odnosić się tu do ewentualnych wyników badań otrzymanych dla innych gatunków materiału. Już w pracy [5] zauważono, że pewną barierą w tej metodzie badawczej jest rozdzielczość w 3D, która dla celów inżynierii materiałowej jest zbyt mała. Porównując jednak wyniki badań próbek stalowych, otrzymanych za pomocą tomografu jednorzędowego [5] i dwurzędowego tego samego producenta, można stwierdzić, że na przestrzeni 7 lat dzielących te dwie generacje konstrukcji nastąpił olbrzymi postęp w jakości otrzymywanych tomogramów, ich rozdzielczości oraz zastosowanych algorytmów służących do budowy obiektów 3D. Jeżeli ta tendencja rozwojowa się utrzyma, metodę CAT będzie można już w niedługim czasie z powodzeniem zastosować do badań dedykowanych również inżynierii materiałowej.

Obiecującym kierunkiem wykorzystania metody komputerowej CAT może być analiza jakości złączy spawanych materiałów polimerowych i kompozytowych.

Wyniki z przeprowadzonych badań spoin teowych dla stali C45 metodami klasycznymi (metodą wizualną, magneto-proszkową, ultradźwiękową i penetracyjną) uzupełnionych badaniami tomograficznymi z wykorzystaniem metody CAT mogą przyczynić się do poszerzenia wiedzy na temat niezgodności spawalniczych w złączach spawanych stali o których jest mowa m. in. w normach PN-ISO 8402 oraz PN-EN ISO 26520-1.

Wydaje się, że dobrym rozwiązaniem dotyczącym zwiększenia czytelności otrzymanych tomogramów dla próbek metalowych może być zastosowanie odpowiedniego programowego filtru.

4. LITERATURA

[1] CZUCHRYJ J., KURPISZ B.: Badania złączy spawanych. Przegląd metod. Wydawnictwo KaBe Krosno, 2009.
[2] CZUCHRYJ J., SIKORA S.: Badania penetracyjne połączeń spawanych, odlewów i odkuwek. Wydawnictwo KaBe Krosno, 2008.
[3] FERENC K.: Spawalnictwo. Wydawnictwo WNT Warszawa, 2007.
[4] GODET M.: The third body approach: A mechanical view of wear. Wear, Vol. 100/1984, 437–452.
[5] GRABOWSKA M., MIKOŁAJCZYK J.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w inżynierii mechanicznej. Wydawnictwo Uczelniane UTP w Bydgoszczy. Czasopismo Naukowo-Techniczne: Postępy w Inżynierii Mechanicznej 9(5), 2017.

[6] KRUK A.: Tomografia elektronowa i jej zastosowanie w obrazowaniu i metrologii mikrostruktury materiałów. Wydawnictwo AGH Kraków, 2012.
[7] LASS P.: Tomografia emisyjna fotonu. VIA MEDICA, Gdańska 1998.
[8] MIKOŁAJCZYK J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2017.
[9] MIKOŁAJCZYK J.: Maszyny tarciowe. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2018.
[10] Norma PN-ISO 8402.
[11] Norma PN-EN ISO 13534 kat. IV.
[12] Norma PN-EN ISO 26520-1.
[13] PIWOWAR S.: Kontrola procesów spawalniczych. Wydawnictwo WNT Warszawa, 1979.
[14] POLAKOWSKI K.: Tomograficzne obrazowanie lokalnych wartości parametrów przepływów produktów spalania w technice samochodowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
[15] RIGNEY D., GLEASER A.W.: The significance of near surface microstrukture in the wear process. Wear, 46, 1978, s. 241–250.

APPLICATION OF CAT SCANNING IN NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDED T-JOINTS

Summary: The article presents the results of a non-destructive conducted with the aid of computer tomograph Somaton Definition AS (Siemens). The samples were welded T-joints made in the downhand position. The material used for probes was steel C45. The joints were made on the Level C quality (medium requirements).

Key words: Computer Axial Tomography, tomograph

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 45–51
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Marietta MARKIEWICZ-PATALON

PRAWNE I ORGANIZACYJNE ASPEKTY GOSPODAROWANIA ODPADAMI Z TWORZYW SZTUCZNYCH W POLSCE

Streszczenie: Problem segregacji odpadów szczególnie w aspekcie wymogów Unii Europejskiej nabiera szczególnego znaczenia. W ostatnich latach w Polsce powstało szereg aktów prawnych dotyczących segregacji, utylizacji oraz recyklingu odpadów. W pracy omówiono sposoby katalogowania odpadów oraz plan gospodarowania odpadmi.

Słowa kluczowe: recykling, odpady z tworzyw sztucznych, gospodarowanie odpadami

1. WSTĘP

Przepisy ogólne dotyczące odpadów i ich utylizacji zawarte są w Ustawie o odpadach [2]. Ustawa ta precyzuje sposób postępowania z odpadami, a w szczególności określa działania mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa ludziom i środowisku. Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie „Prawo Ochrony Środowiska" odpady oznaczają każdą substancję lub przedmiot należący do jednej z kategorii, określonych poniżej, który posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do ich pozbycia się jest obowiązany [7].

Kategorie odpadów [1]:

- pozostałości z produkcji lub konsumpcji, niewymienione w pozostałych kategoriach,
- produkty nieodpowiadające wymaganiom jakościowym,
- produkty, których termin przydatności do właściwego użycia upłynął,
- substancje lub przedmioty, które zostały rozlane, rozsypane, zgubione lub takie, które uległy innemu zdarzeniu losowemu, w tym zanieczyszczone wskutek wypadku lub powstałe wskutek prowadzenia akcji ratowniczej,
- substancje lub przedmioty zanieczyszczone lub zabrudzone w wyniku planowych działań,
- przedmioty lub ich części nienadające się do użytku,
- substancje, które nie spełniają już należycie swojej funkcji,
- pozostałości z procesów przemysłowych,
- pozostałości z procesów usuwania zanieczyszczeń,
- pozostałości z obróbki skrawaniem lub wykańczania,
- pozostałości z wydobywania lub przetwarzania surowców,

mgr inż. Marietta MARKIEWICZ-PATALON, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Mechatroniki i Maszyn Roboczych, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: marmar000@utp.edu.pl

– podrobione lub zafałszowane substancje lub przedmioty,
– wszelkie substancje lub przedmioty, których użycie zostało prawnie zakazane,
– substancje lub przedmioty, dla których posiadacz nie znajduje już dalszego zastosowania,
– zanieczyszczone substancje powstające podczas rekultywacji gleby i ziemi,
– wszelkie substancje lub przedmioty, które nie zostały uwzględnione w powyższych kategoriach.

Zgodnie z polskim prawem odpady można klasyfikować na kilka sposobów. Podstawowy podział zawarty w Ustawie o odpadach dzieli je na niebezpieczne oraz inne niż niebezpieczne. Katalog odpadów zawarty został w rozporządzeniu Ministra Środowiska. Odpady klasyfikowane są tam według źródła ich powstawania. Przedsiębiorstwa zajmujące się odzyskiem i utylizacją odpadów używają danych zawartych w katalogu do wypełnienia kart przekazania odpadów, uzupełniając je odpowiednim kodem przypisanym do danego rodzaju odpadu. Karta przekazania odpadu jest częścią dokumentacji zawierającej informacje o odpadach. Katalog odpadów, który dzieli odpady w zależności od źródła ich powstawania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Katalog odpadów [1]
Table 1. Waste catalog [1]

LP.	KATEGORIA	NAZWA
1	01	odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalin
2	02	odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności
3	03	odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury
4	04	odpady z przemysłu skórzanego, futrzarskiego i tekstylnego
5	05	odpady z przeróbki ropy naftowej, oczyszczania gazu ziemnego oraz przeróbki węgla
6	06	odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii nieorganicznej
7	07	odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii organicznej
8	08	odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania powłok ochronnych (farb, lakierów, emalii ceramicznych), kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich
9	09	odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych
10	10	odpady z procesów termicznych
11	11	odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych

cd. tabeli 1.
continued table 1.

12	12	odpady z chemicznej obróbki i powlekania powierzchni metali oraz innych materiałów i z procesów hydrometalurgii metali nieżelaznych
13	13	oleje odpadowe i odpady ciekłych paliw (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05, 12 i 19)
14	14	odpady z rozpuszczalników organicznych, chłodziw i propelentów (z wyłączeniem grup 07 i 08)
15	15	odpady opakowaniowe; sorbenty, tkaniny do wycierania, materiały filtracyjne i ubrania ochronne nieujęte w innych grupach
16	16	odpady nieujęte w innych grupach
17	17	odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych)
18	18	odpady medyczne i weterynaryjne
19	19	odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych
20	20	odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie

2. GOSPODAROWANIE ODPADAMI

W zasadach gospodarowania odpadami ważną kwestią jest, aby wytwórca odpadów stosował takie sposoby produkcji oraz formy usług, które przeciwdziałają wytwarzaniu odpadów lub ograniczają ich ilość, a także minimalizują ich negatywne oddziaływanie na środowisko. Podmiot posiadający odpad, czyli posiadacz odpadów ma obowiązek postępować z nimi zgodnie z zasadami ochrony środowiska oraz planami gospodarki odpadami. W pierwszej kolejności, składowane selektywnie odpady powinien poddać odzyskowi, a w przypadku gdy jest to nie możliwe powinien poddać je unieszkodliwieniu w miejscu ich powstawania. Niektóre rodzaje odpadów odzyskuje się lub unieszkodliwia w określonych warunkach, które nie są możliwe do spełniania w warunkach gospodarstwa domowego. W takim przypadku posiadacz odpadów zobowiązany jest przekazać odpady do miejsc, zlokalizowanych najbliżej miejsca ich powstawania, w których mogą one zostać poddane bezpiecznemu odzyskowi lub unieszkodliwieniu.

Plany gospodarki odpadami opracowywane są dla osiągnięcia celów założonych w polityce ekologicznej państwa oraz realizacji działań mogących zapobiec powstawaniu odpadów, o których mowa powyżej. Realizowanie założeń zgodnych z planem zagospodarowania odpadów jest niezbędne do tworzenia w państwie zintegrowanej sieci instalacji i urządzeń wykorzystywanych do odzysku i unieszkodliwiania odpadów.

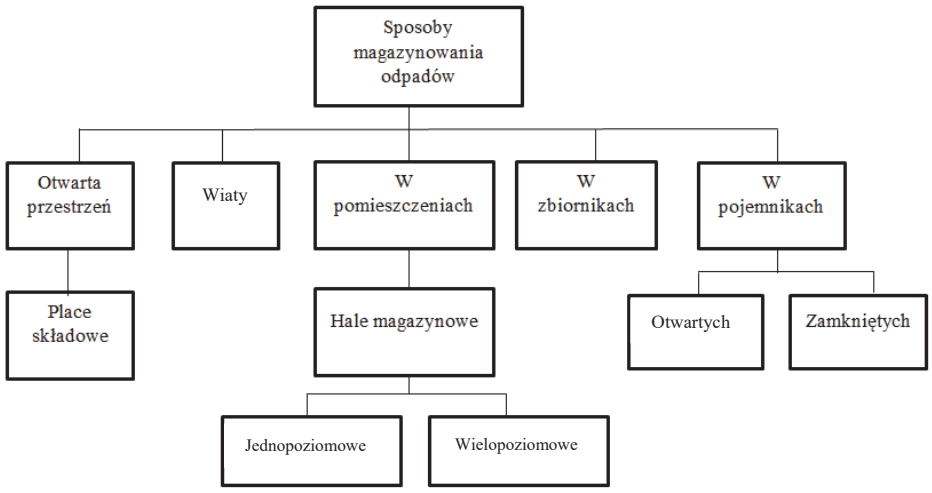
Rodzaje i ilości planowanych rocznych odpadów poddanych procesowi odzysku oznaczają warunki dotyczące rodzaju oraz ilości (1 Mg = 1000 kg) odpadów, jakie przedsiębiorstwo może poddać procesowi w zakresie odzysku odpadów. Warunki te zawarte zostały w decyzji wydanej przez starostę powiatu na

podstawie Ustawy o odpadach, rozporządzenia Ministra Środowiska oraz kodeksu postępowania administracyjnego i są nimi odpady opakowaniowe grupy 15, odpady z instalacji z grupy 19, odpady komunalne z grupy 20 [5, 8].

Odzysk odpadów odbywa się na terenie firmy. Proces recyklingu, tj. odzysku tworzyw sztucznych w celu uzyskania materiału o przeznaczeniu pierwotnym oraz wykorzystaniu odpadów do wytworzenia nowego produktu wykonywany jest za pomocą metod R3 (recykling lub odzysk substancji organicznych, które nie są stosowane jako rozpuszczalniki), R14 (inne działania polegające na wykorzystaniu odpadów w całości lub części) i R15 (przetwarzanie odpadów, w celu ich przygotowania do odzysku, w tym do recyklingu). Metale przygotowywane są do odbioru poprzez obróbkę ręczną – sortowanie i segregowane według rodzaju surowca. Segregowaniu i sortowaniu ręcznemu są również poddawane odpady wielomateriałowe, dodatkowo ręcznie obrabiane w celu uzyskania surowca.

W polskim prawie nie zdefiniowano jednoznacznie pojęcia segregacji, dlatego przyjąć można, iż segregacja jest to rozmieszczenie poszczególnych rodzajów odpadów i rozlokowanie tych odpadów w odpowiednich pojemnikach, dzieląc je na rodzaj materiałów, z których zostały wytworzone. Ma ona na celu przygotowanie odpadów do ich ponownego użycia lub unieszkodliwienia. Segregację należy rozpoczynać u źródła powstawania odpadów, czyli w gospodarstwach domowych i przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Odpady magazynowane są najczęściej w miejscu ich segregacji i odzysku w zamkniętych halach należących do przedsiębiorstw oraz w podstawionych metalowych kontenerach. Odpady, które zostały już posegregowane i uformowane na paletach euro (120 cm x 80 cm) magazynowane są w sposób niezagrażający życiu lub zdrowiu ludzi oraz nie oddziałujący na środowisko. Inne sposoby magazynowania odpadów przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Sposoby magazynowania odpadów [3]
Fig. 1. Waste storage methods [3]

W przeciwieństwie do segregacji, proces utylizacji odpadów ma na celu zniszczenie surowców lub przygotowanie ich do ponownego użycia. Nadaje on cechy użytkowe odpadom i umożliwia ich zagospodarowanie. Utylizacja polegać powinna na zastosowaniu procesów fizycznych, chemicznych lub biochemicznych i nie stanowi dużej uciążliwości dla środowiska. Utylizacja łączy się ze składowaniem oraz gospodarowaniem odpadów i tworzy wraz z nimi program gospodarki odpadami przemysłowymi, co przedstawione zostało na rysunku 2.

