POSTĘPY
nauki i techniki

Advances in Science and Technology

11/2011

Zespó³ Redakcyjny / *Editorial Commitee*:

Gabriel Borowski – *redaktor naczelny* / *Editor-in-Chief*
Monika Wrona – *sekretarz redakcji* / *Secretary*
Izolda Gorgol – *redaktor statystczny / Statistical Editor*
Sylwia Pociupany – *redaktor jêzyka polskiego / Polish Language Editor*
David Marcs – *redaktor jêzyka angielskiego / English Language Editor*
Andrzej Krzy¿ak – *sk³ad / Layout*

Redaktorzy tematyczni / *Topic Editors*:

Klaudiusz Lenik, Dorota Wójcicka-Migasiuk, Franciszek Dziubiñski,
Renata Lis, Marcin Barszcz, Sylwester Korga

Czasopismo recenzowane – kwartalnik / *Reviewed Journal – Quarterly*

Rada Programowa / *Programing Board*:

- Prof. dr hab. in¿. Klaudiusz Lenik – Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. in¿. Franciszek Kluza – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
- Prof. dr hab. in¿. Miros³aw W. Kindraczuk – National Aviation University, Kiev
- Prof. dr hab. in¿. Mykhaylo Pashechko – Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. in¿. Tadeusz Pe³czyñski – Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. in¿. Jan Senatorski – Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie
- Dr hab. in¿. Marek Jakubowski, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr hab. in¿. Franciszek Lis, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr hab. in¿. Wojciech Ozgowicz, prof. PŒl – Politechnika Œl¹ska w Gliwicach
- Dr hab. in¿. Dorota Wójcicka-Migasiuk, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr in¿. Pawe³ Chojnacki – Prezes Zarz¹du Oddzia³u SIMP w Lublinie

Adres Redakcji / *Editorial Office*:

Politechnika Lubelska
Katedra Podstaw Techniki
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38
tel. (81) 538 14 89, fax (81) 525 93 85
e-mail: pnt@pollub.pl, http://www.pnt.pollub.pl

© Copyright by Katedra Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej.

ISSN 2080-4075

Wydanie drukowane jest wersj¹ pierwotn¹

Wydawca / *Publisher*:

Oddzia³ SIMP w Lublinie
20-079 Lublin, ul. Chmielna 2a

SPIS TREŚCI
CONTENTS

Andrzej Adamkiewicz, Jakub Rutkowski
EKSPLOATACYJNA OCENA NOŚNOŚCI INFORMACYJNEJ SYSTEMU NADZORU PRACY POMOCNICZEJ TURBINY PAROWEJ JEDNOSTKI PŁYWAJĄCEJ TYPU FPSO
OPERATIONAL EVALUATION OF INFORMATIVE VALUE OF A MONITORING SYSTEM OF AN AUXILIARY STEAM TURBINE ON THE FPSO UNIT 5

Grzegorz Chruściel
MIKROSTRUKTURALNA CHARAKTERYSTYKA MECHANIZMU PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO MATERIAŁU AW 7075-T651
MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTIC OF FATIGUE FRACTURE MECHANISM IN AW 7075-T651 ALLOY 16

Kazimierz Drozd
FRAKTOGRAFICZNE I METALOGRAFICZNE BADANIA USZKODZEŃ SPRĘŻYN ZAWIESZENIA POJAZDÓW
FRACTOGRAPHY AND METALLOGRAPHY EXAMINATION OF SUSPENSION SPRINGS DAMAGES . 25

Leszek Gil, Piotr Ignaciuk
WPŁYW LICZBY KWASOWEJ NA SMARNOŚĆ BIOPALIW
INFLUENCE OF ACID NUMBER ON THE BRICITY OF BIOFUELS 37

Piotr Ignaciuk, Leszek Gil, Stefan Lisak
PORÓWNANIE EMISJI ZWIĄZKÓW TOKSYCZNYCH SILNIKA ZS ZASILANEGO OLEJEM NAPĘDOWYM I BIOPALIWAMI OPARTYMI NA ESTRACH OLEJU LNIANKI I ESTRACH OLEJU RZEPAKOWEGO
COMPARISON OF EXHAUST TOXIC EMISSIONS FROM DIESEL ENGINE FUELED WITH DIESEL FUEL AND BIOFUELS BASED ON RAPE-SEED AND CAMELIE-SEED METYL ESTERS 43

Zbigniew Korczewski
IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ TŁOKÓW SILNIKÓW OKRĘTOWYCH METODAMI ENDOSKOPOWYMI W EKSPLOATACJI
FAILURES' IDENTIFICATION OF PISTONS OF MARINE DIESEL ENGINES BY MEANS OF ENDOSCOPIC METHODS IN OPERATION 49

Norbert Radek, Bogdan Antoszewski
BADANIA EKSPLOATACYJNE POWŁOK WĘGLIKOWO-CERAMICZNYCH PRZED I PO OBRÓBCE LASEROWEJ
DETERMINING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF ELETRO-SPARK DEPOSITED TUNGSTEN CARBIDE-CERAMIC COATINGS BEFORE AND AFTER LASER TREATMENT 63

Grzegorz Koszałka, Andrzej Niewczas, Hubert Dębski, Maciej Kaczor, Leszek Taratuta, Andrzej Krzyżak
UNIWERSALNA NACZEPA O ZMIENNEJ DŁUGOŚCI DO PRZEWOZU MASZYN
UNIVERSAL EXTENDABLE SEMITRAILER FOR TRANSPORTATION OF MACHINES 71

B. Surowska, K. Beer, J. Borowicz, I. Veremchuk
WP£YW TECHNOLOGII ODLEWANIA NA JAKOŒÆ STOMATOLOGICZNEGO STOPU KOBALTU

THE INFLUENCE OF CASTING TECHNOLOGIES ON QUALITY OF DENTAL COBALT ALLOY 81

Przemys³aw Tyczewski
ANALIZA ZU¯YCIA WÊZ£ÓW TARCIA SPRÊ¯AREK CH£ODNICZYCH PRACUJ¥CYCH W WYSOKIEJ TEMPERATURZE I CIŒNIENIU

THE ANALYSIS OF FRICTION NODES OF THE REFRIGERATION COMPRESORS OPERATING AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES 89

Mariusz Walczak, Jaros³aw Bieniaœ, Barbara Surowska
ZASTOSOWANIE POW£OK SiO_2-TiO_2 W PROTETYCE STOMATOLOGICZNEJ

APPLICATTION OF THE SiO_2-TiO_2 COATINGS IN DENTAL PROSTHETICS 98

Mariusz Walczak, £ukasz Ró¿ycki
ANALIZA STANU NAPRÊ¯EÑ W TWARDYCH TKANKACH ZÊBÓW NA PRZYK£ADZIE DOLNEGO SIEKACZA Z WYKORZYSTANIEM METODY MES

ANALYSIS OF STATE STRESSES IN HARD TISSUES OF TEETH ON EXAMPLE OF LOWER INCISOR BY USING FEM METHOD 107

£ukasz Wojciechowski
TRIBOLOGICZNY ASPEKT ANALIZY SK£ADOWYCH STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY WIERZCHNIEJ

THE ANALYSIS OF SURFACE LAYER ENERGY CONDITIONS COMPONENTS IN THE TRIBOLOGICAL ASPECT 115

Mariusz Matejski, Tadeusz Graczyk
TECHNOLOGIA BADAÑ PODWODNYCH W BA£TYKU Z ZASTOSOWANIEM ZDALNIE STEROWANYCH POJAZDÓW G£ÊBINOWYCH

TECHNOLOGY OF UNDERWATER RESEARCH IN THE BALTIC SEA APPLYING REMOTELY OPERATED VEHICLES 126

Jacek Mucha, Waldemar Witkowski
ANALIZA WYTRZYMA£OŒCI NA ŒCINANIE OKR¥G£YCH PO£¥CZEÑ PRZET£OCZENIOWYCH Z CIENKIEJ BLACHY DC04

THE SHEARING STRENGTH ANALYSIS OF ROUND CLINCHING JOINTS MADE OF THIN DC04 SHEET 137

Jerzy Montusiewicz, Krzysztof Dziedzic
NAUCZANIE TRÓJWYMIAROWEJ ANIMACJI NA KIERUNKU ETI

TEACHING 3D ANIMATION WITHIN THE ETI FIELD OF STUDY 148

Zygmunt Lenik
ZASTOSOWANIE MULTIMEDIALNYCH ŒRODKÓW DYDAKTYCZNYCH W PROCESIE NAUCZANIA

APPLICATIONS OF MULTIMEDIA TEACHING AIDS IN THE PROCESS OF LEARNING 156

Ma³gorzata Mrozik
MODEL OF VEHICLE SPEED DETERMINATION BASED ON CAR BODY STRAIN

MODEL OKREŒLANIA PRÊDKOŒCI POJAZDU NA PODSTAWIE ODKSZTA£CEÑ NADWOZIA 164

Andrzej Adamkiewicz*, Jakub Rutkowski*

EKSPLOATACYJNA OCENA NOŚNOŚCI INFORMACYJNEJ SYSTEMU NADZORU PRACY POMOCNICZEJ TURBINY PAROWEJ JEDNOSTKI PŁYWAJĄCEJ TYPU FPSO

Streszczenie. Artykuł dotyczy szczególnego przypadku niesprawności turbiny parowej napędzającej prądnicę w układzie energetycznym pływającej jednostki produkcyjno-magazynująco-przeładunkowej typu FPSO. Niesprawność, jaka wystąpiła w jednym z turboparowych zespołów prądotwórczych została ujawniona przez automatyczny system nadzoru. Przedstawiono jej lokalizację, skutki oraz sposoby i efekty prób jej usunięcia. Ustosunkowano się do możliwych przyczyn zaistniałej sytuacji. Na przykładzie wybranego, szczególnie trudno rozpoznawalnego uszkodzenia eksploatacyjnego, wykazano konieczność stosowania zaawansowanych inteligentnych systemów nadzoru pracy.

Słowa kluczowe: turbina parowa, zespół prądotwórczy, uszkodzenie, jednostka pływająca.

Wprowadzenie

Powstanie i rozwój jednostek typu FPSO (ang. *Floating Production Storage and Offloading units)* podyktowała potrzeba elastycznej eksploracji złóż ropy naftowej.

Współcześnie eksploatowane FPSO są w większości jednostkami adoptowanymi z wcześniej zbudowanych zbiornikowców. Rozpatrywana jednostka została przebudowana z dwudziestoletniego tankowca w roku 2008. Na jednostkach typu FPSO turbinowe silniki parowe znajdują zastosowanie w grupie maszyn produkcji i siłowni. Służą one do napędu prądnic, pomp przeładunkowych, pomp wody zaburtowej, sprężarek i w niektórych przypadkach do napędu głównego jednostki, jeżeli jest zainstalowany [2]. Na rysunku 1 przedstawiono widok FPSO, której dotyczy treść artykułu.

FPSO są jednostkami o szczególnych właściwościach i parametrach. Charakteryzują się m.in. wysoką średnią produkcyjnością oraz rozbudowanymi układami energetycznymi. Wartość ich dziennego produktu często przewyższa kilkudziesięciokrotnie produkt finansowy jednostek transportowych. Powoduje to, że na większości jednostek FPSO stosowane są najbardziej zawansowane sposoby utrzymania i kontroli ruchu. Ze względu na wymienione właściwości jednostki typu FPSO powinny być wyposażone w wiarygodny i wysoko rozwinięty system wczesnego wykrywania niesprawności i uszkodzeń [3, 4].

Eksploatacja maszyn, a w tym turbinowych zespołów parowych, jest współcześnie procesem coraz dokładniej monitorowanym. Pozwalają na to współczesne systemy pomiarowe,

* *Katedra Diagnostyki i Remontów Maszyn, Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Szczecinie, a.adamkiewicz@am.szczecin.pl; jakubrr@o2.pl*

rejestracji i archiwizowania danych, szybsze i zminiaturyzowane komputery oraz uniwersalne i otwarte oprogramowanie. Zgromadzone dane stają się cennym zasobem informacji. Ich identyfikacja i analiza pozwala na sterowanie procesem eksploatacji turbin parowych, o ile pozyskane z systemu monitoringu informacje są wiarygodne i jednoznaczne diagnostycznie [1, 2, 3].

Rys. 1. Widok jednostki FSPO na polu naftowym

Celem artykułu jest wykazanie konieczności zachowania ograniczonego zaufania do wiarygodności informacyjnej okrętowych systemów nadzoru pracy elementów układu energetycznego statku morskiego, nawet drugiej generacji, i ich nośności diagnostycznej.

1. Identyfikacja turboparowego zespołu prądotwórczego

Utrzymanie stanu technicznego turbin parowych odnosi się przede wszystkim do zachowania ich w stanie zdatności i gotowości do użytkowana na oczekiwanym poziomie i w odpowiednim czasie. Niebagatelną rolę i znaczenie ma tu obsługiwanie techniczne i diagnostyka na potrzeby obsługiwania, wykonywana z wykorzystaniem zintegrowanych oraz autonomicznych systemów i metod diagnostycznych. Są one wykonywane w bezpośrednim kontakcie z turbiną i odgrywają w jej utrzymaniu rolę nadrzędną.

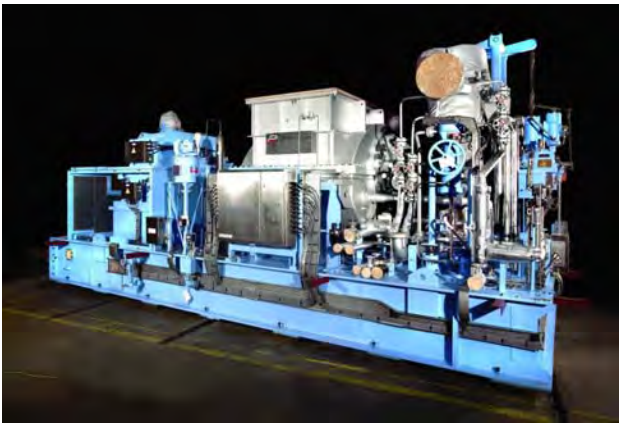
W zależności od wielkości i specyfiki jednostki, moc elektryczna potrzebna do jej bezpiecznej, niezawodnej i efektywnej pracy wacha się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu MW. Jednostki te pracują często jako „matki" na polach naftowych, gdzie zadaniem ich jest zapewnienie energii elektrycznej do zasilania odpowiedzialnych odbiorników, takich jak: wysokociśnieniowych sprężarek gazu ziemnego, wież wydobywczych itp. [1, 3].

Elektrownia jednostki FPSO po modernizacji skonfigurowana została z trzech niezależnych zespołów prądotwórczych (silnik spalinowy firmy MAN B&W 7L 23/30 plus prądnica firmy AVK) przebudowanego tankowca oraz dodatkowo zainstalowanych dwóch turboze-

społów po 27 MW każdy, w których prądnice firmy Brush są napędzane przez 10 stopniową turbiną parową firmy Peter Brotherhood typu Frame 20 o następujących parametrach:

Ciśnienie pary na dolocie do turbiny	41,0 bar G
Temperatura pary na dolocie do turbiny	400 ºC
Ciśnienie pary na odlocie z turbiny	0,18 bar A
Strumień masy pary	34 kg/s
Nominalna prędkość obrotowa wirnika turbiny mocy ciągłej	6445 obr/min
Nominalna prędkość obrotowa wirnika prądnicy mocy ciągłej	1800 obr/min
Graniczna prędkość obrotowa zespołu wirnikowego turbiny	7410 obr/min
Zakres krytycznych prędkości obrotowych wirnika turbiny	2000–4000 obr/min

Na rysunku 2 przedstawiono widok turbiny parowej firmy Peter Brotherhood napędzającej prądnicę [4, 7, 9].



Rys. 2. Widok turbiny parowej firmy Peter Brotherhood o mocy 27 MW

2. System nadzoru pracy parowego turbozespołu prądotwórczego

Poprawną pracę turbozespołów parowych zapewnia zastosowany na statku system nadzoru pracy drugiej generacji. System nadzorujący układ kontrolno-pomiarowy turbiny firmy Peter Brotherhood, oparty jest na sterownikach programowalnych PLC S7-300 oraz SCADA WinCC firmy Siemens. SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) do którego zadań należy:

- zbieranie aktualnych wyników pomiarów i ich wizualizację,
- sterowanie procesem roboczym,
- alarmowanie oraz archiwizację danych.

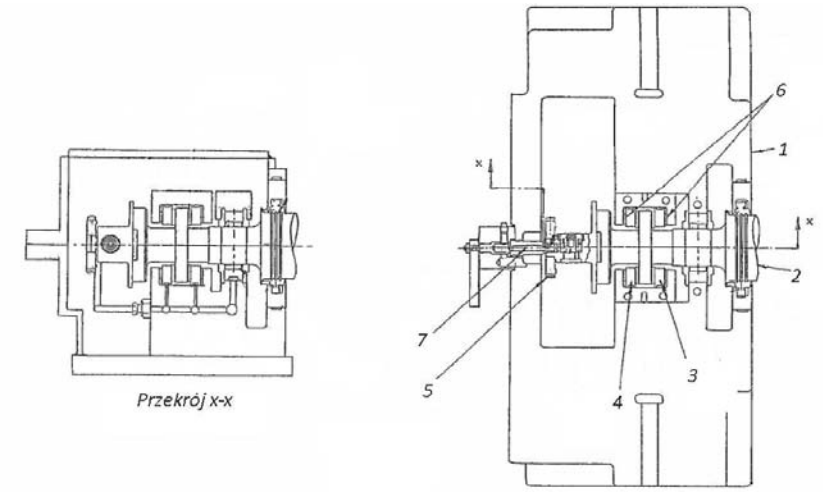
Termin SCADA odnosi się do systemu komputerowego, który pełni rolę nadrzędną, w odniesieniu do sterownika PLC. Sterownik PLC jest połączony z urządzeniami wykonawczymi turbiny (np. sterowanie zaworami, pompami) oraz aparaturą pomiarową (czujniki temperatur, ciśnień, drgań, poziomu) i zbiera aktualne dane z pracy turbiny, wykonuje automatycznie algorytmy sterowania i regulacji *on-line*. Dzięki sterownikowi PLC dane te

trafiają do systemu komputerowego SCADA, gdzie są archiwizowane oraz przetwarzane na konkretne wartości rozróżniane przez operatora. Są one łatwo odczytywane z monitora komputera (*HMI – Human Machine Interface*) [5, 6, 8]. Na rysunku 3 pokazano widok ekranów systemu monitorowania.

Rys. 3. Widok ekranów systemu monitorowania zespołu prądotwórczego

W tabeli 1 wyszczególniono ważniejsze parametry pracy turbozespołu monitorowane w systemie on-line.

W tabeli 1 drukiem wytłuszczonym wyróżniono parametr, który w rozpatrywanej niesprawności wygenerował sygnał alarmowy, informując o błędzie sygnału czujnika temperatury łożyska oporowego. Na rysunku 4 przedstawiono konstrukcję łożyska oporowego w zespole wirnikowym turbiny [7, 9].

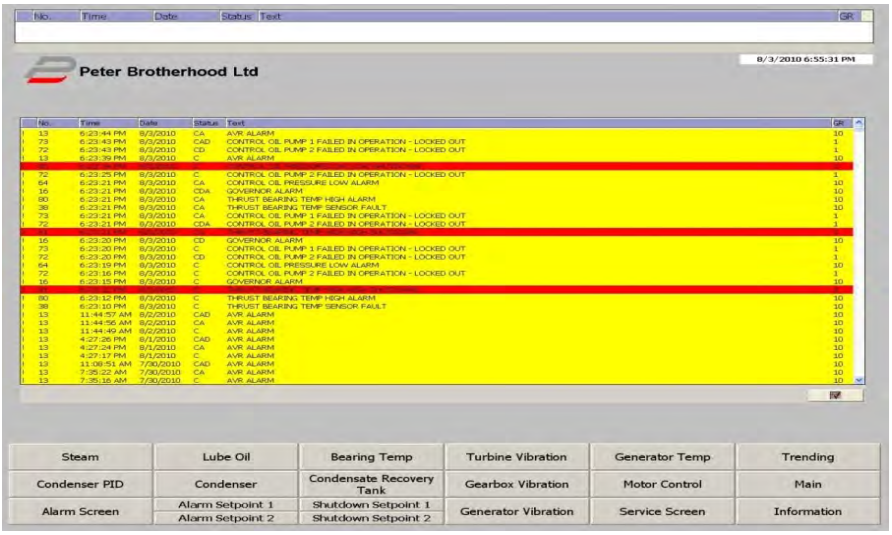


Rys. 4. Konstrukcja łożyska oporowego w zespole wirnika turbiny: 1 – kadłub; 2 – wirnik; 3 – pierścień oporowy pływający; 4 – pierścień oporowy; 5 – czujnik granicznej prędkości obrotowej; 6 – luz osiowy łożyska oporowego; 7 – kanał dolotu oleju

Tabela 1. Zestawienie parametrów monitorowanych przez system wraz z wartościami alarmowymi

L.p.	Parametr kontrolny	Wartość zadana		Jednostka
		Alarm	Zatrzymanie	
1.	Ciśnienie pary na dolocie do turbiny minimalne	35	-	Bar
2.	Ciśnienie wylotu pary maksymalne	0,35	0,45	Bar
3.	Niskie ciśnienie oleju sterującego	10	8	Bar
4.	Spadek ciśnienia oleju smarnego na filtrze	1	-	Bar
5.	Minimalne ciśnienie oleju smarnego	1,4	1	Bar
6.	Maksymalne ciśnienie pary w kadłubie turbiny	30	-	Bar
7.	Spadek ciśnienia oleju sterującego na filtrze	1	-	Bar
8.	Wysoka temperatura pary na wylocie z turbiny	105	120	°C
9.	Niska temperatura pary na dolocie	350	290	°C
10.	Wysoka temperatura pary na dolocie	420	440	°C
11.	**Wysoka temperatura łożyska oporowego**	**100**	**115**	**°C**
12.	Wysoka temp. dziobowego łożyska głównego	95	105	°C
13.	Wysoka temp. rufowego łożyska głównego	95	105	°C
14.	Wysoka temp. łożyska rufowego koła biernego przekładni	107	115	°C
15.	Wysoka temp. łożyska dziobowego koła biernego przekładni	107	115	°C
16.	Wysoka temp. wody w instalacji i chłodzenia prądnicy	65	70	°C
17.	Niski poziom skroplin w zbiorniku	20	10	%
18.	Wysoki poziom skroplin w zbiorniku	70	80	%
19.	Wysoka temp. powietrza na wylocie chłodzącego prądnice	90	95	°C
20.	Wysoka temp. wody w instalacji II chłodzenia prądnicy	65	70	°C
21.	Wysoka temp. rufowego łożyska prądnicy	95	110	°C
22.	Wysoka temp. zwojenia "W" prądnicy	130	150	°C
23.	Wysoka temp. uzwojenia "V" prądnicy	130	150	°C
24.	Wysoka temp. uzwojenia "U" prądnicy	130	150	°C
25.	Wysoka temp. dziobowego łożyska prądnicy	95	110	°C
26.	Wysoka temp. łożyska dziobowego atakującego koła zębatego przekładni	107	115	°C
27.	Wysoka temp. łożyska rufowego atakującego koła zębatego przekładni	107	115	°C
28.	Wysoka temp. oleju smarnego za chłodnicą	55	60	°C
29.	Wysoka temp. oleju smarnego przed chłodnicą	55	60	°C
30	Niski poziom oleju smarnego w zbiorniku	20	10	%
31	Wysoki poziom skroplin w zbiorniku wyrównawczym	55	70	%

Podczas pracy turbiny parowej, system kontrolno-pomiarowy wygenerował alarm: „uszkodzenie czujnika temperatury łożyska oporowego". Po upływie 2 sekund system poinformował w funkcji czasu jako alarmy o wysokiej temperaturze łożyska oporowego, następnie bardzo wysokiej (wysoka wysoka). Hydrauliczny układ sterowania wyłączył turbinę z pracy w trybie alarmowym, poprzez odcięcie dopływu pary. Na rysunku 5 przedstawiono fragment listy alarmowej systemu SCADA dotyczącą opisywanego przypadku.



Rys. 5. Lista alarmowa SCADA z zarejestrowaną niesprawnością

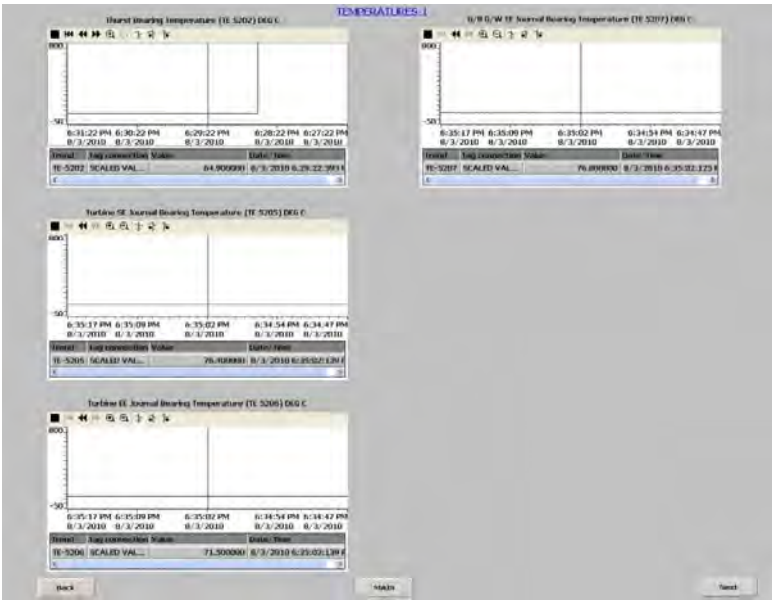
3. Analiza postępowania poawaryjnego

Rezultatem wyłączenia turbiny z pracy był zanik prądu elektrycznego podawanego do sieci elektroenergetycznej statku FPSO. System SCADA wizualizację zmian temperatury łożyska oporowego w czasie zarejestrował graficznie na monitorze, którego fragmenty przedstawiono na rysunku 6 (a, b, c, d).

Po otwarciu pokrywy łożyska oporowego (rys. 4), sprawdzono stan techniczny kołnierza na wale (przedstawionego na rysunku 7) oraz jego okładzin (przedstawionych na rysunku 8). W wyniku ich oględzin nie stwierdzono degradacji uzasadniającej stwierdzeni awarii łożyska.

Rozpoznano natomiast uszkodzenie jednego z czujników temperatury łożyska oporowego. Po wymianie uszkodzonego czujnika temperatury, turbinę uruchomiono ponownie. Widok okładzin łożyska z czujnikami przedstawiono na rysunku 9.

Wymieniony czujnik po uruchomieniu turbiny po przekroczeniu około 11 MW zaczął wykazywać wzrost temperatury łożyska oporowego do wartości alarmowej,. Dla obciążeń niższych wskaźnik wykazywał temperaturę normalną rzędu 80 – 90 °C. W związku z powyższym, turbinę wyłączono z pracy w celu rozpoznania przyczyny. Usunięcie niesprawności łożyska oporowego poprzez jego wymianę na nowe w warunkach okrętowych nie było możliwe ze względów logistycznych, jak również ograniczeń producenta.



Rys. 6. Widok zmian temperatury w czasie zarejestrowany przy pomocy czujników umieszczonych przy określonych łożyskach: a) schyłek skokowego wzrostu temperatury w łożysku oporowym po wyłączeniu turbiny z pracy; b) zmiana temperatury łożyska głównego od strony wlotu pary; c) zmiana temperatury łożyska głównego od strony wylotu pary; d) zmiana temperatury łożyska w przekładni od strony turbiny (koła biernego)

Rys. 7. Widok kołnierza łożyska oporowego w zespole wirnika turbiny po otwarciu pokrywy

Rys. 8. Widok okładzin łożyska oporowego turbiny

Rys. 9. Widok okładzin łożyska oporowego z uszkodzonym przewodem czujnika

W związku z powyższym zdecydowano się na kontrolne wzorcowanie układu pomiarowego w oparciu o laboratoryjne termometry cieczowe. Wskazania układu pomiarowego temperatury łożyska oporowego stwierdzono że są prawidłowe. Konsekwencją tego faktu było

ponowne uruchomienie turbiny z przekroczeniem obciążeń powyżej 11 MW do wartości mocy bliskich nominalnej. Ponieważ wzrostowi obciążenia towarzyszył wzrost temperatury łożyska turbinę wyłączono z pracy po raz trzeci.

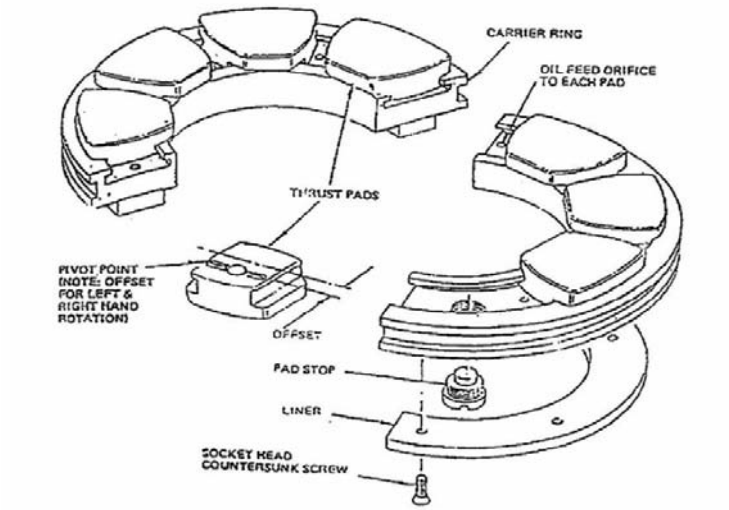
Po okresie postoju turbiny w okresie czterech tygodni ponownie podjęto próbę jej uruchomienia. Do obciążenia 11 MW zarejestrowano wzrost temperatury do 105 °C, a po jego przekroczeniu stwierdzono zmniejszanie temperatury do bliskiej poprawnej 70 – 80 °C. Pomimo takiego efektu i przy braku akceptacji ze strony producenta dalsza eksploatacja turbozespołu została wstrzymana w oczekiwaniu na obsługę serwisową.

4. Podsumowanie

Od początku eksploatacji do momentu wystąpienia niesprawności turbina przepracowała 7460 godzin. Dlatego też przyczyn niesprawności poszukiwano na trzech płaszczyznach:

1. Wiarygodności toru pomiarowego;
2. Stanu technicznego obiektu – łożyska oporowego i czujnika temperatury wraz z torem pomiarowym;
3. Ewentualnej zmiany własności oleju chłodzącego, w tym pod wpływem temperatury i ciśnienia.

Pierwsza i druga przyczyna zostały wykluczone poprzez wymianę czujnika i sprawdzenie jego wskazań. Łożysko zostało otwarte, a stan jego okładzin i powierzchni trących oceniony jako prawidłowy. Mając na uwadze specyfikę konstrukcji łożyska, a w tym sposobu jego smarowania i chłodzenia zdecydowano się na poszukiwanie odpowiedzi w efektywności funkcjonowania instalacji olejowej. Do sformułowania powyższej tezy upoważniła złożona konstrukcja rozpatrywanego łożyska, przedstawionego na rysunku 10.



Rys. 10. Widok elementów łożyska oporowego ze szczególnym uwzględnieniem kanałów olejowych

Do prawdopodobnych przyczyn wzrostu temperatury okładzin łożyska oporowego zaliczono:

1. Zakłócenie prawidłowości dopływu oleju do każdej z okładzin, na skutek zanieczyszczenia oleju i pogorszenia drożności kanałów olejowych,
2. Zmianę własności fizyko-chemicznych oleju na skutek starzenia i zmian parametrów stanu.

Mając na uwadze stronę prawną ubezpieczyciela oraz interesy Towarzystwa Klasyfikacyjnego, sugestie te, jak i rozwiązanie problemu przekazano serwisowi producenta, co jest częstą metodą postępowania poawaryjnego na statkach morskich.

Przedstawiony przypadek jest doskonałym przykładem i świadectwem konieczności warunkowego zaufania do informacji gromadzonych i przetwarzanych przez system monitorowania i nadzoru parametrów pracy silników i urządzeń okrętowych w warunkach eksploatacji. Często informacje te stanowią dowód w poawaryjnych postępowaniach odszkodowawczych. Na przykładzie wybranego spośród spotykanych w praktyce eksploatacji jednostek typu FPSO, szczególnie trudno rozpoznawalnego uszkodzenia eksploatacyjnego, wykazano konieczność stosowania współcześnie zaawansowanych inteligentnych systemów nadzoru pracy, szczególnie na takich jednostkach jak FPSO.

Literatura

1. Adamkiewicz A.: Studium przydatności parametrów pracy w diagnozowaniu okrętowyc turbinowych silników spalinowych. Zeszyty naukowe 158 A. Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Gdynia 2004.
2. Adamkiewicz A., Burnos A.: Utrzymanie turbinowych silników spalinowych na jednostkach typu FPSO .Zeszyty Naukowe Nr 178A, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2009, s. 9-20.
3. Adamkiewicz A., Burnos A.: Influence of maintenance strategies on the reliability of gas turbines in power systems of floating production, storage and offloading units (FPSO). TECHNICKA DIAGNOSTIKA, z1, ROCNIK XVIII 2009, CD. 28-th International cientific conference DIAGO® 2009. Technical diagnostics of machines and Manufacturing equipment. Vysoká škola báňská – Technická Univerzita Ostrava. Asociace Technických Diagnostiků České Republiky, o.s., Ostrava, Rožnov pod Radhoštěm, 27 – 28 January 2009.
4. Cydejko J., Puchalski J., Rutkowski G.: Statki i technologie off-shore w zarysie . TRADEMAR Gdynia 2011.
5. Kozak M.: Budowa i metody kontroli eksploatacji turbin parowych. Wydawnictwo KAPRINT Lublin 2008.
6. Krzyżanowski J., Głuch J.: Diagnostyka cieplno-przepływowa obiektów energetycznych. Wydawnictwo IMP PAN Gdańsk 2004.
7. Manual instruction Peter Brotherhood Frame 20 Steam Turbine.
8. Rusin A.: Awaryjność, niezawodność i ryzyko techniczne w energetyce cieplnej. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2008.
9. http://www.dresser-rand.com/products/steam/multistage/.

OPERATIONAL EVALUATION OF INFORMATIVE VALUE OF A MONITORING SYSTEM OF AN AUXILIARY STEAM TURBINE ON THE FPSO UNIT

Summary. This article relates to a particular case of unserviceability of a steam turbine which drives a current generator in the electric power system of a floating, production, storage and offloading unit, FPSO type. The unserviceability, which has occurred in one of the power electric turbine sets, has been revealed by an automatic control system. Its localization, consequences, means and results of attempts of its elimination have been presented here. Possible causes of such unserviceability have been discussed. The necessity to apply most advanced intelligent control systems has been indicated.on the basis of a chosen, exteremely difficult to identify, operational fault.

Key words: steam turbine, power electric turbine sets, failure, FPSO

Grzegorz Chruścielski*

MIKROSTRUKTURALNA CHARAKTERYSTYKA MECHANIZMU PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO MATERIAŁU AW 7075-T651

Streszczenie. Materiał AW 7075 jest materiałem powszechnie stosowanym przy wytwarzaniu szczególnie odpowiedzialnych konstrukcji w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. W tych warunkach eksploatacyjnych niemal zawsze występuje zagrożenie pękaniem zmęczeniowym, więc poznanie mechanizmu takich pęknięć jest wciąż niezwykle istotne. W pracy przedstawiono przegląd literatury poświęconej problematyce zmęczenia oraz wyniki badań własnych mechanizmu pękania zmęczeniowego materiału AW 7075, W szczególności omówiono mechanizm łączenia się mikroporów powstałych wokół wydzieleń faz międzymetalicznych i wskazano na plastyczny charakter pękania zmęczeniowego.

Słowa kluczowe: stop aluminium, anizotropia, mechanizm pękania zmęczeniowego

Wprowadzenie

Zjawisko pękania zmęczeniowego w wysokowytrzymałych stopach aluminium jest od wielu lat przedmiotem licznych badań. Zainteresowanie to wynika przede wszystkim z faktu, że materiały te, charakteryzujące się bardzo korzystnymi własnościami fizycznymi i mechanicznymi (wysoką udarnością i plastycznością, dużą odpornością na zmęczenie i zadowalającą na korozję, łatwą obrabialnością, a przede wszystkim wysoką wytrzymałością w stosunku do gęstości [18]), są powszechnie stosowane w przemyśle lotniczym [4, 19] i motoryzacyjnym [11]. W niemal wszystkich tych zastosowaniach niszczące działanie naprężeń zmęczeniowych jest nieuniknione.