Rys. 2. Schemat powiązań operacji w gospodarce odpadami przemysłowymi [1]
Fig. 2. Diagram of connections between operations in industrial waste management [1]

Procesami unieszkodliwiania odpadów przemysłowych są:
- magazynowanie na składowiskach odpadów obojętnych,
- obróbka w glebie i ziemi,
- składowanie poprzez głębokie wtryskiwanie,
- retencja powierzchniowa,
- składowanie na składowiskach odpadów niebezpiecznych lub na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne,
- odprowadzanie do wód, z wyjątkiem mórz,
- zatapianie na dnie mórz,
- obróbka biologiczna niewymieniona w innym punkcie, w wyniku której powstają odpady, unieszkodliwiane za pomocą któregokolwiek z wymienionych procesów,
- obróbka fizyczno-chemiczna niewymieniona w innym punkcie, w wyniku której powstają odpady, unieszkodliwiane za pomocą któregokolwiek z wymienionych procesów,
- termiczne przekształcanie odpadów w instalacjach lub urządzeniach zlokalizowanych na lądzie,
- termiczne przekształcanie odpadów w instalacjach lub urządzeniach zlokalizowanych na morzu,
- składowanie odpadów w pojemnikach w ziemi (np. w kopalni).

3. PROBLEM UTYLIZACJI ODPADÓW W POLSCE

Odpady są ogromnym problemem dla środowiska oraz ludzi. W społeczeństwach rozwiniętych notowany jest wzrost ilości odpadów, co spowodowane jest dynamicznym rozwojem gospodarki, wzrastającą liczbą populacji czy też postępem cywilizacyjnym. Dane dotyczące ilości produkowanych odpadów w Polsce zaczerpnięte zostały z Głównego Urzędu Statystycznego i przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Bilans odpadów pochodzenia przemysłowego z 2016 roku [4]
Table 2. Waste balance of industrial origin from 2016 [4]

WYSZCZEGÓLNIENIE	ODPADY [MG]/TERENY SKŁADOWANIA [HA]
Odpady wytworzone [Mg]	123810
Odpady wykorzystane [Mg]	96771
Odpady unieszkodliwione [Mg]	3350,4
Odpady składowane [Mg]	30506,7
Odpady nagromadzone [Mg]	1977946,6
Tereny składowania nie zrekultywowane [ha]	10642,4
Tereny składowania zrekultywowane [ha]	291,5

4. PODSUMOWANIE

Odpady i zagrożenia z nimi związane stają się coraz większym problemem w ochronie środowiska. Jednak w ostatnich latach można zauważyć zainteresowanie gospodarką odpadami i tworzenie nowych technologii związanych z ich unieszkodliwianiem oraz recyklingiem. W zakresie gospodarki odpadami od 1997 r. Powstało wiele warunków prawnych, które respektują zarządzanie odpadami. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w Polsce każdego roku wytwarzanych jest około 120 milionów megaton odpadów przemysłowych i każdego roku ta ilość jest zmniejszana. Jest to znaczący i trudny problem, z którym Polska boryka się cały czas [4]. Większość odpadów w naszym kraju znajduje się w południowo-zachodniej części i zajmuje kilka tysięcy hektarów. Odpady te stanowią 1,7 miliarda ton, a większość z nich może być wykorzystywana jako surowiec wtórny [4].

5. LITERATURA

[1] BILITEWSKI B., HARDTLE G., MAREK K.: Podręcznik gospodarki odpadami teoria i praktyka. Wydawnictwo Seidel Przywecki. Warszawa, 2006.
[2] Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów (Dz.U. L312 z 22 XI 2008).
[3] GÓRSKI M.: Prawo Ochrony Środowiska. Warszawa, 2009.
[4] Krajowy plan gospodarki odpadami 2022 przyjęty przez Radę Ministrów uchwałą nr 88 z dnia 1 lipca 2016 r.
[5] Orzeczenie Wojewódzkiego Sądu Administracyjnego w Warszawie z dnia 12 stycznia 2010 r. (sygn. akt IV SA/Wa 885/09).

[6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. Nr 112, poz. 1206).
[7] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627).
[8] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 nr 0 poz. 21).

LEGAL AND ORGANIZATIONAL CONDITIONS FOR THE MANUFACTURE OF WASTES FROM PLASTIC WASTE IN POLAND

Summary: The problem of waste segregation, in particular the aspect of requirements of the European Union, is important. Last years in Poland there have been drawn up many legal acts concerning segregation and recycling of waste. In order to facilitate presentation of the process of recovery, utilization and segregation of waste in accordance with the law, there was conducted the analysis on the basis of a small enterprise dealing with secondary raw materials' recycling, such as waste paper, LDPE and PE foil, and PP and PS plastic company.

Key words: waste, transportation, segregation, recycling, plastic waste

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 53–67
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Oleg POLISHCHUK, Olexsander BURMISTENKOV,
Natalia PYSHCHENIUK, Maciej MATUSZEWSKI

THE INCREASE OF EFFICIENCY OF METAL FITTINGS INSTALLING OPERATION IN LIGHT INDUSTRY PRODUCTS

Summary: Nowadays there is a large assortment of metal fittings for light industry products: grommets, shoe blades and hooks, buttons, rivets, jeans buttons, etc. Qualitative installation of metal fittings in light industry products is a significant problem and depends on various factors. Therefore, theoretical and experimental researches in this field are important and relevant nowadays.
The most popular types of metal fittings used in the sewing, footwear, leather and haberdashery industries are blocks and grommets. While grommets installing in a traditional way, unreasonable losses between the two operations occur.
One of the ways to increase labor productivity is to combine the technological operations of holes punching in the grommets and their fastening in the material. This installation method can be applied to fittings which have a cylindrical hollow shape and a sharp incisive edge.
To investigate the operation of metal grommets installation in light industry products, an experimental installation was developed and experimental studies were carried out.
The experimental studies confirmed the possibility of utilization of the grommet cutting edge as a working tool for the punch, which in turn allowed the punching and fitting operation to be combined, reduce the number of working tools, and increase the productivity of the equipment.

Key words: light industry, metal fittings, grommets, material, press for fitting installation

1. THE RESEARCH TASK AND URGENCY

Nowadays there is a large assortment of metal fittings for light industry products: grommets, shoe blades and hooks, buttons, rivets, jeans buttons, etc. [3]. Almost all kinds of clothes are decorated with metal fittings, and some are generally hard to be imagined without it, for example, denim clothing, which must necessarily be with rivets, jeans buttons, buttons, grommets, etc. The use of quality fittings can decorate any clothing and shoes, increase the convenience and their working term, etc.

[1] Oleg POLISHCHUK, Khmelnytskyi National University, Ukraine, e-mail: oplishchuk71@gmail.com
[2] Olexsander BURMISTENKOV, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine, e-mail: bur42@ukr.net
[3] Natalia PYSHCHENIUK, Lazarski University, Poland, e-mail: natalia.pyshcheniyk@gmail.com
[4] Maciej MATUSZEWSKI, UTP University of Science and Technology Bydgoszcz, Poland, e-mail: maciej.matuszewski@utp.edu.pl

The offer of the metal fittings market is very large today; it is represented by both cheap and expensive various kinds of metal fittings of various quality. The same statement can be said about the tools and equipment for its installation. Quite often, manufacturers of clothing and footwear, using the method of "test and error", are looking for an optimal combination of price and quality when installing the fittings. These attempts are successful not always; consequently, it often causes consumers to suffer because of buying products with poorly installed fittings that are quickly about to be spoiled, broken and need to be replaced.

Qualitative installation of metal fittings in light industry products is a significant problem and depends on various factors. Therefore, theoretical and experimental researches in this field are important and relevant nowadays.

In many cases, the task of a theoretical study is simplified by assumed assumptions in order to determine the basic values that describe the technological process. Experimental studies that are carried out to confirm the adequacy of theoretical statements show how significant the error of the results is due to the assumed assumption and, accordingly, in which direction the theoretical studies should be corrected.

Experimental studies of the process of the metal fittings installation need to be conducted in order to identify patterns of interest in terms of existing theoretical studies and their application.

2. THE RESEARCH METHODOLOGY

The most popular types of metal fittings used in the sewing, footwear, leather and haberdashery industries are blocks and grommets.

The blocks are shaped sleeves which have a circlet on one side. They are intended to strengthen the edges of the openings of sewing, footwear, leather and haberdashery products [3].

The grommets, as a rule, consist of two elements: blocks and rings (pucks), which lead to the connection of increased strength.

The installation of metal fittings in clothing, footwear, leather and haberdashery products at light industry enterprises is carried out according to the traditional technology, which consists of two stages: punching of the opening in the material; metal fittings fastening.

For several decades, the mechanisms implementing the workflow are stable and not subjects to any noticeable changes in their design [2]. Such fittings are installed manually (with hand tools or presses with a manual or foot type of drive) or by special working units of the equipment (in automatic presses with electric, electromagnetic and pneumatic type of drive) into a pre-pierced opening in the material of the product, and then fastened by splitting or beading.

Such working tool as a punch-cutting board is used for holes punching; for fixing of metal fittings, working tool called a die holder is used (Fig. 1).

The process of grommets installation in the traditional way is as follows. The punch-cutting board is mounted on the frame of the press in the die holder. A puncher is attached to the puncher of the press. The puncher with a punch goes down and pierces the opening of the required diameter in the material. Metal fittings are installed into the pierced hole. The puncher is removed from the press puncher, and a punch is installed in that place. The matrix is mounted on the frame of the press in the die holder. The grommet that is in the material is inserted into the matrix. The puncher with a punch goes down and performs the operation of grommet fastening in the material.

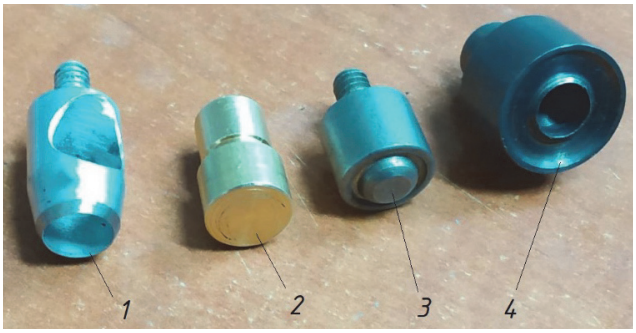


Fig. 1. Working tools: 1 – punch; 2 – punch-cutting board; 3 – punch; 4 – matrix

Thus, unreasonable time losses between the two operations associated with the necessary replacement of working tools occur. Two presses can be used; one with a punch, the second with a punch. The installation time will be lower, but two operations must be performed.

One of the ways how to increase labor productivity is to combine technological operations. The hole punching for the metal fittings and its fastening in the material should occur without intermediate replacement of working tools; it should occur in one operation on the press and impact equipment with the help of the metal fittings themselves and the special design of the puncher and matrix.

This installation method can be applied to fittings which have a cylindrical hollow shape and a sharp incisive edge. Such fittings include special blocks and grommets, which appeared relatively recently, but quickly have gained strong positions in the printing and advertising industries; they are used for holes strengthening in various materials (cardboard, plastic, etc.) and outdoor advertising: banners, stretch marks, etc. Such grommets and sharp-edged blocks can be recommended for use in clothing, footwear, leather and haberdashery goods industries, mainly for dense materials (various types of leather, leather substitutes and textiles).

This method of installation has limitations for highly elastic synthetic materials. If the grommet's edge is not sharp enough, then the material will stretch while beading, it will also get into the gap between the grommet and the puck,

and it will be crumbled; hence, the qualitative installation of the grommet is impossible [2].

Further, in the course of experimental studies, such grommets will be used, that is, blocks with reinforcing pucks, which are most common in light industry.

To perform the installation of metal fittings we propose to use the punch design by Micron Group Inc. The general look of the working tools made in the Solid Works software environment is shown on Figure 2.

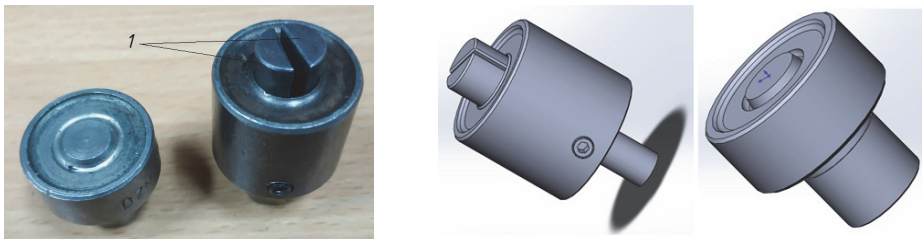


Fig. 2. General look of working tools: a) punch; b) matrix; c–d) model in the Solid Works software environment; 1 – holder

The scheme of the implementation of the technological operation of installing the grommets by the proposed method is shown on Figure 3.

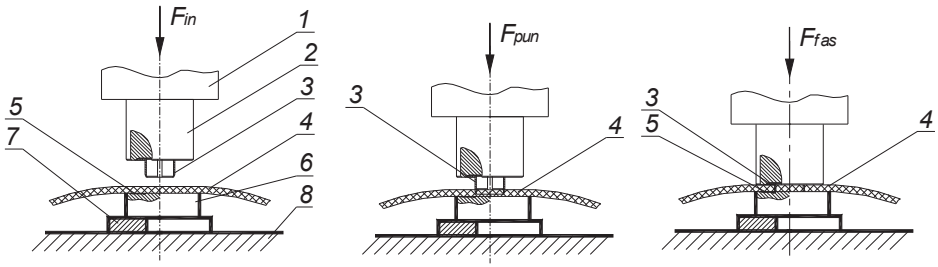


Fig. 3. The scheme of the implementation of the technological operation of installing the grommets by the proposed method: a) puncher movement towards the material; b) cutting an opening in the material; c) grommet fixing on the material; 1 – puncher; 2 – punch; 3 – grommets; 4 – material; 5 – puck; 6 – matrix; 7 – die holder; 8 – base

The proposed working tool works as follows. The punch 2 is fixed to the puncher of the press 1. The matrix 6 is fixed to the 7 die holder. Firstly, a puck 5 for strengthening is fixed to the matrix 6. The punch 2 in its design has two spring-loaded holders 1. On the holder 1 of the punch 2, a metal grommet 3 is installed. The material 4 is fixed on the matrix 6 in a certain side. The puncher with a punch and the grommet begins to move towards the material. The grommet, reaching the material, with the help of its sharp part begins to cut the material,

plunging into it. The complete cutting of the opening with the sharp part of the fittings and its immersion into the material occurs. This corresponds to the first stage of metal fittings installation in a traditional way. After the material cutting, the grommet, with further displacement, begins to contact with frontal surface of the matrix. Due to the conical protrusion on the matrix, distribution of the grommet manhole occurs. When the edge of the grommet reaches the ring-shaped hollow, a further stripping of the distributed part of the grommet manhole is carried out. Thus, an integral combination is obtained: the grommet- the material – the puck.