W ostatnim dziesięcioleciu osiągnięty został znaczący postęp w badaniu procesu zmęczenia, ponieważ zastosowane zostały nowe techniki badawcze, pozwalające na elektronomikroskopową rejestrację poszczególnych etapów ewolucji struktury materiału podczas jednego cyklu zmęczeniowego. W ten sposób badano m.in. stop IN9052 z silnie rozdrobnionym ziarnem [21] oraz stop A356 z wydzieleniami eutektyki krzemowej [9]. Badania te wskazały, że w tych przypadkach rozwój pękania zmęczeniowego odbywa głównie poprzez rozwieranie materiału wzdłuż pasm ścinania (dla stopu IN 9052) oraz dodatkowo poprzez mikropęknięcia wydzieleń fazy kruchej (w przypadku A356).

Szczególną grupę stopów aluminium stanowią wysokowytrzymałe stopy serii 7000, których zachowanie sie w warunkach naprężeń zmęczeniowych opisują m.in. prace [7, 10, 16]. Wśród tej grupy jednym z najczęściej stosowanych (np. na poszycia i dźwigary skrzydeł sa-

* *Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, grzegorz.chruscielski@pwr.wroc.pl*

molotów, elementy hamulców i pomp paliwa) jest stop EN AW 7075 (oznaczenie wg PN-EN 573-3:2010, symbol chem. AlZn5,5MgCu). Z racji zastosowań materiałowi temu poświęca się wiele prac, wśród których w ostatnich latach znaleźć można m.in. publikacje dotyczące prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego [22], zmęczeniowego zużycia cierno-korozyjnego [15], odporności korozyjnej po utlenianiu [12], odkształceń sieci przy obciążeniach zmęczeniowych [17] czy trwałości zmęczeniowej [20, 23]. Jednak tylko nieliczne prace dotyczyły badań mechanizmu pęknięcia zmęczeniowego [13].

Uznając, że tylko pełne poznanie mechanizmu pękania zmęczeniowego może przyczynić się do kontrolowania tego procesu, niniejsza praca poświęcona jest opisowi czynników wpływających na przebieg pękania zmęczeniowego w materiale AW 7075-T651.

1. Własności mechaniczne i struktura badanego materiału

Materiałem przeznaczonym do badań był stop aluminium AW 7075 w postaci płyty walcowanej o grubości 25 mm w stanie T651 (oznaczenie T651 wskazuje, że materiał poddawany był przesycaniu, rozciąganiu w celu usunięcia naprężeń cieplnych i następnie sztucznemu starzeniu). Skład chemiczny stopu AW7075 przedstawiono w tabl. 1, a własności wytrzymałościowe w tabl. 2.

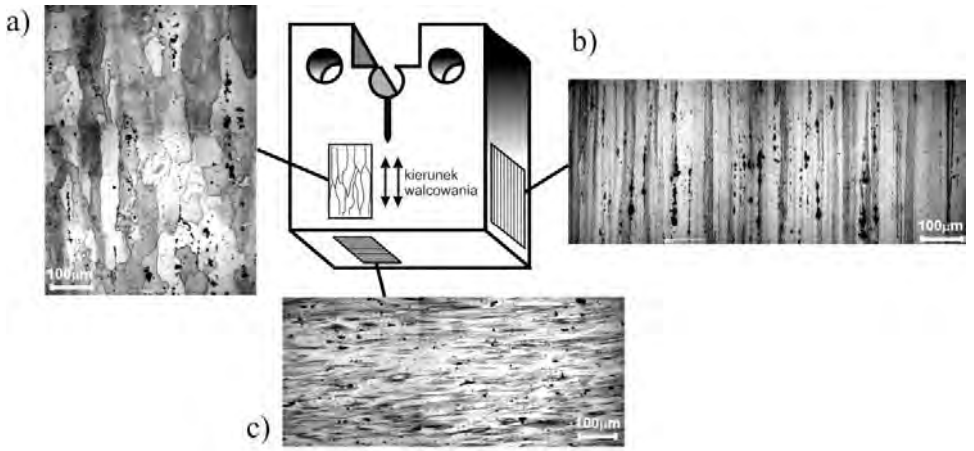
Tabela 1. Skład chemiczny materiału AW 7075 (wg. Atestu Alcoa Europe Flat Rolled Products, atest nr 0381740)

Pierwiastek	Al	Zn	Mg	Cu	Ti	Cr	Fe	Si	Mn	Sn	B	Na	Ti+Zr
Zawartość %	89,48	5,75	2,39	1,64	0,40	0,20	0,12	0,08	0,01	0,01	0,0009	0,0002	0,04

Tabela 2. Własności mechaniczne materiału EN AW 7050

Wyznaczana wielkość	**Kierunek walcowania**	**Kierunek poprzeczny**
$\mathbf{R_{p0,2}}$ [MPa]	544	505
$\mathbf{R_m}$ [MPa]	600	570
$\mathbf{A_5}$ [%]	10	9
Z [%]	12	10
E [MPa]	68382	71891
$\mathbf{K_{IC}}$ [MPa/m$^{1/2}$]	31,00	25,95

Struktura badanego materiału 7075 wykazywała silną teksturę po walcowaniu. Do badań stosowano próbki zwarte, odpowiadające próbkom do badań odporności na pękanie. Orientacje próbek wraz ze strukturami powierzchni zewnętrznych, widocznymi na trawionych zgładach metalograficznych, przedstawiono na rys. 1.



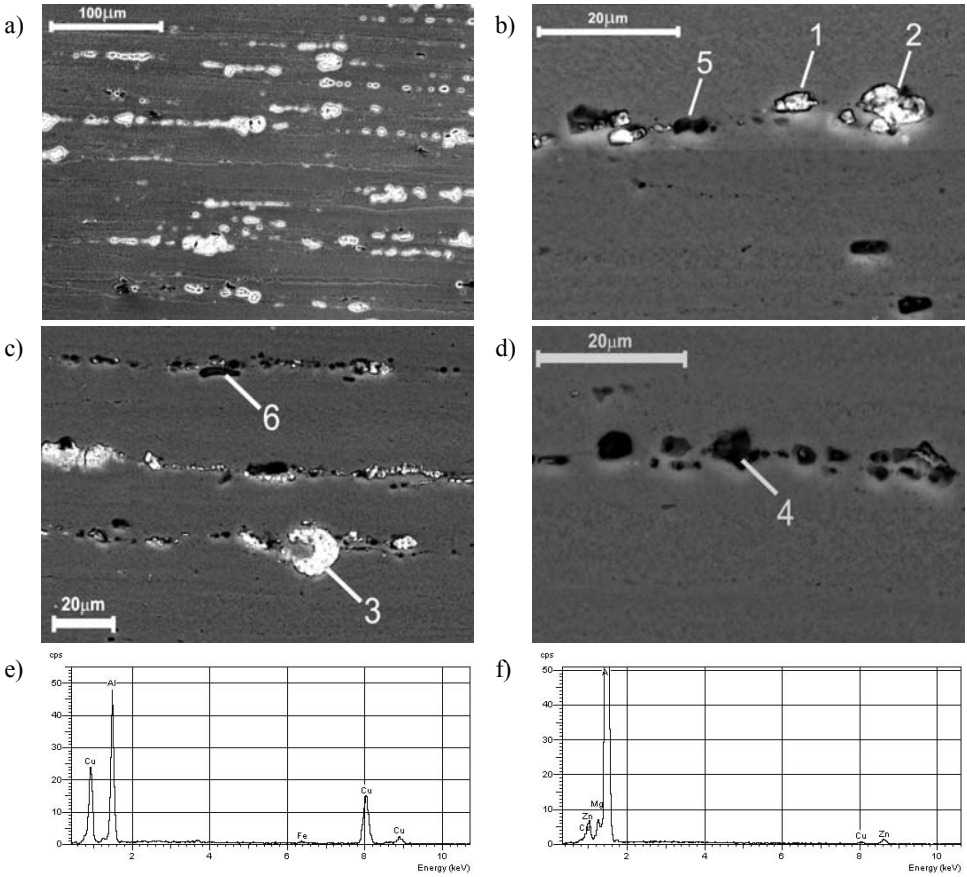
Rys. 1. Schemat próbki do badań mechanizmu pękania zmęczeniowego wraz ze zdjęciami struktur powierzchni zewnętrznych: a) płaszczyzna walcowania, b) powierzchnia przekroju wzdłużnego, c) powierzchnia przekroju poprzecznego. Trawienie Mi2Al

Na fotografiach przedstawionych na rys. 1 widać, że badany materiał posiada silną teksturę po walcowaniu. Widoczne są również liczne wydzielenia, których rozłożenie na powierzchni walcowania wykazuje pasmowość, nie związaną jednak z granicami ziaren (rys. 1a).

Analiza spektroskopowa (EDS) udziału procentowego pierwiastków wchodzących w skład typowych wydzieleń, przedstawiona w tabeli 3, wykazała, że wydzielenia te można podzielić na dwie grupy: związki bogate w miedź, które obserwowane pod mikroskopem skaningowym przy zastosowaniu detektora elektronów odbitych (BSE) widoczne są jako cząsteczki o bardzo jasnej barwie (rys. 2a-c), oraz związki z udziałem miedzi, cynku, krzemu i manganu, widoczne na podobnych zdjęciach jako cząsteczki ciemne. (rys. 2b-d). Na podstawie analizy udziału procentowego pierwiastków, ich masy molowej oraz danych literaturowych [2, 10, 14], w tabeli 3 podano również wzory związków chemicznych, jakie w przybliżeniu mogą być tworzone przez pierwiastki obecne w wydzieleniach.

Tabela 3. Udziały procentowe pierwiastków występujących w wydzieleniach w strukturze materiału AW 7075

Nr wydzielenia	Udziały procentowe pierwiastków						Teoretyczny związek chem.*	Przybliżony rzeczywisty związek chem.**
	Al	Cu	Si	Fe	Zn	Mg		
1	60,9	38,5		0,6			$Cu_{56}Al_{210}Fe$	Al_2Cu
2	42,3	54,2		3,5			$Cu_{13}Al_{25}Fe$	$(Al,Cu)_6(Fe,Cu)$
3	12,5	82,6		4,9			$Cu_{14}Al_5Fe$	$(Al,Cu)_6(Fe,Cu)$
4	85,1	6,7		4,5	2,9	0,8	$Al_{95}Cu_3Fe_2ZnMg$	Al_7Cu_2Fe
5	95,3	0,8			3,3	0,6	$Al_{280}Zn_4Mg_2Cu$	$(Al, Zn)_2Mg$
6	60,5	0,9	34,5		3,5	0,6	$Al_{158}Si_{86}Zn_3MgCu$	$(Al_2Si)_2$
(*) na podstawie analizy udziału procentowego pierwiastków i ich masy molowej (**) na podstawie danych literaturowych [2, 10, 14]								



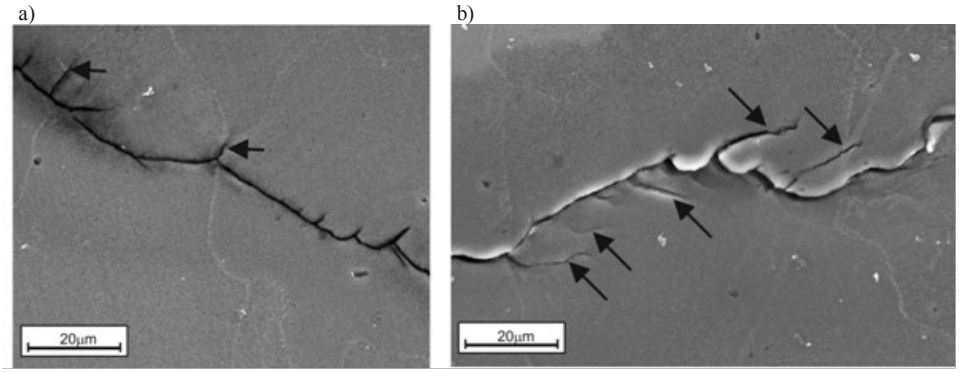
Rys. 2. Powierzchnia przekroju wzdłużnego materiału AW 7075 po walcowaniu: a) pasmowe wydzielenia faz międzymetalicznych na tle granic ziaren, b-d) wydzielenia poddane analizie chemicznej (zaznaczone numerami od 1 do 6), e, f) przykładowe spektrogramy energii (EDS) otrzymane dla wydzieleń nr 1 i nr 5

2. Badania mechanizmu pękania zmęczeniowego

Do badań mechanizmu pękania zmęczeniowego wykorzystano próbki stosowane do wyznaczania odporności na pękanie (por. rys. 1), w których pęknięcie przebiegało w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania (orientacja X-Y wg PN-EN ISO 12737). Podczas obciążania zmęczeniowego stosowano siłę zmienną w zakresie 2-10 kN z częstotliwością 10 Hz.

Na fotografiach 3a i 3b przedstawiono zdjęcia SEM trawionej powierzchni bocznej próbki po wystąpieniu pęknięcia zmęczeniowego. Jak można zauważyć, głównemu frontowi pęknięcia towarzyszą liczne uskoki, które niekiedy związane są z granicami ziaren (dwa takie przypadki zaznaczono na rys. 3a strzałkami), ale częściej występują w obrębie ziaren, jak można zobaczyć na rys. 3b. Tego typu uskoki śródkrystaliczne świadczą o odkształcaniu

i pękaniu materiału wzdłuż trwałych pasm poślizgu wewnątrz ziaren [8] (ewentualne pasma ścinania, które również mogą powodować pękanie śródkrystaliczne, występują niezmiernie rzadko w stopach serii 7000 w postaci T6 lub T7 z powodu ich odpuszczania [3]).



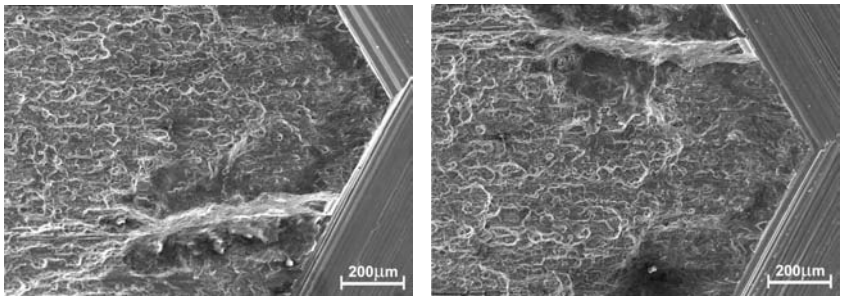
Rys. 3. Fotografie SEM pęknięcia zmęczeniowego z licznymi uskokami związanymi z granicami ziaren (zaznaczonymi strzałkami na fot. 3a) i z pasmami poślizgu (zaznaczonymi strzałkami na fot. 3b)

Na rys. 4 przedstawiono zdjęcie SEM przedstawiające interakcję frontu pęknięcia z polem naprężeń generowanym przez wydzielenie fazy międzymetalicznej. Wydzielenia takie, stanowiąc nieciągłość struktury osnowy, często stają się źródłem powstania mikroporów i przyczyniają się do przyspieszenia pękania, które wówczas odbywa się na drodze zrywania połączeń (mostków) między wydzieleniami. Mechanizm taki znalazł potwierdzenie również przy omówionej w dalszej części analizie fraktografii pękania. Z drugiej jednak strony, uskok widoczny na rys. 4 przy większym wydzieleniu, świadczy o chwilowym powstrzymaniu frontu pęknięcia.

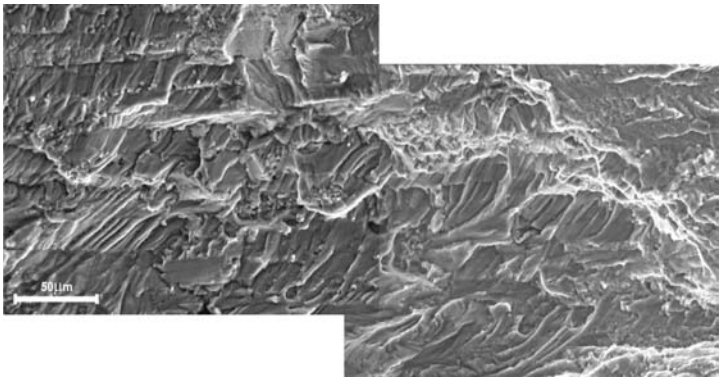
Rys. 4. Fotografia SEM przedstawiająca interakcję pęknięcia zmęczeniowego w wydzieleniem w strukturze materiału AW 7075

Na rys. 5 przedstawiono zdjęcia SEM dwóch przylegających stron przełomu zmęczeniowego próbki. Ułożenie języczków odkształcenia – na obu powierzchniach wypukłością zwróconych przeciwnie do kierunku propagacji pęknięcia – wskazuje wyraźnie na plastyczny charakter pęknięcia i odpowiada mimoosiowemu, nierównomiernemu rozrywaniu [8]. O plastycznym charakterze pękania zmęczeniowego świadczy również obecność na powierzch-

niach przełomu prążków plastycznych (rys. 6), będących śladem kolejnych cykli pękania zmęczeniowego, jak również liczne wgłębienia i bruzdy na powierzchni pęknięcia, widoczne na mikroskopie SEM przy większych powiększeniach (rys. 7). Jak stwierdzono, wgłębienia te powstały podczas pękania głównie w miejscach wydzielania się faz międzymetalicznych. Pozostałości tych wydzieleń widoczne są na rys. 7d.

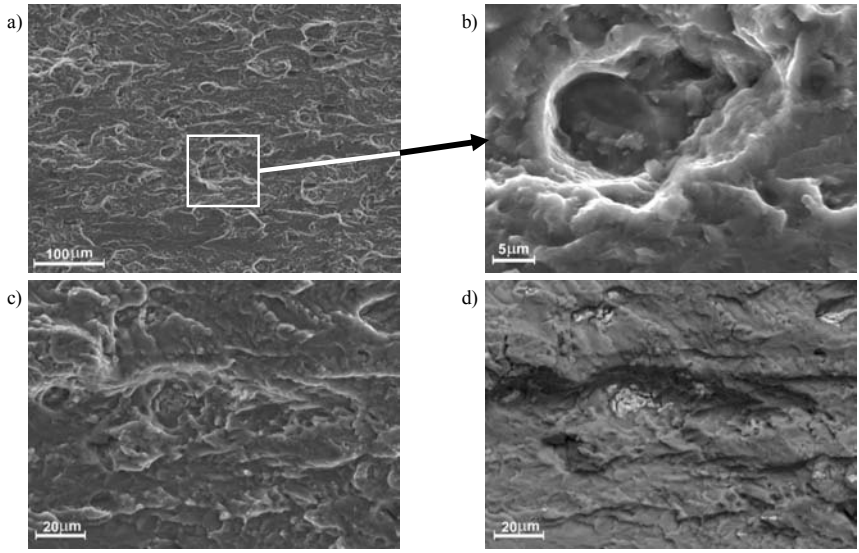


Rys. 5. Fraktografie dwóch przylegających stron przełomu zmęczeniowego. Materiał AW 7075

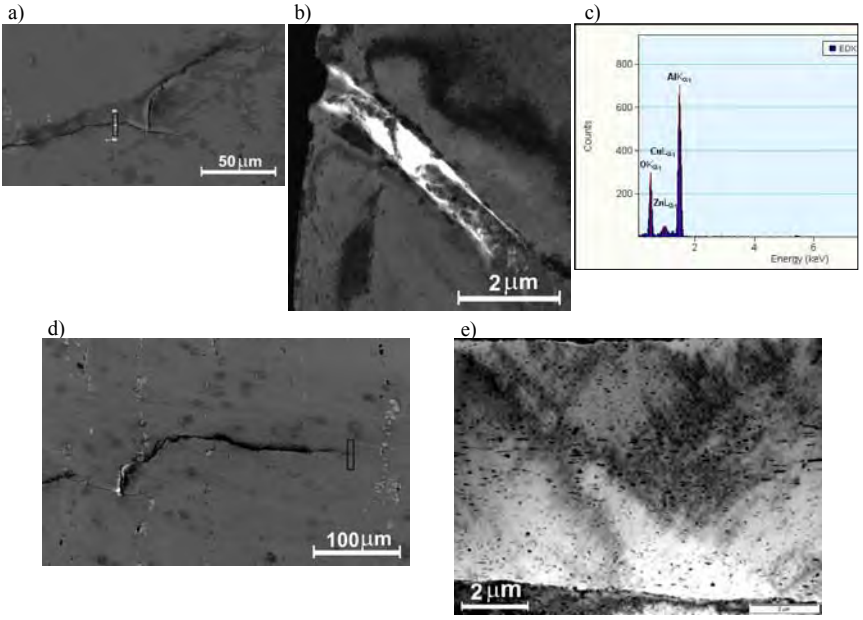


Rys. 6. Fraktografia przełomu zmęczeniowego z widocznymi prążkami odkształcenia plastycznego, powstałymi podczas kolejnych cykli obciążania zmęczeniowego. Materiał AW 7075

Badania na mikroskopie transmisyjnym (TEM) struktur dyslokacyjnych w obszarze bezpośrednio przylegającym do pęknięcia zmęczeniowego wykazały występowanie pasmowych struktur dyslokacyjnych oraz obszarów wolnych od dyslokacji (rys. 8 a-d). Tworzenie się takich splotów dyslokacji możliwe jest dzięki temu, że w stopach aluminium, jak we wszystkich materiałach o sieci A1, dyslokacje wykazują znaczną ruchliwość, nawet przy niskich temperaturach [5]. Jak wykazano w pracy [1], pasmowe ułożenie splotów dyslokacji ma wpływ na skłonność materiału do pękania zmęczeniowego. Potwierdza to rys. 8d, na której widać, że pęknięcie przebiega po granicy obszaru wolnego od dyslokacji. Badanie składu chemicznego struktury w obrębie pęknięcia wykazało obecność amorficznego tlenku aluminium (rys. 8e), którego obecność może jednak wiązać się ze wzrostem temperatury materiału podczas wykonywania preparatu do badań transmisyjnych.



Rys. 7. Wgłębienia i bruzdy na powierzchni przełomu zmęczeniowego: a) powierzchnia przełomu przy małym powiększeniu, b) wgłębienie z środkowej części zdjęcia (a) z widoczną na dnie pozostałością po wydzieleniu, c,d) bruzdy na powierzchni pękania w obrazie SE (c) i BSE (d) z widocznymi pozostałościami po wydzieleniach



Rys. 8. Struktura dyslokacyjna w środku pęknięcia zmęczeniowego (a, b) i w wierzchołku pęknięcia (d, e). Na rys. (b) widoczne wydzielenie amorficznego tlenku aluminium, którego skład chemiczny przedstawia analiza spektograficzna widma na rys. (c). Na rys. (e) widoczne obszary splotów dyslokacyjnych i obszary wolne od dyslokacji

3. Wnioski

Badania mechanizmu pękania wykazały, że pękanie zmęczeniowe przy jednostronnym rozciąganiu mimośrodowym ma charakter plastyczny. Wskazują na to mikropęknięcia wnikające w głąb ziaren (przebiegające po trwałych pasmach poślizgu), obecne na przełomie próbki prążki plastyczne oraz liczne wgłębienia i bruzdy.

Występującą przy wierzchołku pęknięcia zmęczeniowego strefę odkształceń plastycznych można łatwo określić, obliczając jej teoretyczny promień według wzoru [6]:

$$r_p = (K_I / R_{p0,2})^2 / 6\pi \quad (1)$$

i dla badanego materiału promień ten wynosi około 2,7 mm. Strefa plastyczna jest więc na tyle niewielka, że materiał 7075 uznaje się za materiał kruchy, spełniający (przy odpowiedniej grubości) warunki płaskiego stanu odkształceń.

Stwierdzona obecność pozostałości wydzieleń faz międzymetalicznych (wśród których wyróżnić można grupę związków bogatych w miedź, a także związki aluminium z miedzią, cynkiem, krzemem i manganem) we wgłębieniach i bruzdach na powierzchni pękania wskazuje, że wokół wydzieleń (na granicy wydzielenie – osnowa) dochodzi do tworzenia się mikroporów, i że pękanie zmęczeniowe, przynajmniej częściowo, przebiega na drodze zrywania mostków między mikroporami. Mechanizm taki jest typowy dla pękania zmęczeniowego stopów aluminium.

Literatura

1. Awatani J. i in.: Structure changes in metal fatigued at ultrasonic frequency. 1 Report, Aluminium. Bulletin JSME Japan Society. Mechanical Engineers, 12 (53), 1969, 940-946.
2. Chandan Mondal i in.: On the nature of T (Al2Mg3Zn3) and S (Al2CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy. Material Science and Engineering A 391 (2005) s. 367-376.
3. Dumont D. i in.: A model of predicting fracture mode and toughness in 7000 series aluminium alloys. Acta Mater. 52, 2004, 2529-2540.
4. Heinz A i in.: Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. Material Science and Engineering A 2000, 280 (1), s. 102-107.
5. Hertzberg R. W.L: Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 4th ed. New York, John Wiley and Sons, 1996.
6. Irwin G. R.: Relation of crack toughness measurements to practical applications. Weld. J. Res. Suppl. 1962, 41, s. 519.
7. Jata K. V. i in.: Fatigue Crack Growth and Fracture Toughness Behavior of an Al-Li-Cu Alloy. Metallurgical Transactions A, 17A, 1986, 1011-1026.
8. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT Warszawa 1978.
9. Lee K. i in.: Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, rheo-casting, and casting-forging processes. Engineering Fracture Mechanics 75, 2008, 4200-4216.

10. Li X.- M. i in.: Effect of compositional variations on characteristics of coarse intermetallic particles in overaged 7000 aluminium alloys. Materials Science and Technology, Nov. 2001, 17, 11, 1324-1328.
11. Miller WS i in.: Recent development in aluminum alloys for the automotive industry. Material Science and Engineering A 2000, 280 (1), s. 37-49.
12. Moszczyński P., Trzaska M.: Odporność korozyjna anodowo utlenianego stopu aluminium AW-7075. Ochrona przed korozją 4-5, 2010.
13. Payne J. i in.: Observations of fatigue crack initiation in 7075-T651. International Journal of Fatigue 32, 2010, 247-255.
14. Salamci E. i in.: Investigation of secondary phase particles in spray deposited 7000 series aluminium alloys. Materials Science and Technology, Dec. 2002, 18, 12, 1445-1452.
15. Shinde S. R. i in.: Quantitative analysis of fretting fatigue degradation in 7075-T6 aluminum alloy. Tribology International 40, 2007, 542-547.
16. Srivatsan T. S.: The high-cycle fatigue and fracture behavior of aluminum alloy 7055. Materials Science and Engineering A281, 2000, 292-304.
17. Turkmen H. S. i in.: On the mechanical behaviour of AA 7075-T6 during cyclic loading. International Journal of fatigue 23, 2003, 267-281.
18. Woei-Shyan L., Wu-Chung S, Chi-Feng L, Chin-Jyi W.: The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy. Journal of Material Processing Technology 2000, 100, s.116-122.
19. Williams JC, Starke EA: Progress in structural materials for aerospace systems. Acta Materialia 2003, 51 (19), 5775-5799.
20. Xue Y. i in.: Microstructure-based multistage fatigue modeling of aluminum alloy 7075-T651. Engineering Fracture Mechanics 74, 2007, 2810-2823.
21. Zhang J.Z.: A shear band decohesion model for small fatigue crack growth in an ultra-fine grain aluminum alloy. Engineering Fracture Mechanics 65, 2000, 665-681.
22. Zhao T. i in.: A study of fatigue growth of 7075-T651 aluminium alloy. Inter. J. of Fatigue 30, 2008, 1169-1180.
23. Zhao T. i in.: Fatigue of 7075-T651 aluminium alloy. International Journal of Fatigue, 30, 2008, 834-849.

MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTIC OF FATIGUE FRACTURE MECHANISM IN AW 7075-T651 ALLOY

Summary. AW 7075 material is commonly used in particulary reliable constructions in aircraft and automotive industry. In these conditions the danger of fatigue fracture is very frequent so knowledge of such fracture mechanics is still deeply important. In this article the reviev of works dedicated to fatigue issues and the results of authors researches of fatigue fracture of AW 7075 alloy were presented. In particular the mechanism of coalescence of microvoids arised around intermetalic phase particles were described and ductile character of fatigue fracture was pointed.

Key words: aluminium alloy, anisotropy, fatigue fracture mechanics

Kazimierz Drozd*

FRAKTOGRAFICZNE I METALOGRAFICZNE BADANIA USZKODZEŃ SPRĘŻYN ZAWIESZENIA POJAZDÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości uszkodzonych sprężyn stalowych montowanych w zawieszeniach pojazdów. Badania miały na celu przeanalizowanie problematyki określania przyczyn uszkodzeń i próbę ich usystematyzowania. Najczęściej obserwowaną, bezpośrednią, przyczyną przełomu, było występowanie mikropęknięć na powierzchni uszkodzonych elementów w obszarze przełomu. Kompleksowe wyniki analizy składu chemicznego, badań makro – i mikroskopowych oraz badań twardości pozwalają wskazać przyczyny powstawania mikropęknięć w materiale nawet wtedy gdy sam skład chemiczny i analiza twardości elementów nie wskazuje na możliwe przyczyny uszkodzenia.

Słowa kluczowe: przełom sprężyny, mikrostruktura, odwęglenie

Wprowadzenie

W wielu konstrukcjach inżynierskich stosuje się elementy mające za zadanie akumulację energii odkształcenia w zakresie sprężystym. Z bardziej znanych grup można wymienić sprężyny talerzowe, stabilizatory i drążki sprężyste, belki skrętne, sprężyny śrubowe i resory piórowe. Części takie stosuje się również w celu zabezpieczenia innych, bardziej odpowiedzialnych lub droższych elementów, przed niszczącymi przeciążeniami niemożliwymi do przewidzenia z powodu silnie zmiennych warunków eksploatacji, jak w przypadku większości rolniczych maszyn uprawowych [6]. Większość tych konstrukcji znajduje zastosowanie jako elementy sprężyste w zawieszeniach pojazdów samochodowych, ciągników, przyczep i specjalistycznych maszyn [12]. Zastosowanie sprężyn jako elementów zawieszenia lub do pełnienia funkcji wodzących ma na celu zapewnienie niezbędnego kontaktu koła lub ostrza narzędzia z podłożem [17].

Aktualnie prowadzi się badania weryfikujące możliwości zastosowania innych tworzyw inżynierskich jako elementów sprężystych. W szczególności duże nadzieje wiąże się z materiałami kompozytowymi, których niewątpliwą zaletą jest mała masa właściwa i odporność na czynniki korozyjne. Wykorzystywanie kompozytów na osnowie polimerów zbrojonych włóknami, o budowie warstwowej, jako elementów sprężystych było przedmiotem wielu badań i aktualnie rozwiązania takie są opatentowane i stosowane w przypadkach gdzie koszty materiałowe są mniej istotne [2, 21]. Korzystne jest stosowanie materiałów kompozytowych w przypadku gdy mają one zastąpić klasyczną stalową sprę-

* *Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, k.drozd@pollub.pl*

żynę płaską. Ważną ich zaletą jest zdolność do tłumienia drgań wynikająca z dużego tarcia wewnętrznego [18].

Elementy sprężyste powszechnie wykonywane są ze stali, zwykle niskostopowych [5], o średniej zawartości węgla i kształtowane w celu uzyskania możliwie dużej wartości stosunku granicy plastyczności Re do granicy wytrzymałości Rm [11]. Dotychczasowe badania, w tym prowadzone przez autora, wykazały, że kluczowym problemem technologicznym, który ma istotny wpływ na właściwości stalowych elementów sprężystych, jest przeprowadzenie ich obróbki cieplnej w sposób zapewniający uniknięcie powiększania się strefy odwęglenia warstwy wierzchniej [7, 13].

Korzystną strukturę rdzenia materiału oraz wysoką trwałość i wytrzymałość zmęczeniową elementów wykonywanych ze stali sprężynowych można uzyskać poprzez hartowanie i niskie odpuszczanie [15, 19]. Niektórzy badacze zwracają uwagę, że kształtowanie warstw wierzchnich w celu zmiany stanu naprężeń, poprzez wygenerowanie naprężeń własnych ściskających, powoduje istotne zwiększenie trwałości zmęczeniowej sprężyn w warunkach laboratoryjnych do trzech rzędów wielkości [9, 20]. Do tego celu proponuje się zabiegi odkształcania na zimno [10], nasycania warstwy wierzchniej pierwiastkami [14] oraz kompleksową obróbkę cieplno-chemiczną i plastyczną [1].

Uszkodzenie sprężyny, szczególnie pełniącej rolę wodzącą lub prowadzącą jest przyczyną strat materialnych i problemów organizacyjnych przedsiębiorstw, zwłaszcza transportowych. Ocenia się, że trwałość elementów sprężystych jest zwykle mniejsza od resursu węzłów kinematycznych występujących w tym samym urządzeniu [16]. Specyfika pracy sprężyn wpływa na to, że niewielkie niedoskonałości struktury materiału mogą powodować istotny wpływ na trwałość zmęczeniową. Badania przyczyn uszkodzeń prowadzi wiele zespołów a publikacje na ten temat ukazują się w czasopismach o światowym zasięgu [3,4].

Ostatnio dominuje przekonanie, że dalszy rozwój technologii sprężyn będzie postępował w wyniku rozpoznania i eliminowania strukturalnych przyczyn występowania konkretnych przypadków uszkodzeń. Niniejsza publikacja ma na celu wskazanie przykładów i usystematyzowanie niektórych przyczyn uszkodzeń silnie obciążonych elementów sprężystych zawieszeń wykonanych ze stali. Najwięcej uwagi, podobnie jak w aktualnie publikowanych badaniach, poświęcono aspektom strukturalnym i wpływu środowiska pracy. Problem uszkodzeń eksploatacyjnych sprężyn jest o tyle istotny, że, w wyniku globalizacji, dotyczy również krajowego przemysłu, który zaopatruje w sprężyny wiele zagranicznych koncernów [8].

1. Zakres i metodyka badań

Przeprowadzono badania, mające na celu określenie przyczyn uszkodzeń sprężyn oraz przykładowe oznaczenie składu chemicznego materiału, z którego wykonano uszkodzony element i jego zgodność z odpowiednimi normami materiałowymi. Obiektem badań były przełomy, uszkodzone pióra resorowe, sprężyny zawieszenia i drążki skrętne. Wszystkie badane elementy były wykonane ze stali stopowych z grupy sprężynowych, charakteryzujących się dużą hartownością.

Zakres badań obejmował:

- badania faktograficzne i makroskopowe przełomów oraz powierzchni elementów uszkodzonych,
- analizę składu chemicznego,
- badania struktury materiału,
- określenie głębokości warstwy odwęglonej metodą mikroskopową,
- oznaczenie, metodą metalograficzną, stopnia zanieczyszczenia badanych struktur wtrąceniami niemetalicznymi,
- badania twardości uszkodzonych elementów.

Badania fraktograficzne przeprowadzono bezpośrednio z użyciem przełomów oraz w oparciu o obrazy uzyskane na mikroskopie stereoskopowym Nikon typu SMZ 1500. Obróbkę zdjęć i wyznaczanie zakresu stref przełomu wykonano posługując się oprogramowaniem ImagePro Plus. Do analizy składu chemicznego użyto spektrometru rentgenowskiego Philips PW 2400. Badań metalograficzne mikroskopowe zgładów przygotowanych z badanych elementów prowadzono na mikroskopie Nikon typu MA 200, umożliwiającym wykonywanie obserwacji w polu jasnym i ciemnym. Do badań twardości uszkodzonych elementów użyto hydraulicznego twardościomierza Brinella typu B2.

2. Badania makroskopowe i fraktografia przełomów

Zużycie lub uszkodzenie elementów sprężystych zawieszeń prowadzi do zmian charakteru obciążenia zarówno samego zawieszenia jak i układu jezdnego pojazdu. Na rysunku 1 przedstawiono typowy przypadek zużycia resoru piórowego w wyniku zaniedbań serwisowych. Początkowo, jedna z obejm ustalających pióra względem pióra głównego uległa uszkodzeniu. Nie spowodowało to przemieszczania (obracania wokół śruby centralnej) piór względem siebie i prawdopodobnie dlatego początkowo nie zwrócono uwagi na to uszkodzenie. Istotne jest, że w obszarze sąsiadującym z uszkodzoną obejmą pióra nie stykały się ze sobą podczas dalszej eksploatacji. Szczelina jest widoczna również pomiędzy piórami pierwszymi (głównym i drugim, drugim i trzecim), które są mocowane kolejną, nieuszkodzoną obejmą. W konsekwencji w szczelinę pomiędzy pióra dostawała się woda, która powodowała korozję powierzchni uszkodzonej w wyniku tarcia.

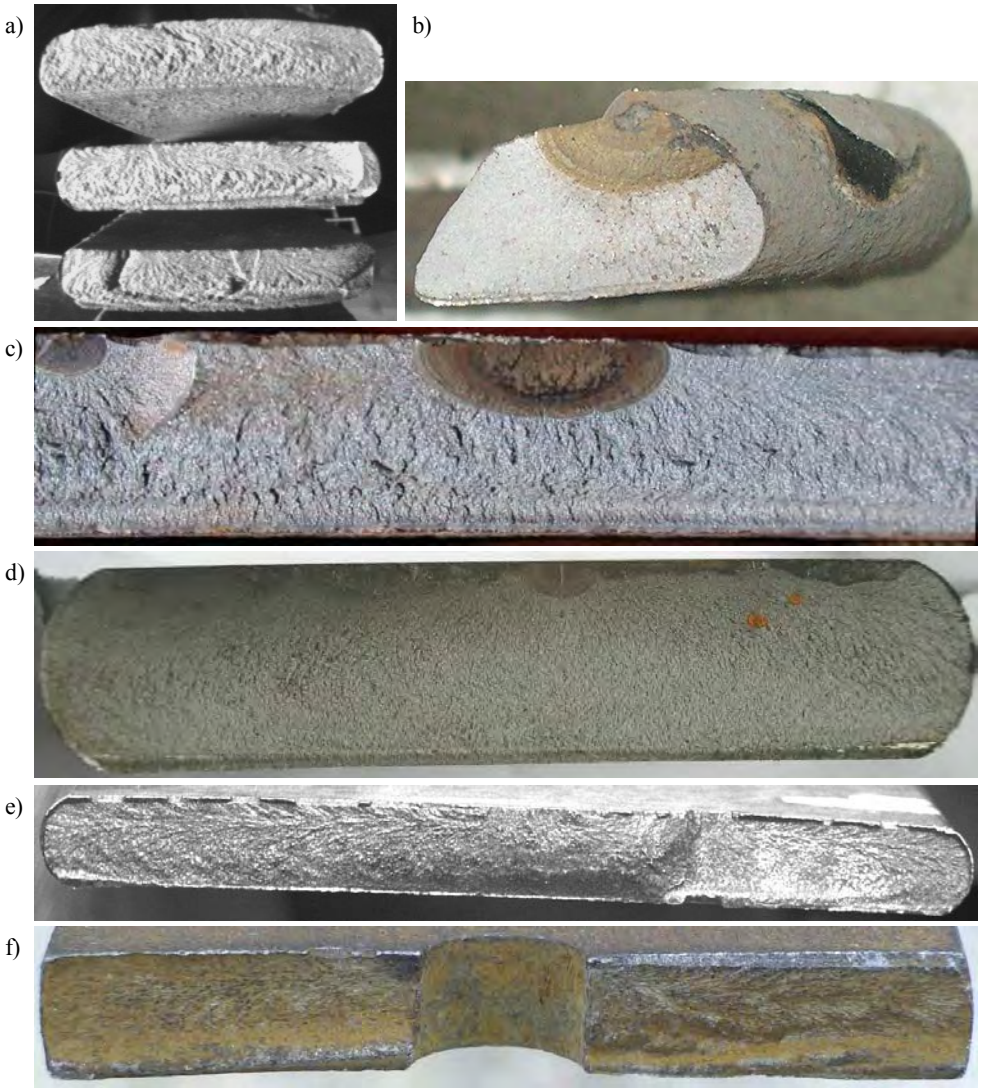
Rys. 1. Resor przyczepy zniszczony przez korozję

W efekcie narastania produktów korozji (rys. 1) kolejne pióra były obciążone nie tylko siłą pochodzącą od obciążenia pojazdu ładunkiem, lecz również ulegały odkształceniom spowodowanym występowaniem produktów korozji pomiędzy piórami. Po pewnym czasie eksploatacji, najkrótsze pióra zaczęły ulegać odkształceniu plastycznemu. Wniosek ten jest oczywisty jeśli weźmie się pod uwagę, że kolejne pióra są kształtowane fabrycznie z odpowiednio większą krzywizną, czyli pomimo uszkodzenia obejmy końce piór powinny przylegać do piór dłuższych. W tym przypadku widoczne jest, że końce piór nie mają kontaktu z piórami położonymi wyżej. W wyniku zużycia pióra o numerze większym niż 5 włączają się do pracy dopiero po zlikwidowaniu tego dystansu w rezultacie ugięcia piór dłuższych, czyli pełnią rolę podobną do resoru dodatkowego. Zadaniem resoru dodatkowego jest również włączanie się do pracy wtedy, gdy resor główny ulegnie ugięciu umożliwiającemu osiągnięcie kontaktu (zredukowanie dystansu) pomiędzy piórami resoru głównego i dodatkowego.

Wykonanie badań makroskopowych zwykle jest utrudnione z powodu występowania produktów korozji na przełomach. Korozja na przełomie nie zdąży zajść, gdy uszkodzenie wiąże się z koniecznością wycofania pojazdu z ruchu. W przypadku zestawu sprężyn płaskich o przekroju zmiennym wg paraboli najczęściej zdarza się pęknięcie wszystkich piór z pakietu jednocześnie i zwykle wiąże się to z przeciążeniem konstrukcji (rys. 2a). Pęknięcie kilku piór ma charakter przełomu doraźnego międzykrystalicznego, gdzie pojedyncze kryształy wystają z powierzchni przełomu. Wszystkie pióra pękają w tym samym miejscu konstrukcji tzn. w takiej samej lub zbliżonej odległości od miejsca zamocowania. Podobnie, jeżeli pęknięcie rozwijało się w dłuższym czasie a sprężyna o dowolnej konstrukcji zostanie wymontowana bezpośrednio po jej uszkodzeniu, występowanie korozji na części powierzchni przełomu może ułatwić precyzyjnie wskazać ognisko.

Zdarza się, że materiał nie ulega doraźnemu uszkodzeniu lecz przełom rozprzestrzenia się w pewnym czasie i ma charakter przełomu zmęczeniowego (rys. 2b). W silnie wytężonych elementach ze stali po ulepszaniu cieplnym, na przełom zmęczeniowy składa się wyraźna część przełomu transkrystalicznego, tj. przebiegającego przez ziarna materiału. Ta część przełomu wygląda na „gładką". Pozostała część powierzchni przełomu ma charakter doraźny i wygląd taki jak przełom doraźny opisany w poprzednim akapicie. Na fotografii widoczne są również ubytki w lakierniczej powłoce ochronnej, występujące w okolicach przełomu. Podobną zależność pomiędzy występowaniem ubytków bądź uszkodzeń powłok ochronnych obserwowano w większości uszkodzonych fragmentów sprężyn, niezależnie od ich typu konstrukcyjnego.

Dokładniejsza analiza strefy przełomu zmęczeniowego na rys. 2b i 2c pozwala na dostrzeżenie linii przestankowych które ujawniają położenie ogniska przełomu w górnej jego części przy powierzchni elementu. Na rys. 2c-2e widoczny jest innych charakter przełomu w części najbliższej powierzchni elementów. Spowodowane jest to zmodyfikowaną warstwą wierzchnią w celu uzyskania naprężeń własnych ściskających. Modyfikacja rozkładu naprężeń spowodowana występowaniem naprężeń własnych wpływa na zmianę przebiegu przełomu w warstwie umocnionej w ten sposób. W przedstawionych przełomach ognisko znajduje się pod powierzchnią materiału, to znaczy w miejscu, gdzie w wyniku modyfikacji warstwy wierzchniej wystąpiło maksimum wartości naprężeń.



Rys. 2. Przełomy badanych sprężyn zawieszenia

Stosunek powierzchni całego przełomu do jego części doraźnej świadczy o „rzeczywistym" współczynniku bezpieczeństwa konstrukcji. W przypadku przełomu sprężyny przedstawionego na rys. 2b wartość tego współczynnika wynosiła 1,22 a dla przełomu na rys. 2c – 1,082. Współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji w chwili uszkodzenia pióra przedstawionego na rys. 2d wynosił 1,013. Dwie ostatnie wartości są szczególnie małe, ponieważ w literaturze podaje się, że we współczesnych konstrukcjach sprężyn stosowanych w zawieszeniach pojazdów współczynnik bezpieczeństwa wynosi od 1,3 do 1,7. Jeżeli dostępne są dane dotyczące pełnego stanu obciążenia sprężyny to wartości współczynnika bezpieczeń-

stwa mogą być przyjmowane z zakresu 1,1 – 1,2 [5, 16]. Wynika stąd, że przy konstruowaniu sprężyn przedstawionych na rys. 2c i 2d przyjęto współczynnik bezpieczeństwa o zbyt małej wartości.

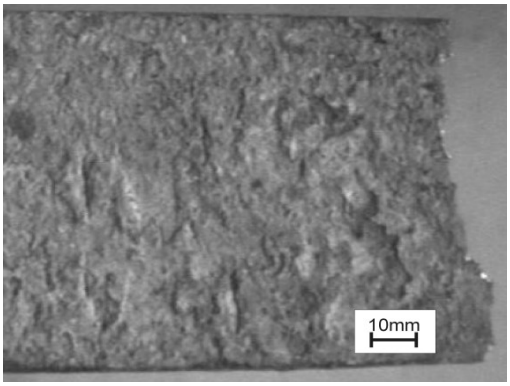
Jeżeli materiał charakteryzuje się niejednorodnością składu chemicznego, zawiera wtrącenia niemetaliczne lub z innych przyczyn charakteryzuje się silną anizotropią właściwości, powierzchnia przełomu może zawierać liczne uskoki zarówno na części zmęczeniowej przełomu jak i na części doraźnej. Na części zmęczeniowej, uskoki te mogą być mieć kształt zbliżony do łuków, których teoretyczny środek krzywizny znajdowałby się w okolicy ogniska przełomu. Na obu częściach przełomu zmęczeniowego (zmęczeniowej i doraźnej) mogą występować uskoki rozmieszczone promieniście w stosunku do ogniska przełomu zmęczeniowego. Powierzchnia takich przełomów jest bardziej rozwinięta, tzn. ich kształt bardziej odbiega od płaszczyzny a niekiedy zawiera jakby wyrwania materiału w kierunku prostopadłym do powierzchni przełomu. Przykłady takich przełomów zamieszczono na rys. 2c, 2e i 2f. W takich przypadkach przyczyn uszkodzenia należy poszukiwać w mikrostrukturze bądź technologii obróbki materiału.

Jedno z piór, dla których prowadzono dalsze badania mikroskopowe charakteryzowało się występowaniem powłoki lakierniczej o zadowalającej jakości i miało zmienny przekrój (zmienną grubość pręta). Na dużej części jego długości miało prosty kształt (zerowa krzywizna). Pęknięcie nastąpiło w części o mniejszej grubości, charakteryzującej się również większą krzywizną. W okolicy przełomu (rys. 2e) pióro było pokryte produktami korozji, co uniemożliwiło dokładne określenie charakteru i odtworzenie propagacji pęknięcia. Wyciągnięto wniosek, że prawdopodobna przyczyna jego uszkodzenia była związana z jakością materiału lub przebiegiem procesu wytwarzania. Z uskoku na przełomie można dodatkowo wnioskować, że warstwa wierzchnia różniła się właściwościami od pozostałej części przełomu (rdzenia).

Pęknięcie przez otwór centralny (rys. 2f) najczęściej występuje w przypadku resorów naprawianych i świadczy o zastosowaniu zbyt małej wartości momentu do skręcenia piór śrubą. W resorach z piórami o stałym przekroju najczęściej uszkodzeniu ulega jedno pióro, choć niezauważone powoduje osłabienie konstrukcji i w rezultacie może pękać większa liczba piór, zwykle sąsiadujących.

3. Zużycie powierzchni elementów sprężystych

Najczęściej obserwowaną przyczyną przełomów było występowanie mikropęknięć na powierzchni elementów, które następnie rozwijały się w większym obszarze. Widok rozciąganej podczas eksploatacji powierzchni pióra resorowego wskazuje bezpośrednią przyczynę jego uszkodzenia. Jeżeli na tej powierzchni (szczególnie w obszarze sąsiadującym z przełomem) widoczne są pęknięcia usytuowane w poprzek pióra (rys. 3), to stanowiły one karby umożliwiające propagację pęknięcia. Nawet w przypadku braku pęknięć na powierzchni mogą je ujawnić badania mikroskopowe na zgładach wykonanych poprzez usunięcie wierzchniej warstwy materiału pióra w pobliżu przełomu, co zostanie przedstawione w dalszej części niniejszej pracy i na rys. 4a.



Rys. 3. Powierzchnia pióra resorowego, rozciągana podczas eksploatacji, z produktami korozji. Widoczne miejsca inicjacji pęknięć przebiegające w kierunku równoległym do przełomu

4. Analiza składu chemicznego

Oznaczony skład chemiczny materiału, którego przełom przedstawiono na rys. 2e, odpowiada stali stopowej sprężynowej 50CrV4 wg DIN 17221-72 lub stali 50HF wg PN-74/H-84032 (tabela 1). Stale te, po ulepszaniu cieplnym, charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i największą hartownością spośród stali sprężynowych. Zaleca się stosować te materiały na silnie obciążone sprężyny, o dużych przekrojach, zwłaszcza podlegające silnym zmiennym i przemiennym obciążeniom, w tym na najbardziej obciążone elementy sprężyste zawieszeń pojazdów [13, 15].

Tabela 1. Skład chemiczny jednej ze sprężyn użytych do badań

Skład chemiczny [% masy]									
Pierwiastek		**C**	**Mn**	**Si**	**S**	**P**	**Cr**	**Ni**	**V**
badany materiał		0,51	0,79	0,24	0,030	0,015	1,00	0,14	0,15
50CrV4	min	0,47	0,70	0,15			0,90	brak danych	0,10
	max	0,55	1,10	0,40	0,035	0,035	1,20		0,20
50HF	min	0,46	0,50	0,15			0,80		0,10
	max	0,54	0,80	0,40	0,030	0,030	1,10	0,40	0,20

5. Mikrostruktura i odwęglenie badanych sprężyn

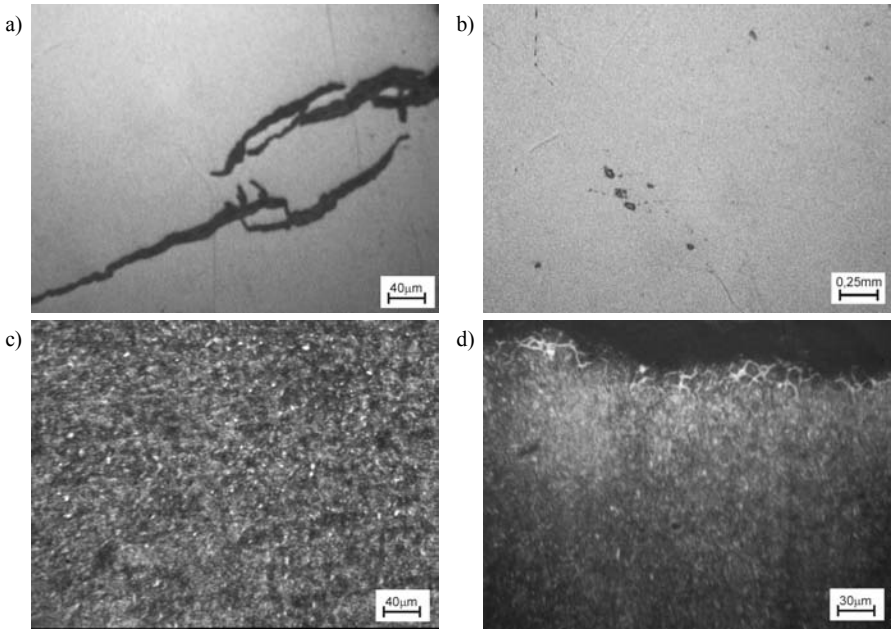
Na zgładzie nietrawionym z powierzchni sprężyny w pobliżu przełomu, po usunięciu warstwy o grubości około 0,5mm, można zaobserwować mikropęknięcia (stanowiące lokalne karby) przebiegające w kierunku równoległym do powierzchni przełomu (rys. 4a).

Propagacja tych pęknięć, w kierunku zależnym od kierunku największych naprężeń oraz struktury materiału, była bezpośrednią przyczyną uszkodzeń. Dalsze badania miały na celu wyjaśnienie genezy powstania karbów tego typu na elementach sprężystych.

Tabela 2. Zanieczyszczenia materiału sprężyny wtrąceniami niemetalicznymi

Rodzaj wtrącenia								
TŁ	KK	KP	max(TŁ, KK, KP)	TP	KN	S	AT	AA
0	1	0	1	1	1	1	0	0

Na zgładzie trawionym odczynnikiem Mi1Fe zidentyfikowano strukturę sorbitu, najczęściej z zachowanym układem „iglastym" jak ta przykładowa struktura przedstawiona na rys. 4c. Taka struktura jest charakterystyczna dla stali po hartowaniu i odpuszczaniu średnim lub wysokim. W literaturze podaje się, że mikrostruktura stali sprężynowej po ulepszaniu cieplnym nie powinna wykazywać układu iglastego [16]. Jest jednak mało prawdopodobne, aby wyłącznie ta przyczyna powodowała powstawanie mikropęknięć.



Rys. 4. Struktura materiału sprężyn: pęknięcia widoczne na zgładzie nietrawionym a), wtrącenia niemetaliczne b), mikrostruktura rdzenia c), warstwa wierzchnia odwęglona d)

Granice ziaren były widoczne przy powiększeniu około 200x, a igły martenzytu widoczne przy powiększeniu 100x. Wystąpiła tu niezgodność z normą [PN-90/S-47250], która wymaga, aby przy powiększeniu 500x nie były widoczne granice ziaren. Typowy obraz struktury warstwy przypowierzchniowej przedstawiono na rys. 4d. Głębokość odwęglenia dla tej struktury określono na około 0,03mm. Obserwowano wyłącznie strefę przejściową, a odwę-

glenia zupełnego w ogóle nie stwierdzono na żadnej z obserwowanych warstw wierzchnich. Głębokość odwęglenia najczęściej była mała i nie powinna mieć znaczącego wpływu na właściwości wytrzymałościowe materiału po ulepszaniu cieplnym.

Stopień zanieczyszczenia materiału wtrąceniami niemetalicznymi określono na nietrawionym zgładzie poprzecznym (rys. 4b). Badane elementy wykazują niski stopień zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi co wynika z danych zamieszczonych w tabeli 2. Wtrącenia pasmowe (KP i TP) w zasadzie nie występują (maksymalna wartość wskaźnika równa 1). Występowania wtrąceń łańcuszkowych (TŁ) nie stwierdzono w ogóle. Na uwagę zasługuje również fakt, że mikropęknięcia widoczne na zgładzie nietrawionym (rys. 4a) nie rozprzestrzeniają się między wtrąceniami. Świadczy to o tym, że wtrącenia nie miały istotnego wpływu na propagację pęknięć w uszkodzonym elemencie.

6. Badania twardości materiału

Badania twardości sprężyn stalowych, w szczególności ich rdzenia, zaleca się prowadzić aparatem Brinella. Ma to na celu określenie twardości materiału w większej skali z powodu większych wymiarów odcisku niż w przypadku odcisku stożka Rockwella. Głębokość penetracji wgłębnika nie stanowi ograniczenia w stosowaniu metody Brinella do badania twardości powierzchni piór, ponieważ największa głębokość odcisku nie przekracza 0,3mm (dla kulki o średnicy 10mm). Oznacza to, że najmniejsza grubość próbki, jaką można badać, wynosi około 2,4mm, czyli jest mniejsza niż grubości sprężyn zawieszeń aktualnie stosowanych w pojazdach. Jeżeli grubość pióra lub średnica drutu sprężyny jest nie mniejsza niż około 9mm, to, przy zastosowaniu kulki o średnicy 5mm, można również badać twardość rdzenia na przekroju poprzecznym elementu.

Twardość badano aparatem Brinella z zastosowaniem kulki $\phi 10$ i $\phi 5$ przy obciążeniach odpowiednio 29,42kN (skala HB10/3000) i 7355N (skala HB5/750). Średnia twardość mierzona na powierzchni, po usunięciu warstwy odwęglonej, miała wartość 414HB10/3000 i 393HB5/750. Średnia twardość mierzona na przekroju elementów miała wartość 412-449HB5/750. Zmierzone wartości zawierają się powyżej średniej w granicach 363-460HB podawanych w literaturze. Rozbieżności pomiędzy przytoczonymi wartościami twardości wskazują na istotne różnice właściwości powierzchni i rdzenia w przypadku piór resorowych dla których stosowano kształtowanie warstw wierzchnich na zimno. O różnicach właściwości powierzchni elementów uszkodzonych i ich rdzenia można wnioskować z samego charakteru przełomu oraz z porównania mikrostruktury.

7. Wnioski

Najczęściej obserwowaną, bezpośrednią przyczyną przełomów było występowanie mikropęknięć. Analiza chemiczna i mikroskopowa, występowania zanieczyszczeń i wtrąceń niemetalicznych w materiale badanych sprężyn, nie wykazały możliwych powodów powstania mikrokarbów w badanych elementach. Materiał ma strukturę o zbyt dużych ziarnach, jed-

nak występowanie faz w mikrostrukturze jest typowe dla stali sprężynowych po ulepszaniu cieplnym. Twardość materiału jest zgodna z normą, a przy powierzchni występuje wyłącznie przejściowa strefa odwęglenia.

Przyczyną powstawania mikropęknięć w okolicach przełomu było występowanie ognisk korozji wywołujących efekt mikrokarbu. Należy zwrócić uwagę, że badane sprężyny ulegały korozji niemal wyłącznie w okolicy przełomów. Może to świadczyć o niedostatecznym zabezpieczeniu powierzchni materiału powłoką malarską lub szczególnym narażeniu na działanie środowiska korozyjnego właśnie tej części elementów.

Występowanie pęknięć na rozciąganej podczas eksploatacji (wewnętrznej) powierzchni piór resorów może być spowodowane zbyt małą wartością naprężeń własnych w warstwie wierzchniej materiału. Z badań makroskopowych i pomiarów twardości można wnioskować, że obróbka przez zgniot była prowadzona dla wszystkich sprężyn. Profil niektórych piór, zawierający w stanie swobodnym proste odcinki wskazuje, że zostały one wcześniej nadmiernie obciążone, przez co ich krzywizna uległa trwałej zmianie. Za tą tezą przemawia również uszkodzenie powłoki lakierniczej.

W wyniku badań uszkodzonych sprężyn można stwierdzić, że przełom sprężyn płaskich najczęściej następuje w miejscu spiętrzenia naprężeń (np. na granicy podparcia kolejnym piórem), w okolicy jarzma mocującego resor do belki zawieszenia lub mostu napędowego, w pobliżu obejmy ustalającej pióra przed względnym przesuwaniem się (obracaniem wokół śruby centralnej). Uszkodzenia ucha resoru lub części mocującej zdarzają się zwykle w przypadkach znacznego przekroczenia wytrzymałości konstrukcji podczas najechania na dużą przeszkodę lub w wyniku wypadku. Niezależnie od konstrukcji sprężyny, w okolicy badanego przełomu występują uszkodzenia powłok ochronnych i powierzchni elementów.

Na podstawie przeprowadzonych badań uszkodzonych elementów można wysnuć następujące wnioski ogólne:

1. Materiał sprężyn, które uległy uszkodzeniu, charakteryzował się obecnością wad powierzchniowych, które przyczyniły się do propagacji pęknięć oraz do powstawania uszkodzeń.
2. Wady materiałowe wykryte w warstwie wierzchniej elementów sprężystych, takie jak: wtrącenia niemetaliczne, odwęglenie powierzchni, wżery korozyjne i zawalcowania powodowały powstawanie wielu ognisk pęknięć zmęczeniowych skupionych na małym obszarze w sąsiedztwie przełomu. Rozwój tych pęknięć można śledzić na badanych przełomach.

Literatura

1. Ardehali Barani A., Li F., Romano P., Ponge D., Raabe D.: Design of high strength steels by microalloying and thermomechanical treatment. Materials Science & Engineering, 2007, A463, s. 138-146.
2. Aulich C., Foerster R., Kempe H.: Leaf spring consisting of a fibre-composite material. IFC Composite GmbH. European Patent Office. Opis patentowy. EP1948960. Opubl. 2008.
3. Beretta S., Murakami Y.: Statistical analysis of defects for fatigue strength prediction and quality control of materials. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1998, 21, s. 1049-1065.

4. Bergengren Y., Larsson M., Melander A.: The influence of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardened spring steel. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1995, 18, s. 1071-1087.
5. Branowski B.: Sprężyny metalowe. PWN, Warszawa 1997.
6. Dreszer K.A. (et all.): Wybrane systemy regulacji i zabezpieczeń przed przeciążeniami pługów. Technika rolnicza – ogrodnicza – leśna, 2007, 3.
7. Drozd K., Weroński A.: Influence of heat treatment and corrosion atmosphere on surface layer properties of selected spring steels. Inżynieria Materiałowa, 2004, 140, s. 713-716.
8. Furuya Y.: Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high strength steel. Materials Science & Engineering, 2011, A528, s. 5234-5240.
9. Furuya Y., Abe T.: Effect of mean stress on fatigue properties of 1800MPa-class spring steels. Materials & Design, 2011, 32, s. 1101-1107.
10. Harada Y., Fukaura K., Haga S.: Influence of microshot peaning on surface layer characteristics of structural steel. Jaournal of Materials Processing Technology, 2007, 191, s. 297-301.
11. Kandrotaitė Janutienė R., Žvinys J.: Experimental analysis of transformation plasticity and stress relaxation of carbon spring steel during tempering. Mechanika, 2008, 6, s. 77-80.
12. Kosobudzki M., Jamroziak K.: Budowa ustrojów nośnych zawieszeń samochodów ciężarowo-osobowych wysokiej mobilności sił zbrojnych RP. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych, 2009, 152, s. 97-112.
13. Lee C.S., Lee K.A., Li D.M., Yoo S.J., Nam W.J.: Effect of heat treatment on fatigue resistance of spring steel 60SiCr7VAT. Metal Science & Heat Treatment, 2010, 52, s. 57-60.
14. Nie Y., Hui W., Fu W., Weng Y.: Effect of boron on delayed fracture resistance of medium-carbon high strength spring steel. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 14, s. 53-57.
15. Palma E.S., dos Santos E.S.: Fatigue damage analysis in an automobile stabilizer bar. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – D – Journal of Automobile Engineering, 2002, 216, s. 865-871.
16. Prawoto Y., Ikeda M., Manville S.K., Nishikawa A.: Design and failure modes of automotive suspension springs. Engineering Failure Analysis, 2008, 15, s. 696-706.
17. Talarczyk W.: Konstrukcja i działanie kompaktowej brony talerzowej. Technika rolnicza – ogrodnicza – leśna, 2007, 2, s. 11-13.
18. Talib A.R.A. (et all.): Developing a composite based elliptic spring for automotive applications. Materials and Design, 2010, 31, s. 475-484.
19. Shin J-C. i in.: Correlation of microstructure and fatigue properties of two high-strength spring steels. International Journal of Fatigue, 1999, 6, 571-579.
20. Wang Q.Y. i in.: High-cycle Fatigue Crack Initiation and Propagation Behaviour of High-strength Spring Steel Wires. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1999, 8, 673-677.
21. Zebdi O., Boukhili R., Trochu F.: Optimum design of a composite helical spring by multi-criteria optimization. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2009, 28, s. 1713-1732.

FRACTOGRAPHY AND METALLOGRAPHY EXAMINATION OF SUSPENSION SPRINGS DAMAGES

Summary. In the paper there are presented results of selected properties of a damaged springs from steel that were assembled in vehicles' suspensions. The aim of study was to examine the issue of determining the causes of damage and attempt to systematize them. The direct cause of the fracture, the most frequently observed, was the presence of microcracks beside the fracture on the surface of damaged elements. The complex chemical analysis, macro – and microscopic examination and hardness tests allowed to identify the causes of microcracks in the material even if the chemical composition or the basic analysis of elements hardness were not allowed to indicate the possible causes of damage.

Key words: fracture of spring, microstructure, decarburization

Leszek Gil*, Piotr Ignaciuk**

WPŁYW LICZBY KWASOWEJ NA SMARNOŚĆ BIOPALIW

Streszczenie. Paliwa stosowane do zasilania silników ZS oprócz podstawowej funkcji jaką jest dostarczanie energii pełnią również funkcję oleju smarującego. W tym zakresie najważniejszym zadaniem jest smarowanie par precyzyjnych aparatury wtryskowej. W artykule przedstawiono techniczne możliwości wpływania na smarność biopaliw.

Słowa kluczowe: biopaliwo, liczba kwasowa, smarność, aparatura wtryskowa, silnik ZS

Wstęp

Unia Europejska nałożyła na kraje członkowskie obowiązek stosowania biopaliw płynnych do zasilania silników trakcyjnych w transporcie drogowym. Głównym celem tego działania jest ograniczenie zużycia ropy naftowej oraz zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. W Europie i w Polsce, ze względów klimatycznych i agrotechnicznych jako biopaliwa płynne wykorzystuje się najczęściej estry metylowe oleju rzepakowego oraz ich mieszaniny z olejem napędowym. Opisane w artykule biopaliwo zostało oparte na estrach metylowych oleju lnianki. Z uwagi na niskie temperatury krzepnięcia i blokowania zimnego filtru paliwa może ono mieć szersze zastosowanie w naszej szerokości geograficznej [2]. W silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym paliwo stanowi jedyne źródło smarowania precyzyjnie pasowanych elementów układu wtryskowego. Istotna jest tu zatem smarność paliwa, która określa jego zdolność do wytwarzania mocno związanej ze smarowana powierzchnia warstwy granicznej [4]. Pod względem chemicznym warstwę tą stanowią łańcuchy węglowodorowe „przyłączone" do czystej powierzchni metalu polarną grupą karboksylową. Grupa ta jest charakterystyczna dla kwasów karboksylowych – stąd zakwaszenie nimi paliwa polepsza jego skłonność do wytwarzania warstwy granicznej. Warstwa graniczna stanowi zabezpieczenie powierzchni przed zużyciem w przypadku braku filmu smarnego. W tym aspekcie smarność paliwa wpływa znacząco na trwałość eksploatacyjną par precyzyjnych aparatury wtryskowej.

1. Charakterystyka fizyko – chemiczna badanych paliw

W prezentowanych badaniach wykorzystano dwa rodzaje paliw. Pierwszym był ogólnie dostępny w handlu olej napędowy produkowany przez Orlen – VERVA F 4,8 spełniający wy-

* *Wydział Transportu i Informatyki, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie*
** *Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Lubelska, p.ignaciuk@pollub.pl*

magania normy PN-EN 590:2009 „Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań". Przesłaniem do wyboru oleju napędowego VERVA F 4,8 był fakt, że nie zawiera on w swoim składzie estrów, które mogłyby niwelować ewentualne różnice pomiędzy badanymi paliwami. Jako drugie paliwo zastosowano estry metylowe oleju lnianki, których zmierzone parametry porównano z wymaganiami normy ASTM D 6751-06b oraz PN-EN 14214:2009 „Paliwa do pojazdów samochodowych. Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) do silników o zapłonie samoczynnym (Diesla). Wymagania i metody badań". W badaniach wykorzystano czyste estry metylowe wytworzone w procesie estryfikacji. Wybrane własności paliw użytych do badań zestawiono w tabeli 1. Orientacyjny skład oleju lnianki siewnej z którego wykonano estry przedstawiono tabeli 2.

Tabela 1. Wybrane własności oleju napędowego i estrów metylowych oleju lnianki [1, 2]

Olej	Gęstość w 20°C [kg/dm^3]	Wartość energetyczna [MJ/kg]	Lepkość kinematyczna w 40°C [mm^2/s]	Liczba cetanowa	Temperatura krzepnięcia [°C]	Temperatura zapłonu [°C]
ON	0,84	42,7	2,0-4,5	50	poniżej –20*	80
Estry metylowe lnianki	0,88	37	5,18	52	–16	

Tabela 2. Orientacyjny skład oleju lnianki siewnej (% wagowy) [1]

Olej lniankowy	
Kwasy nasycone	8 %
Kwas oleinowy	12,5 %
Kwas linolowy	18 %
Kwas linolenowy	36 %
Kwas erukowy	3,5%
Inne nieopisane	22 %

2. Metodyka badawcza

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, w którym równolegle pracowały dwie zasilane różnymi paliwami pompy wtryskowe. Stanowisko zasadniczo przeznaczone było do badania procesów zużycia sekcji tłoczących pomp wtryskowych. Umożliwiało ono kontrolę temperatury paliwa, temperatury pompy oraz prędkości obrotowej i liczby wykonanych obrotów (cykli pracy) przez badane pompy wtryskowe. Obiektem badań były pompy wtryskowe firmy MOTORPAL stosowane w silniku 4CT90. W trakcie wcześniej prowadzonych badań trwałościowych zaobserwowano różną prędkość narastania temperatury w zależności od zastosowanego rodzaju paliwa, którym były zasilane badane pompy. Różną prędkość narastania temperatury rejestrowano przy każdorazowym uruchamianiu stanowiska. Zaobserwowano, że temperatura estrów lnianki zawsze narastała szybciej niż temperatura oleju napędowego, zanim osiągnęła wartość, przy której układ regulacji stabili-

zował ją na zadanym poziomie. Główną przyczyną wywiązywania się większej ilości ciepła w estrach oleju lnianki jest ich większa lepkość kinematyczna. Powoduje ona większe opory przepływu zarówno w przewodach zasilających badane pompy jak i samych pompach czy wtryskiwaczach. Innym czynnikiem, który ma wpływ na wytwarzanie ciepła jest tarcie, na którego wartość wpływa smarność – czyli zdolność do wytworzenia mocnej zapobiegającej zacieraniu warstwy granicznej. Jednym ze sposobów zwiększenia smarności jest zwiększenie liczby kwasowej paliwa. Liczba kwasowa jest to ilość miligramów KOH (wodorotlenku potasu) potrzebna do zneutralizowania kwasów tłuszczowych znajdujących się w 1 gramie paliwa. W przypadku paliw i olejów smarujących o liczbie kwasowej decyduje zawartość kwasów organicznych zawierających grupę karboksylową. Grupa ta wykazuje silne powinowactwo do metali i łatwo ulegają chemisorpcji na ich powierzchni. Zwiększonej liczbie kwasowej odpowiada większa ilość zaabsorbowanych na powierzchni metalu łańcuchów węglowodorowych, które chronią ja przed uszkodzeniem oraz zmniejszają tarcie pomiędzy smarowanymi powierzchniami. W prowadzonych badaniach jako czynnika zwiększającego smarność użyto kwasu oleinowego (oleiny). Dodając oleinę do estrów oleju lnianki zwiększany ich liczbę kwasową. Liczba kwasowa czystego kwasu oleinowego $C_{18}H_{34}O_2$ wynosi 198,69 [mgKOH/g]. Zwiększeniu kwasowości towarzyszy wzrost smarności z uwagi na wcześniej omówione zjawisko chemisorpcji.

W badaniach wykorzystano trzy próbki biopaliwa na bazie estrów metylowych oleju lnianki:

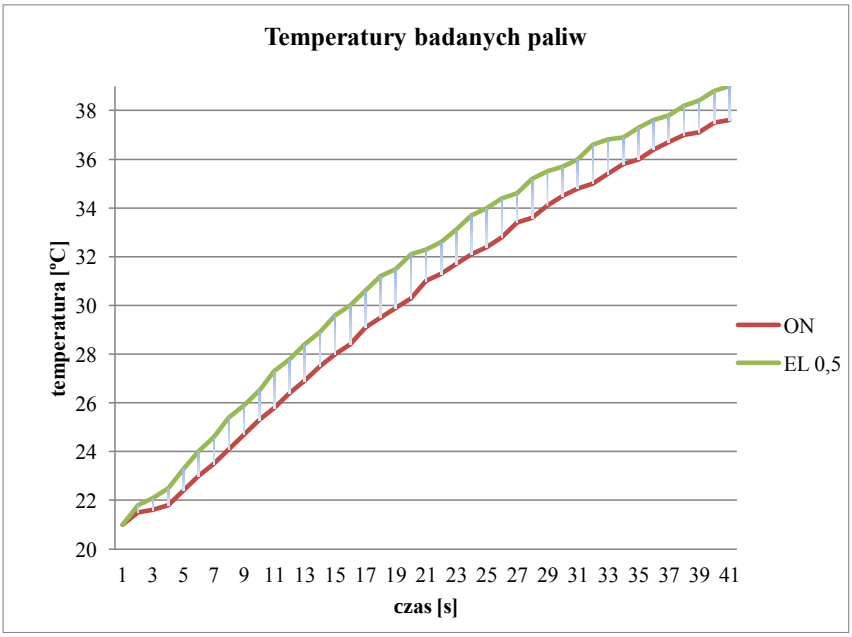
- Biopaliwo spełniające wymagania PN-EN 14214:2009 o liczbie kwasowej równej 0,5 [mgKOH/g],
- Biopaliwo o liczbie kwasowej 5 [mgKOH/g],
- Biopaliwo o liczbie kwasowej 10 [mgKOH/g].

Dla każdej zbadanych próbek ustalono przebieg wzrostu temperatury paliwa w pompie wtryskowej w odniesieniu do klasycznego oleju napędowego [1].