Due to the use of this punch design, it was possible to combine the two stages of the metal fittings installation in a traditional way, and we got one proposed method. And this, in turn, leads to a significant reduction of execution time of this technological operation. In this way, we can significantly increase the machine's productivity.

Reducing the time of metal fittings installation, in turn, will lead to the reducing of energy consumption while using the equipment with electric motors.

Another way of reducing energy consumption when using the proposed methods of metal fittings installation can be the use of high-speed modes of operation. Many scientists have proved that during high-speed implementation of the operation, the technological effort in metals decreases. Therefore, when fixing metal grommet with the help of high-speed modes, less work is spent. Thereby, this reduces the energy consumption of the press equipment. But to confirm this, it is necessary to conduct experimental researches.

The disadvantage of high-speed performance of the operation may be the quality of grommet fixing on the material. It also requires experimental researches.

The interaction of the grommet edge with clammy-elastic material and, subsequently, with the matrix, in the process of its installation, is defined to be extremely complex process mainly due to the physical phenomena that are not subject to a clear analytical description. Only a combination of theoretical grounds with experimental studies will give an understanding of the true physical picture of this process and will make important conclusions.

When performing the technological operation of metal fittings installation in light industry products, the proposed method will contain two technological efforts: the efforts of the grommet punching F_{pun} and the effort of grommet fastening F_{fas} in the material. When setting up the press to install metal fittings for maximum effort in the production environment, you will need to know what effort to choose as the maximum for calculations. Therefore, it is necessary to conduct experimental studies to determine the dependence of the technological effort of performing of the metal fittings installing operation from the motion of a punch for a certain diameter of the grommet. On the received diagrams it is possible to determine the maximum values of efforts and compare them. Moreover, we can also compare the obtained values with the results of experimental

studies on the installation of metal fittings in the traditional way, which are given in papers [4, 5]. The authors of this work determined the technological efforts of cutting the holes for metal fittings in various materials and the metal bushes strengthening in the materials.

3. THE RESULTS OF THE RESEARCH

To investigate the operation of metal grommets installation in light industry products by the proposed method in a static mode, an experimental installation was developed. The structure of the experimental installation includes: a device for performing the operation of metal grommets installation in the products of light industry; unit of measuring equipment; a computer. The device for performing the operation of grommets installation (Fig. 4) consists of: frame 1, pair of screws to create a load 2, a punch 3, and the material with grommet 4.

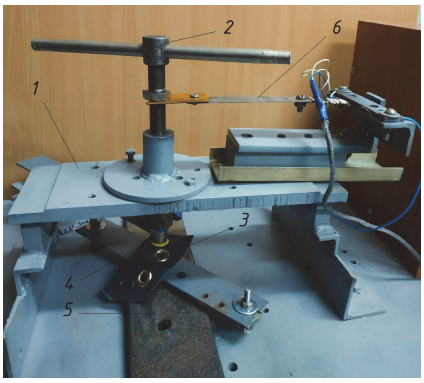


Fig. 4. The device for performing the operation of metal fittings installation: 1 – holster; 2 – a pair of screws for loading; 3 – material with the grommet; 4 – working tools (punch and matrix); 5 – strain gauge for measuring the installation effort; 6 – strain gauge for measuring the value of the punch movement

The block of measuring equipment consists of strain gauge for measuring the installation effort 5, strain gauge for measuring the magnitude of the displacement of puncher 6, an amplifier, an analog-to-digital converter (ADC) and computer.

The setting for the study of the operation of metal grommets installing in static mode works as follows. The ring for strengthening and the material are placed on the matrix fixed in the die holder (Fig. 2). The die holder is in turn placed on the strain gauge. With the help of the pair of screws 2, the necessary effort is made to install the metal fittings in the material 3. The sharp edge of the grommet immerses in material 3 and cuts it. In the further immersion, the distribution of the cylindrical part of the grommet occurs due to the conical part of the matrix. When the distributed part of the grommet falls into the canal on the matrix, its flanging, bending in the form of a ring and fastening on the puck occur.

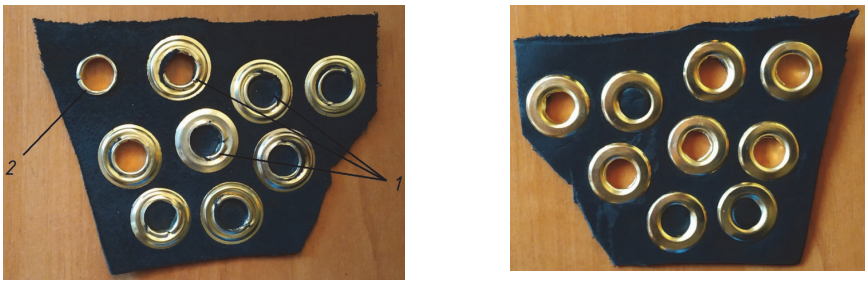
In this way, an inseparable compound is formed: the grommet – the material – the puck.

Analog signals originating in the strain gauges 5 and 6 are amplified with the help of an amplifier, and then they convert to digital with the help of ADC and enter the computer. With the help of the developed software installed on the computer, the dependence between the technological installation effort F_{in} and the value of the punch movement h_p is obtained. Based on the obtained dependencies, the parameters of the process of the metal fittings installation into the material can be determined in the future.

As a material for the grommet installation, natural leather from the top of the shoe was selected (its thickness is 1.6 mm) [8].

For the experimental researches, metal grommets of three different firms "Liuversy" [6], "Alvi" [7] and "Shyjemo razom" [1] were used. The grommets differed in the brand of steel from which they were made and the geometric shape of the puck and had the following dimensions: the inner diameter of the block is 10 mm; the stalk height of the block is 4.8 mm [2].

In the course of experimental research on the installation of the grommets of the company "Liuversy" in the material, we did not manage to perform this operation qualitatively. A torn ring was formed from the flanged metal; there was a lack of leather for the hole (Figure 5a); and the cringing of the outer side of the grommet occurred (Figure 5b).



a) b)

Fig. 5. The installation the grommet in the material by the proposed method: a) the inner side; b) outer side; 1 – defects of installation while using the grommets made from soft material and with dented cutting edge; 2 – defects of installing the grommets when the geometrical shape and size are not measured

Not qualitative performance of the operation can be explained by the softness of the material from which the grommet was made, and the fact that the cutting edge was not sharp enough. As a result of beading, the cylindrical part of the grommet stalk was pulled out, fell into the gap between the grommets and the puck, and cringed.

While installing the grommets of the company "Alvi", it was impossible at all to fix a puck on the material. After measuring the geometric parameters of the outer diameter of block stalk and the inner diameter of the puck, it turned out

that the gap between them was very small. The puck was very tight on the cylindrical stalk. That is, they fitted each other very tightly. Furthermore, the shape of the puck did not repeat the shape of the matrix. The splashing of the volumetric shape of the puck took place. The ring from the flanged material was formed on the material itself (Figure 5b).

The installation of fittings of the first two companies with the help of traditional method was carried out qualitatively without breakage, with the formation of an appropriate ring from the flanged metal on the puck. This can be explained by the fact that there was no need to cut the material with the grommet. It was installed in already prepared hole.

The best indicators were shown by the company's "Shyjemo razom" grommets. The block material was stiffer and had a sharp cutting edge. The puck completely repeated the contours of the matrix, and the gap between outer diameter of block stalk and the inner diameter of the puck was sufficient.

When performing the first stage of the operation, the hole punching occurred full and clear, with a clean frontal surface of the hole cutting with the sharp edge of the fittings (Figure 6a). Then there was a qualitative grommet fastening in the material.

a) b) c)

Fig. 6. Stages of grommets installation by the proposed method: a) a sample of cut material for the hole of the grommet; b) grommet fastening on the material (inner side); c) grommet fastening on the material (outer side)

While conducting the experiment, the values of the dependence between the technological installation effort F_{in} and the value of the punch movement h_p were measured; and they determined the nature of the operation, the maximum punching effort $F_{pun.max.}$ and the maximum installation effort $F_{in.max}$.

Figure 7 shows the graph of the dependence between the technological installation effort F_{in} and the value of the punch movement h_p. The analysis of the given graph allowed allocating six stages that the grommet passes in the process of its installation in the material. At the first stage (I) the cutting of material with sharp part of the grommet takes place. The maximum technological punching $F_{pun.max.}$ occurs when the punch passes through the entire thickness of the material. At the second stage (II) there is a sudden drop of effort due to the certain gap between the material and the conical part of the matrix. During the contact

with the conical part of the matrix, the technological effort begins to increase again (Stage III). The process of distribution of the cylindrical part of the grommet occurs. Subsequently, due to the ring-shaped slot on the matrix, the process of flanging the distributed part of the grommet (Stage IV) with subsequent bending in the form of a ring (Stage V) on the fastening washer that is on the material is carried out. At the sixth stage there is further contact of the material with a fixed grommet. By the quantity of the material compression it is possible to evaluate the quality of the installation.

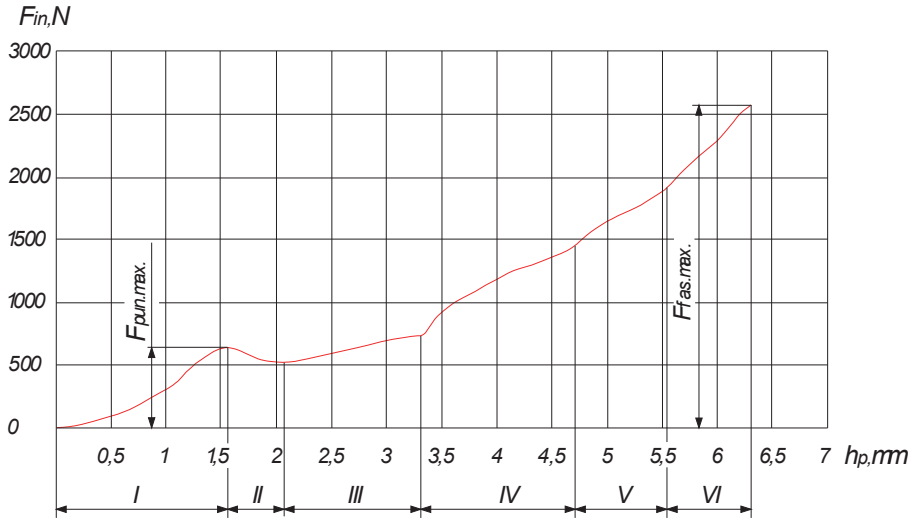


Fig. 7. The graph of the dependence between the technological installation effort F_{in} and the value of the punch movement h_p: $F_{pun.max.}$ – the maximum punching effort; $F_{in.max.}$ – the maximum installation effort

Having analyzed the received schedule, one can conclude that for the fastening of the grommet in material it is necessary to apply much more effort than to cut the punching hole for the fittings. Therefore, the effort of grommet installing F_{in} will be equal:

$$F_{in} = F_{fas} \tag{1}$$

Thus, when calculating the maximum technological effort for the press during the grommet installation of a certain diameter $F_{in.max.}$, it is necessary to take the maximum effort of fastening $F_{fas.max}$.

In the work [4] a study of holes punching for the metal fitting with the angle of aggravation of 25° was conducted, and we obtained the value of maximum punching effort. The comparison of obtained maximum technological efforts of holes punching with the angle of aggravation of 25° and the grommet with a cutting edge (Fig. 7) discovered that the use of the grommet as a cutting tool leads to a significant reduction in the punching effort F_{pun}, and to the reduction of the cutting work and energy costs of the press.

The reduction of the punching effort F_{pun} can be explained by the fact the angle of aggravation of the cutting edge is about 5–10° in the grommets used in the experiment. The blunt blade is absent at all. The sharp edge of the grommet does one-time cutting of the material, and it does not affect the process of its wear. At a smaller angle there are less frictional forces on the cutting edge.

Accordingly, the reduction of the cutting angle and the coefficient of frictional forces lead to a significant reduction in the cutting effort, which was confirmed experimentally.

In order to find out the optimum maximum technological effort in which the quality of the installation will be satisfactory, the following experiment was conducted. The essence of the experiment was as follows. Gradually increasing the installation effort, the height of the fastened grommet was measured with the calipers and we also evaluated the quality of the fixation in the material. The conducted experiment made it possible to discover the following things. A necessary ring of fastening from the flanged part of the grommet was formed at a higher eminence (Experiment 1). The grommet was fixed on the material, but there was a gap between the material and the puck. Accordingly, the grommet scrolled on the material. With increasing effort, the thickness of the fastened grommet diminished. So, the grommet fitted tighter d to the material. When the load became larger the thickness of the grommet reduced to a certain limit. Further, the thickness of the grommet did not change but the effort increased. This can be explained by the geometric parameters of the matrix and the punch. During the collision of their frontal surfaces, the grommet volume was formed only at the expense of their forms. A further increase in force results only in the deformation of the strain gauge beam in an experimental setting. Under the real conditions, an increase in force will lead to the deformation of the equipment for the fittings fixing and the energy consumption will increase as well. In some cases the leather was cut by fittings due to the more compression. These factors should also be taken into account.

On the basis of obtained experimental data we have created a graph of the dependence between the height of the fixed grommet in the material $B_{f.g.}$ and the maximum installation effort F_{in}, as it is shown in Figure 8.

The optimal option that satisfies the quality of the grommet installation in the material is the conditions where the height of the fixed grommet $B_{f.g.}$ is 3.85 mm, and the installation effort F_{in} is 2500 N.

The approximation of the obtained experimental polynomial of the 1st degree made it possible to obtain the equation:

$$F_{in}=-162.79B_{f.g}+868.68 \tag{2}$$

The obtained equation can be used to determine the installation effort at the required height of grommet fastening in the material.

In order to study the effect of speed on the quality of the installation, a design of a press with a pneumatic drive and a design of a press with an electromagnetic drive were developed. This press equipment is shown on Figure 9.

We carried out the operations of metal fitting installation on this press equipment at different speeds.