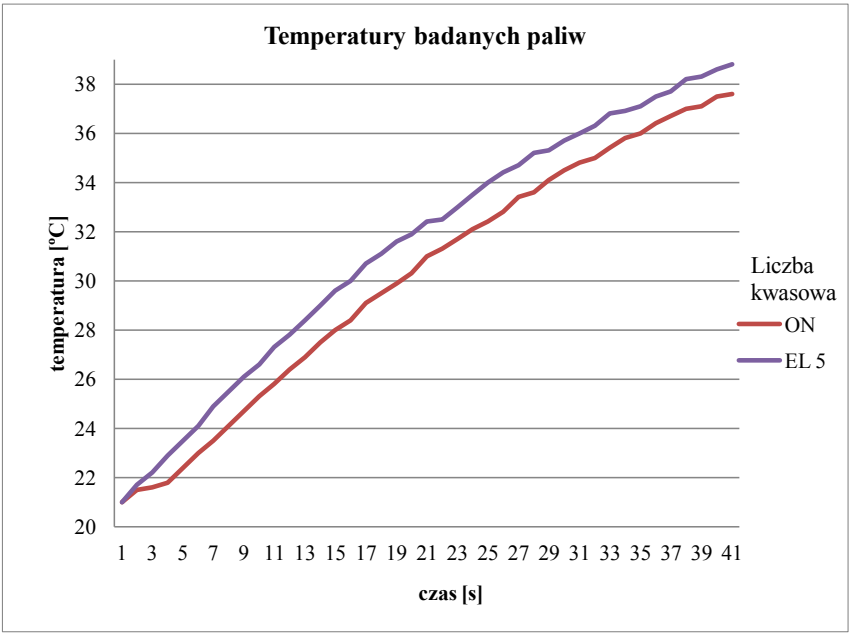
3. Wyniki pomiarów zmian temperatur paliwa

Estry lnianki liczbie kwasowej (LK=0,5), osiągają wyższą temperaturę w czasie badań na stanowisku niż olej napędowy, przyczyną może być wspominania większa lepkość kinematyczna. Przebieg zmian temperatur oleju napędowego oraz czystych estrów metylowych oleju lnianki (o liczbie kwasowej LK=0,5) przedstawiono na rysunku 1.

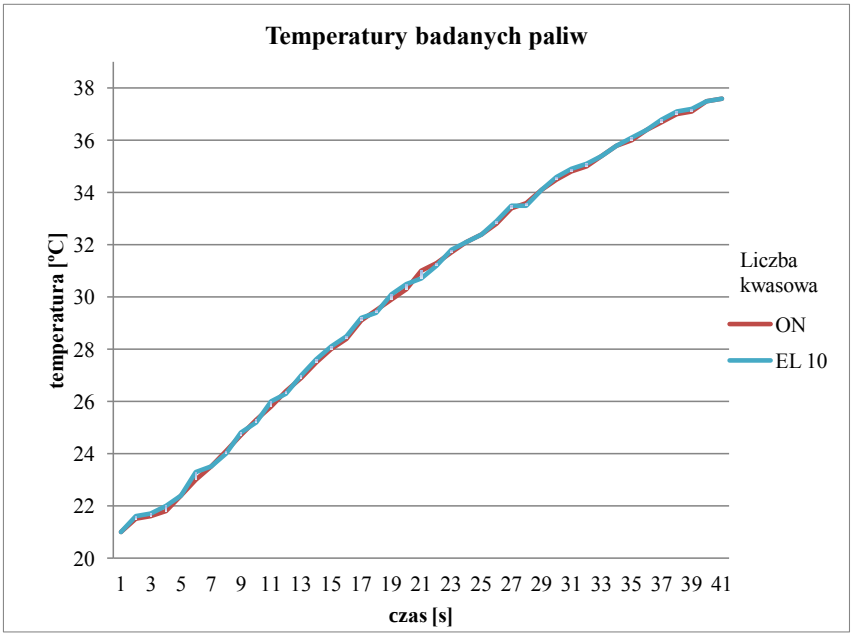
Zwiększenie LK estrów metylowych oleju lnianki od wartości 5 [mgKOH/g] nie spowodowało istotnych zmian w szybkości narastania ich temperatury (rysunek 2). Wyraźny spadek szybkości wzrostu temperatury badanego biopaliwa nastąpił dopiero gdy liczba kwasowa została zwiększoną do wartości wyższych niż 5. Jednak uzyskanie podobnej szybkości przyrostu temperatury do obserwowanego na oleju napędowym uzyskano dopiero gdy liczba kwasowa została podniesiona do 10 [mgKOH/g] (rysunek 3). Świadczy to, że pomimo niezmienionych oprócz oporów przepływu musiały znacząco zmaleć opory tarcia dzięki wytworzeniu się śliskiej warstwy granicznej. Warstwa ta odpowiada tu za redukcje ilości wydzielonego ciepła.



Rys. 1. Różnice temperatur podczas nagrzewania się paliw w trakcie badań: ON i estry lnianki o LK=0,5



Rys. 2. Różnice temperatur podczas nagrzewania się paliw w trakcie badań: ON i estry lnianki o LK=5



Rys. 3. Różnice temperatur podczas nagrzewania się paliw w trakcie badań: ON i estry lnianki o LK=10

4. Wnioski

- Na wzrost temperatury paliwa tłoczonego przez rzędową pompę wtryskową wpływa lepkość paliwa oraz tarcie w parach precyzyjnych. Na wartość oporów tarcia wpływa smarność paliwa, które spełnia tu rolę oleju smarującego.
- O smarności paliwa decyduje ilość zawartych w nim węglowodorów zawierających grupę karboksylową, dzięki której ulegają one chemisorpcji na czystej powierzchni metalu.
- Dodają do biopaliwa oleinę zwiększmy jego liczbę kwasową, ale też jednocześnie wpływamy na jego smarność (ulega ona wtedy zwiększeniu). Wzrostowi smarności towarzyszy zmniejszenie oporów tarcia, co skutkuje zmniejszeniu ilości wydzielanego ciepła (objawia się to niższą temperaturą pompowanego paliwa).
- Poprzez dodawanie oleiny możemy modyfikować właściwości smarne biopaliw. W badaniach zwiększenie liczby kwasowej estrów lnianki do 5 [mgKOH/g] nie spowodowało widocznych zmian w narastaniu temperatury badanego paliwa (rys. 2). Dopiero zwiększenie liczby kwasowej do 10 [mgKOH/g] spowodowało jednakowy przyrost temperatury w obu badanych paliwach: estrach oleju lnianki i oleju napędowym (rys. 3).

Literatura

1. Gil L.: Badania zużycia tribologicznego elementów układu wtryskowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego olejami roślinnymi. Rozprawa doktorska . Lublin 2010.
2. Lnianka, czyli lepszy rydz..., Wiadomości Rolnicze Polska, Wrzesień 2006.
3. Sitnik L.: Ekopaliwa silnikowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
4. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.

INFLUENCE OF ACID NUMBER ON THE BRICITY OF BIOFUELS

Summary. Fuels used for the fueling of diesel engines, except their basic function which is providing the energy, fulfill also function of lubricating medium. In this range, the most important task is lubricating the precise couplings of injection apparatus. The paper presents technical abilities of influencing the lubricity of biofuels.

Key words: biofuel, acid number, lubricity, injection apparatus, diesel engine

Piotr Ignaciuk[*], Leszek Gil[**], Stefan Liśćak[***]

PORÓWNANIE EMISJI ZWIĄZKÓW TOKSYCZNYCH SILNIKA ZS ZASILANEGO OLEJEM NAPĘDOWYM I BIOPALIWAMI OPARTYMI NA ESTRACH OLEJU LNIANKI I ESTRACH OLEJU RZEPAKOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań emisji wybranych związków toksycznych silnika 4CT90 zasilanego klasycznym olejem napędowym i estrami oleju lnianki oraz biopaliwem B100. Badania przeprowadzono w oparciu o wymagania testów ETC, ESC oraz NRTC.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, biopaliwa, emisja związków toksycznych, testy emisji

Wstęp

Ograniczenia emisji dwutlenku węgla zawierającego węgiel kopalny wymuszają zwiększanie udziału biokomponentów w paliwach. Biopaliwa lub biodododatki do paliw silnikowych mają w 2014 roku stanowić 7,55% całego rynku paliwowego. Wynika z tego, że najważniejszym efektem stosowania biododatków paliwach ma być obniżenie globalnej emisji dwutlenku węgla – jako gazu cieplarnianego. W przypadku biopaliw całość spalanego węgla pochodzi z fotosyntezy i wpisuje się w naturalny obieg tego pierwiastka w przyrodzie. Oczywiście osobną kwestią jest miara wpływu emisji CO_2 przez silniki spalinowe na tzw. efekt cieplarniany. W artykule przedstawiono wyniki stanowiskowych badań emisji wybranych związków toksycznych silnika 4CT90 zasilanego olejem napędowym, handlowymi estrami oleju rzepakowego (B100) oraz estrami metylowymi oleju lnianki siewnej (EL). Estry oleju lnianki – jako paliwo nie zawierały żadnych dodatków uszlachetniających i zostały wytworzone specjalnie na potrzeby badań. Porównując emisję związków toksycznych przez silnik zasilany tymi paliwami należy pamiętać, że obniżenie wartości emisji tlenku węgla i węglowodorów podczas zasilania estrami olejów roślinnych wynika głównie z zawartości tlenu związanego chemicznie w cząsteczkach estrów, który ułatwia proces spalania.

1. Procedura badawcza

Pomiary emisji związków toksycznych przeprowadzono w oparciu o standardowe procedury tzw. testy emisji ETC (Emission Test Cycles) oraz ESC (European Stationary Cycle)

* *Katedra Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Lubelskiej, p.ignaciuk@pollub.pl*
** *Wydział Transportu i Informatyki, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie*
*** *Katedra Cestnej a Mestkej Dopravy, Zilinska Univerzita v Zilinie*

wykorzystywane do certyfikacji emisji związków toksycznych przez silniki Diesla. Warunki pracy silnika w teście ETC odzwierciedlają jazdę różnych warunkach tj. w warunkach miejskich, pozamiejskich oraz po autostradzie. Z kolei w teście ESC silnik pracuje z trzema różnymi wartościami prędkości obrotowej przy różnych obciążeniach. Testy ETC zostały wprowadzone wraz z ESC, do certyfikacji emisji ciężkich silników Diesla w Europie od roku 2000 [3, 4]. Testami ESC i ETC zastąpiono wcześniej stosowane badania określane jako R-49.

Test ETC odzwierciedla rzeczywiste warunki ruchu drogowego pojazdów ciężarowych, uwzględniając jazdę w miastach, w terenach pozamiejskich i jazdę autostradą.

Czas trwania całego testu to 1800 s. Czas trwania każdej części wynosił 600 s.

- część pierwsza przedstawia jazdę po mieście z maksymalną prędkością 50 kilometrów na godzinę, która charakteryzuje się częstymi zatrzymaniami pojazdu i dużym udziałem pracy silnika na biegu jałowym,
- część druga to jazda w warunkach pozamiejskich z częstymi przyśpieszeniami, średnia prędkość jazdy wynosi około 72 kilometrów na godzinę,
- część trzecia jazda autostradą, ze średnią prędkością około 88 km/h [4].

W teście ESC prędkości obrotowe silnika, są określone w następujący sposób:

- wysoka prędkość n_{hi} jest określona przez obliczenie 70% deklarowanej maksymalnej mocy netto. Najwyższa prędkość silnika przy tej wartości rozwijanej mocy występuje na krzywej mocy określanej jako n_{hi},
- n_{lo} niskiej prędkości określa się przez obliczenie 50% deklarowanej maksymalnej mocy netto. Najniższą prędkość obrotową silnika, gdzie występuje ta wartość mocy na krzywej mocy określa się jako n_{lo},
- prędkości silnika A, B i C, które mają być używane podczas badań są następnie obliczane ze wzorów:

$$A = n_{lo} + 0{,}25\,(n_{hi} - n_{lo}) \tag{1}$$

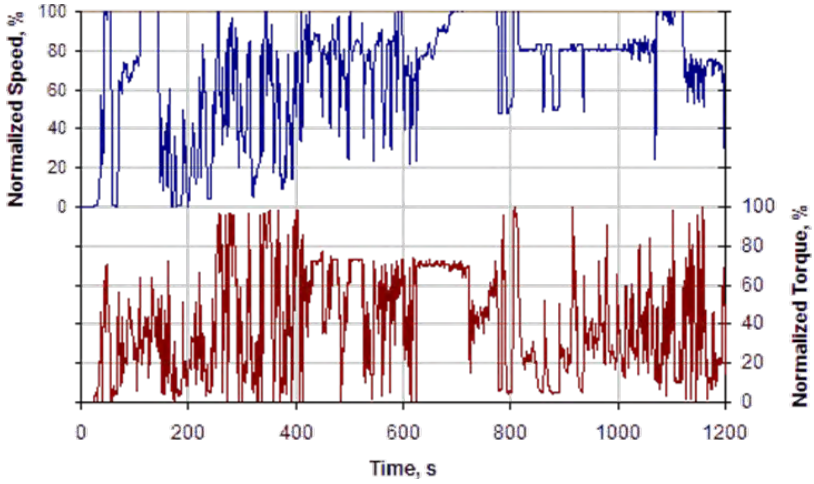
$$B = n_{lo} + 0{,}50\,(n_{hi} - n_{lo}) \tag{2}$$

$$C = n_{lo} + 0{,}75\,(n_{hi} - n_{lo}) \tag{3}$$

Tabela 1. Tryby pracy silnika według testu ESC [3]

Tryby testu ESC				
Tryb	**Prędkość obrotowa silnika**	**% obciążenia**	**Czynnik wagi, %**	**Czas trwania**
1.	Biegu jałowego	0	15	4 minuty
2.	A	100	8	2 minuty
3.	B	50	10	2 minuty
4.	B	75	10	2 minuty
5.	A	50	5	2 minuty
6.	A	75	5	2 minuty
7.	A	25	5	2 minuty
8.	B	100	9	2 minuty
9.	B	25	10	2 minuty
10.	C	100	8	2 minuty
11.	C	25	5	2 minuty
12.	C	75	5	2 minuty
13.	C	50	5	2 minuty

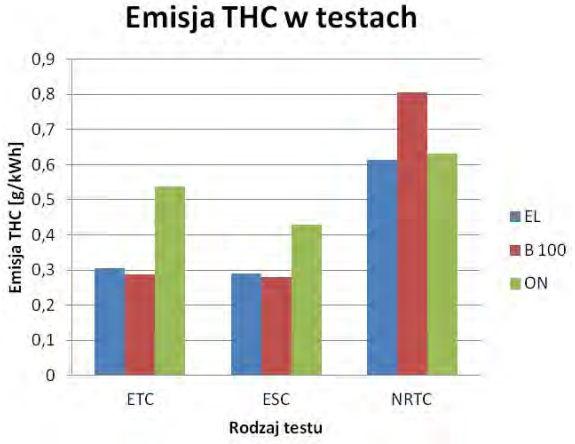
Test NRTC odzwierciedla dynamiczny cykl pracy silników wysokoprężnych. Cykl prowadzony na hamowni silnikowej przeprowadza się według harmonogramu o łącznej długości czasu 1200 sekund. Prędkość i moment obrotowego podczas testu NRTC są przedstawione w na rysunku 1.



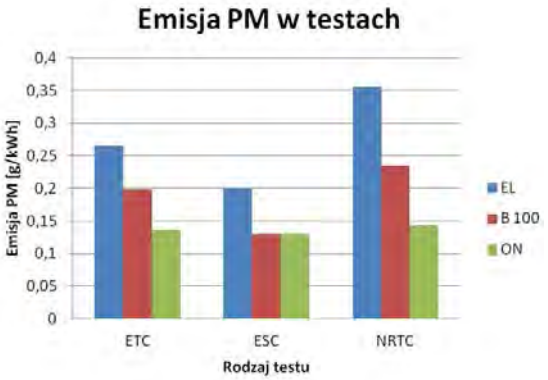
Rys. 1. Znormalizowana prędkość (normalized speed) i moment obrotowy (normalized torque) podczas testu NRTC w czasie 1200 s [5]

2. Wyniki badań

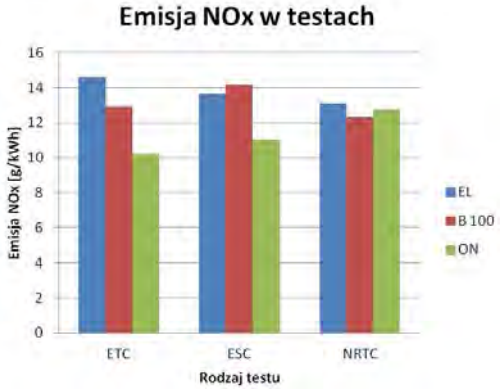
Na rysunkach 2 – 6 przedstawiono wyniki badań emisji wykonane według testów ETC (Emission Test Cycles), ESC (European Stationary Cycle) i NRTC (Nonroad Transient Cycle).



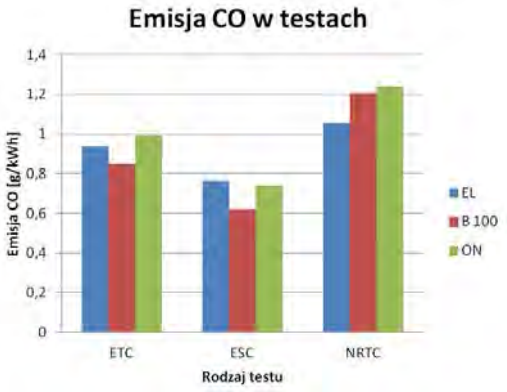
Rys. 2. Porównanie emisji węglowodorów w testach ETC, ESC i NRTC przy zasilaniu silnika EL, B 100 i ON



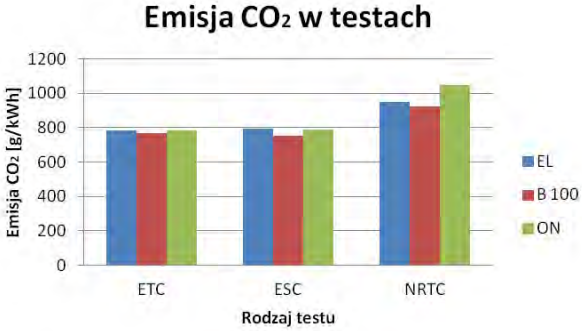
Rys. 3. Porównanie emisji cząstek stałych w testach ETC, ESC i NRTC przy zasilaniu silnika EL, B 100 i ON



Rys. 4. Porównanie emisji tlenków azotu w testach ETC, ESC i NRTC przy zasilaniu silnika EL, B 100 i ON



Rys. 5. Porównanie emisji tlenku węgla w testach ETC, ESC i NRTC przy zasilaniu silnika EL, B 100 i ON



Rys. 6. Porównanie emisji dwutlenku węgla w testach ETC, ESC i NRTC przy zasilaniu silnika EL, B 100 i ON

Dokonując porównania emisji wybranych związków toksycznych w spalinach według testów ETC, ESC i NRTC można dostrzec istotne różnice w zależności od metody prowadzenia badań. Najważniejszym czynnikiem decydującym o emisji wybranych związków jest rodzaj paliwa, którym zasilano silnik podczas badań.

Testy ETC i ESC w porównaniu z testem NRTC mają bardziej zbliżone wyniki i pokazują, że największa emisja węglowodorów powstaje podczas spalania ON a najmniejsza przy biopaliwach (rys. 2). Natomiast z testu NRTC, przeprowadzanego w innych warunkach, opisanych powyżej wynika, iż najwyższa emisja węglowodorów powstaje podczas spalania B 100, a najniższa przy EL. We wszystkich trzech testach wyniki emisji cząstek stałych dla badanych paliw są zbliżone. Najmniej cząstek stałych dostaje się do środowiska przy spalaniu ON, najwięcej przy zasilaniu silnika EL. Według testów ETC i NRTC najwięcej tlenków azotu jest emitowanych podczas pracy silnika zasilanego EL. W teście ESC największa emisja powstaje przy zastosowaniu B 100, natomiast przy EL jest na nieco niższym poziomie. Przeprowadzone testy dotyczące emisji NO_x wykazały, że najbardziej przyjazne środowisku jest zasilanie silnika ON. Najniższą emisję tlenku węgla zaobserwowano podczas zasilania silnika B 100, nieznacznie wyższa jest przy zastosowaniu EL. Najmniej korzystnym do zasilania silników, pod względem emisji tlenku węgla jest ON. Wszystkie prowadzone testy pokazały zbliżoną ilość emisji CO_2 we wszystkich badanych paliwach.

Testy badawcze ETC, ESC i NRTC, dotyczące emisji gazów spalinowych przy zasilaniu silnika EL, B 100 i ON dowodzą, że zasilanie wszystkimi wymienionymi paliwami powoduje powstawanie zbliżonej ilości poszczególnych składników spalin.

3. Wnioski

Badania emisji związków toksycznych w spalinach przeprowadzone według testów: ESC, ETC i NTRC pozwalają stwierdzić, że:

- emisja węglowodorów dla wszystkich badanych paliw jest na zbliżonym poziomie,
- emisja cząstek stałych jest największa dla estrów lnianki,

– emisja tlenków azotu przy estrami lnianki jest zasilaniu największa w teście ETC i NRTC, natomiast w teście ESC jest nieco mniejsza niż przy zasilaniu paliwem rzepakowym B100,
– we wszystkich testach emisja tlenków azotu jest większa przy zasilaniu silnika biopaliwami, niż w przypadku zasilania silnika olejem napędowym,
– emisja tlenku węgla jest najmniejsza dla estrów lnianki w teście NRTC, w pozostałych testach porównywalna do innych badanych paliw.

Literatura

1. Gil L.: Badania zużycia tribologicznego elementów układu wtryskowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego olejami roślinnymi. Rozprawa doktorska . Lublin 2010.
2. Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstwa Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają zostać podjęte przeciwko emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych przez silniki wysokoprężne stosowane w pojazdach oraz emisji zanieczyszczeń gazowych z silników z wymuszonym zapłonem napędzanych gazem ziemnym lub gazem płynnym stosowanych w pojazdach oraz zmieniająca dyrektywę Rady 88/77/EWG.
3. www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.html, 20. 04.2010.
4. www.dieselnet.com/standards/cycles/etc.html, 20. 04.2010.
5. www.dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.htm, 20. 04.2010.

COMPARISON OF EXHAUST TOXIC EMISSIONS FROM DIESEL ENGINE FUELED WITH DIESEL FUEL AND BIOFUELS BASED ON RAPE-SEED AND CAMELIE-SEED METYL ESTERS

Summary. The paper presents exhaust emissions of some toxic compounds measured on the 4CT90 engine fueled with classical diesel fuel and methyl esters of cameline-seed oil and biofuel B100. Research was done using procedures corresponding to test ETC, ESC and NRTC.

Key words: diesel engine, biofuels, toxic exhaust emissions, emission tests

Zbigniew Korczewski*

IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ TŁOKÓW SILNIKÓW OKRĘTOWYCH METODAMI ENDOSKOPOWYMI W EKSPLOATACJI

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia diagnostyki endoskopowej przestrzeni roboczych okrętowych tłokowych silników spalinowych. Przybliżono podstawy teoretyczne procesu powstawania uszkodzeń tłoków układów cylindrowych w aspekcie identyfikacji i genezy znanych i rozpoznawalnych stanów niezdatności eksploatacyjnej. Zaprezentowano wyniki badań endoskopowych dotyczące uszkodzeń tłoków, które najczęściej występowały w procesie eksploatacji wybranych typów silników okrętowych.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, badanie endoskopowe, okrętowy tłokowy silnik spalinowy, uszkodzenia tłoków

Wstęp

Badanie wizualne powierzchni, tworzących przestrzenie robocze okrętowych tłokowych silników spalinowych z zastosowaniem specjalistycznych wzierników tzw. endoskopów to obecnie niemal podstawowa metoda diagnostyki technicznej [4]. Struktura powierzchniowa materiału konstrukcyjnego widoczna jest podczas badań jak przez lupę, zazwyczaj z pewnym powiększeniem, co umożliwia wykrycie, rozpoznanie i ewentualną ocenę ilościową występujących defektów i wad materiałowych, które zazwyczaj nie generują obserwowalnych zmian wartości parametrów diagnostycznych. Badanie endoskopowe wyłączonego z ruchu silnika pozwala natychmiast ocenić stopień zużycia i zanieczyszczenia jego elementów konstrukcyjnych. Tłoki układów cylindrowych, stanowiąc newralgiczny element silnika, o największej częstości występowania uszkodzeń, charakteryzują się wysoką podatnością diagnostyczną

1. Fizyka uszkodzeń eksploatacyjnych

Tłok, jako ruchome dno komory spalania układu cylindrowego silnika stanowi element konstrukcyjny narażony na największe obciążenia mechaniczne i cieplne. Oddziaływanie na materiał konstrukcyjny denka tłoka ciśnień osiągających 20 MPa i temperatury do 800 K [10] powoduje, że w zakresie ustalonych obciążeń maksymalnych i intensywnych (forsownych) zmian częściowego obciążenia mogą nastąpić na tyle istotne deformacje kształtu i zmiany

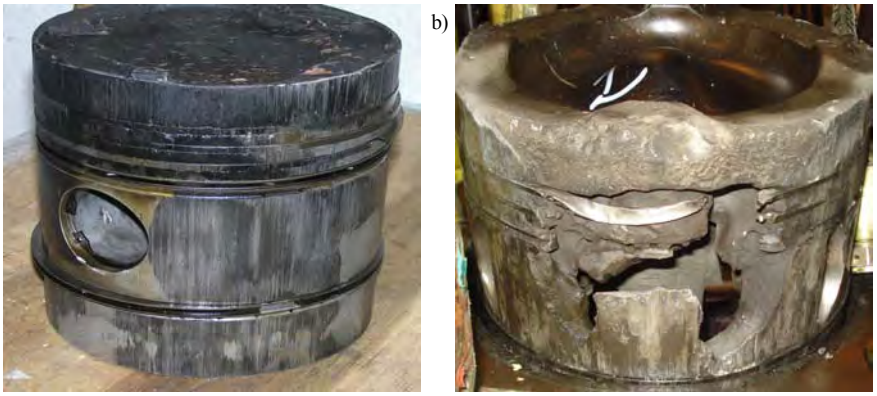
* *Katedra Siłowni Okrętowych, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska, z.korczewski@gmail.com*

właściwości wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego tłoka, że w wyniku ich rozwoju następują zwykle jego poważne uszkodzenia pierwotne, które nieuchronnie prowadzą do rozległych uszkodzeń wtórnych układu tłokowo-korbowego i całego silnika.

W zależności od miejsca i charakteru występowania uszkodzeń układ konstrukcyjny tłoka można podzielić na następujące elementy:

- denko tłoka – pęknięcia, odkształcenia plastyczne, przegrzanie i przepalenie,
- część pierścieniowa – pęknięcia, zatarcia, wyłamanie półek pierścieni,
- część prowadząca (nośna*) – korozja, pęknięcia, zatarcia,
- piasta sworznia tłokowego – zatarcie i pęknięcia piasty, pęknięcia, wykruszenia rowków pierścieni ustalających sworzeń.

Natomiast ze względu na możliwości bezpośredniego wykrycia tych uszkodzeń metodami endoskopowymi to są one ograniczone tylko i wyłącznie do denka tłoka. Dlatego, o możliwych przyczynach uszkodzeń zlokalizowanych w pozostałych elementach tłoka można wnioskować dopiero po jego zdemontowaniu z silnika (ewentualnie po zdemontowaniu bloku cylindrowego), z powodu uszkodzeń zlokalizowanych na gładzi tulei cylindrowej – rys. 1.

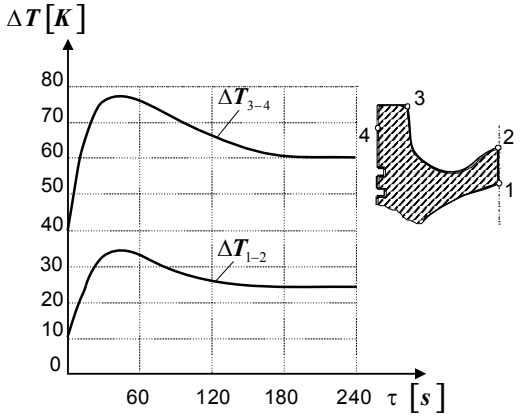


Rys. 1. Uszkodzenia części pierścieniowej i prowadzącej tłoka, a) tłok ze śladami zatarcia w części pierścieniowej i prowadzącej, rozkucie półek pierścieni, b) zniszczony tłok silnika

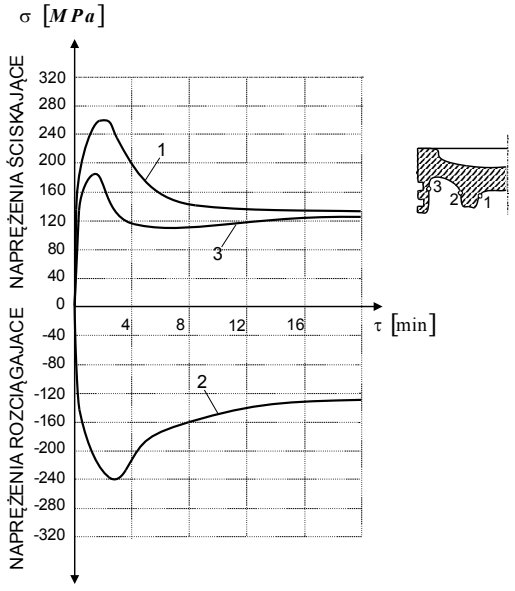
Najczęstszą przyczyną uszkodzenia tłoków są zakłócenia funkcjonowania układu zasilania silnika paliwem i powietrzem, szczególnie podczas jego rozruchu. Prowadzi to zazwyczaj do stukowego (detonacyjnego) spalania paliwa, które charakteryzuje bardzo duża szybkość rozprzestrzeniania się płomienia w komorze spalania (nawet kilkanaście razy większa niż przy normalnym spalaniu).

Następuje intensywny wzrost pulsacji ciśnienia i temperatury czynnika roboczego i w konsekwencji wzrost cieplnego i mechanicznego obciążenia elementów komory spalania, w szczególności tłoka [6]. W rezultacie wzrastających gradientów temperatury w strukturze konstrukcyjnej tłoka (rys. 2) pojawiają się jego cykliczne deformacje i wzrost naprężeń cieplnych (rys. 3), które znacznie przekraczają wartości odpowiadające stanom pracy ustalonej silnika (nawet dwukrotnie) [3].

* *Przenosi siłę normalną na gładź cylindra*



Rys. 2. Zmiany wartości gradientów temperatury w materiale konstrukcyjnym tłoka silnika szybkoobrotowego wykonanego ze stopu aluminium podczas wzrostu obciążenia [3]



Rys. 3. Zmiany wartości naprężeń cieplnych w materiale konstrukcyjnym tłoka wolnoobrotowego silnika okrętowego MAN Diesel & Turbo typu K6Z57/80 podczas forsownego wzrostu obciążenia (30 sekundowe dojście do maksymalnej dawki paliwa i osiągnięcie nominalnej prędkości obrotowej wału korbowego po 150 sekundach) [3]

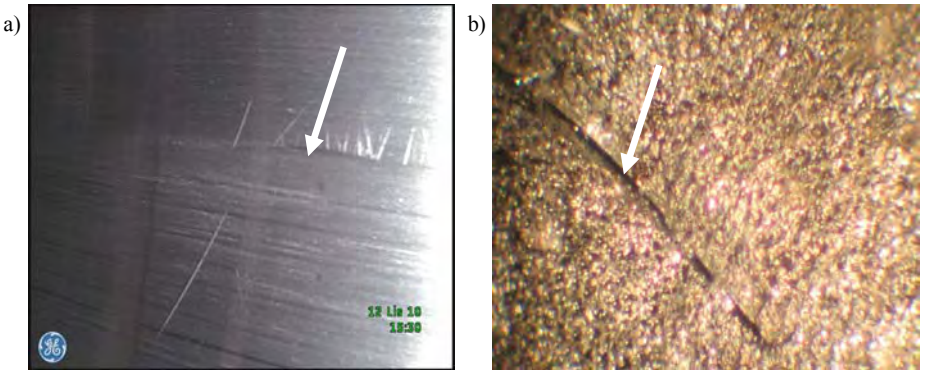
Przy czym szczególnie newralgicznym rejonem tłoka, z punktu widzenia stanu naprężeń cieplnych, jest jego wewnętrzna powierzchnia, gdzie ma miejsce największe nagromadzenie materiału (rejon piast sworznia tłokowego) [3, 10]. Naprężenie cieplne denka tłoka, w przypadku wysokodoładowanych silników okrętowych (średnie ciśnienie użyteczne powyżej 2 MPa), mogą osiągać porównywalne wartości w stosunku do naprężeń wewnętrznych od sił gazowych [10].

2. Endoskopowy obraz uszkodzeń

Na wyposażeniu bazy diagnostycznej Katedry Siłowni Okrętowych Politechniki Gdańskiej znajduje się wideoendoskop cyfrowy firmy EVEREST typu XLG3 wyposażony w głowicę pomiarową umożliwiającą identyfikację jakościową i ilościową wykrytych defektów powierzchniowych metodą „Cienia" – rys. 4. Szczegółową charakterystykę wideoenedoskopu wraz z metodyką realizacji diagnostycznych badań endoskopowych silników okrętowych zawierają publikacje [1, 2, 4, 12].

Rys. 4. Widok ogólny wideoendoskopu pomiarowego firmy EVEREST typu XLG3 [12]

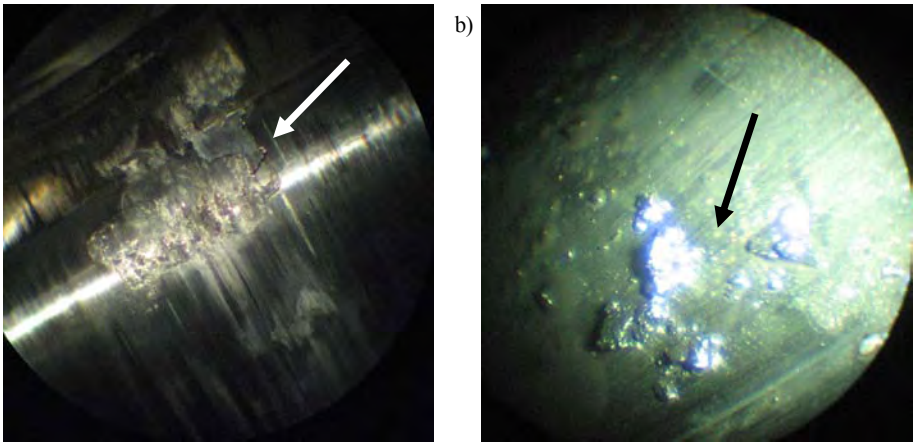
Skutkiem znacznego, lokalnego przegrzania denka tłoka, aż do przekroczenia granicy plastyczności materiału konstrukcyjnego, jest jego miejscowe spęczenie. Jeżeli wzrost temperatury denka tłoka jest tylko chwilowy może to skutkować również chwilowym przycieraniem, a nawet zakleszczaniem korony tłoka w gładzi cylindrowej – rys. 5a [5].



Rys. 5. Endoskopowy obraz mechanicznych i cieplno-zmęczeniowych konsekwencji zacierania tłoka w tulei cylindrowej, a) gładź tulei cylindrowej – ślady tarcia części prowadzącej tłoka, b) denko tłoka – pęknięcie zmęczeniowe

Inną konsekwencją tego zjawiska jest zmęczenie niskocyklowe denka tłoka, aż do wystąpienia pęknięć, związane z cyklicznymi naprężeniami ściskającymi i rozciągającymi materiału konstrukcyjnego – rys.5b. Są one wynikiem cyklicznego, odpowiednio: przegrzewania i rozszerzania się materiału oraz jego stygnięcia i kurczenia się, w trakcie realizacji cyklu roboczego silnika.

Jeżeli wzrost temperatury denka tłoka jest na tyle duży, że układ chłodzenia silnika nie jest w stanie przejąć strumienia ciepła od elementów konstrukcyjnych komory spalania następuje trwały wzrost wymiarów zewnętrznych korony tłoka, który zmienia warunki smarowania węzła ciernego tłok – tuleja. W takiej sytuacji, ze względu na „sprzyjające" warunki zaistnienia zużycia adhezyjnego II-ego rodzaju, niszczenia warstwy wierzchniej materiału konstrukcyjnego tłoka (wykonanego ze stopu aluminium), które polega na miejscowym sczepieniu wierzchołków powierzchni trących tłoka i tulei cylindrowej oraz odrywaniu cząstek aluminium i ich rozmazywania na gładzi cylindrowej – rys.6a. Często powierzchnia obszarów nawalcowań nie obejmuje całego obwodu tulei, co przy niewielkiej grubości nawalcowań świadczy zazwyczaj, że nastąpiło jedynie krótkotrwałe przekroczenie temperatury płynięcia materiału korony tłoka. Prawidłowa praca pierścieni, które po obniżeniu temperatury denka tłoka i poprawie warunków smarowania, „zdejmują" nawalcowany na powierzchnię tulei materiał tłoka, skutkuje niestety intensywnym wzrostem ilości opiłków aluminiowych w układzie smarowania silnika – rys.6b.

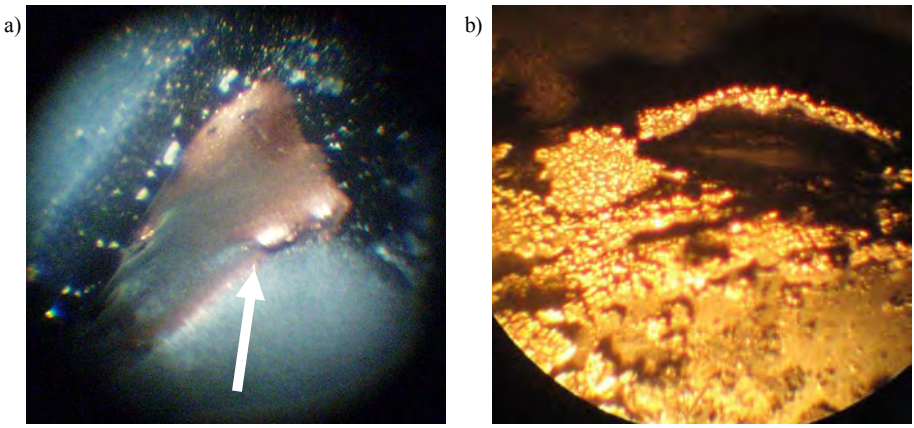


Rys. 6. Endoskopowy obraz skutków zużycia adhezyjnego tłoka ze stopu aluminium, a) gładź tulei cylindrowej – ślady nawalcowania warstwy materiału tłoka (stop aluminium), b) gładź tulei cylindrowej – opiłki metaliczne (stop aluminium)

Przedstawiony przebieg powstania uszkodzenia jest najbardziej prawdopodobny w sytuacji, kiedy silnik pracuje na biegu luzem lub na obciążeniach częściowych. W takich warunkach zmieniają się szczególnie niekorzystnie warunki pracy układu zasilania silnika paliwem, mającego bezpośredni wpływ na przebieg procesu spalania w cylindrze. Zgodnie z obowiązującymi zasadami eksploatacji silników okrętowych, jak i wymaganiami technologicznymi producentów, parametry regulacyjne układu wtryskowego tj.: dawkę paliwa

i geometryczny początek tłoczenia ustala się dla warunków obciążenia nominalnego. Jednak w przypadku pracy na obciążeniach częściowych zwiększa się znacznie nierównomierność dawkowania pomp wtryskowych, co oznacza, że do niektórych cylindrów dostarczana jest dawka paliwa wielokrotnie większa niż dawka zapotrzebowana, optymalna dla zadanego obciążenia silnika. W przypadku silników wielocylindrowych sytuacja ta jeszcze się pogarsza, bowiem w niektórych cylindrach, pomimo dostarczenia paliwa, nie dochodzi do jego samozapłonów. Podanie więc, większej niż zapotrzebowana dawki paliwa, czy to w wyniku nierównomierności dawkowania, czy też w wyniku gromadzącego się paliwa przy wypadaniu samozapłonów, prowadzi również do spalania detonacyjnego z omówionymi powyżej konsekwencjami*.

Bardzo często, wraz z występowaniem spalania detonacyjnego, następuje wzrost zwłoki samozapłonu, któremu, w sytuacji przesunięcia spalania poza GMP, towarzyszy intensywny wzrost temperatury wszystkich elementów komory spalania (w szczególności tłoka). Przeniesienie procesu spalania paliwa na suw rozprężania (pracy), przy niecałkowitym i niezupełnym charakterze tego procesu, skutkuje zwiększeniem ilości powstających osadów nagaru na powierzchniach ograniczających komorę spalania. Gruba warstwa nagaru na denku tłoka (rys.7b), powstająca szczególnie intensywnie przy pracy rozregulowanego silnika z obciążeniami częściowymi, pogarsza w sposób istotny warunki przepływu ciepła prowadząc w konsekwencji do przegrzania denka tłoka – rys. 7a.



Rys. 7. Endoskopowy obraz przegrzanego denka tłoka, a) denko tłoka – miejscowe przegrzanie materiału konstrukcyjnego, b) denko tłoka – gruba warstwa nagaru

Inną przyczyną przegrzania tłoka jest niedostateczne chłodzenie obszaru pierwszego pierścienia uszczelniającego. Jeżeli czas pomiędzy uruchomieniem, zasprzęgleniem i pełnym obciążeniem silnika okrętowego zgodny jest z wymaganiami producenta, to przy drożnym, poprawnie funkcjonującym układzie chłodzenia, silnik powinien być w ustalonym sta-

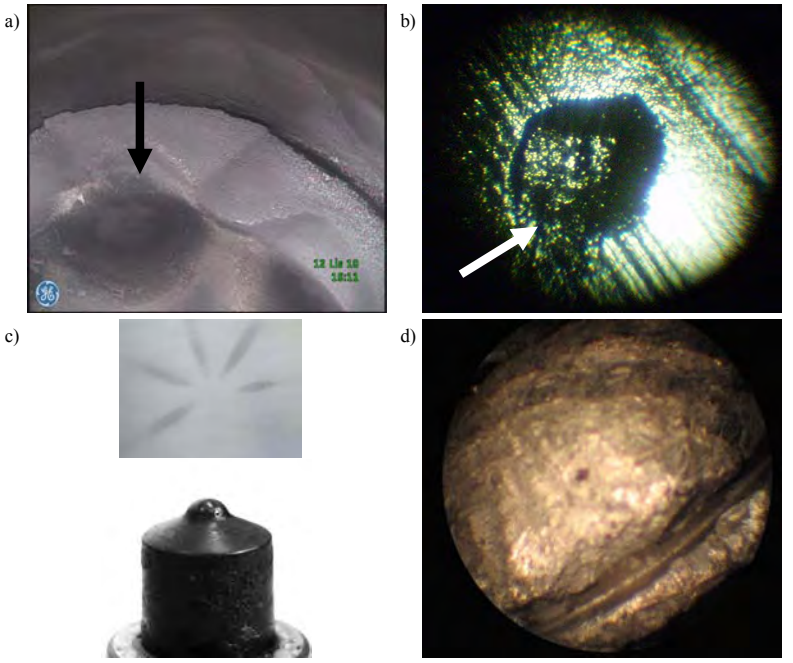
* *Dodatkową konsekwencją detonacyjnego spalania paliwa w cylindrach silnika jest często złamanie półek pierścieniowych (najczęściej miedzy I i II pierścieniem uszczelniającym, a także uszkodzenia mechaniczne w układzie korbowym.*

nie cieplnym, co oznacza, że układ chłodzenia powinien „nadążać" z odbiorem strumienia ciepła od zespołu tłok – pierścienie – tuleja cylindrowa (TPC).

Jednak w wyniku, na przykład nadmiernych osadów węglanów wapnia ($CaCO_3$) i magnezu ($MgCO_3$), tzw. kamienia kotłowego, powstających w przestrzeniach chłodzących silnika w wyniku termicznego rozkładu wodorowęglanów wapnia i magnezu zawartych w wodzie, może dojść do całkowitej lub miejscowej utraty drożności układu chłodzenia. Nie bez znaczenia pozostaje wpływ nadmiernych drgań przenoszonych na konstrukcje silnika od śruby napędowej okrętu. Mogą one intensyfikować proces odrywania się warstw kamienia kotłowego z powierzchni wewnętrznych kanałów chłodzących, które dławią przepływ czynnika chłodzącego. Rozległy charakter uszkodzeń tłoków, zwłaszcza znaczne ubytki (poprzez dyfuzję wysokotemperaturową) materiału korony tłoka świadczą o długotrwałym oddziaływaniu wysokich temperatur. Istotna jest również lokalizacja największych uszkodzeń tłoka, które w takim przypadku występują na kierunku oddziaływania siły normalnej, czyli w naturalnym kierunku odprowadzenia strumienia ciepła od tłoka. Rozległe uszkodzenia w tym rejonie tłoka świadczą o utracie możliwości efektywnego odprowadzenia ciepła poprzez pierwszy pierścień uszczelniający do tulei cylindrowej. W przypadku chwilowego przeciążenia silnika momentem obrotowym, występuje inny obraz zużycia – w tym przypadku korona tłoka, przy poprawnie działającym wtryskiwaczu, rozszerza się równomiernie i obszar zużycia na powierzchni tłoka jest również równomierny na jego obwodzie, a całe zjawisko zużycia adhezyjnego zachodzi przy znacznie niższej temperaturze. Widoczne są wówczas wyraźne bruzdy i nawalcowania, zarówno na tłoku, jak i tulei cylindrowej. Natomiast przy nieprawidłowo działających wtryskiwaczach, np. w wyniku utraty szczelności rozpylacza i utraty drożności jego otworów rozpylających (rys. 8c), niecałkowite spalanie paliwa w cylindrach silnika skutkuje zwiększeniem intensywności powstających osadów nagaru zmywanych z gładzi cylindrowej olejem smarowym.

Jednak część nagaru gromadząca się w rowkach pierścieniowych tworzy szczelną, trudno usuwalną warstwę osadu, w której stopniowo unieruchamiają się pierścienie tłokowe. Tracą one zdolność sprężystego przylegania do gładzi cylindrowej, w konsekwencji następuje utrata szczelności komory spalania i przedmuch gorących spalin wzdłuż gładzi cylindrowej do skrzyni korbowej, co skutkuje spalaniem filmu olejowego i całkowitym unieruchomieniem pierścieni tłokowych (rys. 9). W takiej sytuacji dochodzi bardzo szybko do rozległych zatarć w części prowadzącej tłoka. Inną przyczyną unieruchomienia pierścieni tłokowych jest przedostanie się do rowków pierścieniowych opiłków metalicznych stanowiących produkt zużycia adhezyjnego tłoka i gładzi cylindrowej, którego pierwotne przyczyny opisano w punkcie 2 niniejszego opracowania.

Często spotykanym uszkodzeniem denka tłoka jest bezpośrednie uderzenie o jego powierzchnię grzybków zaworowych, końcówki wtryskiwacza oraz urwanych części konstrukcyjnych umieszczonych w dolej płycie głowicy cylindrowej. Z reguły takie uszkodzenia tłoków cylindrowych nie eliminują ich z dalszej eksploatacji, pod warunkiem, że ich charakter i rozmiary mieszczą się w granicach tolerancji eksploatacyjnych wyznaczonych przez konstruktorów silnika. Obecność płytkich wgnieceń na powierzchni korony denka tłoka, o rozmiarach i kształcie grzybków zaworowych (rys.10a.b), świadczy o uderzeniach tłoka o zawory, w wyniku wykasowania luzu między otwartymi zaworami a denkiem tłoka,



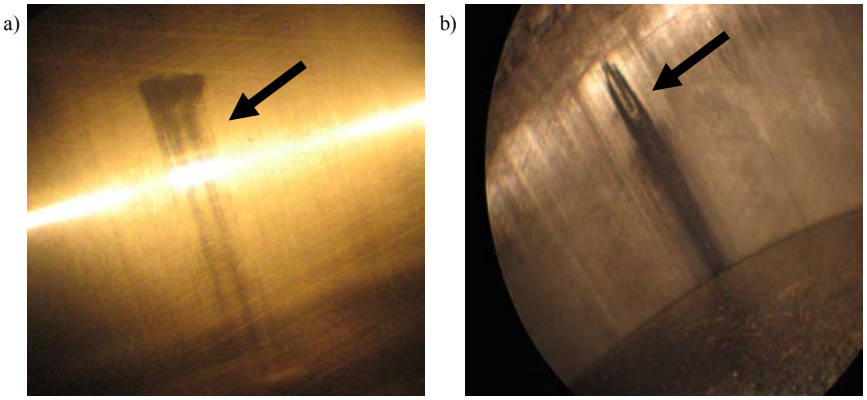
Rys. 8. Endoskopowy obraz uszkodzeń denka tłoka spowodowanych skoksowanym paliwem w otworach rozpylacza, a) denko tłoka – ślady dopalania paliwa, b) denko tłoka – wytopiony otwór, c) końcówka rozpylacza – nagar w rejonie otworów rozpylających oraz obraz rozpylania paliwa na bibule stanowiska kontrolnego, d) stopiony tłok z widoczną pozostałością rowka pierścieniowego

znajdującego się w GMP po suwie wylotu. Pierwotną przyczyną takich uderzeń może być rozregulowanie faz rozrządu lub zawisanie trzonka zaworowego w prowadnicy*, ale również nadmierne luzy w układzie korbowym np. w wyniku zużycia piasty sworznia tłokowego**, panewek łożyskowych etc. Wtórną konsekwencją takich uderzeń jest przeniesienie obciążeń udarowych na pozostałe elementy układu rozrządu zaworowego: krzywki, popychacze, dźwignie zaworowe etc, które również mogą ulec rozległym uszkodzeniom.

W niektórych rozwiązaniach tłoków wykonywane są celowo podtoczenia o kształcie grzybków zaworowych na koronach denek tłoków, jednak są one znacznie głębsze i mają za zadanie wyeliminowanie możliwości powstawania mechanicznych uszkodzeń trzonków zaworowych (i ich wtórnych konsekwencji w postaci rozległych uszkodzeń układów cylindrowych) w przypadku rozregulowania rozrządu zaworowego. Jednak ma to sens tylko wówczas, gdy głębokość podtoczenia jest większa od skoku zaworowego.

* *Podstawy teoretyczne zjawiska obszernie opisano w monografii Autora pt.: „Endoskopia silników okrętowych" AMW Gdynia 2008.*

** *Dotyczy to zakłóceń pracy sworznia pływającego (obracającego się zarówno w łbie korbowodu jak i w piaście) polegające na jego zakleszczeniu w łbie korbowodu, co prowadzi do nadmiernego zużycia piasty.*

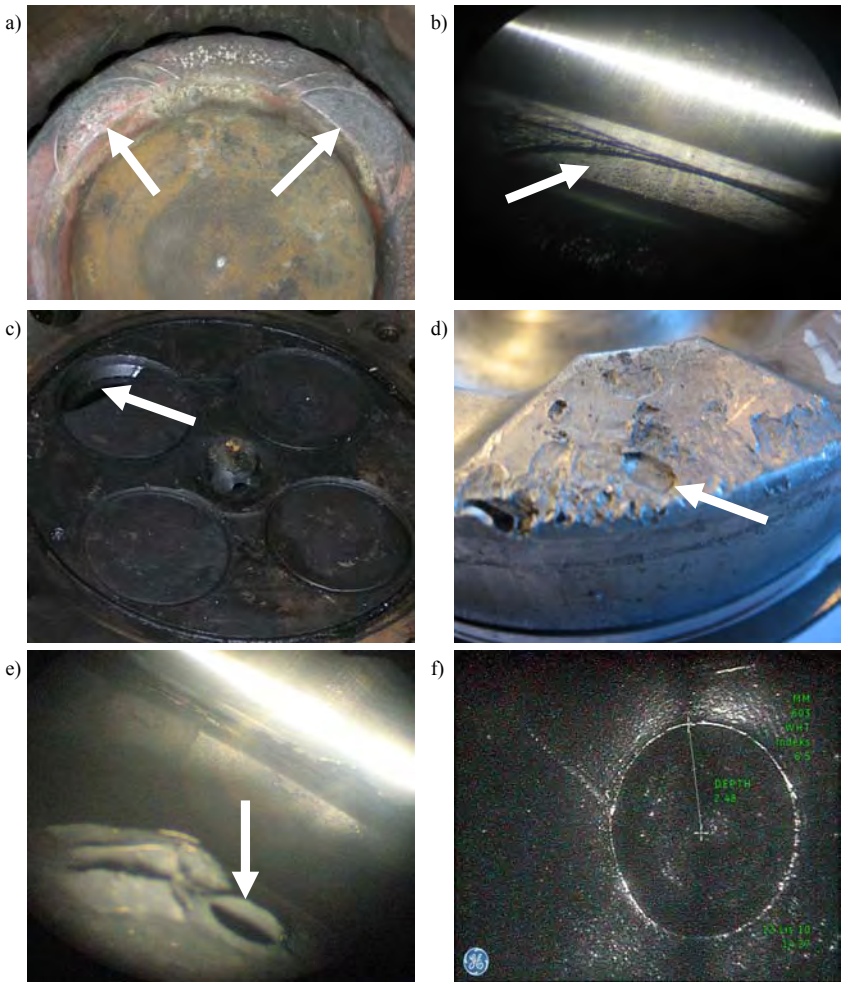


Rys. 9. Endoskopowy obraz unieruchomienia pierścieni tłokowych w rowkach oraz przedmuchu spalin do skrzyni korbowej przez nieszczelne pierścienie tłokowe, a) gładź tulei cylindrowej – ślady zakleszczania pierścienia tłokowego w tulei cylindrowej, b) gładź tulei cylindrowej – ślady przedmuchu spalin do skrzyni korbowej

Stosunkowo często spotykanym uszkodzeniem tłoka są jego deformacje mechaniczne spowodowane wpadnięciem do komory spalania części zaworu (najczęściej wylotowego) np. wyłamanego grzybka zaworowego (rys. 10c.d). W czasie pracy zaworu wylotowego przesuwa się on na trzonku w prowadnicy, która ulega nieodwracalnemu zużyciu ściernemu [4, 7]. Proces ten przebiega w warunkach wysokich temperatur trzonka, którego dodatkowym zadaniem jest odprowadzenie ciepła z grzybka zaworowego. W rezultacie dochodzi do nadmiernego zwiększenia luzu promieniowego między prowadnicą a trzonkiem zaworu, które w każdym przypadku prowadzi do niepożądanego przekoszenia zaworu, zwłaszcza, że obciążony jest on składową poprzeczną od nacisku dźwigni lub krzywki rozrządu, a w następstwie przekoszenia – do utraty szczelności cylindra (spadku ciśnienia sprężania), erupcji gazów, przepływów zwrotnych, wycieków oleju smarowego z pary precyzyjnej trzonek-prowadnica, aż do intensywnego zużywania się całego węzła zaworowego. Zjawisko to może przebiegać szczególnie intensywnie w przypadku zasilania silnika olejem opałowym o znacznej zawartości siarki. Znane są przypadki całkowitego wypalenia zaworu, jako wtórnej konsekwencji znacznego zużycia prowadnicy zaworowej [8, 10, 11]. W skrajnym wypadku może również dojść do pęknięcia trzonka zaworowego, jego wpadnięcia do przestrzeni cylindrowej i uszkodzeń wtórnych układu TPC, włącznie z pęknięciem tłoka. Obserwowalnym symptomem zużytych prowadnic zaworowych są często okopcone sprężyny zaworowe, co świadczy o utracie szczelności komory spalania.

Obecność punktowego wgniecenia na denku tłoka, umiejscowionego w osi wtryskiwacza (rys. 10 e, f) świadczy o uderzeniach mechanicznych tłoka o końcówkę wtryskiwacza w wyniku np. wydłużonego skoku tłoka (odległość pomiędzy denkiem tłoka i końcówką wtryskiwacza w GMP wynosi dla niektórych silników szybkoobrotowych nie więcej niż 3-4 mm). Może to być konsekwencją nadmiernych luzów w układzie korbowym lub intensywnego zużywania się panewek łożyskowych. Inną prawdopodobną przyczyną powstawania tego typu wgnieceń jest nadmierne obniżenie położenia wtryskiwacza osadzonego w gnieździe

głowicy spowodowane niewłaściwie dobraną podkładką pod wtryskiwacz. W takiej sytuacji należy wyjaśnić pierwotne przyczyny obecności wgnieceń, a niezależnie wymienić wtryskiwacz, gdyż dalsza eksploatacja w takim stanie może doprowadzić do pęknięcia, a nawet wyłamania końcówki wtryskiwacza. Skutkuje to zazwyczaj intensywnym wyciekiem paliwa do przestrzeni cylindrowych, rozcieńczeniem oleju smarowego paliwem, aż do powstania rozległych uszkodzeń wtórnych w układzie cylindrowym, zagrażających awarią silnika.



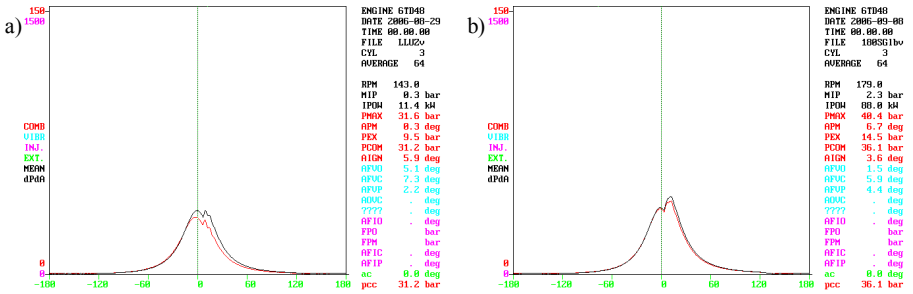
Rys. 10. Endoskopowy obraz uszkodzeń denka tłoka spowodowanych uderzeniami mechanicznymi (bezpośredni kontakt mechaniczny), a) denko tłoka – ślady uderzeń tłoka o zawory (stan po uderzeniu hydraulicznym), b) denko tłoka – ślady uderzeń tłoka o zawór (zawisanie zaworu w prowadnicy), c) dolna płyta głowicy – wyłamany fragment grzybka zaworowego, d) korona denka tłoka – ślady uderzeń wyłamanego fragmentu grzybka zaworowego, e) denko tłoka – wgniecenie po uderzeniu tłoka o końcówkę wtryskiwacza, f) denko tłoka – pomiar głębokości wgniecenia po uderzeniu tłoka o końcówkę wtryskiwacza metodą „Cienia" (2,48 mm)

Wyjątkowo rzadko spotykaną postacią uszkodzenia tłoka silnika okrętowego jest zużycie tribologiczne łożyska sworznia tłokowego (rys. 11). Jest ono najczęściej konsekwencją niezachowania prawidłowych luzów montażowych lub zakłóceń procesu smarowania współpracujących powierzchni trących (w wyniku utraty właściwości smarujących nadmiernie zanieczyszczonego lub rozcieńczonego paliwem oleju smarowego, bądź niedrożności wewnętrznych kanałów oleju smarowego).

Rys. 11. Endoskopowy obraz uszkodzeń tulei sworznia tłokowego silnika Sulzer 6TD48, a) łożysko sworznia tłokowego – przed demontażem tulei, b) łożysko sworznia tłokowego – tuleja sworznia osadzona w łożysku, c) tuleja sworznia tłokowego – ślady zużycia warstwy wierzchniej dolnej części tulei, d) tuleja sworznia tłokowego – ślady zużycia ściernego warstwy wierzchniej dolnej części tulei, e) gładź tulei cylindrowej – ślady zużycia ściernego warstwy wierzchniej, f) gładź tulei cylindrowej – opiłki brązu wtarte w bruzdy honownicze

Dochodzi do chwilowego zakleszczania się sworznia obracającego się w tulei łożyskowej, czego obserwowalnym symptomem diagnostycznym jest zwiększona obecność zanieczyszczeń metalicznych (na osnowie miedzi) w oleju smarowym silnika. Produkty zużycia ściernego tulei sworznia tłokowego można również łatwo wykryć na drodze badań endoskopowych przestrzeni wewnątrzcylindrowych silnika. Mając złociste zabarwienie są dobrze widoczne na srebrzystej gładzi tulei cylindrowej, jako nawalcowane (wtarte) wypełnienia bruzd po honowaniu tulei (rys. 11f).

Zdecydowanie trudniej identyfikuje się tego typu uszkodzenie łożyska sworznia tłokowego na podstawie indykowania cylindrów. Praktycznie tylko w przypadku bardzo intensywnego rozwoju zużycia ściernego i znacznych ubytków materiału warstwy wierzchniej tulei łożyska, następuje na tyle duże zwiększenie objętości komory spalania, że ma to swoje odzwierciedlenie w rozwarstwieniu linii sprężania na rozwiniętym wykresie indykatorowym (rys. 12a).



Rys. 12. Rozwinięty wykres indykatorowy układu cylindrowego numer 3 silnika Sulzer 6TD48, a) w stanie uszkodzenia łożyska sworznia tłokowego, b) w stanie po przeprowadzonej wymianie tulei sworznia tłokowego

Zarejestrowany przebieg zmian ciśnienia w cylindrze jest gazodynamiczną konsekwencją zmian struktury uszkodzonego łożyska sworznia tłokowego silnika Sulzer 6TD48, przedstawionych na rysunku 11. W wyniku dokonanych pomiarów warsztatowych ustalono, że w wyniku zwiększonego luzu promieniowego sworznia tłokowego w tulei nastąpiło blisko dwukrotne zwiększenie wysokości komory spalania – z 6-7 mm (zgodnie z warunkami technologicznymi) do wysokości 11 mm [11]. Analizując charakter zaistniałych deformacji rozwiniętego wykresu indykatorowego oraz ilościowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych można wnioskować, że wzrost objętości komory spalania układu cylindrowego nr 3 spowodował spadek ciśnienia sprężania w tym układzie oraz wzrost jego rozrzutu, w stosunku do wartości uśrednionej dla silnika, do wartości 10,8 % (po przeprowadzonej naprawie zarejestrowano wartość 1,9% – rys.12b). Natomiast rozrzut obciążeń (oceniany według zmian średniego ciśnienia indykowanego) spowodowany wadliwą pracą uszkodzonego układu cylindrowego wynosił około 78% dla minimalnego zakresu pracy silnika*. Są to wartości znacznie zawyżone, świadczące o silnym niezrównoważeniu sił gazowych w cylindrach, działających z jednej strony na układ korbowy (poprzez tłok), z drugiej zaś – na

* *W wyniku zwiększonej ilości zanieczyszczeń metalicznych w oleju smarowym ograniczono możliwość maksymalnego obciążania silnika.*

głowicę i blok cylindrowy (poprzez tuleję cylindrową i głowicę). Niezrównoważone siły gazowe potęgują destrukcyjne oddziaływanie na konstrukcję silnika niezrównoważonych sił bezwładności pochodzących od mas wykonujących ruch obrotowy i ruch posuwisto-zwrotny. Kontynuowanie użytkowania silnika w takim stanie technicznym zagraża jego niezawodności i trwałości. Znaczny rozrzut obciążeń między układami cylindrowymi skutkuje wzrostem amplitudy drgań skrętnych linii napędowej, co może doprowadzić do zmęczenia materiału, aż do inicjacji pęknięć zmęczeniowych elementów zespołu napędowego transmitujących moment obrotowych do śruby okrętowej. Po przeprowadzonej naprawie silnika zarejestrowano spadek rozrzutu obciążenia poszczególnych cylindrów do wartości 17%, dla porównywalnego zakresu pracy silnika (jest to wartość dopuszczalna dla minimalnego obciążenia silnika), bez konieczności przeprowadzenia regulacji dawkowania paliwa.

Warto w tym miejscu zauważyć, że identyczny obraz uszkodzeń na wykresie indykatorowym pozostawia praca układu cylindrowego z wygiętym korbowodem, ewentualnie uszkodzonym (zużytym) łożyskiem korbowodowym. Przyczyną tak zdeformowanego wykresu indykatorowego może być również zakłócony pomiar ciśnienia w cylindrze w wyniku częściowej utraty drożności kanału (zaworu) indykatorowego lub utrata szczelności układu cylindrowego* [10, 11].

Dodatkowy, bardzo istotny wniosek, który wypływa z analizy wykresu indykatorowego, to możliwość popełnienia błędu podczas wnioskowania diagnostycznego i przeprowadzenia zbędnej regulacji silnika w przypadku braku możliwości wyznaczenia maksymalnego ciśnienia sprężania. W takiej sytuacji diagnosta oceniający zaistniałe zmiany przebiegu ciśnienia w cylindrze mógłby zalecić zwiększenie dawki paliwa lub kąta wyprzedzenia wtrysku na niedociążonym 3 układzie cylindrowym, ze wszystkimi negatywnymi skutkami takiej decyzji dla silnika (możliwość przeciążenia cieplnego elementów układu tłokowo-cylindrowego wywołanego gradientami temperatury).

3. Uwagi końcowe i wnioski

Wykrywanie wad materiałowych powierzchni elementów ograniczających przestrzenie robocze tłokowego silnika spalinowego z zastosowaniem endoskopów jest jedną z najmłodszych metod diagnostyki technicznej. Na podstawie charakteru i rozmiarów zidentyfikowanych uszkodzeń możliwa jest ocena stanu technicznego nie tylko bezpośrednio dostępnych elementów konstrukcyjnych przestrzeni roboczych silnika, ale również, w sposób pośredni, ocena stanu technicznego tych elementów konstrukcyjnych silnika, które nie są bezpośrednio dostępne, a które z przestrzeniami roboczymi współpracują [10, 11, 12]. Przykładowo, na podstawie badania endoskopowego gładzi cylindrowej i charakteru wykrytych na niej defektów powierzchniowych można w sposób pośredni sformułować diagnozę o stanie technicznym części pierścieniowej czy prowadzącej tłoka, chociaż nie istnieje możliwość dokonania bezpośredniej endoskopowej oceny stanu technicznego tych rejonów tłoka [4, 5, 9].

* *W tym przypadku należało wykluczyć taką możliwość, gdyż silnik Sulzer 6TD48 jest silnikiem dwusuwowym, ze szczelinowo-szczelinowym układem wymiany ładunku (brak zaworów cylindrowych).*

W ramach charakterystyki identyfikowanych endoskopowo uszkodzeń układu tłokowo-korbowego najwięcej miejsca poświęcono tłokom układów cylindrowych, jako najbardziej newralgicznych podzespołów konstrukcyjnych silnika okrętowego, i nie tylko. Wyjaśniając najbardziej prawdopodobne przyczyny powstawania uszkodzeń tłokowych, wykorzystano wyniki badań własnych Autora oraz dostępne wyniki badań silników o zapłonie samoczynnym stosowanych w transporcie samochodowym i kolejowym.

Literatura

1. Breen J., Stellingwerff M.: Application of optical and digital endoscopy. Proceedings 2nd EAEA-Conference, Vienna 1995.
2. Hlebowicz J.: Endoskopia przemysłowa. Biuro Gamma. Warszawa 2000.
3. Kondratiev N.N.: Otkazy i defekty sudowych dizelej, Izdatielstwo „Transport", Moskva 1985 r.
4. Korczewski Z.: Endoskopia silników okrętowych. AMW, Gdynia 2008.
5. Korczewski Z.: Failures' identification of cylinder liners of marine diesel engines in operation. Journal of Polish CIMAC, Diagnosis, Reliability and Safety, Vol. 2, No.2/ 2007, s. 89-101.
6. Mitianiec W., Adam Jaroszewski.: Modele matematyczne procesów fizycznych w silnikach spalinowych małej mocy. Wydawnictwo im. Ossolińskich Wrocław 1993.
7. Niewczas A.: Podstawy stochastycznego modelu zużywania poprzez tarcie w zagadnieniach trwałości elementów maszyn. Zeszyty Naukowe, Mechanika nr 19, WSI Radom 1989 r.
8. Piaseczny L.: Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992 r.
9. Sitnik L.: Kinetyka zużycia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998r.
10. Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio – i szybkoobrotowe. WNT Warszawa 2005 r.
11. Dokumentacja techniczna i eksploatacyjna okrętowych tłokowych silników spalinowych Zwiedza typu M401A-1(2), M503, M520, Detroit Diesel typu 16V149TI, Sulzer 6TD48.
12. XL PRO videoprobe measurement system. Oferta EVEREST VIT.

FAILURES' IDENTIFICATION OF PISTONS OF MARINE DIESEL ENGINES BY MEANS OF ENDOSCOPIC METHODS IN OPERATION

Summary. The paper deals with diagnostic issues concerning endoscopic examinations of working spaces within marine diesel engines. The considerations have been focused on theoretical bases of normal wear and tear process of pistons in the aspect of identification, localization and genesis of the well known and recognizable operational unserviceable states. There have been also demonstrated results of endoscopic exams concerning the pistons' failures which appeared the most often in current operation of the selected types of marine diesel engines.

Key words: technical diagnostics, endoscopic investigation, marine diesel engine, pistons' failures

Norbert Radek, Bogdan Antoszewski*

BADANIA EKSPLOATACYJNE POWŁOK WĘGLIKOWO-CERAMICZNYCH PRZED I PO OBRÓBCE LASEROWEJ

Streszczenie: W pracy badano wpływ obróbki laserowej na właściwości powłok nanoszonych elektroiskrowo. Ocenę właściwości powłok po obróbce laserowej przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, pomiarach twardości i chropowatości oraz badań tribologicznych. Badania przeprowadzono wykorzystując elektrody WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2, które zostały wytworzone poprzez spiekanie nanostrukturalnych proszków, a następnie przetapiane wiązką laserową. Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenie EIL-8A. Obróbkę laserową nałożonych powłok elektroiskrowych wykonano laserem Nd:YAG. Obrobione laserowo powłoki elektroiskrowe WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 charakteryzują się mniejszą twardością i współczynnikiem tarcia oraz większą chropowatością. Ponadto obróbka laserowa spowodowała likwidację porów i mikropęknięć powłok naniesionych obróbką elektroiskrową. Powłoki tego typu mogą być stosowane w ślizgowych węzłach tarcia oraz jako powłoki ochronne.

Słowa kluczowe: obróbka elektroiskrowa, obróbka laserowa, powłoka

Wstęp

Jedną z tanich i dobrze znanych metod nanoszenia powłok jest obróbka elektroiskrowa, która podobnie jak obróbka laserowa wykorzystuje skoncentrowany strumień energii [6].

Obróbka elektroiskrowa powstała w latach czterdziestych w ZSRR, prawie równocześnie z ubytkową obróbką elektroerozyjną. Zaczęto ją intensywnie rozwijać w latach sześćdziesiątych, a w latach siedemdziesiątych dość powszechnie używać do nanoszenia trudno topliwych materiałów na metale i ich stopy, głównie na stale. W Polsce zaczęto interesować się nanoszeniem powłok elektroiskrowych na początku lat osiemdziesiątych. Współcześnie stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej spełniające zadania wytwarzania powłok, a także kształtowania mikrogeometrii powierzchni [2, 3, 7, 8].

Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę – pozostają białe. Warstwa wierzchnia kształtowana jest w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroiskrowej są następujące [5]:

- ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej wynosi $(2\div7)\cdot10^3$ GPa,
- temperatura osiąga wartości rzędu $(5\div40)\cdot10^3$ °C.

Współczesne zastosowania przemysłowe obróbki elektroiskrowej obejmują następujące dziedziny: przemysł motoryzacyjny, przemysł kosmiczny, przemysł lotniczy, przemysł

* *Centrum Laserowych Technologii Metali, Politechnika Świętokrzyska, norrad@tu.kielce.pl, ktrba@tu.kielce.pl*

okrętowy, przemysł zbrojeniowy, przemysł energetyczny, mechanika precyzyjna, produkcja narzędzi oraz medycyna.

Powłoki elektroiskrowe posiadają pewne niedostatki, co z kolei istotnie obniża ich właściwości użytkowe. Głównie podnoszonymi wadami tej technologii są stosunkowe duże chropowatości oraz silny stan naprężeń rozciągających powłok nałożonych elektroiskrowo [1, 4]. Obecnie te dwa niepożądane efekty ukształtowanej powłoki ogranicza się obróbką mechaniczną np. poprzez nagniatanie diamentowymi kulkami, rolowanie. Chropowatość powierzchni powłoki może być kilkanaście razy większa od chropowatości materiału podłoża [4]. Alternatywną metodą, którą można eliminować wady powłok elektroiskrowych jest ich obróbka laserowa [9÷13].

W wyniku proponowanej obróbki laserowej może nastąpić uszczelnienie powłoki oraz likwidacja jej defektów powierzchniowych np. rys, rozwarstwień, mikropęknięć.

1. Materiały i parametry obróbki

Przedmiotem badań były powłoki nakładane elektrodą WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 (85% WC, 10% Co oraz 5% $Al_2O_3$3TiO_2) o przekroju 3 x 4 mm (anoda) metodą elektroiskrową na próbki wykonane ze stali C45 (katoda). Skład chemiczny stali C45 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stali C45

Pierwiastki	C	Mn	Si	P	S
Zawartość %	0,42÷0,50	0,50÷0,80	0,10÷0,40	0,04	0,04

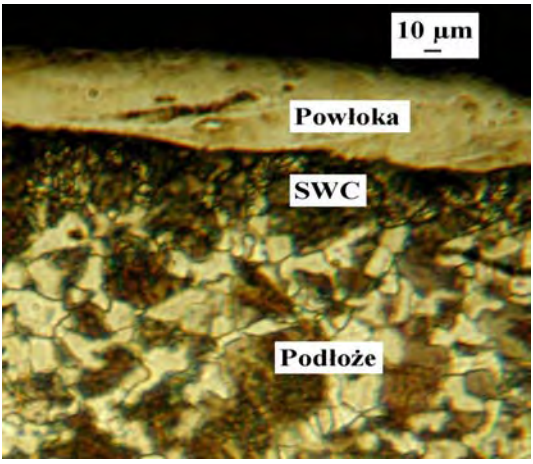
Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenie (o ręcznym przesuwie elektrody) produkcji ukraińskiej, model EIL-8A. Opierając się na doświadczeniach własnych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych: napięcie U = 230 V, pojemność kondensatorów C = 300 μF, natężenie prądu I = 2,4 A.