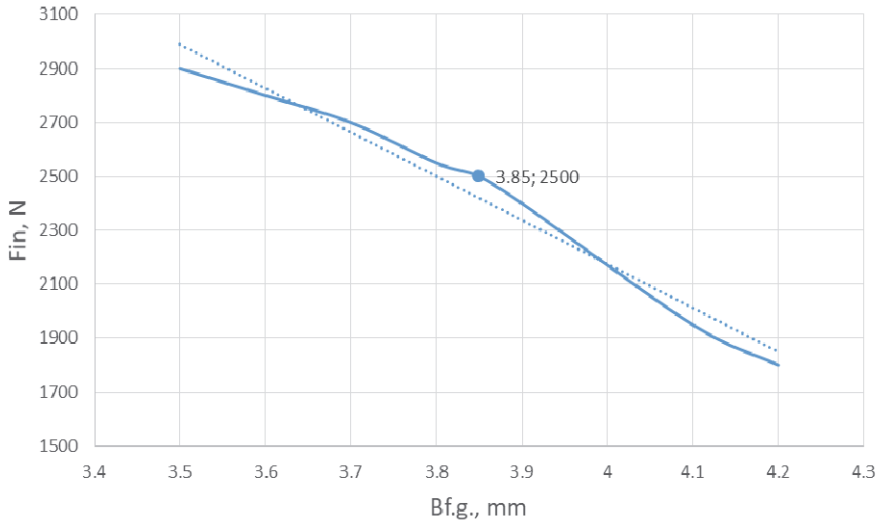
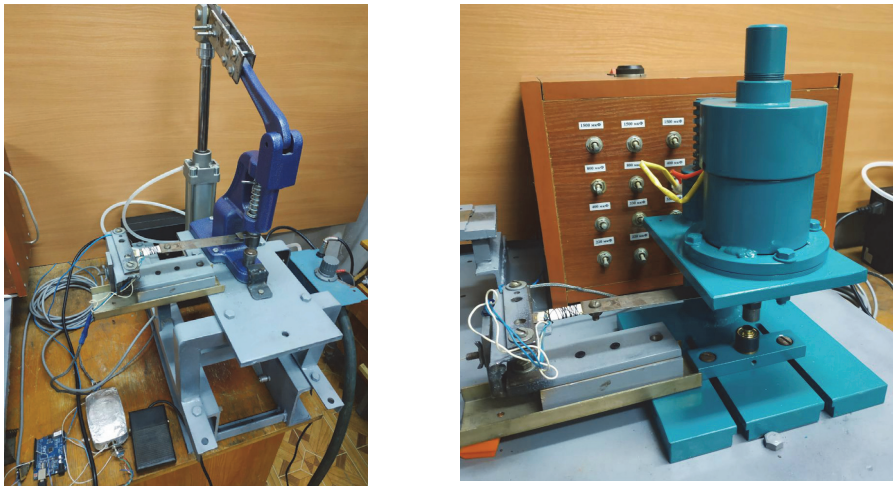


Fig. 8. The graph of the dependence between the height of the fixed grommet $B_{f.g.}$ and the maximum installation effort F_{in}



a) b)

Fig. 9. Equipment for the grommet installation in a dynamic mode: a) press with pneumatic drive; b) press with electromagnetic drive

Figure 10 demonstrates a sample of the material (natural leather from the top of the footwear; its thickness is 1 mm) with the installed grommets with the help of the manual press, press with pneumatic and electromagnetic drives in a dynamic mode. To install grommets on a manual press, a pneumatic cylinder rod from the press was detached (Figure 9) for transformation into a manual press.

The analysis of the quality of the grommet installation in the material has shown that the grommets are fitted tightly to the material and firmly fixed in it. The outer side of the grommet has no mechanical defects. An equable ring from flanged metal is formed from the inner side of the material.

a) b)

Fig. 10. The natural leather with the installed grommets in a dynamic mode: a) inner side, b) outer side

Later on, the experiment was conducted to determine the productivity of various press equipment types for the grommet installation: manual press and presses with pneumatic and electromagnetic drive (Figure 9). The list of necessary operations for the grommet installation with the help of traditional and proposed methods was identified for this purpose.

The analysis of the operations has demonstrated that in order to install a grommet in the traditional way it is necessary to perform 15 operations, while when using the proposed method their number decreases to 7.

The comparative diagrams of the grommet installation on manual press and presses with pneumatic and electromagnetic drive in traditional and proposed ways are shown on Figure 11.

The analysis of the results has showed that the productivity of the operation of grommets installation on the press with a manual drive increases in 3.4 times, on the press with a pneumatic drive in 4.9 times, and on the press with an electromagnetic drive in 5.3 times.

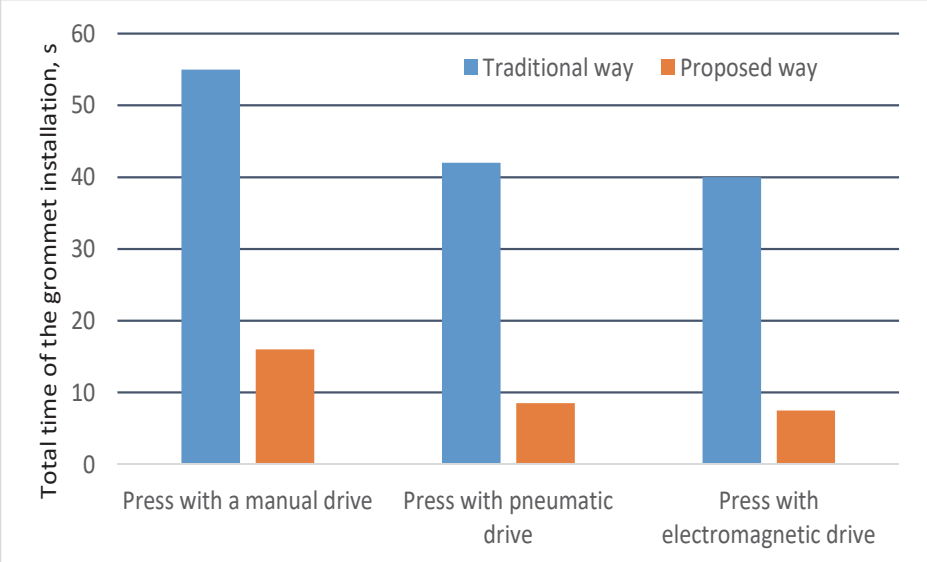


Fig. 11. The comparative diagrams of the grommet installation on manual press, and presses with pneumatic and electromagnetic drive in traditional and proposed ways

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATION

1. The experimental studies, which were carried out, confirmed the possibility of using the cutting edge of the grommet as a working tool for the punch, which in turn made it possible to combine punching and fixing of the fittings and reduce the number of working tools.
2. The conducted experimental studies have shown that not all grommets can be used for installing into the material by the proposed method. It is necessary to use more rigid grommets with sharp cutting edge. This should be taken into account when choosing the grommets for installation by the proposed method.
3. Reducing the angle of aggravation leads to a significant reduction in the cutting effort, which in turn reduces the cutting performance.
4. The obtained results have shown that during performing the operation of metal fittings installation by the proposed method, the maximum technological effort arises at the end of the puncher move. As a result, when calculating the theoretical effort, it is necessary to use a formula for measuring the maximum fixing effort.
5. There are optimal modes of metal fittings installation where the wasted energy is spent to perform the useful installation work. Increased efforts have a negative effect on the press equipment and can lead to the rapid failure of the equipment and faults in the grommet material and the material in which it is installed.

6. The installation of grommets by the proposed method in high-speed modes does not lead to deterioration of the quality of its attachment to the material.
7. The use of the proposed method for installing a grommet in the material leads to a significant increase in the productivity of the equipment. the productivity of the operation of grommets installation on the press with a manual drive increases in 3.4 times, on the press with a pneumatic drive in 4.9 times, and on the press with an electromagnetic drive in 5.3 times.

5. REFERENCES

[1] Blochky, liuversy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://shiemorazom.com/catalog/blochki_lyuversy.
[2] CHUMAKOVA S.V.: Analitychnyi ohliad sposobiv ta obladnannia dlia vstanovlennia metalevoi furnitury u vyroby lehkoi promyslovosti / S.V. Chumakova, O.S. Polishchuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2(5), 2010, s. 142–148.
[3] CHUMAKOVA S.V.: Ohliad shveinoi ta vzuttievoi metalevoi furnitury, yaka vstanovliuietsia u vyroby lehkoi promyslovosti shliakhom rozvaltsovuvannia ta rozklepuvannia / S.V. Chumakova, O.S. Polishchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu 3(155), 2010, s. 104–110.
[4] CHUMAKOVA S.V.: Doslidzhennia protsesu vyrubuvannia otvoriv pid metalevu furnituru u vyrobakh lehkoi promyslovosti / S.V. Chumakova, O.S. Polishchuk, A.K. Karmalita // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – 5(182), 2011, s. 34–41.
[5] CHUMAKOVA S.V.: Doslidzhennia protsesu zakriplennia metalevykh liuversiv u vyrobakh lehkoi promyslovosti v kvazistatychnomu rezhymi / S.V. Chumakova, O.S. Polishchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – 2, 2013, s. 147–153.
[6] Liuversy (blochky) [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://lyuversy.com.ua/g8990877-lyuversy-blochki.
[7] Liuversy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://alvi-furniture.com/furnitura/lyuversy-optom.
[8] POLISHCHUK O.S.: Polimerni materialy dlia vyrobnytstva vyrobiv lehkoi promyslovosti ta yikh fizyko-mekhanichni vlastyvosti / O.S. Polishchuk, A.K. Karmalita, O.P. Burmistenkov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – 2(259), 2018, s. 134–140.
[9] Rolled rim grommet dies with hole piercing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.micronamerica.com/sub-categories/rolled-rim-grommet-dies-with-hole-piercing.

ZWIĘKSZENIE WYDAJNOŚCI MONTAŻU ODZIEŻOWYCH ELEMENTÓW METALOWYCH W PRZEMYŚLE LEKKIM

Streszczenie: Obecnie istnieje duży asortyment metalowych dodatków odzieżowych dla przemysłu lekkiego: oczka, klamry do butów, guziki, nity itp. Jakościowa instalacja metalowych kształtek w produktach przemysłu lekkiego jest poważnym problemem i zależy od różnych czynników. Dlatego teoretyczne i eksperymentalne badania w tej dziedzinie są ważne i aktualne w dzisiejszych czasach.
Najpopularniejszymi rodzajami metalowych dodatków stosowanych w przemyśle krawieckim, obuwniczym, skórzanym i galanteryjnym są oczka metalowe i zapięcia. Podczas instalowania tych elementów w tradycyjny sposób dochodzi do nieuzasadnionych strat czasowych pomiędzy tymi operacjami.

Jednym ze sposobów zwiększenia wydajności pracy jest połączenie operacji technologicznych wykrawania otworów w pierścieniach i ich mocowania w materiale. Tę metodę instalacji można zastosować do kształtek o cylindrycznej formie i ostrych krawędziach.
Aby zbadać działanie instalacji metalowych pierścieni w produktach przemysłu lekkiego, opracowano metodę instalacji i przeprowadzono badania eksperymentalne.
Badania eksperymentalne potwierdziły możliwość wykorzystania krawędzi tnącej oczka metalowego jako narzędzia roboczego dla stempla, co z kolei pozwoliło połączyć operacje wykrawania i montażu, zmniejszyć liczbę narzędzi roboczych i zwiększyć wydajność.

Słowa kluczowe: przemysł lekki, metalowe dodatki, przelotki, prasa do montażu

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 69–77
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Łukasz SKOWROŃSKI, Olaf STRAUSS

ŚWIETLNE WŁAŚCIWOŚCI SZKIEŁ Z KOLOROWYMI INTERFERENCYJNYMI POWŁOKAMI TYPU TiO_2/Ti OTRZYMANYMI METODĄ MAGNETRONOWĄ

Streszczenie: Powłoki funkcjonalne nakładane na szkło modyfikują jego cechy lub nadają mu zupełnie nowe właściwości, zmieniając jednocześnie właściwości optyczne całego układu (warstwa/warstwy-podłoże). Interferencyjne kolorowe powłoki dekoracyjne typu TiO_2/Ti/TiO_2/szkło otrzymano z zastosowaniem magnetronu przemysłowego. Świetlne właściwości otrzymanych układów określono zgodnie z normą PN-EN 410. Wykazano, że zarówno grubości warstw TiO_2, jak i Ti znacząco wpływają na parametry zdefiniowane w wyżej wymienionej normie.

Słowa kluczowe: powłoki dekoracyjne, przepuszczalność światła, odbicie światła, dwutlenek tytanu, tytan

1. WPROWADZENIE

Szkło jest jednym z podstawowych materiałów używanych w nowoczesnym budownictwie. Stosowane jest w pakietach przeszkleń w różnych konstrukcjach okiennych, dzielących/oddzielających fragmenty pomieszczeń oraz jako szkło fasadowe. W ostatnich latach, wraz z rozwojem nanotechnologii, szkło staje się nośnikiem, a nanoszone warstwy nadają mu różne dodatkowe funkcje. W domach pasywnych powszechnie stosowane jest tzw. szkło niskoemisyjne, które dzięki zastosowaniu nanowarstwy srebra odbija promieniowanie długofalowe (cieplne), ograniczając straty energii [4]. W różnego typu wyświetlaczach oraz niektórych typach ogniw słonecznych stosowane są transparentne powłoki przewodzące, do których zaliczyć można ITO (tlenek indowo-cynowy; ang. *indium thin oxide*), AZO (tlenek cynku domieszkowany aluminium; ang. *aluminum doped zinc oxide*) oraz FTO (tlenek cynku domieszkowany fluorem; ang. *fluoride doped zinc oxide*) [6]. Duże nadzieje wiąże się z powłokami elektrochromowymi, które zapewniają regulację ilości przepuszczanego światła w dość dużym zakresie [2], czyli mogą zastąpić żaluzje.

Powyżej wymieniono tylko nieliczne, wybrane powłoki funkcjonalne. Nakładane są one różnymi metodami na szkło. Jedną z najpopularniejszych technik jest metoda magnetronowa, stosowana bardzo często w hutach szkła do nanoszenia warstw funkcjonalnych bezpośrednio na gorące podłoże. Technika ta jest również stosowana do otrzymywania różnych typów powłok w późniejszym okresie [10–15, 17].