Obróbkę laserową przeprowadzono laserem Nd:YAG (impulsowy tryb pracy), model BLS 720. Próbki z powłokami elektroiskrowymi naświetlano laserowo przy następujących parametrach obróbki: średnica plamki laserowej d = 0,7 mm; moc lasera P = 20 W; prędkość przemieszczania wiązki v = 250 mm/min; odległość dysza-przedmiot obrabiany Δf = 1 mm; czas trwania impulsu t_i = 0,4 ms; częstotliwość powtarzania f = 50 Hz; skok przesuwu wiązki S = 0,4 mm.

2. Wyniki badań

2.1. Analiza morfologii powłok

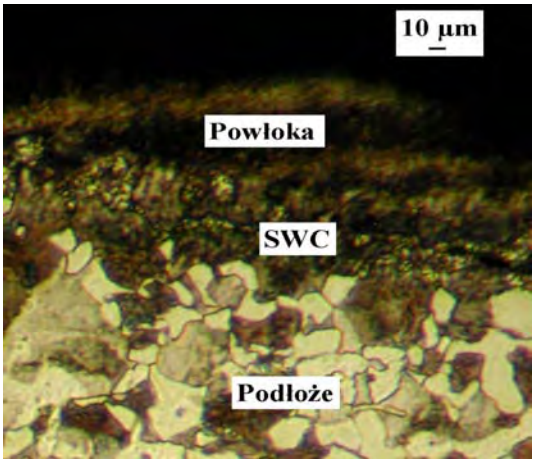
Analizie mikrostruktury poddano powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 przed i po obróbce laserowej. Do badań mikrostruktury wykorzystano mikroskop optyczny NEOPHOT 2.



Rys. 1. Mikrostruktura powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2

Na przykładowej fotografii (rys. 1) przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 naniesionej obróbką elektroiskrową. W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że grubość uzyskanych warstw wyniosła od 55÷60 µm, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża ok. 30÷40 µm. Na przedstawionej fotografii mikrostruktury widoczna jest wyraźna granica pomiędzy powłoką, a podłożem. Można zaobserwować niekorzystne zjawiska w postaci porów i mikropęknięć powłoki.

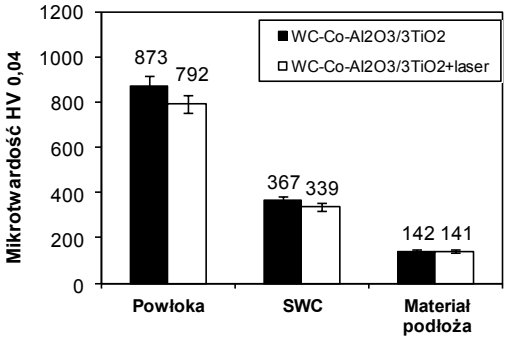
W wyniku modyfikacji wiązką laserową powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 nastąpiło ujednorodnienie składu chemicznego powłoki [9]. Powłoka w wyniku przetapiania laserowego została pozbawiona mikropęknięć i porów (rys. 2). Grubość powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po modyfikacji laserowej uległa zmianie i mieściła się w zakresie 80÷100 µm. Zasięg SWC wyniósł w głąb materiału podłoża ok. 45÷60 µm.



Rys. 2. Mikrostruktura powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po obróbce laserowej

2.2. Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa, stosując obciążenie 0,4 N. Odciski penetratorem wykonano na zgładach prostopadłych w trzech strefach: w powłoce, strefie wpływu ciepła (SWC) oraz materiale rodzimym. Wyniki pomiarów mikrotwardości dla powłok elektroiskrowych WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 przed i po obróbce laserowej przedstawiono na wykresie (rys. 3).



Rys. 3. Wyniki pomiarów mikrotwardości

Zastosowanie obróbki elektroiskrowej spowodowało zmiany mikrotwardości w obrabianym materiale. Mikrotwardość materiału podłoża po obróbce elektroiskrowej wynosiła średnio około 141 $HV_{0,04}$ (taka samą wartość mikrotwardości miał materiał w stanie wyjściowym). Powłoka WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 posiadała średnią mikrotwardość 873 $HV_{0,04}$ (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 515 % w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża). Mikrotwardość SWC po obróbce elektroiskrowej wzrosła o 161 % w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża.

Zastosowanie obróbki laserowej obniżyło nieznacznie mikrotwardość powłok elektroiskrowych. Naświetlanie laserowe spowodowało spadek mikrotwardości powłok WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 o 10 % w odniesieniu do tych powłok bez naświetlania laserowego. Nieznaczny spadek mikrotwardości badanych powłok (po obróbce laserowej) może mieć wpływ na poprawę ich właściwości plastycznych, co ma istotne znaczenie podczas pracy przy dużych obciążeniach np. narzędzi wiertniczych w przemyśle wydobywczym, elementów pras stosowanych w ceramice budowlanej.

2.3. Pomiary chropowatości

Pomiary chropowatości przeprowadzono w Laboratorium Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej za pomocą przyrządu topo L120 przy wykorzystaniu programu PROFILOMETR.

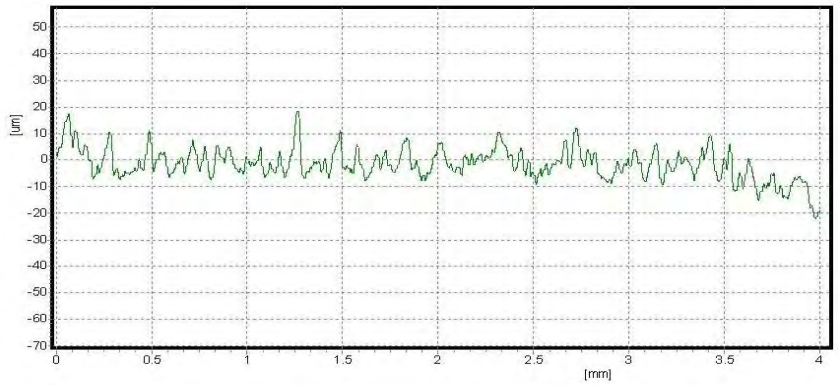
Pomiary chropowatości powłok WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 wykonano w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Pierwszy pomiar był wykonany zgodnie z ruchem przemieszczania się

elektrody, natomiast drugi pomiar był prostopadły do ściegów skanujących. Z dwóch pomiarów obliczono wartość średnią parametru Ra dla danej powłoki.

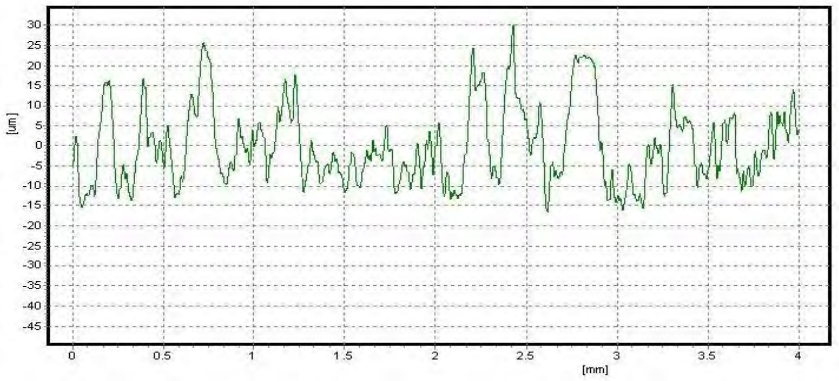
Pomiary powłok WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 obrobionych laserem wykonano w kierunku prostopadłym i równoległym do osi ścieżek wykonanych wiązką laserową, a następnie obliczono wartość średnią chropowatości dla danej powłoki. W większości prac podawane są wyniki pomiarów chropowatości dla profili mierzonych wzdłuż osi ścieżek otrzymanych laserem, co nie odzwierciedla rzeczywistego obrazu mikrogeometrii powierzchni po tej obróbce. Maksymalne wysokości chropowatości występują bowiem w kierunku prostopadłym do osi ścieżek.

Powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 posiadały chropowatość Ra = 4,18÷4,58 μm, natomiast po obróbce laserowej chropowatość wynosiła od 9,65÷11,79 μm. Próbki ze stali C45, na które nanoszono powłoki miały chropowatość Ra = 0,40÷0,45 μm.

Przykładowe protokoły pomiarów parametrów mikrogeometrii badanych próbek przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii dla powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2



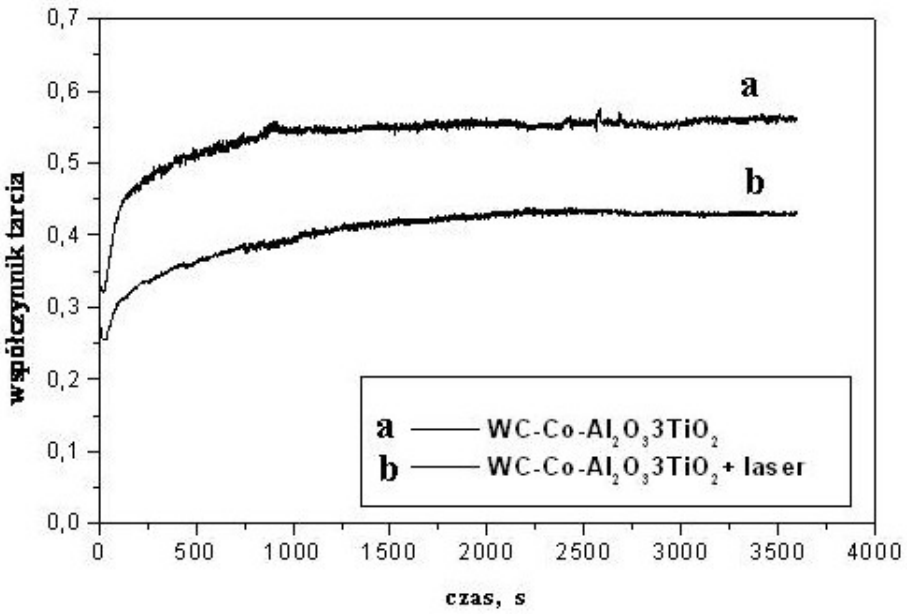
Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii dla powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po obróbce laserowej

2.4. Badania tribologiczne

Badania oporów tarcia (tarcie technicznie suche) przeprowadzono na testerze tribologicznym T-01M typu trzpień-tarcza. Jako próbki stosowano pierścienie ze stali niestopowej specjalnej C45, na które naniesiono elektroiskrowo powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 (przed i po obróbce laserowej). Przeciwpróbką była kulka o średnicy φ6,3 mm wykonana ze stali 100Cr6.

Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach tarcia:

- prędkość liniowa v = 0,8 m/s,
- czas próby t = 3600 s,
- zakres zmian obciążenia Q = 4,9; 9,8; 14,7 N.



Rys. 6. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji czasu: a) powłoka WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2, b) powłoka WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po obróbce laserowej

Wyniki badań przedstawiono na wykresie (rys. 6), który ilustruje przebiegi współczynnika tarcia w funkcji czasu próby przy obciążeniu 14,7 N.

Na przebiegu (rys. 6a) dotyczącym powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 można zaobserwować, że stabilizacja współczynnika tarcia następuje po upływie około 1000 sekund, a wartość jego oscyluje na poziomie 0,55÷0,57. W przypadku powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po modyfikacji laserowej (rys. 6b) stabilizacja współczynnika tarcia następuje po upływie 2000 sekund, a wartość jego oscyluje na poziomie 0,43÷0,44. Średni współczynnik tarcia powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 jest około 23 % większy od współczynnika tarcia powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po naświetlaniu laserowym (w momencie ich stabilizacji). Główną przyczyną tego efektu jest likwidacja wad powłoki (mikropęknięć oraz porów) po obróbce laserowej.

3. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań można sformułować następujące wnioski:

1. W wyniku laserowego przetopienia powłok elektroiskrowych i następującego po nim krzepnięcia otrzymujemy likwidację mikropęknięć i porów w powłoce.
2. Chropowatość powłok elektroiskrowych po obróbce laserowej jest większa dwukrotnie w stosunku do chropowatości powłok bez tej obróbki. Jest to zjawisko niekorzystne pod względem jakości i przydatności w określonych warunkach eksploatacyjnych. Należy poszukiwać parametrów obróbki laserowej przy których nastąpi nadtopienie tylko wierzchołków mikronierówności powłoki (wygładzanie laserowe).
3. Podczas badań tribologicznych uzyskany średni współczynnik tarcia powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 jest około 23 % większy od współczynnika tarcia powłoki WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 po modyfikacji laserowej (w momencie ich stabilizacji).
4. W wyniku modyfikacji laserowej powłok elektroiskrowych nastąpiło obniżenie mikrotwardości powłok WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 o 10 % w odniesieniu do tych powłok bez obróbki laserowej.
5. W dalszym etapie badań za konieczne wydaje się wykonanie pomiarów naprężeń własnych oraz badań analizy fazowej powłok elektroiskrowych przed i po obróbce laserowej.

Literatura

1. Burakowski T., Chałko L.: Badania wpływu parametrów nanoszenia elektroiskrowego na wybrane właściwości powłok W-Co na stali SW7M. Inżynieria Materiałowa 5 (2002) 404-406.
2. Chen Z., Zhou Y.: Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization. Surface and Coatings Technology 201 (2006) 1503-1510.
3. Goto A., Moro T., Matsukawa K., Akiyoshi M., Saito N., Mohri N.: Development of electrical discharge coating method. Proceeding of International Symposium for Electro-Machining XIII, Bilbao 2001, 601-610.
4. Michajłjuk A. I.: Umienszienije szierochowatosti eliektroiskrowych pokrytij pri posliedujuszcziej obrabotkie grafitowym eliektrodom. Elektronnaja Obrabotka Materiałow 3 (2003) 21-27.
5. Miernikiewicz A.: Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM). Politechnika Krakowska, Rozprawy, 274, Kraków.
6. Oczoś K.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.
7. Praca zbiorowa pod redakcją Petrowa J.: Elektroiskrowoje legirowanie metallićieskich powierchnostoj. Kisziniew 1985.
8. Radek N.: Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition. Maintenance and Reliability 4 (2009) 10-16.

9. Radek N.: Laser treatment of electro-spark WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 coatings. Proc. Inter. Conf. Nekonvencne Technologie – NT'10, Strecno 2010, 1-7.
10. Radek N., Antoszewski B.: Influence of laser treatment on the properties of electro-spark deposited coatings. Kovove Materialy-Metallic Materials 1 (2009) 31-38.
11. Radek N., Bartkowiak K.: Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. Physics Procedia, 5 (2010) 417-423.
12. Radek N., Szalapko J.: Tribological properties of electro spark molybdenum coatings after laser treatment. Problems of Tribology 1 (2006) 76-81.
13. Radek N., Wajs E., Luchka M.: The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 47, No. 3-4 (2008) 197-201.

DETERMINING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF ELECTRO-SPARK DEPOSITED TUNGSTEN CARBIDE-CERAMIC COATINGS BEFORE AND AFTER LASER TREATMENT

Summary. The aim of the study was to determine the influence of the laser treatment process on the properties of electro-spark coatings. The properties of the coatings after laser treatment were assessed based on following methods: microstructure analysis, roughness measurement, hardness tests and tribological studies. The studies were conducted using WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2 electrodes produced by sintering nanostructural powders and molten with a laser beam. The coatings were deposited by means of the EIL-8A and they were laser treated with the Nd:YAG. The tests show that the laser-treated electro-spark deposited WC-Co-$Al_2O_3$3TiO_2coatings are characterized by lower hardness and friction coefficient, higher roughness. The laser treatment process causes the structure refinement and the healing of microcracks and pores of the electro-spark deposited coatings. Laser treated electro-spark deposited coatings are likely to be applied in sliding friction pairs and as protective coatings.

Key words: electro spark alloying, laser treatment, coating

Praca wykonana w ramach projektu badawczego N N503 150736.

Grzegorz Koszałka[*], Andrzej Niewczas[*], Hubert Dębski[*], Maciej Kaczor[**], Leszek Taratuta[**], Andrzej Krzyżak

UNIWERSALNA NACZEPA O ZMIENNEJ DŁUGOŚCI DO PRZEWOZU MASZYN

Streszczenie. W artykule przedstawiono założenia konstrukcyjne oraz zastosowane rozwiązania w nowoskonstruowanej naczepie do przewozu ładunków nienormatywnych, w szczególności maszyn samojezdnych. Podczas projektowania naczepy szczególny nacisk położono na jej uniwersalność. Naczepa może służyć do przewozu ładunków ponadgabarytowych dzięki możliwości jej wydłużenia oraz poszerzenia, natomiast cięższych od normatywnych – dzięki zastosowaniu 4 osi. Zaletą naczepy jest to, że w stanie złożonym spełnia wszystkie wymagania stawiane pojazdom normatywnym, a więc może poruszać się po drogach i przewozić ładunki normatywne bez specjalnych zezwoleń. W artykule zaprezentowano również przykłady wykorzystania analiz MES w procesie konstruowania naczepy.

Słowa kluczowe: transport samochodowy, ładunek nienormatywny, naczepa o zmiennej długości, obliczenia wytrzymałościowe, MES

Wstęp

Celem prezentowanego projektu realizowanego przez Wielton SA, największego polskiego producenta naczep i przyczep, we współpracy z Politechniką Lubelską było opracowanie nowej konstrukcji i przygotowanie produkcji niskopodwoziowej naczepy umożliwiającej przewóz ładunków ponadnormatywnych i ponadgabarytowych, w szczególności ciężkich maszyn budowlanych, rolniczych i wojskowych, konstrukcji stalowych, zbiorników i innych ładunków ponadgabarytowych.

Zakres prac obejmował pełny obszar prac projektowych, począwszy od badań marketingowych, poprzez przegląd istniejących na rynku rozwiązań i sformułowanie założeń funkcjonalnych i konstrukcyjnych oraz opracowanie konstrukcji, po zbudowanie prototypu i jego badania oraz przygotowanie dokumentacji technologicznej.

Niniejszy artykuł prezentuje krótki opis powyższych prac, koncentrując się głównie na zagadnieniach konstrukcyjnych, w tym wykorzystaniu metody elementów skończonych w procesie projektowania, oraz opisie opracowanej naczepy.

* *Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, g.koszalka@pollub.pl, a.niewczas@pollub.pl, h.debski@pollub.pl*

** *Wielton SA, m.kaczor@wielton.com.pl, l.taratuta@wielton.com.pl*

1. Proces projektowania

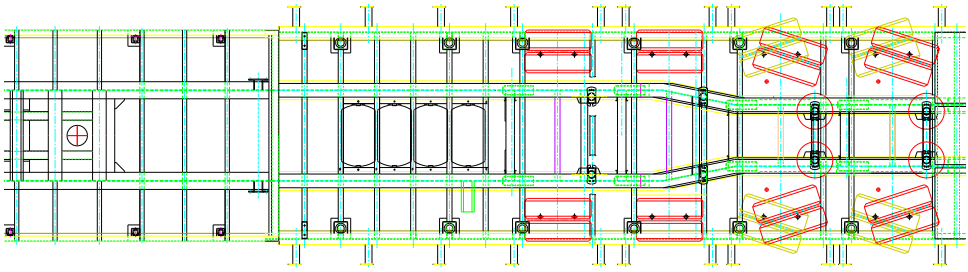
Na podstawie badań potrzeb i oczekiwań przyszłych użytkowników założono, że naczepa powinna charakteryzować się rozwiązaniami umożliwiającymi przewóz nienormatywnych ładunków, dzięki możliwości wydłużenia i poszerzenia pojazdu, oraz że w stanie „złożonym" naczepa powinna spełniać wszystkie wymagania stawiane pojazdom standardowym. Zastosowanie takiego rozwiązania poprawia funkcjonalność naczepy, stwarzając możliwość dostosowania długości i szerokości platformy ładunkowej do wymiarów przewożonego ładunku. Jeżeli wymiary ładunku tego nie wymagają lub ładunek nie jest przewożony, wymiary naczepy mogą zostać zmniejszone do wymiarów zgodnych z przepisami o ruchu drogowym. Ma to zasadnicze znaczenie dla użytkownika, gdyż nie musi on występować o administracyjną zgodę na przejazd naczepy i ponosić związanych z tym kosztów, jeżeli w danej chwili naczepą nie jest przewożony ładunek nienormatywny.

W pierwszej fazie prac zdecydowano, że powinna istnieć możliwość zwiększenia długości naczepy o 5 m, ponad standardową długość, oraz że podstawowa wersja naczepy wyposażona będzie w 4 osie jezdne, przy czym wersja z 3 osiami również będzie równolegle opracowywana, ponieważ część przyszłych użytkowników nie była zainteresowana zwiększoną ładownością naczepy.

W ramach prac badawczo-rozwojowych przeprowadzono analizę różnych rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych podzespołów i całej naczepy pod kątem jej funkcjonalności, niezawodności, bezpieczeństwa eksploatacji oraz kosztów produkcji. Zasadnicze prace konstrukcyjne prowadzone były równolegle w trzech obszarach: konstrukcja ramy nośnej i platformy ładunkowej, konstrukcja układu jezdnego oraz konstrukcja urządzeń pomocniczych.

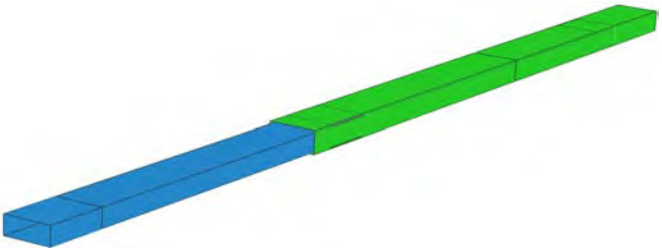
1.1. Konstrukcja ramy nośnej i platformy ładunkowej

Wielton SA posiadał duże doświadczenie konstrukcyjne oraz dobrze opanowaną technologię produkcji klasycznych ram składających się z dwóch belek głównych. Dlatego takie rozwiązanie próbowano również zastosować w nowej naczepie (rys. 1). Jednak rozwiązanie takie posiadało wiele wad. Jedną z najpoważniejszych był problem z uzyskaniem założonej zmiany długości naczepy, w przypadku zastosowania skręcanych kół.



Rys. 1. Analizowana koncepcja ramy dwubelkowej

Po przeanalizowaniu różnych koncepcji ramy, zdecydowano się ostatecznie na zastosowanie ramy centralnej. Zaproponowane rozwiązanie opiera się na cienkościennej konstrukcji skrzynkowej o przekroju prostokątnym, złożonej z dwóch niezależnych części, umożliwiających łatwą zmianę długości ramy oraz zapewniających dobrą sztywność konstrukcji. Schemat zaproponowanego rozwiązania przedstawiono na rys. 2. Konstrukcję ramy zaprojektowano w taki sposób, aby część tylna będąca podstawowym elementem nośnym konstrukcji, do której zamocowane będą osie jezdne pojazdu, zapewniała podparcia dla części przedniej, z którą na stałe połączona będzie płyta sprzęgu z siodłem ciągnika siodłowego. Zmiana długości ramy następuje w wyniku wsuwania i wysuwania części przedniej z części tylnej ramy.

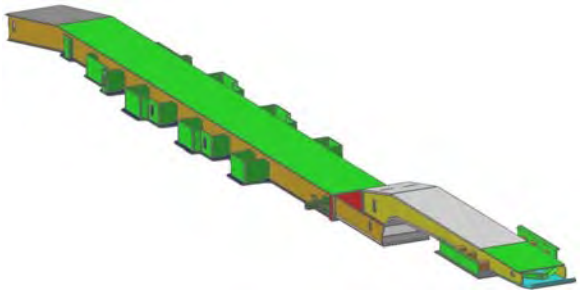


Rys. 2. Schemat rozsuwanej centralnej ramy skrzynkowej

Decydujący wpływ na przyjęte wymiary zewnętrzne ramy miały uwarunkowania konstrukcyjne. Szerokość tylnej części ramy ograniczona była możliwością zastosowania osi jezdnej ze skrętnymi kołami bliźniaczymi. Z kolei przy doborze wysokości ramy ograniczeniem było dążenie do uzyskania możliwie najniższej wysokości platformy ładunkowej. Biorąc pod uwagę powyższe ograniczenia przyjęto zewnętrzne wymiary tylnej części ramy i założono, że nie będą one podlegały dalszym modyfikacjom, natomiast parametrem pozwalającym wpływać na zmianę charakterystyki wytrzymałościowej konstrukcji będą grubości płyt z których wykonana będzie rama. Wymiary zewnętrzne części przedniej ramy wynikać miały z przyjętych wymiarów części tylnej i miały zapewniać prawidłową współpracę obydwu elementów konstrukcji.

Na podstawie powyższych założeń opracowano wstępny projekt ramy (rys. 3). Projekt ten poddano szczegółowej analizie wytrzymałościowej MES, opisanej w następnym rozdziale. Wyniki analiz MES ujawniły pewne niedoskonałości projektu wstępnego – istniały obszary, w których naprężenia znacząco przekraczały wartości granicy plastyczności materiału z jakiego miały być wykonane elementy konstrukcji. Istnienie tak dużych naprężeń wymusiło wprowadzeni zmian w projekcie wstępnym. Największe zmiany wprowadzono w przedniej części ramy: zwiększono grubości górnej i dolnej ścianki belki oraz przekonstruowano obszar przejścia belki przedniej w tzw. łabędzią szyję. Ponadto dodano specjalne płyty poślizgowe, zamocowane w przedniej części tylnej belki. Płyty poślizgowe wprowadzono w celu zwiększenia powierzchni kontaktu pomiędzy tylną i przednią belką, co pozwoliło na znaczne zmniejszenie lokalnych nacisków powierzchniowych.

W podobny sposób konstruowano i sprawdzano, z zastosowaniem MES, wsporniki głównej platformy ładunkowej oraz tzw. balkonu (pomocnicza platforma ładunkowa w przedniej części naczepy, nad siodłem, rys. 14).



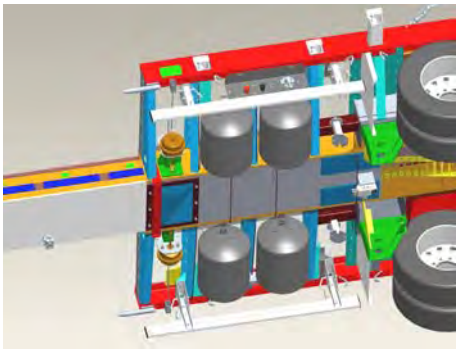
Rys. 3. Model geometryczny rozsuwanej ramy naczepy

Do zwiększania szerokości platformy ładunkowej wykorzystano wysięgniki wysuwane ze wsporników przyspawanych do poprzecznych belek podtrzymujących platformę ładunkową (rys. 6 i 9).

1.2. Konstrukcja układu jezdnego

Przeanalizowano wpływ rodzaju zawieszenia: mechanicznego, pneumatycznego i hydraulicznego, oraz liczby osi skrętnych i kątów skręcenia kół na właściwości trakcyjne pojazdu, przy różnych jego długościach. Biorąc pod uwagę wyniki powyższych analiz oraz czynniki ekonomiczne wybrano osie naczepy i ich zawieszenia oraz ogumienie kół. Zdecydowano, że pojazd będzie posiadał zawieszenie pneumatyczne i że pierwsza oś będzie osią podnoszoną. Zdecydowano również, że naczepa będzie dostępna z jedną lub dwoma (dotyczy tylko wersji 4 osiowej) osiami skrętnymi.

Dobrano również układ hamulcowy i pneumatyczny oraz wykonano niezbędne prace konstrukcyjne związane z ich adaptacją w naczepie (rys. 4). Wybrany układ hamulcowy wyposażony jest w system automatycznej regulacji siły hamowania i zapobiegania blokowaniu kół ABS/EBS. Układ pneumatyczny wykorzystywany jest przez układ zawieszenia oraz układ hamulcowy. Ponadto jest on wykorzystywany przez układ blokowania wysuwu ramy (zmiany długości naczepy).



Rys. 4. Składniki układu pneumatycznego zabudowane w naczepie: zbiorniki ciśnieniowe, siłowniki pneumatyczne kołków blokujących wysuw ramy oraz panel kontrolny

1.3. Konstrukcja układów pomocniczych

W tym obszarze prac przeprowadzono badania wpływu sposobu mocowania na bezpieczeństwo przewożonego ładunku oraz rozwiązań zmniejszających zagrożenia w ruchu drogowym. Wyniki tych badań wykorzystano w konstrukcji i rozmieszczeniu uchwytów do mocowania przewożonego ładunku oraz przy konstrukcji zabezpieczeń przeciwnajazdowych.

Ponadto dobrano nogi podporowe naczepy oraz płytę sprzęgu z 2,5 calowym sworzniem królewskim, jako wyposażenie standardowe, oraz z 3,5 calowym sworzniem, jako opcję, i wykonano odpowiednie prace konstrukcyjne pozwalające na ich zastosowanie w naczepie.

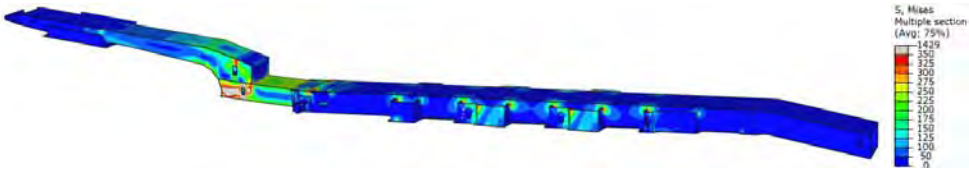
Opracowano konstrukcję najazdów tylnych o regulowanym rozstawie, umożliwiających wjazd na naczepę maszyn samojezdnych (rys. 10), oraz hydraulicznego systemu ich podnoszenia i opuszczania. Skonstruowano także przenośne najazdy umożliwiające wjazd na balkon naczepy (rys. 11) oraz inne układy i akcesoria będące na wyposażeniu naczepy. Wykonano również projekty oświetlenia i oznakowania pojazdu.

2. Przykłady wykorzystania MES w konstrukcji naczepy

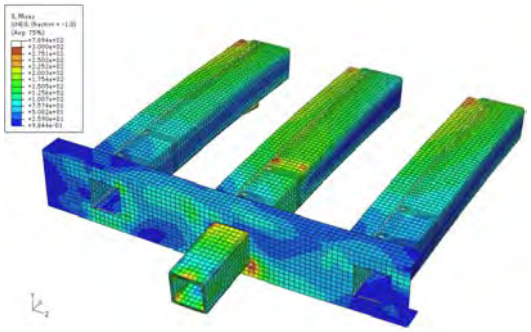
Analizy konstrukcji z wykorzystaniem MES były prowadzone na wszystkich etapach prac konstrukcyjnych. Na podstawie modeli geometrycznych konstrukcji opracowano dyskretne modele numeryczne. W przypadku dużych elementów, takich jak rama centralna naczepy, zdecydowano się na dyskretyzację konstrukcji z wykorzystaniem elementów powłokowych, w pozostałych przypadkach wykorzystano elementy bryłowe. Obliczenia przeprowadzano dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym możliwym przypadkom obciążenia konstrukcji. Obliczenia numeryczne wykonano z wykorzystaniem programu Abaqus/Standard.

Wyniki obliczeń pozwoliły ustalić obszary, w których występowały największe naprężenia. Jeśli poziomy naprężeń uznano za niebezpieczne dla konstrukcji, dokonywano jej modyfikacji. Przy ocenie brano pod uwagę rozkłady naprężenia zredukowanego wg hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Hencky'ego oraz nacisków kontaktowych – w obszarach styku przedniej i tylnej części ramy.

Wyniki obliczeń numerycznych, dla najmniej korzystnych obciążeń ładunkiem, wstępnego projektu ramy (rys. 3) przedstawiono na rys. 5, natomiast wsporników platformy ładunkowej i poszerzającego ją wysięgnika na rys. 6. W pewnych obszarach modelu naprężenia przekraczały wartości granicy plastyczności materiału. W takich przypadkach konieczna była modyfikacja konstrukcji.

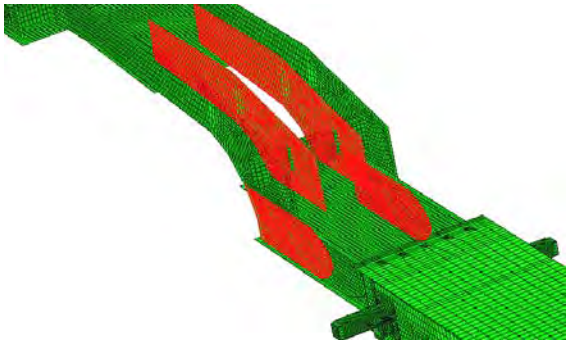


Rys. 5. Rozkład naprężeń w modelu ramy przed modyfikacjami

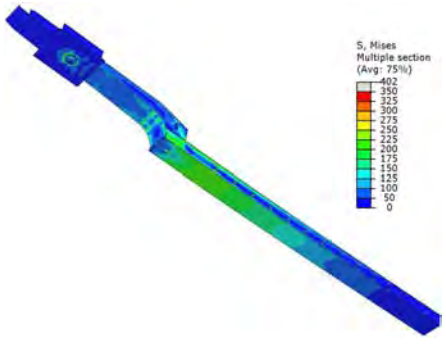


Rys. 6. Rozkład naprężeń w modelu belek platformy ładunkowej oraz wysięgniku poszerzającym platformę przed modyfikacjami

W przypadku ramy centralnej naczepy największe naprężenia były zlokalizowane w obszarze przejścia belki przedniej w łabędzią szyję (rys. 5). W celu zredukowania tych naprężeń przeniesiono otwory technologiczne ze ścianek bocznych ramy na ścianę dolną a ponadto dodano nakładki wzmacniające ściany boczne oraz żebra wzmacniające w tylnej części balkonu (rys. 7). Wprowadzone modyfikacje pozwoliły na zredukowanie naprężeń do bezpiecznego poziomu (rys. 8).



Rys. 7. Nakładki wzmacniające środniki ramy oraz żebra wzmacniające łabędzią szyję



Rys. 8. Rozkład naprężeń w modelu ramy po modyfikacjach

Jeśli istniała taka potrzeba, tego typu modyfikacje wprowadzano w innych elementach naczepy. Analizy wytrzymałościowe prowadzone z wykorzystaniem MES odegrały istotną rolę w procesie konstruowania i wydaje się, że pozwoliły uniknąć błędów konstrukcyjnych, które mogły prowadzić do uszkodzeń naczepy podczas eksploatacji.

3. Wynik realizacji projektu

W wyniku przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych opracowano konstrukcję niskopodłogowej naczepy do przewozu maszyn i ładunków nienormatywnych o ładowności do 40 ton. Długość naczepy może być w łatwy sposób regulowana w zakresie 5 m ze skokiem 0.5 m, a szerokość platformy ładunkowej może być zwiększona o 0.51 m. Ponadto naczepa, w zależności od potrzeb odbiorcy, może posiadać 3 lub 4 osie, w tym oś podnoszoną i skrętną, pneumatyczne zawieszenie pozwalające na regulację wysokości platformy ładunkowej, hydraulicznie sterowane najazdy tylne o regulowanym rozstawie umożliwiające załadunek maszyn samojezdnych. Naczepa spełnia rygorystyczne wymagania w zakresie bezpieczeństwa czynnego i biernego: wyposażona jest w układ hamulcowy z systemem ABS i EBS, zabezpieczenia przeciwnajazdowe oraz odpowiednie oznakowanie i oświetlenie.