[1] dr inż. Łukasz SKOWROŃSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Instytut Matematyki i Fizyki, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: lukasz.skowronski@utp.edu.pl
[2] mgr inż. Olaf STRAUSS, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Instytut Matematyki i Fizyki, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

Praca dotyczy właściwości świetlnych [8] szkieł z powłokami dekoracyjnymi na bazie dwutlenku tytanu i tytanu [11–14, 17] nałożonych na szkło metodą magnetronową z impulsowym wstrzykiwaniem gazu do komory roboczej [15, 16]. Dzięki ciągłemu wzbudzaniu i wygaszaniu plazmy cząsteczki fazy gazowej nie tracą swojej energii (lub tracą ją tylko w niewielkim stopniu) przed kondensacją na powierzchni podłoża [15, 16]. Proces ten zapewnia odpowiedną adhezję warstw do podłoża pomimo niestosowania jego dodatkowej aktywacji termicznej.

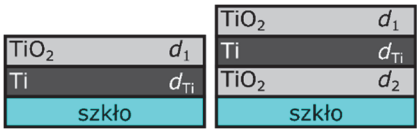
W zakresie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego dwutlenek tytanu jest materiałem nieabsorbującym, a efekt barwny układów TiO_2/Ti/TiO_2/szkło związany jest głównie z interferencją światła w zewnętrznej warstwie TiO_2 [1, 10–15, 17]. Dla rożnych grubości zewnętrznej warstwy dwutlenku tytanu można otrzymać rożne kolory powłok (od żółtego, przez pomarańczowy, czerwony i fioletowy do niebieskiego) [11–14]. Wymienione kolory dotyczą grubości warstw TiO_2 w zakresie od około 18 nm do 60 nm [11–14]. Dla większych grubości warstwy dielektrycznej możliwe jest również uzyskanie koloru zielonego i różowego [1]. W półprzezroczystych układach TiO_2/Ti/TiO_2/szkło istotną rolę gra powłoka metaliczna. Im jest grubsza (do 100 nm; dla większych grubości zmiana efektu jest pomijalnie mała), tym kolor powłoki jest bardziej nasycony, lecz jednocześnie maleje ilość przepuszczanego przez nią światła [12].

Zastosowanie warstw na powierzchni szkła lub innego typu modyfikacja jego powierzchni wpływa na zmianę właściwości optycznych całego układu (warstwa/warstwy-podłoże). W pracy stwierdzono, że grubości nanowarstw TiO_2 i Ti znacząco wpływają na przepuszczalność i odbicie światła. Przedstawiono również tendencję tych zmian. Wyżej wymienione współczynniki wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 410 [8].

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK ORAZ ZASTOSOWANE METODY POMIAROWE

1.1. Przygotowanie próbek

Układy TiO_2/Ti/TiO_2/szkło były przygotowane poprzez naprzemienne nakładanie warstw TiO_2 oraz Ti, przy czym część próbek otrzymano, pomijając warstwę dwutlenku tytanu pomiędzy tytanem a szkłem. Strukturę wytworzonych próbek przedstawiono na rysunki 1. Zarówno warstwy metaliczne, jak i dielektryczne były otrzymane zmodyfikowaną metodą magnetronową, charakteryzującą się impulsowym wstrzykiwaniem gazu do komory urządzenia (ang. GIMS – *gas impulse injection magnetron sputtering*) [15, 16] wykorzystując komercyjną linię magnetronową w firmie BOHAMET S.A. [3].



Rys. 1. Schemat wytworzonych układów interferencyjnych TiO_2/Ti TiO_2/szkło
Fig. 1. The diagram of produced interference TiO_2/Ti TiO_2/glass coatings

Podłoże (szkło mikroskopowe o grubości 1 mm) przed nanoszeniem warstw było odtłuszczane w acetonie, alkoholu etylowym i izopropylowym z wykorzystaniem płuczki ultradźwiękowej. Ponadto, bezpośrednio przed nakładaniem warstw, zastosowano czyszczenie plazmowe.

W celu otrzymania warstw TiO_2 i Ti zastosowano dwie tytanowe tarcze magnetronowe o wymiarach 2500 mm × 100 mm× 10 mm. Każda z nich była zasilana zasilaczem typu DPS 20 kW/1000 V (ang. *Dora Power System*) [9], w którym częstotliwość zmian napięcia wynosiła 100 kHz z modulacją 2 kHz [8]. Odległość pomiędzy podłożem a tarczą wynosiła 140 mm.

Warstwy tytanowe nakładano w plazmie argonowej przy średnim ciśnieniu 0,07 Pa, natomiast powłoki TiO_2 w plazmie tlenowo-argonowej (0,21 Pa). Stosunek ciśnień parcjalnych tlenu do argonu wynosił 4 do 1. Czystości zastosowanych gazów wynosiły 5 N. Początkowe ciśnienie w komorze (przed nanoszeniem warstw) było niższe niż 0,01 Pa. Różne grubości warstw TiO_2 i Ti otrzymano, zmieniając czas ich wzrostu w zakresie od 10 s do 90 s dla warstw metalicznych oraz od 270 s do 1500 s dla zewnętrznej warstwy tlenkowej. Warstwę TiO_2 pomiędzy Ti a szkłem nakładano przez 1100 s.

1.2. Zastosowane metody pomiarowe

Widma odbiciowe i transmisyjne układów TiO_2/Ti/TiO_2/szkło zarejestrowano w zakresie od 200 nm do 2500 nm z zastosowaniem spektrofotometru Cary 5000 (Agilent) wyposażonego w sferę całkującą.

Grubości warstw TiO_2 i Ti oraz ich stałe optyczne wyznaczono metodą elipsometryczną [5] z zastosowaniem urządzenia V-VASE (J.A. Woollam Co., Inc.). Azymuty elipsometryczne zmierzono w zakresie energii padających fotonów od 0,6 eV (2100 nm) do 6,5 eV (190 nm) dla trzech kątów padania promieniowania elektromagnetycznego (65°, 70°, 75°). Sposób wyznaczenia stałych optycznych oraz grubości warstw został przedstawiony w pracy [12].

1.3. Przepuszczalność oraz odbicie światła

Współczynniki odbicia R(λ) oraz transmisji T(λ) są wielkościami zależnymi od długości fali. W zastosowaniach inżynierskich częściej jednak stosuje się pewne uśrednione współczynniki, które są zdefiniowane w normie PN-EN 410 zatytułowanej „Szkło w budownictwie – określanie świetlnych i słonecznych właściwości oszklenia". Współczynniki te oblicza się, bazując na zmierzonych widmach R(λ) oraz T(λ). Przepuszczalność (τ_v) oraz odbicie (ρ_v) światła dana są wzorami:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380\ nm}^{780\ nm} D_\lambda T(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\ nm}^{780\ nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \tag{1}$$

oraz

$$\rho_v = \frac{\sum_{\lambda=380\ nm}^{780\ nm} D_\lambda R(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\ nm}^{780\ nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \tag{2}$$

gdzie:

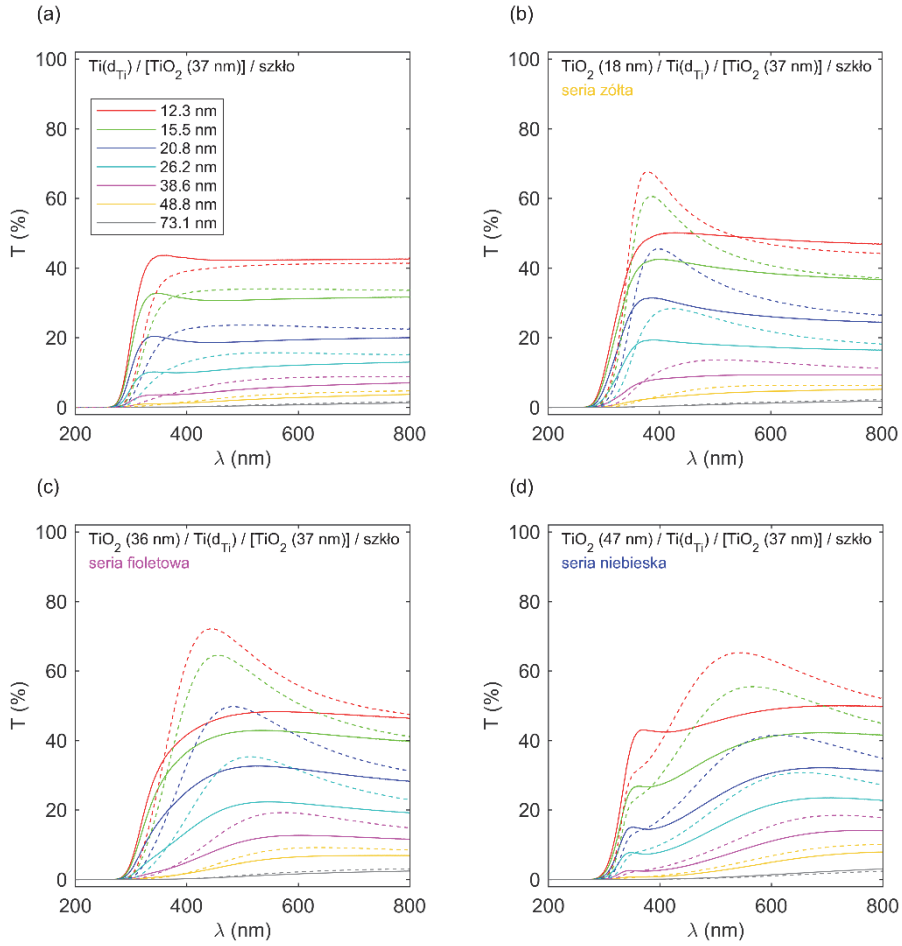
D_λ – względny widmowy rozkład źródła światła D65,
$V(\lambda)$ – widmowa skuteczność świetlna w warunkach widzenia fotopowego,
$T(\lambda)$ – współczynnik transmisji,
$R(\lambda)$ – współczynnik odbicia,
$\Delta\lambda$ – przedział długości fal.

Współczynniki dane wzorami (1)–(2) obliczono, implementując odpowiednie wyrażenia w programie Matlab.

3. WYNIKI

Na rysunku 2a. przedstawiono widma transmisyjne warstw tytanowych naniesionych na szkło oraz szkło pokryte warstwą dwutlenku tytanu o grubości 37 nm. W przypadku warstw metalicznych współczynnik transmisji w zakresie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego zawiera się w przedziale od około 40% do kilku procent odpowiednio dla próbek z najcieńszą i najgrubszą warstwą tytanu, przy czym (generalnie) dla próbek z dodatkową warstwą dwutlenku tytanu pomiędzy szkłem i Ti wartości T są nieco większe. Podobną zależność można zaobserwować dla kolorowych powłok (rys. 2b–2d), lecz różnice w wartościach T dla poszczególnych długości fal w pobliży maksimum widma są znacznie większe. Zauważyć można również przesunięcie maksimum w widmie transmisyjnym w stronę większych długości fal wraz ze wzrostem grubości zewnętrznej warstwy tlenkowej. Ten efekt jest typowy dla warstw interferencyjnych [12, 15]. Gwałtowny spadek wartości T dla długości fal mniejszych niż 300 nm związany jest z absorpcją promieniowania elektromagnetycznego przez szkło.

Bazując na zarejestrowanych widmach transmisyjnych dla wszystkich wytworzonych próbek, obliczono przepuszczalność światła według zależności (1). Wyniki zebrano w tabeli 1. Zauważyć można, że wartość τ_v maleje wraz ze wzrostem grubości warstwy metalicznej od 64% (próbka ciemnoniebieska) do 1–2%. Dla próbek z najcieńszą warstwą metaliczną przepuszczalność światła rośnie wraz ze wzrostem grubości warstwy tlenkowej. Dla pozostałych próbek maksimum przepuszczalności światła (biorąc pod uwagę poszczególne serie próbek dla stałej wartości d_{Ti}) występuje dla mniejszych grubości warstwy dielektrycznej. Ciekawy efekt można zaobserwować, porównując próbki z i bez dodatkowej warstwy TiO_2 pomiędzy podłożem a warstwą Ti, zwłaszcza dla próbek z grubszymi warstwami tlenkowymi. Dla układów z dodatkową warstwą tlenkową pomiędzy tytanem a szkłem przepuszczalność światła jest większa (nawet o 16%) niż dla próbek bez niej. Zjawisko to można wytłumaczyć dodatkowymi odbiciami światła na granicy szkło TiO_2 i TiO_2/szkło.



Rys. 2. Widma transmisyjne układów interferencyjnych TiO_2/Ti TiO_2/szkło dla wybranych grubości warstw TiO_2. Linie ciągłe dotyczą powłok bez warstwy TiO_2 pomiędzy szkłem i Ti, natomiast linie przerywane z jej uwzględnieniem. Widma transmisyjne układów TiO_2/Ti/szkło zostały zaczerpnięte z pracy [12]

Fig. 2. Transmittance spectra of the produced TiO_2/Ti TiO_2/glass samples for chosen thicknesses of TiO_2 layer. Solid and dashed line are related to systems without and with the TiO_2 between glass and Ti. The data recorded for TiO_2/Ti/glass systems were taken from [12]

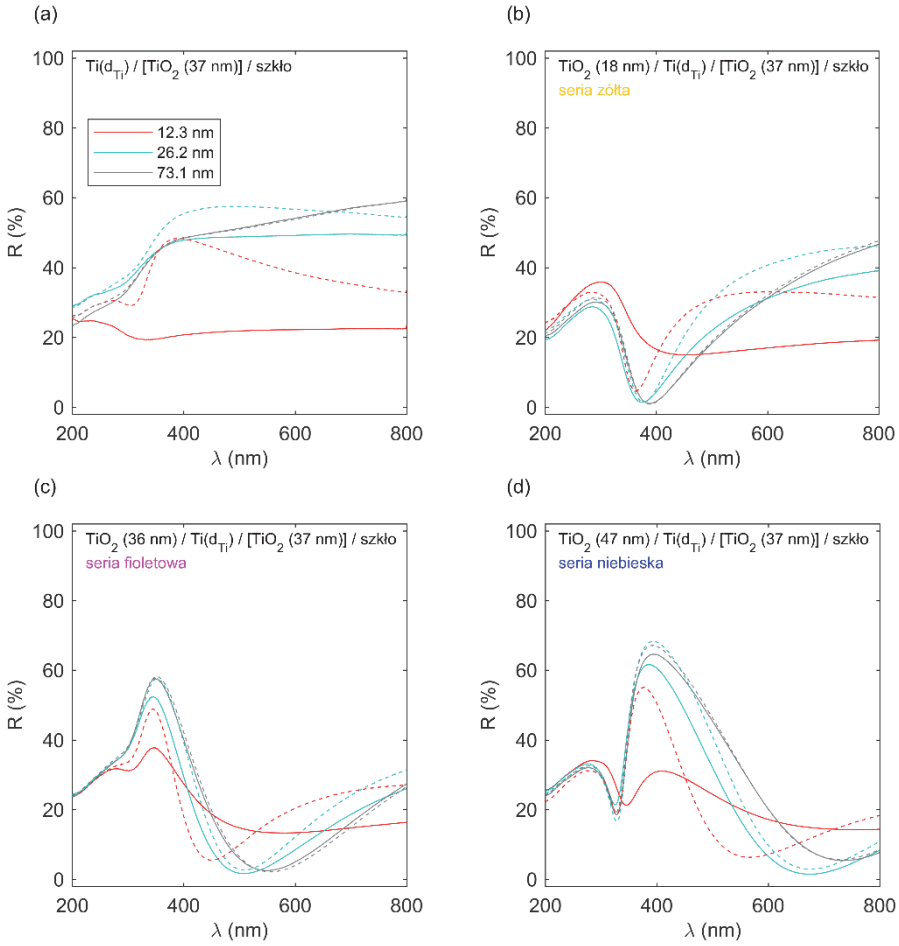
Tabela 1. Przepuszczalność światła (τ_v) dla próbek TiO_2/Ti/TiO_2/szkło w zależności od grubości warstwy Ti i zewnętrznej warstwy TiO_2. Wartości w tabeli dotyczą układów z/bez dodatkowej warstwy pomiędzy podłożem i Ti

Table 1. Luminous transmittance (τ_v) for TiO_2/Ti/TiO_2/glass samples as a function of thickness of Ti and the external TiO_2 layer. Values refer to systems with/without the TiO_2 layer between glass and Ti

Grubość warstwy TiO_2 / d_1 (nm)	Grubość zewnętrznej warstwy Ti \ d_{Ti} (nm)							
		12	16	21	26	39	49	73
		Przepuszczalność światła / τ_v (%)						
	0	41 / 42	34 / 31	23 / 20	16 / 12	8 / 6	4 / 3	1 / 1
	11 (z)	46 / 47	39 / 36	28 / 24	19 / 14	11 / 8	5 / 4	1 / 1
	15 (ż)	48 / 48	41 / 38	31 / 26	22 / 16	12 / 8	6 / 4	1 / 1
	18 (p)	49 / 49	43 / 39	33 / 27	23 / 18	13 / 9	6 / 4	1 / 1
	22 (cz1)	52 / 50	46 / 40	36 / 28	26 / 19	15 / 10	7 / 5	2 / 1
	27 (cz2)	54 / 50	49 / 41	39 / 29	29 / 20	16 / 11	8 / 5	2 / 1
	36 (f)	60 / 48	55 / 43	45 / 32	33 / 22	19 / 12	8 / 6	2 / 1
	40 (n1)	63 / 48	56 / 41	43 / 30	30 / 21	15 / 11	7 / 5	1 / 1
	47 (n2)	64 / 48	54 / 39	39 / 28	26 / 19	13 / 9	5 / 4	1 / 1

Orientacyjne kolory próbek:
z – złoty, ż – żółty, p – pomarańczowy, cz1 – czerwony, cz2 – ciemnoczerwony, f – fioletowy, n1 – niebieski, n2 – ciemnoniebieski

Na rysunku 3. przedstawiono widma odbiciowe dla próbek z wybranymi grubościami warstw tytanowych, natomiast w tabeli 2 zebrano współczynniki odbicia światła wyznaczone według zależności (2). Dla układów metalicznych (rys. 3a), w których $d_{Ti} \leq 39$ nm większe wartości R wykazują próbki z dodatkową warstwą tlenkową pomiędzy szkłem a podłożem. Prowadzi to do dużych różnic w wartościach przepuszczalności światła. Dla próbek z najmniejszą grubością Ti ($d_{Ti} = 12$ nm) różnica ta wynosi 19% i stopniowo maleje wraz ze wzrostem grubości warstwy metalicznej. Dla próbek z najgrubszą warstwą tytanu ($d_{Ti} = 73$ nm) kształt widm odbiciowych jest taki sam, a przepuszczalność światła wynosi 53%. W przypadku układów z barwnymi warstwami w widmach odbiciowych można zaobserwować minimum charakterystyczne dla układów interferencyjnych [1, 11–14], którego położenie i kształt związane są bezpośrednio z kolorem próbki [1, 11–14]. Warto podkreślić, że dla układu bez dodatkowej warstwy TiO_2, dla której $d_{Ti} = 12$ nm minimum to nie jest wyraźne, co skutkuje znacznie mniejszym nasyceniem koloru, niż w przypadku pozostałych grubości Ti [12]. Zastosowanie dwutlenku tytanu pomiędzy szkłem a Ti, na skutek dodatkowych odbić w tej warstwie, prowadzi do powstania w widmie odbiciowym wspomnianego minimum i bardziej nasyconego koloru próbki. W przypadku kolorowych próbek największe różnice w wartościach ρ_v dla układów z i bez dodatkowej warstwy tlenkowej zaobserwować można również w przypadku próbek z $d_{Ti} = 12$ nm. Zanikają one wraz ze wzrostem grubości warstwy metalicznej.



Rys. 3. Widma odbiciowe układów interferencyjnych TiO_2/Ti TiO_2/szkło dla wybranych grubości warstw TiO_2 oraz Ti. Linie ciągłe dotyczą powłok bez warstwy TiO_2 pomiędzy szkłem a Ti, natomiast linie przerywane z jej uwzględnieniem. Widma odbiciowe układów TiO_2/Ti/szkło zostały zaczerpnięte z pracy [12]

Fig. 3. Reflectance spectra of the produced TiO_2/Ti TiO_2/glass samples for chosen thicknesses of TiO_2 and Ti layers. Solid and dashed line are related to systems without and with the TiO_2 between glass and Ti. The data recorded for TiO_2/Ti/glass systems were taken from [12]

Tabela 2. Odbicie światła (ρ_v) dla próbek TiO_2/Ti/TiO_2/szkło w zależności od grubości warstwy Ti i zewnętrznej warstwy TiO_2. Wartości w tabeli dotyczą układów z/bez dodatkowej warstwy pomiędzy podłożem a Ti

Table 2. Luminous reflectance (ρ_v) for TiO_2/Ti/TiO_2/glass samples as a function of thickness of Ti and the external TiO_2 layer. Values refer to systems with/without the TiO_2 layer between glass and Ti

Grubość warstwy TiO_2 / d_1 (nm)	Grubość zewnętrznej warstwy Ti / d_{Ti} (nm)							
		12	16	21	26	39	49	73
		Odbicie światła / ρ_v (%)						
	0	41 / 22	44 / 30	51 / 40	57 / 49	58 / 55	57 / 56	53 / 53
	11 (z)	37 / 19	39 / 23	43 / 31	48 / 39	48 / 43	45 / 44	40 / 39
	15 (ż)	34 / 17	35 / 19	37 / 25	41 / 33	40 / 36	37 / 35	31 / 30
	18 (p)	32 / 16	32 / 17	34 / 22	37 / 27	35 / 32	32 / 31	27 / 26
	22 (cz1)	28 / 15	27 / 15	27 / 16	28 / 21	25 / 22	22 / 22	18 / 17
	27 (cz2)	25 / 15	23 / 13	21 / 12	21 / 15	18 / 16	14 / 15	11 / 11
	36 (f)	16 / 14	13 / 10	8 / 6	8 / 5	7 / 5	6 / 6	4 / 4
	40 (n1)	10 / 19	6 / 11	5 / 6	8 / 6	15 / 12	17 / 15	16 / 15
	47 (n2)	8 / 20	8 / 14	14 / 13	23 / 17	30 / 27	33 / 31	31 / 31

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono widma odbiciowe i transmisyjne układów interferencyjnych TiO_2/Ti/TiO_2/szkło wytworzonych metodą magnetronową w warunkach przemysłowych. Bazując na normie PN-EN 410 wyznaczono przepuszczalność i odbicie światła dla wytworzonych próbek. Wykazano, że wraz ze wzrostem grubości warstwy metalicznej maleje przepuszczalność światła, przy czym (generalnie) nieco większe wartości wykazują układy z dodatkową warstwą TiO_2 pomiędzy szkłem a tytanem. Największe różnice przepuszczalności światła zaobserwowano dla próbek z najcieńszą warstwą metaliczną, przy czym zanikają one wraz ze wzrostem jej grubości.

5. LITERATURA

[1] ANTOŃCZAK A.J., STĘPAK B., KOZIOŁ P.E., ABRAMSKI K.M.: The influence of process parameters on the laser-induced coloring of titanium, Applied Physics A 115, 2014, 1003–1013.

[2] CRONIN J.P.: Electrochromic Coatings. [W:] Aegerter M.A., Mennig M. (eds) Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users. Springer, Boston, MA, 2004.

[3] DOMANOWSKI P., WAWRZAK A.: Automation of thin film deposition process based on magnetron sputtering, J. Mach. Eng. 2, 2012, 111–119.

[4] FERRARA M., CASTALDO A., ESPOSITO S., D'ANGELO A., GUGLIELMO A., ANTONAIA A.: AlN–Ag based low-emission sputtered coatings for high visible transmittance window, Surface Coatings and Technology 295, 2016, 2–7.

[5] FUJIWARA H.: Spectroscopic Ellipsometry. Principles and Applications. JohnWiley & Sons Ltd., Chichester UK, 2009.

[6] GINLEY D.S., BRIGHT C.: Transparent Conducting Oxides, MRSBulletin 25, 2000, 15–18.

[7] NOCUŃ M.: Powłoki funkcyjne na szkle – rodzaje, właściwości, perspektywy rozwoju, Świat Szkła 1, 2010, 44–49.

[8] PN-EN 410:2011, Szkło w budownictwie – określenie świetlnych i słonecznych właściwości oszklenia

[9] POSADOWSKI W.M., WIATROWSKI A., DORA J., RADZIMSKI Z.J.: Magnetron sputtering process control by medium-frequency power supply parameter. Thin Solid Films 516, 2008, 4478–4482
[10] SKOWRONSKI L., SZCZESNY R., ZDUNEK K.: Optical and microstructural characterization of amorphous-like Al_2O_3, SnO_2 and TiO_2 thin layers deposited using a pulse gas injection magnetron sputtering technique, Thin Solid Films, 632, 2017, 112–118.
[11] SKOWROŃSKI Ł., TRZCINSKI M., ANTOŃCZAK A.J., DOMANOWSKI P., KUSTRA M., WACHOWIAK W., NAPARTY M.K., HILLER T., BUKALUK A., WRONKOWSKA A.A.: Characterisation of coloured TiO_x/Ti/glass systems, Applied Surface Science 322, 2014, 209–214.
[12] SKOWRONSKI L., WACHOWIAK A.A., GRABOWSKI A.: Characterization of optical and microstructural properties of semitransparent TiO_2/Ti/glass interference decorative coatings, Applied Surface Science 388, 2016, 731–740.
[13] SKOWRONSKI L., WACHOWIAK A.A., WACHOWIAK W.: Optical and microstructural properties of decorative Al/Ti/TiO_2 interference coatings, Applied Surface Science, 421, 2017, 794–801.
[14] SKOWRONSKI L., WACHOWIAK A.A., ZDUNEK K., TRZCINSKI M., NAPARTY M.K.: TiO_2 – based decorative coatings deposited on the AISI 316L stainless steel and glass using an industrial scale magnetron, Thin Solid Films, 627, 2017, 1–8.
[15] SKOWRONSKI L., ZDUNEK K., NOWAKOWSKA-LANGIER K., CHODUN R., TRZCINSKI M., KOBIERSKI M., KUSTRA M., WACHOWIAK A., WACHOWIAK W., HILLER T., GRABOWSKI A., KURPASKA Ł., NAPARTY M.: Characterization of microstructural, mechanical and optical properties of TiO_2 layers deposited by GIMS and PMS methods, Surface and Coatings Technology 282, 2015, 6–23
[16] ZDUNEK K., NOWAKOWSKA-LANGIER K., DORA J., CHODUN R.: Gas injection as a tool for plasma process control during coating deposition, Surface and Coatings Technology 228, 2013, S367–S373.
[17] ZDUNEK K., SKOWRONSKI L., CHODUN R., NOWAKOWSKA-LANGIER K., GRABOWSKI A., WACHOWIAK W., OKRASA S., WACHOWIAK A., STRAUSS O., WRONSKOWSKI A., DOMANOWSKI P.: Novel gims technique for deposition of coloured Ti/TiO_2 coatings in industrial scale. Material Science-Poland 34, 2016, s. 137–141

LUMINOUS PROPERTIES OF GLASS WITH INTERFERENCE TiO_2/Ti – BASED COATINGS PRODUCED BY MAGNETRON SPUTTERING

Summary: Functional coatings deposited on glass modify its features or give it completely new properties, simultaneously changing optical properties of the whole system (layer/layers-substrate). Interference decorative TiO_2/Ti/TiO_2/glass coatings were produced using magnetron sputtering technique at industrial conditions. Luminous properties of the obtained systems were determined according norm EN 410. Showed that thickness of both TiO_2 and Ti significantly have an influence on parameters defined in the above mentioned norm.

Key words: decorative coatings, luminous transmittance, luminous reflectance, titanium dioxide, titanium

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
11(6)/2018, 79–90
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Wojciech SZMYT

OPTYMALIZACJA TOPOLOGICZNA DŹWIGNI PEDAŁU HAMULCA

Streszczenie: Przedstawiono sposób przeprowadzenia optymalizacji topologicznej dźwigni pedału hamulca w programie solidThinking Inspire. Pokazano geometrię przed optymalizacją, nadane warunki brzegowe optymalizacji oraz obliczeń wytrzymałościowych, a także geometrię po optymalizacji. Porównano wyniki obliczeń wytrzymałościowych oraz masy badanych obiektów przed i po optymalizacji. Zoptymalizowana geometria spełniła przyjęte kryteria przy jednoczesnym zmniejszeniu masy o 34,1%.

Słowa kluczowe: MES, optymalizacja topologiczna, motoryzacja

1. WSTĘP

We wszelkich pojazdach masa ma krytyczne znaczenie, gdyż im jest większa, tym potrzebny jest większy wydatek energetyczny zarówno przy przyspieszaniu, jak i hamowaniu. Przekłada się to na zwiększone zużycie paliwa (lub innego źródła energii np. prądu elektrycznego) oraz części eksploatacyjnych (tarcz i klocków hamulcowych) układu hamulcowego. Zatem mając na uwadze koszty eksploatacji oraz ekologię uzasadnione jest dążenie do zmniejszenia masy. Można tego dokonać, przeprowadzając optymalizację poszczególnych części pojazdu. Przebadano dźwignię pedału hamulca.