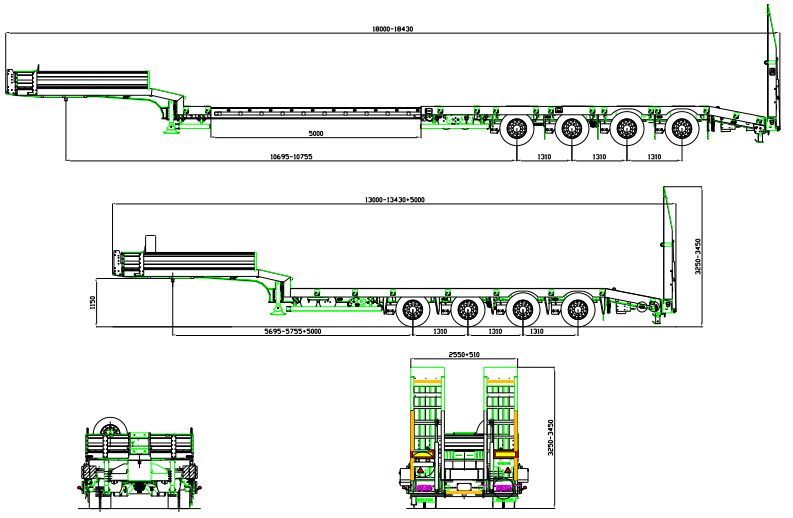
Rys. 9. Poszerzona platforma ładunkowa za pomocą deski położonej na wysuwanym wysięgniku

Rys. 10. Opuszczone najazdy tylne z wysuniętymi nogami podporowymi najazdów

Rys. 11. Przenośne najazdy umożliwiające wjazd na balkon

4. Podsumowanie

Prace badawczo-rozwojowe przeprowadzone w Politechnice Lubelskiej i firmie Wielton SA, wiodącym polskim producencie naczep i przyczep, zakończyły się sukcesem. Opracowano nowoczesną konstrukcję, uniwersalnej naczepy o zmiennej długości do przewozu maszyn samojezdnych i innych ładunków nienormatywnych. Projekt wdrożono do produkcji i do chwili obecnej sprzedano kilkadziesiąt sztuk naczepy (rys. 13 i 14). Jedną z głównych zalet naczepy jest to, że w stanie złożonym spełnia wszystkie wymagania stawiane pojazdom normatywnym, a więc może poruszać się po drogach i przewozić ładunki normatywne bez specjalnych zezwoleń. Dotychczasowe pozytywne opinie użytkowników na jej temat potwierdzają poprawność przyjętych rozwiązań.



Rys. 12. Podstawowe wymiary naczepy

Rys. 13. Naczepa w wersji czteroosiowej w stanie zsuniętym

Rys. 14. Naczepa w wersji czteroosiowej w stanie rozsuniętym

Literatura

1. Abaqus Theory Manual version 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, 1998.
2. Abaqus/Standard User's Manual version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen, 2005.
3. Osiński J.: Obliczenia wytrzymałościowe elementów maszyn z zastosowaniem metody elementów skończonych. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997.
4. Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
5. Rudawska A., Dębski H.: Experimental and numerical analysis of adhesively bonded aluminum alloy sheets joints. Eksploatacja i niezawodnosc – Maintenance and Reliability, Vol. 49, No. 1, 2011, pp. 4-10.
6. Rusiński E., Czmochowski J., Smolnicki T.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.

7. Saga M., Medvecky S.: Contribution to machine frames optimization subjected to fatigue damage. Machine Design 2009, pp. 177-182.
8. Winkler T.: Komputerowy zapis konstrukcji. WNT, Warszawa 1989.

UNIVERSAL EXTENDABLE SEMITRAILER FOR TRANSPORTATION OF MACHINES

Abstract. Design assumptions and solutions used in the newly constructed semitrailer for transportation of oversized and heavy loads, especially self-propelled machines, are presented in the paper. During the design process a special attention was paid to its versatility. The semitrailer can be used for transportation of oversized loads thanks to the loading platform that can be extended in length and in breadth and for transportation of heavier than standard loads thanks to its 4 axles. The big advantage of the semitrailer is that when it is not extended it meets all the requirements for standard vehicles and thus it can be used on roads as standard semitrailer and carry standard loads without any special permissions. Some examples of applying FEM strength analysis during design process are also presented in the paper.

Key words: road transport, oversized loads, extendable semitrailer, strength analysis, FEM

B. Surowska[*], K. Beer[**], J. Borowicz[***], I. Veremchuk[****]

WPŁYW TECHNOLOGII ODLEWANIA NA JAKOŚĆ STOMATOLOGICZNEGO STOPU KOBALTU

Streszczenie. Metalowe protezy szkieletowe stwarzają problemy na etapie wykonawstwa oraz w czasie użytkowania, ulegając pękaniu. Jednym z najistotniejszych etapów wytwarzania, wpływającym na końcową jakość protezy, jest odlewanie metalowego szkieletu. W pracy dokonano analizy wpływu techniki odlewania na właściwości mechaniczne i strukturę stomatologicznego stopu CoCrMo. Zastosowano dwie metody odlewania: odlewanie odśrodkowe oraz próżniowo-ciśnieniowe. Porównano właściwości mechaniczne i strukturę odlewów. Nie stwierdzono istotności różnicy we właściwościach wytrzymałościowych (przy kryterium $p<0,05$) dla stopów odlewanych odśrodkowo oraz próżniowo. W strukturze zaobserwowano większy stopień porowatości odlewu i nieciągłości po granicach dendrytów na przełomach w materiale odlewanym odśrodkowo.

Słowa kluczowe: stop stomatologiczny, odlewanie odśrodkowe, odlewanie próżniowo-ciśnieniowe, wytrzymałość

Wprowadzenie

Protezy szkieletowe to jedne z popularniejszych i funkcjonalnych uzupełnień protetycznych. Należą do ruchomych protez częściowych o zredukowanej płycie podpartej ozębnowo. Elementami protezy szkieletowej są zęby, łączniki oraz elementy utrzymujące i podpierające. Pomimo wprowadzania ceramiki opartej na dwutlenku cyrkonu nadal znaczna część szkieletów protez ruchomych wykonywana jest ze stopów metali.

Stosowanie stopów metali w stomatologii wynika głównie z łatwości uzyskania wymaganych właściwości mechanicznych elementów protetycznych przy stosunkowo niskim koszcie wytwarzania. Z ich stosowaniem wiążą się zarówno problemy technologiczne, wynikające z wymagań stawianych biomateriałom i specyfiki techniki protetycznej na przykład związane z wyborem metody odlewania oraz stosowania wtórnych przetopów [1, 6-11], jak i aspekty estetyczne i ekonomiczne nieodłącznie towarzyszące usługom stomatologicznym.

Do wytwarzania metalowych szkieletów stosuje się technikę odlewania precyzyjnego metodą wytapianych modeli (tzw. traconego wosku) dostosowaną do specyfiki wyrobu oraz możliwości pracowni protetycznych [12].

Do topienia stopów przez szereg lat stosowane było nagrzewanie palnikiem gazowym, co powodowało zanieczyszczanie ciekłego metalu oraz uniemożliwiało dokładne określenie

* *Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, b.surowska@pollub.pl*
** *Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska*
*** *Uniwersytet Medyczny w Lublinie*
**** *Lutsk National Technical University, Ukraina*

temperatury. Technologia ta była przyczyną dużego procentu niepowodzeń wykonawczych [4, 5, 10]. Obecnie stosuje się głównie nagrzewanie indukcyjne, co skutecznie eliminuje część wad odlewniczych. Ciekły stop jest odlewany odśrodkowo lub metodą próżniowo-ciśnieniową [2]. Odlewanie z wykorzystaniem siły odśrodkowej zalecane jest w szczególności do odlewów o skomplikowanych kształtach oraz większych wymiarach, np. szkieletów protez lub mostów wieloprzęsłowych. Odlewanie próżniowe stosowane jest głównie do mniejszych elementów, np. koron lub krótkich mostów, szczególnie wykonywanych ze stopów metali szlachetnych.

W artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu badań nad wpływem metody odlewania na właściwości stopów kobaltu, obejmującego porównanie jakości odlewniczego stopu CoCrMo wytworzonego odlewaniem odśrodkowym i próżniowo.

1. Materiał badawczy i technologia wytwarzania

Do badań zastosowano stop Wironit®extrahart firmy Bego o nominalnym składzie chemicznym (masowo) 63% Co, 30% Cr, 5% Mo, 1,1% Si oraz Mn<1% i C<1% [13]. Stop ten przeznaczony jest do odlewania protez szkieletowych, protez klamrowych i protez mocowanych na zasuwy, rygle i zatrzaski. Właściwości fizyczne i mechaniczne tego stopu, deklarowane przez producenta, zestawiono w tab.1.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne i fizyczne stopu Wironit®extrahart (średnie) [13]

Granica plastyczności Re0,2[MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Moduł Younga E [GPa]	Twardość [HV10]	Wydłużenie A5 [%]	Gęstość [Mg/m3]	Temp. topnienia [°C]	Temp. odlewania- [°C]
625	910	~225	375	4,1	8,2	1260 - 1305	1420

Producent dopuszcza stosowanie przetopów wtórnych ale z nie mniej niż 50% udziałem materiału nowego i z zastrzeżeniem, że cały materiał musi pochodzić z tej samej partii.

Ze stopu wykonano odlewy stosując jednokrotne przetopy o składzie wyjściowym 100% nowego materiału i 50% nowego materiału.

Odlewy wykonano metodą traconego wosku. Jako model bazowy zastosowano próbkę stalową o kształcie i wymiarach stowanych do statycznej próby rozciągania.

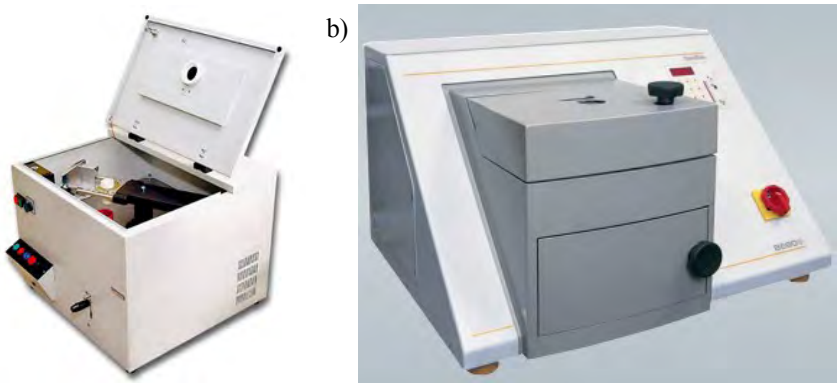
Woskowy model silikonowy zalewany tworzywem akrylowym umieszczany był w pierścieniu ceramicznym i zalewany ceramicznym materiałem ogniotrwałym (tzw. masą osłaniającą). Po wysuszeniu wosk wytapiano w piecu w temp. 2500C, następnie formę nagrzewano do 950°C celem spieczenia formy, wypalenia resztek wosku i usunięcia gazów.

Stopione indukcyjnie wsady odlewane były dwoma metodami: odśrodkową w odlewarce ROTOCAST (rys.1a) oraz próżniowo-ciśnieniową w urządzeniu Nautilus® firmy Bego (rys.1b).

W odlewarce odśrodkowej stopiony indukcyjnie metal jest wtłaczany do formy dzięki sile odśrodkowej powstającej na końcu ramienia. Wartość siły odśrodkowej zależy od pręd-

kości obrotowej i długości ramienia. W zastosowanej wirówce maksymalna prędkość obrotowa wynosi 10 obr./s a moc 2500 W umożliwia stopienie do 100 g metalu.

a) b)



Rys.1. Urządzenia do topienia i odlewania stomatologicznych stopów metalowych: a) odlewarka odśrodkowa ROTOCAST [14], b) odlewarka próżniowo-ciśnieniowa Nautilus® [13]

W odlewarce próżniowej topiony indukcyjnie w tyglu ceramicznym metal wpływa bezpośrednio do formy w warunkach obniżonego ciśnienia bez obniżania temperatury. Jako atmosfera utleniająco-redukująca stosowana jest mieszanina propanu o ciśnieniu 0,05 MPa i tlenu o ciśnieniu 0,2 MPa lub mieszanina powietrze/tlen. Wypełnienie formy następuje w ciągu kilku sekund.

Po usunięciu masy osłaniającej i odcięciu materiału z układu wlewowego powierzchnię próbek piaskowano. Cały proces wykonania próbek ze stopu CoCrMo przeprowadzony był w warunkach pracowni protetycznej według procedur stosowanych do wytwarzania metalowych elementów protez szkieletowych pod nadzorem stomatologa-protetyka z Uniwersytetu Medycznego w Lublinie.

2. Metodyka badań

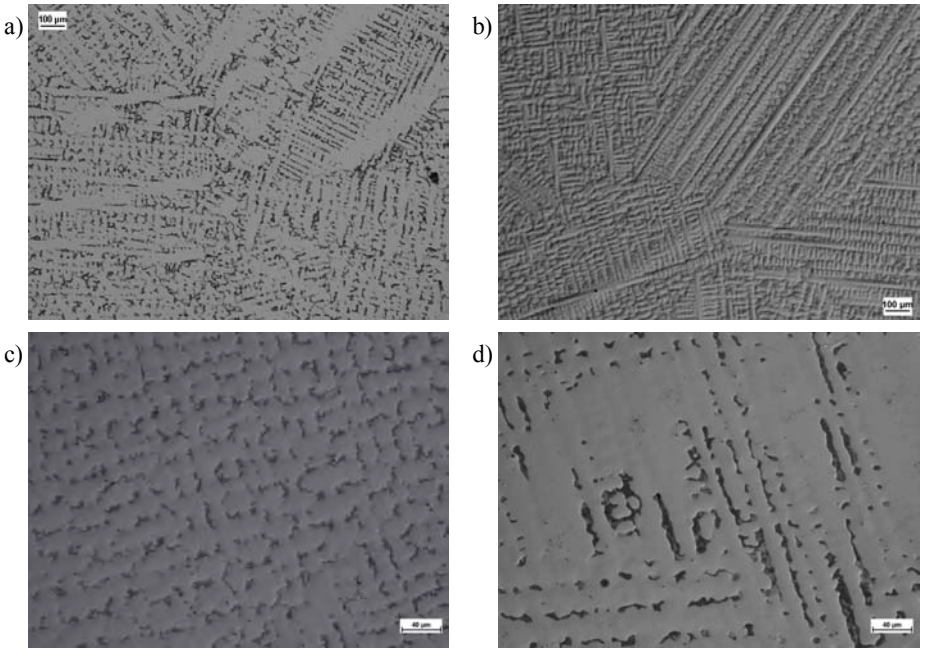
Próbę rozciągania przeprowadzono w oparciu o normę PN EN 10002-1 na maszynie wytrzymałościowej MTS 858 MiniBionix., z prędkością przyrostu wydłużenia względnego 25 μm/s w całym zakresie obciążenia. Pomiar odkształceń wzdłużnych i sterowanie procesem obciążania próbek realizowano liniowym ekstensometrem dynamicznym Instron 2620-601 z bazą pomiarową 11,7 mm. Pomiar odkształceń poprzecznych realizowany był przy użyciu ekstensometru średnicowego MTS 643.31F-24. Odlane próbki walcowe posiadały średnicę pomiarową ϕ 3 mm i długość pomiarową 15 mm. Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa na zgładach poprzecznych i wzdłużnych.

Analizę statystyczną wyników przeprowadzono testem ANOVA w programie Statistica. Za próg istotności przyjęto $p<0,05$.

Obserwacji mikrostrukturalnych na zgładach i przełomach dokonano z zastosowaniem mikroskopów optycznego i skaningowego.

3. Wyniki badań i dyskusja

Odlewy z materiału nowego, w obserwacjach na przekrojach trawionych przy użyciu mikroskopu optycznego, nie wykazują różnicy w mikrostrukturze (rys.2a i b). Charakteryzują się typową, dość grubą strukturą dendrytyczną. Podobny charakter dendrytyczny mają również stopy zawierające materiał z wtórnego przetopu (rys. 2c i d).



Rys. 2. Mikrostruktura odlewów: a) i b) 100% nowego stopu, c) i d) 50% nowego stopu; a) i c) odlewy odśrodkowe; b) i d) odlewy próżniowo-ciśnieniowe

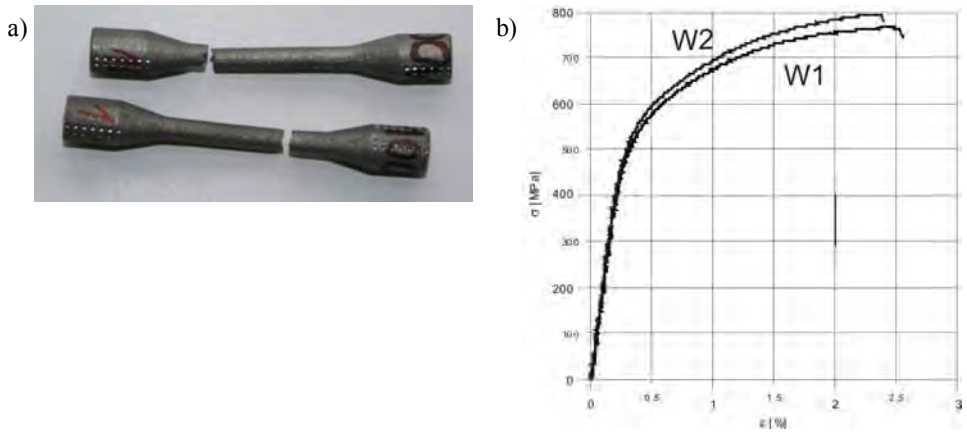
W wyniku badań wytrzymałości mechanicznej wyznaczono następujące wielkości mechaniczne: moduł Younga E, współczynnik Poissona ν, umowną granicę plastyczności R02, wytrzymałość na rozciąganie Rm. Wyniki zestawiono w tab.2.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne (średnie) próbek odlewanych odśrodkowo (W) oraz próżniowo-ciśnieniowo (PC)

Próbki	Współcz. Poissona ν	Moduł Younga E [GPa]	Odch. stand. σ [GPa]	Rm [MPa]	Odch. stand. σ [MPa]	R02 [MPa]	Odch. stand. σ [MPa]
PC 100%	0,25	198	3,62	839	26,56	602	5,56
W 100%	0,26	199	0,20	781	14,50	585	10,50
PC 50%	0,27	193	5,46	828	47,77	601	17,61
W 50%	0,25	189	17,55	800,5	12,50	608	13,50

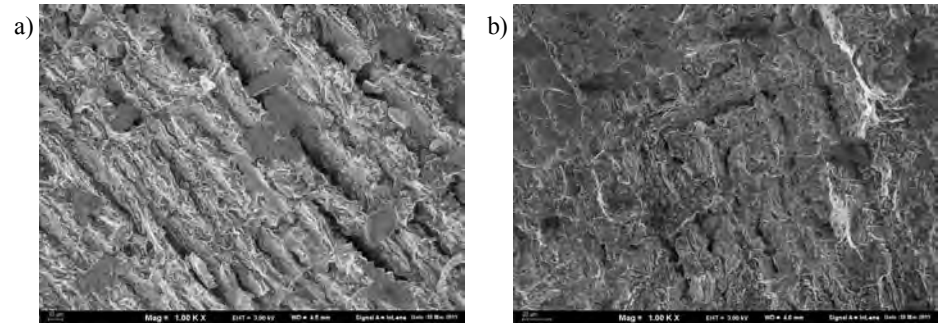
Wielkości te, a w szczególności granica wytrzymałości na rozciąganie, są niższe niż deklarowane przez producenta. Jedynie zmierzona twardość, wynosząca średnio 375 HV10, jest zgodna z podaną przez producenta. Nie wystąpiła statystycznie istotna różnica pomiędzy właściwościami materiałów odlewanych różnymi technologiami zarówno dla stopów zawierających 100% nowego wsadu jak i dla stopów o 50% udziale wsadu nowego ($p>0,05$).

Obserwowano pękanie próbek na długości pomiarowej ale w różnych miejscach tego odcinka (rys.3).



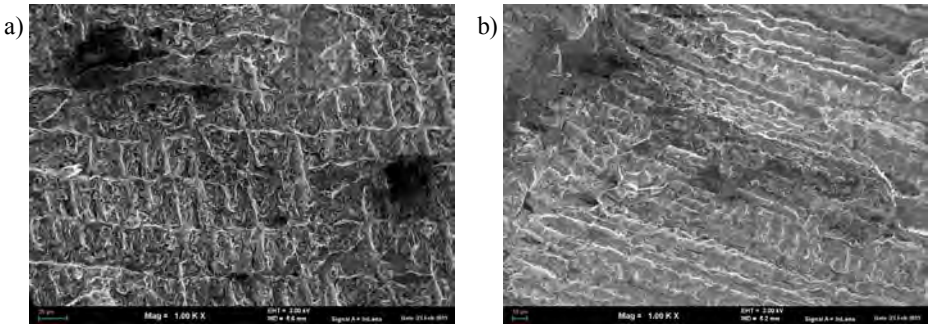
Rys. 3. Typowe miejsca pękania próbek w teście rozciągania (a) oraz krzywe monotonicznego rozciągania (b); odlewanie odśrodkowe, stop bez złomu

Obserwacje przełomów wykazały pewne różnice w morfologii dendrytów w zależności od metody odlewania (rys. 4 i 5). W strukturze materiałów odlewanych odśrodkowo wystąpiły liczniejsze pęknięcia wzdłuż dendrytów.



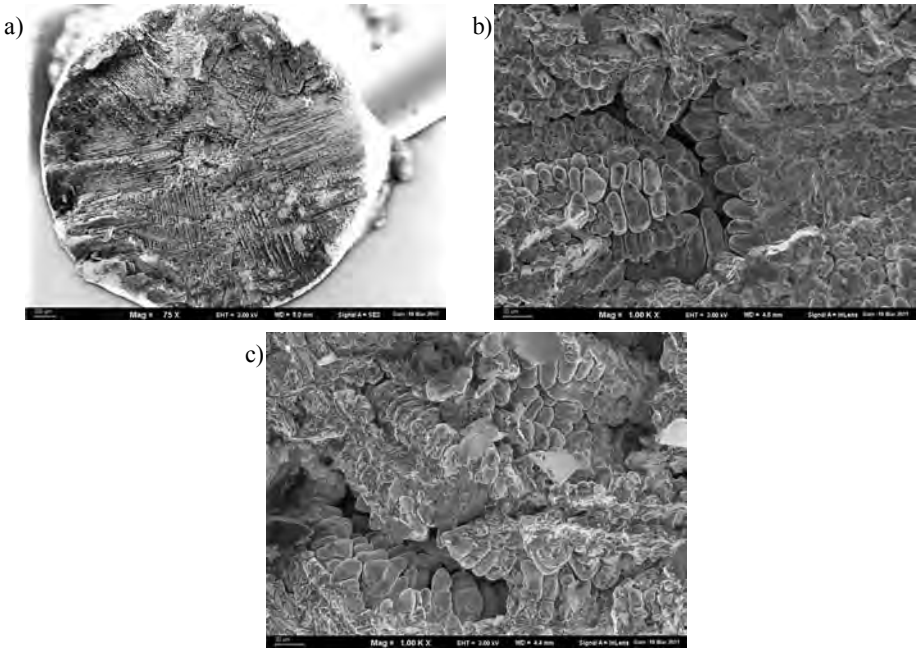
Rys. 4. Struktura przełomów po odlewaniu odśrodkowym: a) 100% nowego stopu, b) 50% nowego stopu; SEM

W odlewach próżniowych wystąpiły obszary o żebrowym ułożeniu dendrytów (rys.5a) oraz obserwowano mniej nieciągłości w postaci pęknięć (rys.5b), natomiast więcej miejsc wskazujących na porowatość gazową (rys.5a).



Rys. 5. Struktura przełomów po odlewaniu próżniowo-ciśnieniowym: a) 100% nowego stopu, b) 50% nowego stopu; SEM

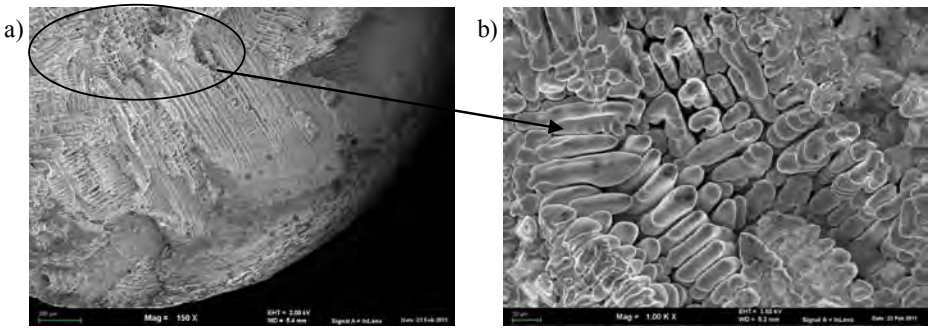
W niektórych odlewach, w szczególności wykonanych metodą odśrodkową, w środkowej części przekroju powstała struktura o bardzo grubych dendrytach z rzadziznami (rys. 6 i 7), pomimo że średnica próbki wynosi tylko 3 mm.



Rys. 6. Struktura przełomu w środku odlewu zawierającego: 50% nowego stopu (a,b) oraz 100% nowego stopu (c); odlew odśrodkowy; SEM

Taką strukturę należy traktować jako wadę technologiczną, której przyczyny wymagają dodatkowych badań. Ze względu na niewielkie różnice we właściwościach mechanicznych wynikające z metody odlewania, ale zaobserwowane różnice w odlewach o różnej zawarto-

ści materiału wtórnie przetapianego, należy wykonać próby z zastosowaniem większej ilości materiału z wtórnego przetopu. Doniesienia literaturowe bowiem są sprzeczne, zarówno co do wpływu wielokrotnych przetopów na właściwości mechaniczne jak i strukturę oraz odporność korozyjną [1, 3, 4, 6-11].



Rys. 7. Struktura przełomu w środku odlewu zawierającego 50% nowego stopu; odlew próżniowo-ciśnieniowy; SEM

4. Podsumowanie

Porównując wyniki badań właściwości mechanicznych nie stwierdzono istotności różnicy (przy kryterium $p<0,05$) dla stopów odlewanych odśrodkowo oraz próżniowo zawierających tylko nowy materiał oraz 50% nowego materiału. Otrzymane parametry wytrzymałościowe są niższe niż deklarowane przez producenta.

W strukturze zaobserwowano większy stopień porowatości odlewu i nieciągłości po granicach dendrytów na przełomach w materiale odlewanym odśrodkowo.

W niektórych próbkach ujawniono niejednorodności strukturalne w środkowej części przekroju, w postaci bardzo grubych dendrytów z rzadziznami. Konieczne są dalsze badania celem określenia, czy ich przyczyną jest jedynie niewłaściwa technologia przygotowania formy odlewniczej, czy również zmiana parametrów stopu zawierającego materiał z przetopu wtórnego.

Literatura

1. Al–Ali A.A.: Evaluation of Macrohardness of Recasted Cobalt–Chromium Alloy, Al–Rafidain. Dent J. , 7(1), 2007, pp. 111–117.
2. Górny Z., Sobczak J.: Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych. Wyd. ZA-PIS, Kraków 2005.
3. Hajduga M., Jasiński M.: Wpływ technologii topienia na strukturę materiałów metalicznych. Nowoczesny Technik Dentystyczny, 1, 2008, str. 53-57.
4. Henriques Guilherme E.P., Consani S., de Almeida Rollo João M.D., Andrade e Silva F.: Soldering and remelting influence on fatigue strength of cobalt-chromium alloys. The Journal of Prosthetic Dentistry, 78, 1997, pp. 146-152.

5. Marciniak S., Połomski J., Pierzynka R., Marciniak-Kraul K., Fabjański P.: Ocena systemów odlewniczych. Nowoczesny Technik Dentystyczny, 1, 2009, str. 44-49.
6. Mortazavi V.A.S., Fathi M.H., Bekhrady F.: Evaluation of the effect of laboratory casting process on the corrosion resistance of Co-Cr-Mo and Ni-Cr-Mo dental alloy. Journal of Dentistry (Shiraz University of Medical Sciences) 2003; 4(1 (6)):44-53.
7. Ozyegin L.S., Tuncer R., Avci E.: Hardness, Behavior and Metal Surface Evaluation of Recasting Non-Precious Dental Alloys. Key Engineering Materials, 330-332, 2007, pp. 1425-1428.
8. Palaskar J., Nadgir D.V., Shah I.: Effect of recasting of Nickel-Chromium alloy on its Hardness. International Journal of Dental Clinics, 2010:2(4):8-11.
9. Palaskar J., Nadgir D.V., Shah I.: Effect of recasting of Nickel-Chromium alloy on its porosity. Contemporary Clinical Dentistry, 2010; vol.1, Iss.4, pp.237-242.
10. Peraire M., Martinez-Gomis J., Anglada J.M., Bizar J., Salsench J., Gil F.J.: Effects of Recasting on the Chemical Composition, Microstructure, Microhardness, and Ion Release of 3 Dental Casting Alloys and Titanium. The International Journal of Prosthodontics, 20, 2007, pp. 286-288.
11. Strietzel R.: Ponowne odlewanie stopów dentystycznych. Dental-labor, 4/2000, str. 3-6
12. Surowska B., Beer K., Veremchuk I.: Problemy technologiczne w wytwarzaniu metalowych elementów szkieletowych protez stomatologicznych. Zeszyty Naukowe WSEiI, Ser. Transport, 2011 (w druku).
13. www.bego.com/ strona firmy Bego, 27 luty 2011.
14. www.rokodent.pl/ katalog firmy Rokodent, 4 kwiecień 2011.

THE INFLUENCE OF CASTING TECHNOLOGIES ON QUALITY OF DENTAL COBALT ALLOY

Summary. The essential reasons for failure during the frame dentures manufacture arise due to the clinical mistakes such as incorrectness or imprecision of design and non-adherence to technical procedures in prosthetic laboratory. The casting of metallic denture is one of the most important manufacture stage which has the influence on denture quality. In this paper an influence of casting method on mechanical properties and structure of CoCrMo dental alloy is carried out. Two methods of casting were used: centrifugal casting and vacuum pressure casting. The mechanical properties and microstructure of precision castings were compared.. No statistically significant differences between mechanical properties of centrifugal and vacuum-pressure casting alloys with 100% and 50% new material were found (significance limit $p<0,05$). Higher porosity and discontinuities on dendrite boundaries in centrifugal cast fractures than in vacuum-pressure cast fractures were observed.

Key words: dental alloy, centrifugal casting, vacuum-pressure casting, strength

Przemysław Tyczewski*

ANALIZA ZUŻYCIA WĘZŁÓW TARCIA SPRĘŻAREK CHŁODNICZYCH PRACUJĄCYCH W WYSOKIEJ TEMPERATURZE I CIŚNIENIU

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badania zużycia węzłów tarcia rzeczywistej sprężarki chłodniczej pracującej w wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Badania wykonano na stanowisku badawczym składającym się z rzeczywistych elementów chłodniczych. Na urządzeniu tym można symulować niekorzystne prace sprężarki, miedzy innymi pracę w wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Do analizy zużycia wybrano następujące elementy ruchowe sprężarki: panewkę korbowodu, łożysko ślizgowe, czop wału korbowego i cylinder tłoka. Analiza zużycia polegała na porównaniu profili chropowatości powierzchni przed i po próbie badawczej. Dodatkowo produkty zużycia poddano mikroanalizie rentgenowskiej w skaningowym mikroskopie elektronowym.

Słowa kluczowe: badania, sprężarka chłodnicza, zużycie

Wstęp

Elementy ruchowe sprężarek chłodniczych narażone są na różnego rodzaju procesy zużycia w zależności od stosowanych olejów i czynników chłodniczych [3, 4, 5]. Przyczynami mechanicznych uszkodzeń sprężarek jest brak oleju, przegrzanie sprężarki, uderzenie cieczowe, rozruch zalanej sprężarki oraz zalanie ciekłym czynnikiem. Niewłaściwe smarowanie spowodowane jest najczęściej stosowaniem nieodpowiednio dobranego oleju do czynnika chłodniczego. Tworzy się wówczas mieszanina olej – czynnik chłodniczy.

Olejom stosowanym w układach chłodniczych oprócz podstawowych wymagań (smarowania oraz chłodzenia sprężarki) stawia się wymóg odporności na krzepnięcie w niskich temperaturach występujących w parowniku oraz mieszalność i kompatybilność z czynnikami chłodniczymi. Oleje muszą posiadać odpowiednie właściwości smarne zapewniające tworzenie się filmu olejowego na elementach trących, jak również zdolność powrotu z układu chłodniczego do sprężarki [2].

W instalacji chłodniczej, układ olej – czynnik chłodniczy cechuje się złożonymi zależnościami. W przypadku przekroczenia wzajemnej mieszalności część czynnika jest zaabsorbowana przez olej. Rozpuszczalność czynnika w oleju uzależniona jest między innymi od bazy oleju. W zależności od składu mieszaniny, temperatury i ciśnienia mieszanina oleju z czynnikiem może mieć charakter jednofazowy lub dwufazowy. Złożone zależności w przypadku mieszaniny olej – czynnik chłodniczy powodują, iż właściwości smarne i przeciwzużyciowe

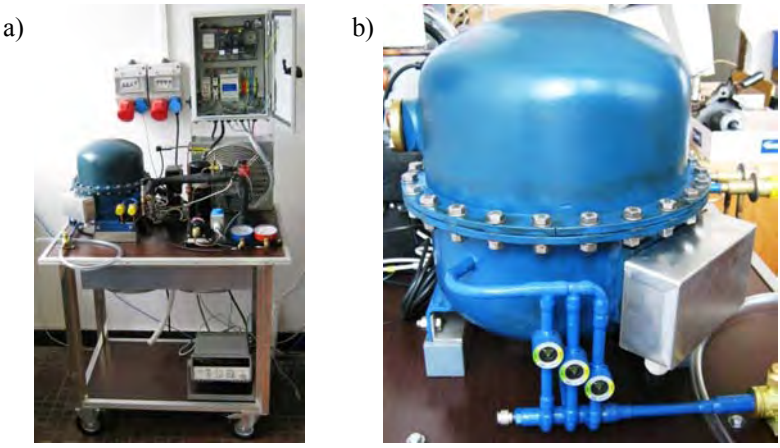
* *Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, przemyslaw.tyczewski@put.poznan.pl*

są dużo gorsze niż oleju czystego. Ze względu na możliwość rozcieńczania oleju czynnikiem chłodniczym stosuje się oleje o zwiększonej lepkości.

Z uwagi na zmieniające się przepisy dotyczące stosowania substancji zubożających warstwę ozonową wprowadzane są nowe czynniki chłodnicze do urządzeń i instalacji chłodniczych. Czynniki chłodnicze z olejami sprężarkowymi tworzą mieszaniny powodujące przyśpieszone zużycie sprężarek chłodniczych [1, 6, 7]. Ze względu na złożoność problemów obecnie nie ma ustalonych międzynarodowych norm dotyczących wymagań olejów stosowanych w sprężarkach chłodniczych. W obecnym czasie nie ma uniwersalnego oleju do sprężarek chłodniczych. Olej należy dobierać dla odpowiedniej sprężarki i czynnika chłodniczego.

1. Stanowisko badawcze

W celu zbadania wpływu niekorzystnych warunków pracy instalacji chłodniczej na zużycie tribologiczne powierzchni elementów ruchowych sprężarki wykonano stanowisko badawcze (rys. 1a).

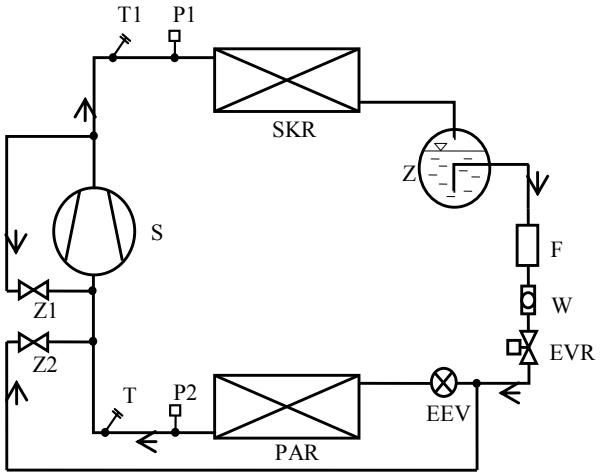


Rys. 1. Stanowisko do badania procesów zużycia sprężarek chłodniczych, a) widok stanowiska, b) korpus

Stanowisko zbudowano jako rzeczywisty układ chłodniczy składający się ze sprężarki, parownika, filtra, wzierników, elektronicznego zaworu rozprężnego, zaworu elektromagnetycznego i skraplacza. Za pomocą układu regulacji można sterować obrotami wentylatorów na parowniku i skraplaczu, wartością przegrzania oraz stopniem otwarcia zaworu rozprężnego. Najistotniejszym elementem stanowiska jest sprężarka chłodnicza znajdująca się w rozbieralnym korpusie (rys. 1b). Semihermetyczna obudowa umożliwia wymianę sprężarki w celu oceny stopnia zużycia jej elementów ruchowych. Zestawem wzierników można kontrolować ilość oleju w korpusie. Elementy stanowiska zostały tak dobrane, aby zapewnić jak najbardziej uniwersalną instalację dla różnych czynników chłodniczych i różnych olejów.