Optymalizacja polega na znalezieniu ekstremum funkcji celu (1) [3] w danym zakresie, przy czym zakres ten może być wyrażony jako funkcja ograniczająca (2). Największą trudnością w optymalizacji jest samo znalezienie ekstremum, ponieważ funkcje celu mogą przyjmować bardzo skomplikowane formy. Optymalizacja w ujęciu wytrzymałości materiału polega na znalezieniu geometrii, która będzie miała możliwie najniższą masę przy jednoczesnym spełnieniu warunków wytrzymałościowych.

$$\underset{x\in D}{f(x)} \rightarrow ekstremum \tag{1}$$

$$c(x) \geq 0 \tag{2}$$

gdzie:

- $f(x)$ – funkcja celu,
- x – wektor parametrów dla rozwiązywanego problemu,
- D – rozpatrywana przestrzeń rozwiązań (ang. *design space*),
- $c(x)$ – funkcja ograniczająca.

inż. Wojciech SZMYT, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz
e-mail: wszmyt@gmail.com

W przypadku obliczeń wytrzymałościowych metodą elementów skończonych można rozróżnić dwa rodzaje optymalizacji: topologiczną i topograficzną.

Optymalizacja topologiczna pozwala na zmniejszenie masy przez wygenerowanie kształtu według zadanych parametrów. Do najważniejszych z nich należą: obszar poszukiwania rozwiązania (tzw. design space) oraz dobrana funkcja celu. W przypadku optymalizacji numerycznej za funkcję celu można wybrać maksymalizację sztywności. W takim przypadku za ograniczenie przyjmuje się, ile procent objętości początkowej design space'a może zostać wykorzystane do wygenerowania kształtu. Za funkcję celu można też wybrać minimalizację masy. Tutaj za ograniczanie stosuje się naprężenia dopuszczalne. Nie jest to zalecany sposób optymalizacji topologicznej, ponieważ przy braku materiału naprężenia są zerowe. Prowadzi to do osobliwości matematycznej, która skutkuje niewłaściwym rozwiązaniem przez całkowite usunięcie materiału z obszaru poszukiwania rozwiązania.

Optymalizacja topograficzna polega na modyfikacji istniejącej geometrii. W przypadku ram zbudowanych z prętów można zmieniać poszczególne wymiary kształtowników np. średnice zewnętrzne i wewnętrzne rur. W konstrukcjach spawanych z blach można zmieniać ich grubości. Jeżeli optymalizacji podlegają elementy odlewane, można zastosować narzędzia pozwalające na edycję geometrii siatki elementów skończonych przez rozciąganie, przesuwanie oraz zmianę wymiarów poszczególnych przekrojów. Działanie tego typu narzędzi polega na tworzeniu domen bazujących na siatce elementów skończonych. Poszczególne domeny mają elementy sterujące, które pozwalają na edycję elementów skończonych zawartych w poszczególnych domenach. Elementy sterujące można sparametryzować, przez co przeprowadzenie optymalizacji geometrii jest możliwe.

Najważniejszą różnicą między opisanymi rodzajami optymalizacji jest to, że optymalizacja topologiczna generuje kształt, a optymalizacja topograficzna modyfikuje już istniejący. Skutkuje to różnymi zastosowaniami wymienionych sposobów optymalizacji. Optymalizację topologiczną stosuje się tam, gdzie istnieje dowolność kształtu. To znaczy, gdy projektowana geometria nie jest znacznie ograniczona innymi elementami konstrukcji oraz technologia wykonania dopuszcza odlewanie lub drukowanie 3D. Pozwala to na wykonanie złożonych kształtów wygenerowanych przez algorytm optymalizacyjny. Optymalizacja topologiczna przydaje się głównie w początkowej fazie projektowania oraz w przypadku projektowaniu elementów odlewanych czy drukowanych w 3D. Optymalizację topograficzną stosuje się, gdy geometria może zmienić się tylko w pewnym zakresie ze względu na ograniczenia dostępnej przestrzeni lub wymagany sposób wykonania np. zgrzewanie blach. Optymalizacja topograficzna jest szczególnie przydatna w optymalizowaniu konstrukcji, ram spawanych z kształtowników oraz blach.

Można także dokonać optymalizacji przez wygenerowanie kształtu poprzez optymalizację topologiczną. Następnie uzyskaną geometrię zoptymalizować

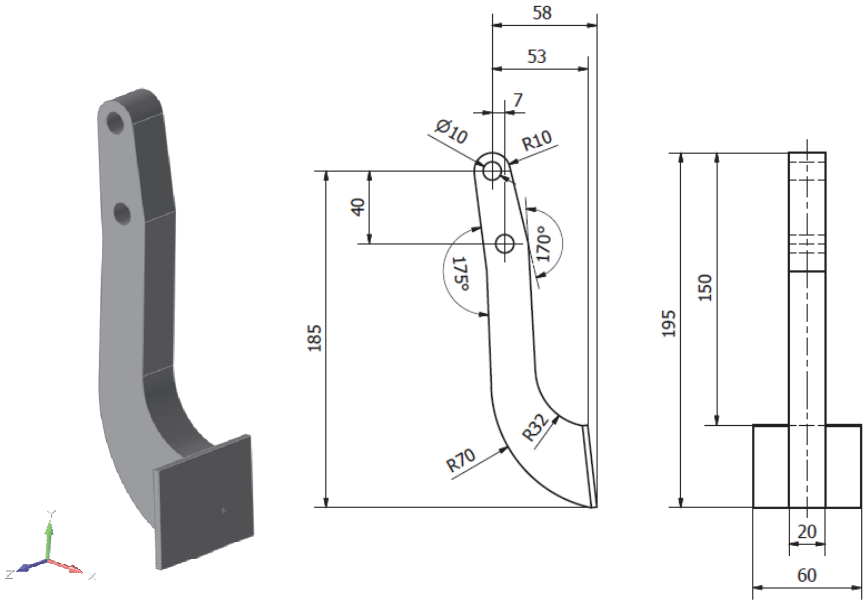
topograficznie. Można w ten sposób ocenić, w których miejscach materiał jest absolutnie niezbędny, a następnie w tych miejscach wprowadzić znormalizowane kształtowniki i sterować ich parametrami geometrycznymi, aby uzyskać optymalne rozwiązanie. Takie podejście wymaga dużego nakładu pracy, czasu i pieniędzy, dlatego jest stosowane głównie przy projektowaniu zupełnie nowej konstrukcji (np. pojazdu szynowego) lub gdy minimalizacja masy jest kluczowa jak w np. przemyśle lotniczym czy sportach motorowych.

Można również przeprowadzać optymalizację, rozpatrując częstotliwości drgań własnych jako funkcję celu, jednakże to zagadnienie nie zostało poruszone w tej publikacji.

Celem badań było przeprowadzenie optymalizacji masowej dźwigni pedału hamulca (rys. 1). Obliczenia wykonano za pomocą oprogramowania solidThinking Inspire w wersji 2017.2.1. Program ten umożliwia zarówno optymalizację topologiczną, jak i przeprowadzanie analiz wytrzymałościowych.

1.1. Obiekt badań

Pierwotna geometria (rys. 1) dźwigni (przed optymalizacją) została utworzona na podstawie ogólnych zasad konstruowania wykorzystywanych w budowie maszyn.

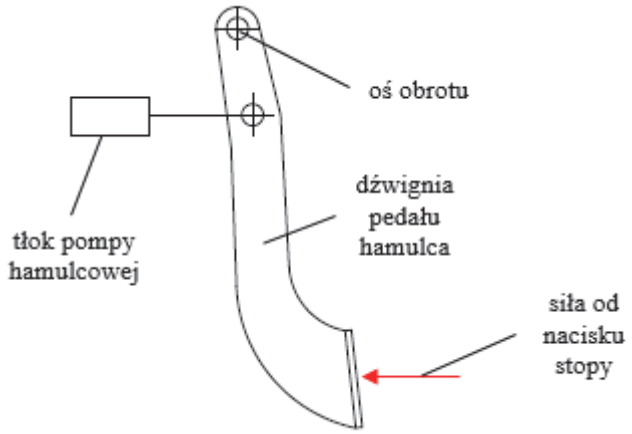


a) b)

Rys. 1. Geometria dźwigienki przed optymalizacją: a) widok ogólny, b) wymiary
Fig. 1. Geometry of the lever before optimization: a) general view, b) dimensions

Natomiast parametry optymalizacji dobrano na podstawie artykułów [2] oraz [3]. W [3] dokonano analizy dla różnych warunków optymalizacji. Stwierdzono natomiast, że w wyniku zastosowania warunku extrusion otrzymuje się nietechnologiczną geometrię, to znaczy niemożliwą do wykonania, ze względu na zbyt skomplikowany kształt. Geometria badanej dźwigni nadaje się do zastosowania warunku extrusion, dlatego postanowiono przeanalizować optymalizację z jego wykorzystaniem. Warunek extrusion stosuje się, gdy istnieje możliwość wykonania rozpatrywanego elementu za pomocą wyciągnięcia jednego szkicu (np. poprzez wycinanie laserem czy wykrawanie).

Schemat działania przedstawiono na rys. 2. Dźwignia pod wpływem nacisku stopy kierowcy obraca się wokół osi, powodując ściskanie tłoka pompy hamulcowej, przez co ciśnienie płynu w układzie hamulcowym zwiększa się.



Rys. 2. Schemat działania dźwigni pedału hamulca
Fig. 2. Operation of brake pedal lever

2. PARAMETRY OBLICZEŃ

2.1. Materiał

Przyjęto, że dźwignia jest wykonana ze stopu EN-AW 6061-T6 według PN-EN 755-2 [4]. Właściwości przedstawiono w tabeli 1.

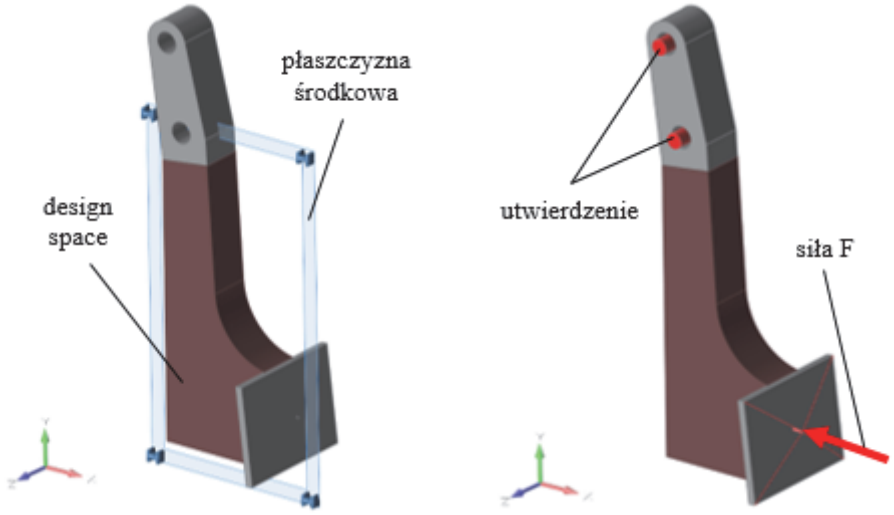
Tabela 1. Przyjęte właściwości stopu EN-AW 6061-T6
Table 1. Assumed properties of EN-AW 6061-T6 alloy

Lp.	Opis	Symbol	Jednostka	Wartość
1	Gęstość	ρ	kg / m^3	2700
2	Moduł Younga	E	MPa	70000
3	Współczynnik Poissona	ν	[–]	0,3
4	Granica plastyczności	R_e	MPa	240
5	Wytrzymałość na rozciąganie	R_m	MPa	260

2.2. Warunki brzegowe modelu

Rozpatrywaną przestrzeń możliwych rozwiązań (ang. *design space*) zaznaczono na rysunku 3. Dodatkowo wymuszono wygenerowanie rozwiązania, które umożliwia utworzenie części przez wyciągnięcie (warunek extrusion) poprzecznie do środkowej płaszczyzny pokazanej na rysunku 3. Model zamocowano, odbierając możliwość przemieszczeń w dwóch otworach. Siłę przyłożono do powierzchni pedału, którą naciska się nogą (rys. 3).

Za funkcję celu optymalizacji przyjęto maksymalizację sztywności przy pozostawieniu 20% początkowej masy design space'a.



Rys. 3. Warunki brzegowe: a) design space oraz płaszczyzna środkowa, b) miejsca utwierdzenia i przyłożenia siły

Fig. 3. Boundary conditions: a) design space and symmetry plane, b) displacement constraints and applied force

2.3. Obciążenia

Przyjęto siłę $F = 2000N$. Przyłożono ją wzdłuż osi X jak pokazano na rysunku 3. Siła F odpowiada działaniu masy 200 kg przy przyspieszeniu ziemskim $a = 10\frac{m}{s^2}$. Przyjęto, że człowiek nie jest w stanie przyłożyć większej siły za pomocą jednej nogi.

2.4. Kryteria wytrzymałościowe

Przyjęto współczynnik bezpieczeństwa $s = 1,2$. Wyliczając zależność (3) otrzymano, że maksymalne naprężenia zredukowane σ_{max} nie powinny prze-

kraczać $200MPa$ co wynika z właściwości materiałowych przedstawionych w tabeli 1.

$$\sigma_{dop} \leq \frac{\sigma_{\max}}{s} \tag{3}$$

gdzie:

σ_{dop} – naprężenia dopuszczalne von Mises [MPa],

$\sigma_{\max}$ – maksymalne naprężenia zredukowane von Mises [MPa],

s – współczynnika bezpieczeństwa.

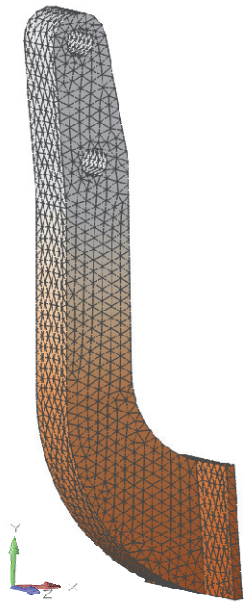
3. WYNIKI

Przeprowadzono analizę wytrzymałościową geometrii dźwigni pedału hamulca przed optymalizacją (p. 3.1) w celu porównania wyników z obliczeniami zoptymalizowanej geometrii.

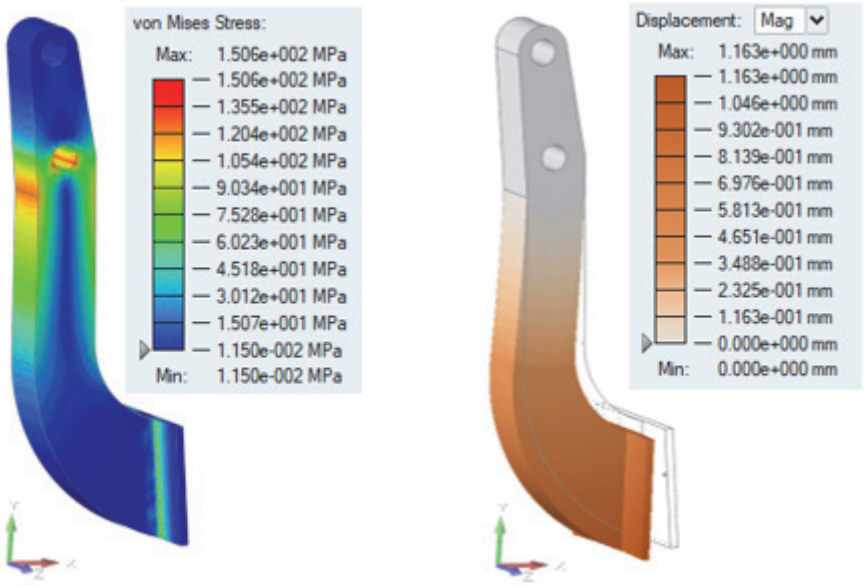
Kolejno przeprowadzono optymalizację dźwigni pedału hamulca (p. 3.2), a następnie przeprowadzono analizę wytrzymałościową uzyskanej geometrii (p. 3.3).

3.1. Analiza wytrzymałościowa geometrii przed optymalizacją

Sprawdzono jakie naprężenia oraz przemieszczenia (rys. 5) występują przy zadanym obciążeniu dla pierwotnej geometrii. Pokazano również mapę współczynnika bezpieczeństwa (rys. 6). Średnia wielkość elementów skończonych wynosiła 3 mm (rys. 4).

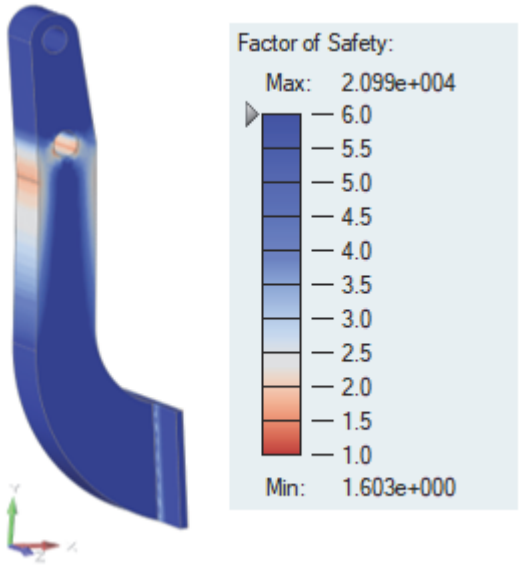


Rys. 4. Siatka elementów skończonych – geometria przed optymalizacją
Fig. 4. Mesh of finite elements – geometry before optimization



a) b)

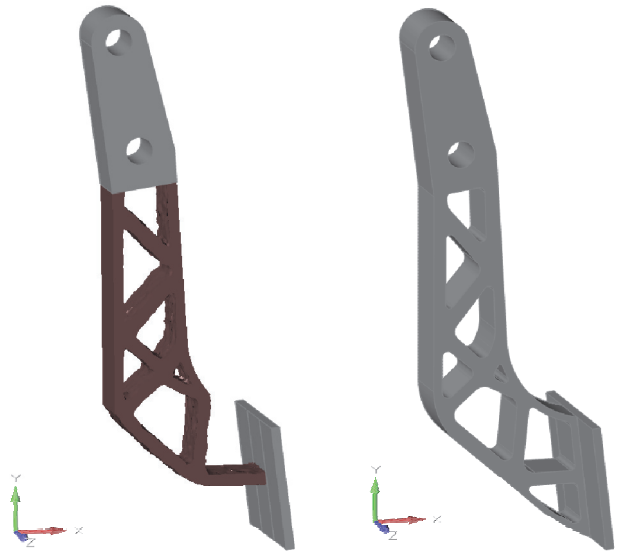
Rys. 5. Geometria przed optymalizacją: a) naprężenia von Mises, b) przemieszczenia
Fig. 5. Geometry before optimization: a) von Mises stress, b) displacement



Rys. 6. Współczynnik bezpieczeństwa – geometria przed optymalizacją
Fig. 6. Safety factor – geometry before optimization

3.2. Optymalizacja topologiczna

Uzyskaną geometrię (rys. 7) wyeksportowano do oprogramowania CAD oraz zmodyfikowano pierwotny kształt dźwigni tak, aby odpowiadała temu uzyskanemu w wyniku optymalizacji. Dodatkowo wprowadzono usztywnienia w obszarze łączenia pedału z dźwignią, ponieważ w wygenerowanej geometrii, obszar ten byłby podatny na naprężenia zginające mogące wystąpić np. podczas naciskania na górną lub dolną krawędź pedału. W związku z tym, dodano wzmocnienia łączące krawędzie pedału z dźwignią. Ma to na celu zwiększenie wytrzymałości tego obszaru poprzez zwiększenie momentu bezwładności. Ostateczną geometrię pokazano na rysunku 7b.

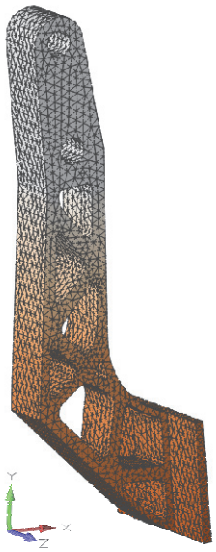


a) b)

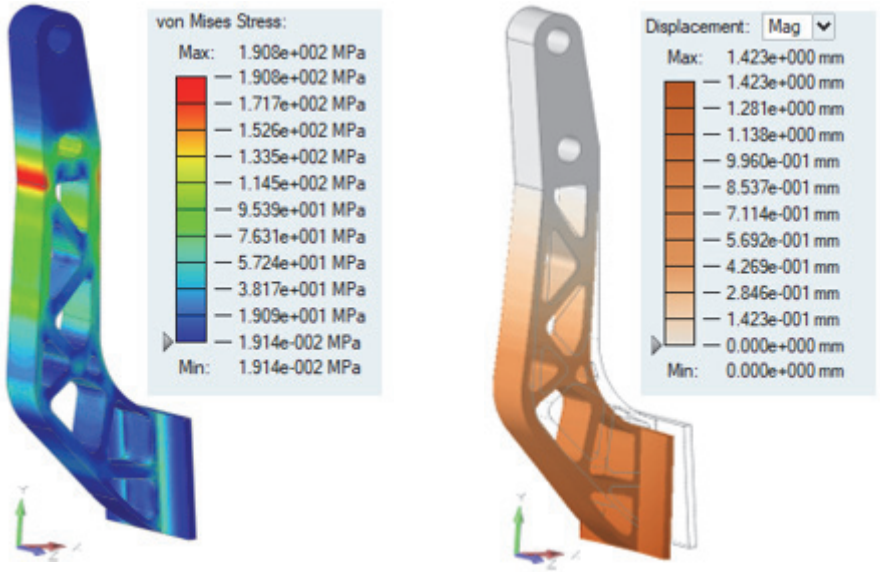
Rys. 7. Kształt uzyskany w wyniku optymalizacji a) model MES, b) model CAD
Fig. 7. Shape acquired through optimization a) FEM model, b) CAD model

3.3. Analiza wytrzymałościowa geometrii po optymalizacji

Po dokonaniu optymalizacji przeprowadzono analizę wytrzymałościową zoptymalizowanej geometrii. Zamocowanie oraz siły przyjęto jak w podrozdziale 2.5. Wyniki obliczeń przedstawiono jako mapę naprężeń zredukowanych (rys. 9), przemieszczeń zredukowanych (rys. 9) oraz współczynnika bezpieczeństwa (rys. 10). Średnia wielkość elementów skończonych wynosiła 3 mm (rys. 8).

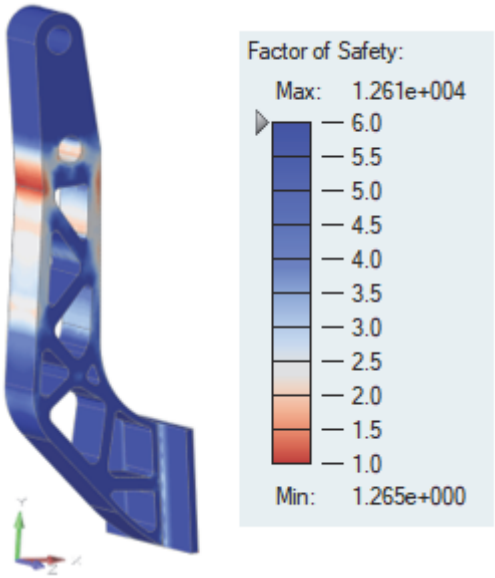


Rys. 8. Siatka elementów skończonych – geometria po optymalizacji
Fig. 8. Mesh of finite elements – geometry after optimization



a) b)

Rys. 9. Geometria po optymalizacji: a) naprężenia von Mises, b) przemieszczenia
Fig. 9. Geometry after optimization: a) von Mises stress, b) displacement



Rys. 10. Współczynnik bezpieczeństwa – geometria po optymalizacji
Fig. 10. Safety factor – geometry after optimization

4. WNIOSKI

Przeprowadzona optymalizacja masowa pozwoliła na obniżenie masy dźwigni pedału hamulca z 0,290 kg na 0,191 kg (czyli o 34,1% jak pokazano w tab. 2). Różnica 0,099 kg wydaje się niewielka, jednakże w sportach motorowych, gdzie liczą się nawet tysięczne sekundy czy w intensywnej walce koncernów motoryzacyjnych o minimalizację zużycia paliwa ze względów ekologicznych i ekonomicznych, wartość ta staje się znacząca. Szczególnie jeśli uwzględni się, że do optymalizacji masowej kwalifikuje się więcej elementów, łącznie z odlewami korpusów (np. przekładni) czy struktury nośnej pojazdu, które to maja istotny udział procentowy w masie pojazdu. Dodatkowo w pojazdach znajduję się wiele różnych wsporników, które dzięki współczesnej technologii druku 3D mogą przyjmować złożoną geometrię, co czyni z nich idealnych kandydatów do optymalizacji topologicznej. Przeprowadzając optymalizację wszystkich tych elementów zdecydowanie obniży się masę pojazdu, przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości.

Pomimo wzrostu maksymalnych naprężeń z 150,6 MPa na 190,8 MPa (o 26,7%) przyjęte kryteria wytrzymałościowe zostały zachowane. Jak widać na (rys. 8) można by przeprowadzić kolejną pętlę optymalizacyjną, ale redukcja masy byłaby niewielka z racji małej objętości materiału o niskim wytężeniu.

Przemieszczenia zredukowane wzrosły z 1,16 mm na 1,42 mm (22,4%). Różnica przemieszczeń na poziomie 0,26 mm jest na tyle niewielka w stosunku do skoku pedału hamulca (przeważnie jest to kilkanaście mm), że użytkownik pojazdu nie odczuje różnicy podczas korzystania z hamulców.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń
Table 2. Results comparison

Nazwa	Wartość przed optymalizacją	Wartość po optymalizacji	Różnica	Procentowa różnica
Maksymalne naprężenia	150,6 MPa	190,8 MPa	40,2 MPa	26,7%
Maksymalne przemieszczenia	1,16 mm	1,42 mm	0,26 mm	22,4%
Masa	0,290 kg	0,191 kg	0,099 kg	-34,1%

5. PODSUMOWANIE

Należy zwrócić uwagę, że w wykorzystanym oprogramowaniu solidThinking Inspire brakuje możliwości sprawdzenia parametrów opisujących jakość siatki elementów skończonych. Jakość siatki można ocenić jedynie wzrokowo, co nie jest wystarczające do zapewnienia dokładnych wyników.

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji uzyskano pozytywny rezultat, to znaczy udało się zredukować masę o 34,1% przy jednoczesnym zachowaniu warunków wytrzymałościowych. Natomiast należy zwrócić uwagę na to, że symulacje numeryczne, obarczone są niepewnością wyników. Z tego powodu wyniki obliczeń należy potwierdzić, przeprowadzając walidację modelu, czyli porównanie wyników obliczeń z wynikami eksperymentu, a także przeprowadzając weryfikację założeń optymalizacyjnych, szczególnie w zakresie przyjętego współczynnika bezpieczeństwa z racji odpowiedzialności badanego obiektu za bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego. Autor w przyszłych pracach badawczych planuje dokładniej przebadać rozpatrywaną dźwignię pedału hamulca i dokonać walidacji modelu.

6. LITERATURA

[1] BENDSOE M.P., SIGMUND O.: Topology Optimization: Theory, Methods and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
[2] MA Z.-D., WANG H., KIKUCHI N., PIERRE C., RAJU B.: Experimental validation and prototyping of optimum designs obtained from topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006.
[3] MANTOVANI S., PRESTI I.L., CAVAZZONI L., BALDINI A.: Influence of manufacturing constraints on the topology optimization of an automotive dashboard. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 2017, Modena, Italy.
[4] PN-EN 755-2:2014-02 Aluminium i stopy aluminium – Pręty, rury i kształtowniki wyciskane – Część 2: Własności mechaniczne
[5] SKIBICKI D., NOWICKI K.: Metody numeryczne w budowie maszyn. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, 2006.
[6] VIQARUDDIN M., RAMANA REDDY D.: Structural optimization of control arm for weight reduction and improved performance. ICAAMM, 2016.
[7] WALTON D., MOZTARZADEH H.: Design and development of an additive manufactured component by topology optimisation. 27th CIRP Design, 2017.

Wojciech SZMYT

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE BREAK PEDAL LEVER

Summary: The paper showcased topology optimization of the brake pedal lever performed in solidThinking Inspire software. Geometries before and after optimization were shown, as well as boundary conditions for optimization and strength assessment. The stresses and masses of geometries before and after optimization were compared. Optimized geometry met assumed strength criteria along with reduced mass by 34,1%.

Key words: FEM, topology optimization, automotive