Schemat stanowiska pokazano na rysunku 2. Na stanowisku można symulować następujące niekorzystne warunki pracy instalacji:

- praca sprężarki we wysokiej temperaturze i ciśnieniu,
- zalewanie sprężarki ciekłym czynnikiem,
- doprowadzenie gorących gazów do sprężarki,
- praca układu z powietrzem i wilgocią,
- praca sprężarki w różnych ilościach oleju,
- praca sprężarki przy braku oleju,
- praca z różnymi czynnikami chłodniczymi,
- praca z różnymi olejami.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego, S – sprężarka zamontowana w rozbieralnej obudowie; SKR – skraplacz; PAR – parownik; Z – zbiornik czynnika chłodniczego; F – odwadniacz; W – wziernik; EVR – zawór elektromagnetyczny; EEV – elektroniczny zawór rozprężny, sterowany mikroprocesorowym sterownikiem EVD evlolution; Z1 – zawór (praca gorąca); Z2 – zawór (praca mokra); T1, T2 – czujniki temperatury; P1, P2 – czujniki ciśnienia

Praca sprężarki w wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Niekorzystne warunki pracy sprężarki to praca na możliwie niskim ciśnieniu, praca na możliwie wysokim ciśnieniu oraz wysokie przegrzanie czynnika. Odpowiednio sterując obrotami wentylatorów można uzyskać wysoką temperaturę tłoczenia, a więc wysoką, niekorzystną temperaturę, w której pracuje sprężarka. Podczas próby przy zamkniętych zaworach Z1 i Z2 i odpowiednich nastawach układ będzie pracować na wysokich parametrach pracy.

Zalewanie sprężarki ciekłym czynnikiem. W celu uzyskania na stanowisku sytuacji, w której do sprężarki na stronę ssawną dostaje się czynnik chłodniczy w formie ciekłej (praca mokra) należy otworzyć zawór Z2. Przez zawór następuje przepływ czynnika w fazie ciekłej do sprężarki powodując, że na elementy ruchowe sprężarki działa mieszanina oleju i ciekłego czynnika.

Doprowadzenie gorących gazów do sprężarki. Doprowadzenie gorących gazów do sprężarki ma za zadanie stworzenie niekorzystnych warunków pracy, poprzez podniesienie temperatury pracy sprężarki. Otwarcie zaworu Z1 powoduj wprowadzenie gorących gazów na stronę ssawną sprężarki.

Praca układu z powietrzem i wilgocią. Praca układu z powietrzem i wilgocią prowadzi do istotnego zanieczyszczenia układu. W celu dostania się do układu powietrza wraz z wilgocią należy zassać do instalacji powietrze wraz z wodą z otoczenia.

Praca sprężarki przy braku oleju. Kolejna próba to praca przy braku oleju. Niewielką ilość oleju w sprężarce można otrzymać zlewając olej z obudowy za pomocą króćca spustowego.

Praca sprężarki w różnych ilościach oleju. Zastosowany układ wzierników przy rozbieralnej obudowie sprężarki umożliwia kontrolę ilości oleju, w którym pracuje sprężarka. Ilość oleju można regulować poprzez spuszczanie oleju za pomocą króćca z zaworem zakończonym przewodem elastycznym. Zbyt wysoki poziom może zaburzać pracę sprężarki i powodować wzrost przerzutu oleju do instalacji chłodniczej. Zbyt niski poziom może przyczynić się do złego smarowania, co może stać się przyczyną jej uszkodzenia [8].

Praca z różnymi czynnikami chłodniczymi. Elektroniczny zawór rozprężny wraz z elektronicznym sterownikiem firmy Carel zapewnia możliwość współpracy instalacji z różnymi czynnikami chłodniczymi. Zmianę pracy zaworu, zależną od zastosowania czynnika, należy zmienić w sterowniku wybierając odpowiedni czynnik chłodniczy.

Praca z różnymi olejami. Obowiązkowa wymiana w instalacjach starych czynników na nowe, które najczęściej pracują z olejami syntetycznymi, skutkuje możliwością pozostawienia niewielkich ilości starego, najczęściej mineralnego oleju w instalacji. Zatem w instalacji może znajdować się mieszanina różnych olejów.

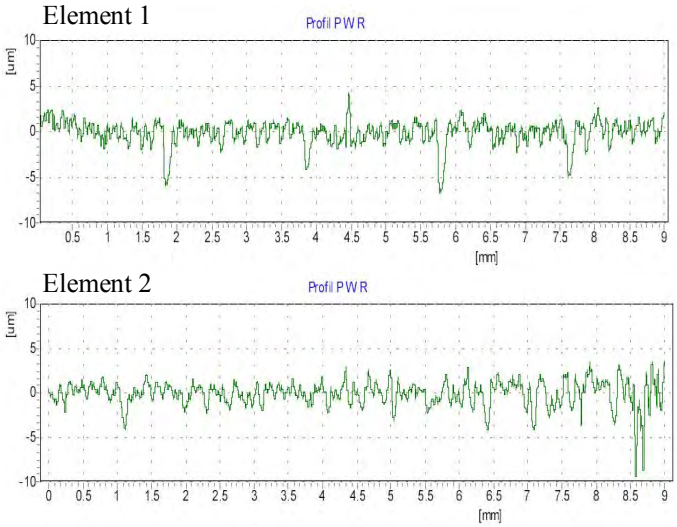
2. Wyniki badań

Przedstawione stanowisko badawcze wykorzystano w celu zbadania wpływu niekorzystnych warunków pracy na rzeczywiste powierzchnie ślizgowe elementów sprężarki. Badania przeprowadzono podczas 30 dniowego testu, w którym temperatura tłoczenia wynosiła 380 T, temperatura ssania 281 T, ciśnienie tłoczenia 2,74 MPa, ciśnienie ssania 0,12 MPa. Do badań wykorzystano olej do sprężarek chłodniczych tłokowych TOTAL PLANETELF ACD 32. Jest to olej syntetyczny poliestrowy na bazie estrów polioil (POE). Instalacja chłodnicza była napełniona czynnikiem R407C (ZEO) o składzie: 23% R32 (CH_2F_2), 25% R125 (C_2HF_5) i 52% R134 ($C_2H_2F_4$).

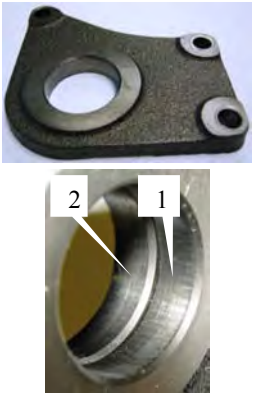
Hermetyczna sprężarka tłokowa Embraco Aspera NE9213GK ma kilka węzłów ruchowych. Powierzchnie ślizgowe to: czopy wału korbowego, pokrywa łożyska korbowodu, powierzchnia tłoka, powierzchnia cylindra.

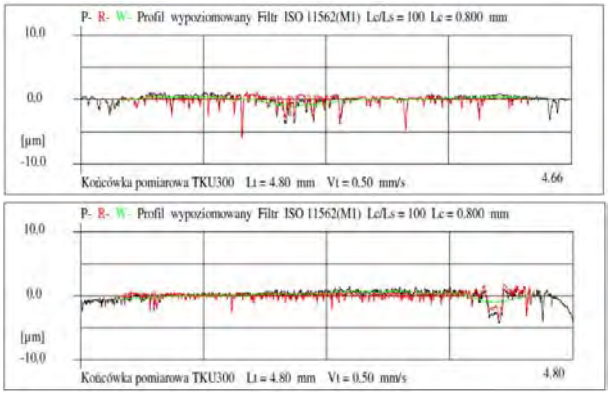
Po przeprowadzonym teście porównano profile chropowatości powierzchni po próbie z elementami nowymi. Na rysunkach 3-6 przestawiono profile oraz wybrane parametry chropowatości porównywanych powierzchni panewki korbowodu, łożyska ślizgowego, czopu wału korbowego i cylindra tłoka.

Parametr	Element 1	Element 2
Rz	7,286	7,438
Rt	13,077	10,802
Ra	1,018	0,945



Rys. 3. Porównanie elementów; 1 – element po próbie w trudnych warunkach, 2 – element nowy

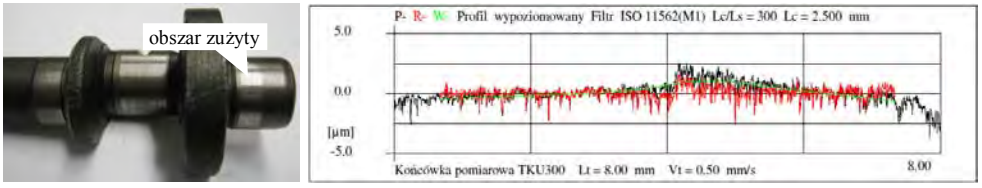




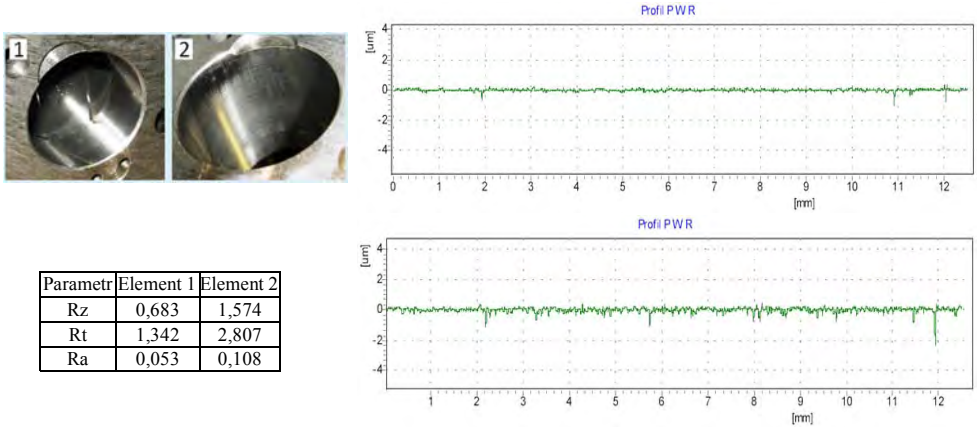
Element 1
Ra 0,378
Rt 5,443
Rz 3,609

Element 2
Ra 0,527
Rt 8,226
Rz 5,220

Rys. 4. Porównanie elementów. 1 – element po próbie w trudnych warunkach, 2 – element nowy



Rys. 5. Profil chropowatości czopu wałka korbowego



Parametr	Element 1	Element 2
Rz	0,683	1,574
Rt	1,342	2,807
Ra	0,053	0,108

Rys. 6. Profil chropowatości cylindra tłoka; 1 – cylinder nowy, 2 – cylinder po próbie

Analizując profile chropowatości powierzchni elementów ślizgowych sprężarki pracującej w wysokiej temperaturze i wysokim ciśnieniu można zauważyć małe zużycia. Powierzchnie po teście mają więcej głębszych zarysowań. Powierzchnie po pracy posiadają mniej wystających wzniesień. W przypadku powierzchni cylindra tłoka i łożyska ślizgowego zanotowano wzrost wartości podstawowych parametrów chropowatości, Ra o około 70%, Rt 80% i Rz 90%.

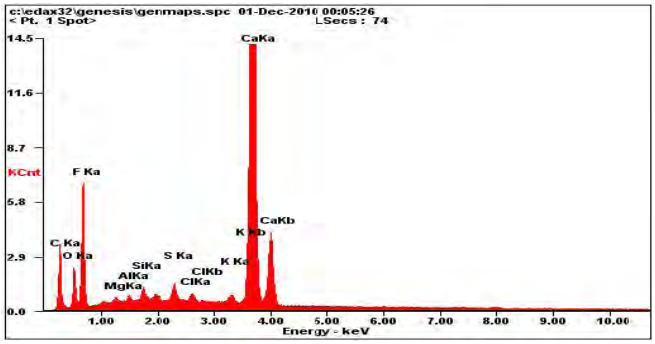
Produkty zużyciowe znajdujące się w oleju poddano mikroanalizie rentgenowskiej w skaningowym mikroskopie elektronowym przy wykorzystaniu algorytmów korekcji macierzowych ZAF. Na rysunku 7 przedstawiono zdjęcia produktów zużycia wraz z analizą jakościową i ilościową pierwiastków znajdujących się w analizowanych produktach. Produktami zużycia były elementy metalowe „opiłki" i „kulki" oraz powierzchnie płaskie „łuski". W większości były to produkty metalowe z zawartością Fe około 52 – 95%. Znaleziono również pierwiastki C (25%), F (28%), O (16%), Ca (27%), które mogły pozostać na produktach zużycia z wykorzystywanego czynnika chłodniczego R407C.

Zawartość cząstek metalu wskazuje na ścieranie lub pokruszenie elementów metalowych. Produkty zużycia stanowią zagrożenie dla powierzchni ruchowych sprężarki, ale mogą również być przyczyną awarii lub niewłaściwej pracy innych elementów układu chłodniczego jak np. zaworu rozprężnego. Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcia tłoka w miejscu smarowania powierzchni tłoka przez otwór smarowniczy.

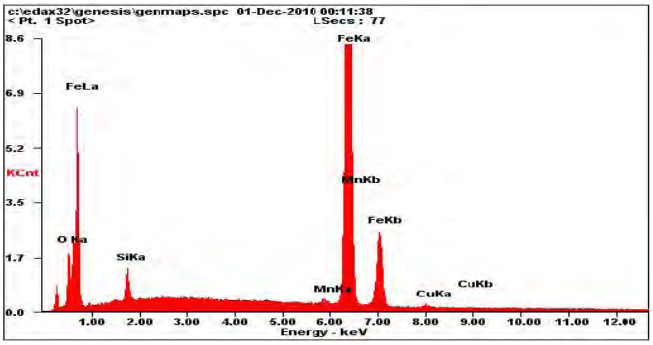
3. Podsumowanie

Ze względu na złożoność problemów oddziaływania oleju i czynnika chłodniczego na powierzchnie robocze sprężarki nie ma obecnie ustalonych międzynarodowych norm dotyczących wymagań olejów stosowanych w sprężarkach chłodniczych w zakresie właściwości tribologicznych.

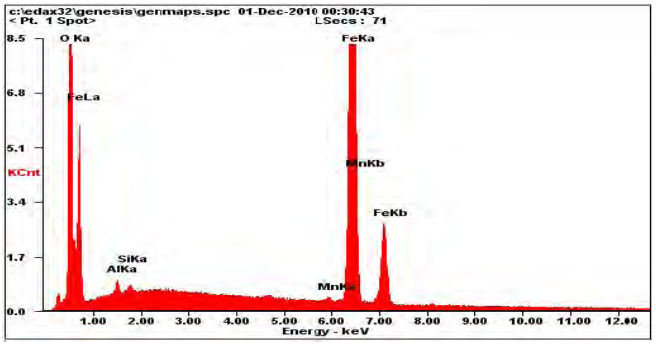
At %	At %
CK 25,18	OK 16,12
FK 28,64	MgK 00,53
AlK 00,43	SiK 00,82
SK 00,75	ClK 00,35
KK 00,34	CaK 26,84



At %	At %
OK 10,09	SiK 03,53
MnK 00,87	FeK 84,77
CuK 00,74	



At %	At %
OK 46,21	AlK 00,84
SiK 00,49	MnK 00,38
FeK 52,09	



Rys. 7. Analiza produktów zużycia po próbie w temperaturze tłoczenia 380 T i ciśnieniu tłoczenia 2,74 MPa

Rys. 8. Powierzchnia tłoka z rysami utworzonymi przez mikroskrawanie i bruzdowanie produktami zużycia znajdującymi się w mieszaninie olej – czynnik chłodniczy. Powiększenie x120

Na skonstruowanym stanowisku można symulować różne ekstremalne warunki pracy rzeczywistych sprężarek. Porównując rzeczywiste powierzchnie ślizgowe elementów sprężarki po próbie w trudnych warunkach pracy z powierzchniami nowymi można zauważyć, że powierzchnie nie uległy dużym zmianom. Zaobserwowany wzrost parametrów chropowatości Ra, Rt, Rz oraz zauważone produkty zużycia mogą świadczyć o występowaniu procesów ściernych, które doprowadziły do małych zmian powierzchni ślizgowych. Świadczyć to może o odpowiednio dobranym materiałom na powierzchnie ślizgowe, które nie ulegają zużycia podczas pracy sprężarki w temperaturze 380 T i ciśnieniu 2,74 MPa przy obecności oleju syntetycznego POE i czynnika R407C. Zatem można stwierdzić, że wzrost temperatury i ciśnienia tłoczenia sprężarki nie wpływa na istotne zużycie tribologiczne powierzchni ślizgowych tłokowej sprężarki chłodniczej.

Literatura

1. Allison Y. Suh, Jayesh J. Patel, Andreas A. Polycarpou, Thomas F. Conry: Scuffing of cast iron and Al390-T6 materials used in compressor applications. Wear, 260 (7-8), 2006, s. 735-744.
2. Bonca, Butrymowicz D., Targański W., Flajduk T.: Poradnik – Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i użytkowe. IPPU MASTA, Gdańsk 2004.
3. De Melloa J.D.B., Binderb R., Demasc N.G.: Polycarpouc A.A., Effect of the actual environment present in hermetic compressors on the tribological behaviour of a Si-rich multifunctional DLC coating. Wear 267 (2009) 907–915.
4. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Characteristics of stands for wear tests of materials for refrigeration compressors elements. Tribologia, 3/2010, s. 75-84.
5. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Ocena wpływu mieszanin olejów sprężarkowych i czynników chłodniczych na trwałość węzłów tarcia w sprężarkach chłodniczych. Tribologia, 4/2010, s. 117-128.
6. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Specification of lubricating oil operation in refrigeration compressors. Tribologia, 3/2010, s. 63-73.
7. Hong-Gyu Jeon, Se-Doo Oh, Young-Ze Lee: Friction and wear of the lubricated vane and roller materials in a carbon dioxide refrigerant. Wear 267 (2009) 1252–1256.
8. Kalinowski K.: Amoniakalne urządzenia chłodnicze. Instalacje. Zastosowania. Bezpieczeństwo. Tom 2. IPPU MASTA, Pruszcz Gdański, 2005.

THE ANALYSIS OF FRICTION NODES OF THE REFRIGERATION COMPRESSORS OPERATING AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

Summary. The paper presents some results of the friction nodes wear examinations for the real refrigeration compressor operating under high pressure and temperature conditions. The examinations were performed on the test stand consisting of the real refrigeration elements. On this stand some disadvantageous compressor operating conditions can be simulated, namely, among others, the compressor

operation at high temperatures and high pressures. To analyse wear the following moving elements of the compressor were selected: the connecting rod bearing shell, slide bearing, crankshaft pin and piston cylinder. The analysis of wear consisted in a comparison of the surface roughness profiles before and after the test. In addition, the products of wear were subjected to X-ray microanalysis in a scanning electron microscope.

Key words: examinations, refrigeration compressor, wear

Mariusz Walczak*, Jarosław Bieniaś*, Barbara Surowska*

ZASTOSOWANIE POWŁOK SIO_2-TIO_2 W PROTETYCE STOMATOLOGICZNEJ

Streszczenie. Przeprowadzono badania przyczepności czterech kombinacji połączeń: Ti/Triceram, Ti/SiO_2-TiO_2/Triceram, Remanium 2000/Vita Keramik i Remanium 2000/ SiO_2-TiO_2/Vita Keramik metodą trzypunktowego zginania (wg PN-EN ISO 9693). Powłoki SiO_2-TiO_2 nanoszone były na tytanowe i kobaltowe podłoże metodą zol-żel. Otrzymane wyniki badań wykazały większą przyczepność połączenia Ti/SiO_2-TiO_2/Triceram w stosunku do układu połączenia Ti/Triceram bez warstwy przejściowej zol-żel. Zastosowanie powłoki przejściowej zol-żel w przypadku stopu CoCrMoW nie podwyższa wytrzymałości połączenia metal-porcelana, a otrzymane wyniki są zbliżone do rezultatów uzyskiwanych z zastosowaniem tradycyjnych technik przygotowania i napalania dentystycznych koron. Potwierdza to celowość stosowania ceramicznej warstwy pośredniej na podłożu tytanowym.

Słowa kluczowe: porcelana dentystyczna, połączenie metal-ceramika, trzypunktowy test przyczepności, powłoki zol-żel

Wprowadzenie

Stopy tytanu i kobaltu są w szerokim zakresie stosowane w protetyce stomatologicznej [8, 9], szczególnie krajowej. Aktualnie z materiałów tych wykonywane są aparaty protetyczne trwale licowane ceramiką stomatologiczną. Stopy kobaltowe licuje się porcelaną wysokotopliwą, natomiast stopy tytanu – porcelaną niskotopliwą. Wynika to z przemian zachodzących w stopach pod wpływem podwyższonych temperatur oraz grubości warstwy utlenionej. Ze względu na temperaturę topnienia porcelany dentystyczne dzieli się na: wysokotopliwe (1288÷1371°C), średniotopliwe (1093÷1260°C) i niskotopliwe (871÷1066°C) [6], a wg innych danych literaturowych [18] zakres niskotopliwych jest rzędu 750÷1000°C). Nowe gatunki ceramiki o temperaturze topnienia w zakresie ok. 700÷850°C klasyfikowane są jako ultra niskotopliwe.

Wykonywanie aparatów protetycznych trwale pokrywanych porcelaną, obecnie w skali laboratoryjnej, jest procesem trudnym, ze względu na różnice w charakterze wiązań chemicznych cechujących obydwa materiały. Natura wiązań chemicznych zmienia się skokowo na granicy metal-ceramika, przy przejściu od sieci metalicznej do jonowo-atomowej.

Połączenie porcelany z metalowym podłożem zachodzi dzięki formowaniu się warstwy tlenków podczas procesu napalania porcelany. Ważnym parametrem jest odpowiedni zakres temperatury, który zapobiega tworzeniu się stosunkowo grubych warstw tlenków, a tym

* *Katedra Inżynierii Materiałowej, Politechnika Lubelska, m.walczak@pollub.pl*

samym optymalny dla wystąpienia trwałego połączenia metal-ceramika [14, 20]. Na etapie przygotowania powierzchni stosuje się tradycyjne piaskowanie [11], co nie zapewnia trwałego połączenia metalu z porcelaną. Obserwuje się przypadki odpryśnięcia ceramiki od powierzchni struktury metalowej. W przypadku stopów tytanu pod tym względem badania kliniczne wykazują 16 % niepowodzeń po trzyletnim użytkowaniu [16,19].

Uszkodzenie połączenia porcelana-metal może mieć kilka przyczyn. Gdy na powierzchni metalu wytworzy się zbyt mała warstewka tlenków i wówczas połączenie będzie zbyt słabe. Także zbyt gruba warstwa tlenków może doprowadzić do uszkodzenia połączenia porcelana-metal w obrębie tej warstwy tlenków [6]. Według badań prowadzonych przez Adachi i współautorów [1] na połączenie porcelany z tytanem mają wpływ następujące czynniki: (1) tytan i jego stop nieprzerwanie utleniają się podczas wypalania porcelany, (2) kumulacja naprężeń wewnętrznych podczas przyrostu tlenków zapobiega łuszczeniu się warstwy tlenkowej, (3) naprężenia wewnętrzne rozwijają się na granicy rozdziału faz z powodu niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnej. Ponadto stwierdzono, że najbardziej korzystna jest sytuacja gdy współczynnik rozszerzalności cieplnej porcelany jest nieznacznie niższy w porównaniu do współczynnika metalu. Dopuszczalna różnica we współczynniku α powinna wynosić około $0{,}5 \times 10^{-6}$ /°C. Gdy różnica będzie znacząco większa, to spowoduje powstawanie szczątkowych naprężeń rozciągających, które mogą być przyczyną uszkodzenia połączenia metal-ceramika, co zostało potwierdzone przez licznych autorów publikacji [3-5, 7, 14].

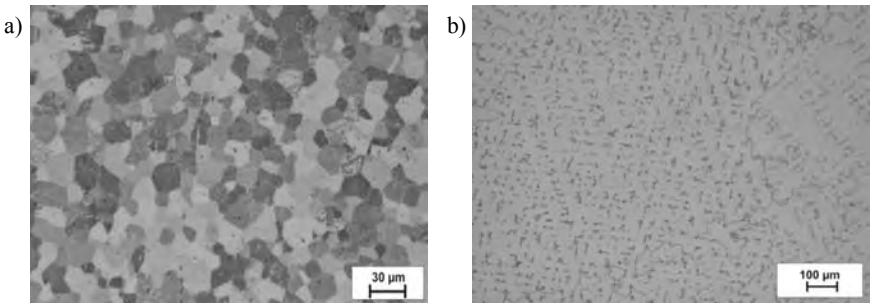
Obecnie poszukuje się rozwiązań podwyższających trwałość układu metal-ceramika. Z danych literaturowych [10, 11, 17] wynika, że wytwarzanie warstw pośrednich zol-żel na tytanowych biomateriałach może prowadzić do zwiększenia przyczepności porcelany do podłoża.

W artykule przedstawiono wyniki badań własnych przeprowadzonych celem ukształtowania warstwy wierzchniej na tytanie i stopie kobaltu CoCrMoW przez wytworzenie układu wielowarstwowego złożonego z wewnętrznej warstwy ceramicznej wykonanej metodą zol-żel i warstwy zewnętrznej z porcelany stomatologicznej tak, by uzyskać trwałe połączenie.

1. Metodyka badań

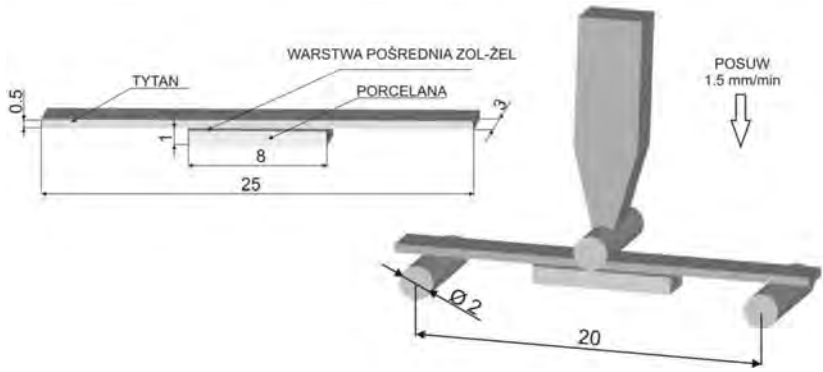
Materiał doświadczalny stanowił czysty technicznie tytan cp-Ti (*commercially pure* ASTM-grade 2) produkcji Daido Steel Co. Ltd oraz stop kobaltu Remanium 2000 firmy Dentaurum. Tytan w stanie dostawy miał postać prętów okrągłych ∅ 25 mm gorącowalcowanych oraz blachy gorącowalcowanej o grubości 0,5 mm. Dodatkowo był on wyżarzany w temperaturze 550°C. Natomiast stop kobaltu (CoCrMoW) Remanium 2000 był materiałem odlewniczym. Mikrostruktury badanych materiałów metalowych przedstawia rys. 1. Struktura czystego technicznie tytanu cp-Ti to struktura jednofazowa: roztwór stały α-Ti. Technicznie czysty tytan jest w rzeczywistości stopem tytanu z tlenem. Ponieważ dopuszczalna maksymalna zwartość tlenu w tytanie nie przekracza 0,5%, rozpuszcza się on w tytanie tworząc roztwór stały α-Ti o strukturze heksagonalnej zwartej. Natomiast w strukturze stopu kobaltu Remanium 2000 w stanie lanym osnową jest roztwór stały składników stopowych w fazie

β-Co. W obrębie krystalitów występują mikrosegregacje dendrytyczne, w przestrzeniach międzydendrytycznych i wzdłuż granic krystalitów rozmieszczone są wydzielania pierwotne o charakterze ciągłym.



Rys. 1. Mikrostruktura materiału podłoża: (a) czystego technicznie tytanu cp-Ti, (b) Remanium 2000

Badania wytrzymałości połączenia metal-ceramika wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 9693 [15]. Do badań jako materiał podłoża wykorzystano czysty technicznie tytan i stop Remanium 2000. Próbki tytanowe wycinano z blachy oraz z pręta na przecinarce Struers wyposażonej w stolik mikrometryczny. Zgodnie ze standardami ISO 9693 [14] (rys. 2) próbki miały postać prostopadłościennych płytek o wymiarach (25 ± 1) mm × (3 ± 0,1) mm × (0,5 ± 0,05) mm. Próbki z Remanium 2000 były odlewane w formie woskowej o wymiarach 25 mm × 3 mm × 0,7 mm zgodnie z zaleceniami producenta. Następnie odlewy szlifowano na szlifierce obrotowej, począwszy od wodnych papierów ściernych o ziarnistości 320, 400, 600 a skończywszy na 800 do uzyskania wymiarów zgodnych z normą ISO 9693.



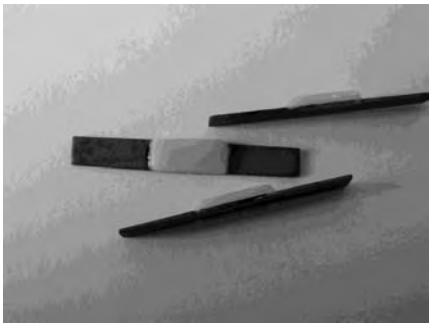
Rys. 2. Schemat trzypunktowego zginania próbek tytanowych z napalaną porcelaną wg ISO 9693 [2]

Metalowe podłoże przygotowano na dwa sposoby: (1) wg standardowych procedur stosowanych w gabinetach protetycznych czyli z zastosowaniem tradycyjnego piaskowania podłoża przed procesem napalania porcelany oraz (2) z zastosowaniem powłok przejściowych zol-żel.

Próbki poddano piaskowaniu za pomocą korundu szlachetnego Al_2O_3 o ziarnie 150 μm pod ciśnieniem 0,25 MPa przez 10 min. Powierzchnię oczyszczono w wodzie destylowanej z wykorzystaniem aparatu ultradźwiękowego i przemywano acetonem. Na próbki metalowe nałożono powłokę SiO_2–TiO_2 metodą zol-żel. Powłoki zol-żel zostały wytworzone w Katedrze Chemii Krzemianów i Związków Wielkocząsteczkowych Akademii Górniczo-Hutniczej. Zol krzemionkowo-tytanowy otrzymano przez hydrolizę propoksylowej pochodnej $Ti(C_3H_7O)_4$ i TEOS z dodatkiem HCl jako katalizatora. Końcowe stężenie TiO_2 + SiO_2 wynosiło 7,63 % wagowych.

Próbki metalowe pokrywano techniką wynurzeniową ze stałą prędkością wynoszącą 3,3 mm/s, a grubość powłoki regulowano przez stosowanie wielokrotnego wynurzania. Po nałożeniu żelu próbki suszono i wygrzewano w temp. ok. 550°C w atmosferze argonu.

Centralnie na tytanowe znormalizowane blaszki nałożono niskotopliwą porcelanę dentystyczną Triceram (firmy Dentaurum). Porcelana była nakładana warstwami według zaleceń producenta. Temperatura napalania porcelany wynosiła od 755 °C do 795 °C w zależności od nakładanej warstwy.



Rys. 3. Próbki Remanium 2000 z napaloną porcelaną Vita Keramik użyte do testów trzypunktowego zginania wg ISO 9693

Natomiast na stop Remanium 2000 (rys. 3) nakładano porcelanę wysokotopliwą Vita Keramik (f-my Vita Omega) i napalano w temperaturze 900-950 °C. Napalanie odbywało się w Pracowni Protetycznej Instytutu Stomatologii Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego w specjalnym piecu, sterowanym automatycznie, według zaleceń producenta.

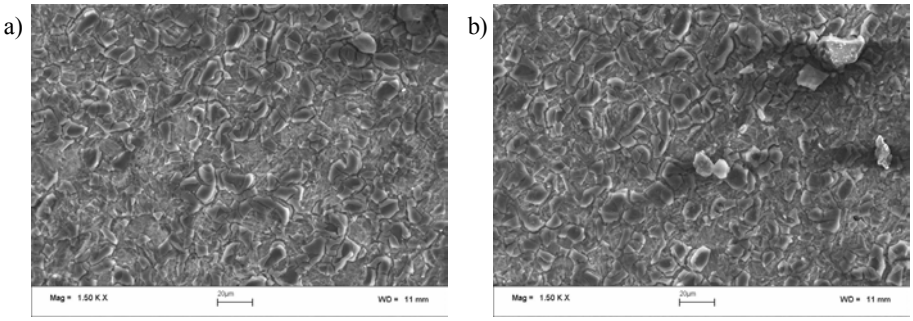
Testy przyczepności wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100. Do testów użyto po 6 sztuk próbek dla każdej kombinacji tytan-ceramika. Posuw wynosił 1,5 mm/min przy obciążeniu 0,6 N. Siła zrywająca F_{fail} była rejestrowana jako maksimum siły w „krzywej wyporności siły". Następnie w oparciu o moduł sprężystości wzdłużnej E dla tytanu i stopu kobaltu odczytywano z krzywych $k=f(d_M)$ (gdzie d_M grubość płytki metalowej) wartość k i obliczano przyczepność porcelany zgodnie z normą PN-EN ISO 9693. Wytrzymałość połączenia (τ_b) określono z zależności [15]:

$$\tau_b = k \cdot F_{fail} \quad (1)$$

gdzie: k jest współczynnikiem zależnym od grubości metalu bazowego i modułu Younga, a F_{fail} jest siłą powodującą utratę połączenia metal-ceramika.

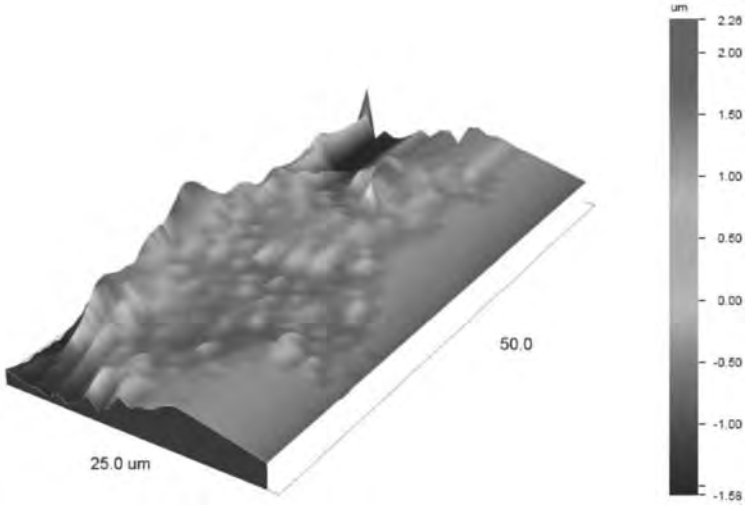
2. Rezultaty i dyskusja

Mikrostrukturę powłok SiO_2-TiO_2 wytworzonych metodą zol-żel na czystym technicznie tytanie cp-Ti i stopie Remanium przedstawiono na rys. 4. Analizę mikrostruktury powłok zol-żel przeprowadzono na mikroskopie skaningowym LEO 1430VP z EDX – Roententec.



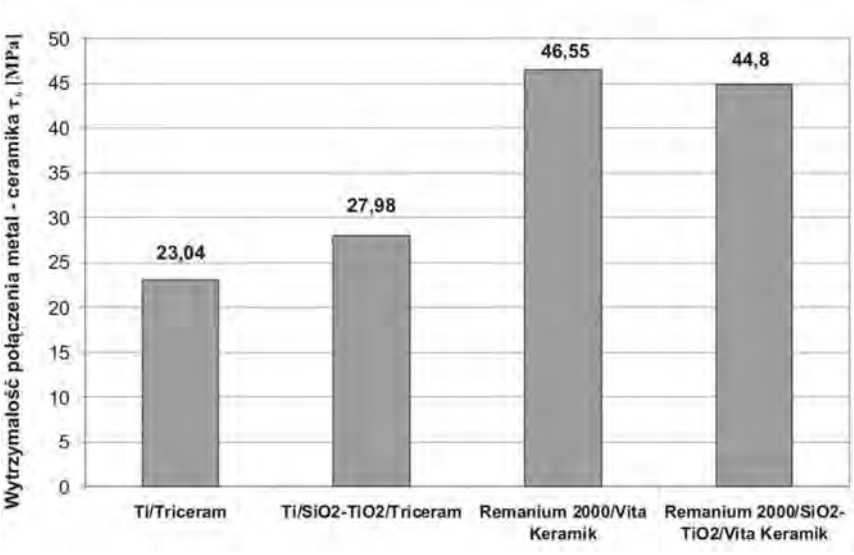
Rys. 4. Morfologia powłoki SiO_2-TiO_2 na podłożu: (a) cp-Ti, (b)Remanium 2000

Struktura powłok SiO_2-TiO_2 jest zwarta, bez widocznych nieciągłości strukturalnych. Powłoka SiO_2-TiO_2 charakteryzuje się korzystną strukturą kompozytową warstwy składającą się z cząsteczek SiO_2 w osnowie TiO_2. Nakładana powłoka zol-żel posiada znaczną chropowatość, większą niż powierzchnia po tradycyjnym piaskowaniu. Zmierzone na profilometrze stykowym Dektak 150 (firmy Veeco) średnie arytmetyczne odchylenie R_a profilu od linii średniej powłok SiO_2–TiO_2 wyniosło 0,82119 μm. Obraz powierzchni otrzymanej w wyniku przeskanowania 3D powłoki zol-żel przedstawiono na rys. 5. Grubość wytworzonych powłok zol-żel wynosi około 3-5 μm.



Rys. 5. Powierzchnia 3D profilu chropowatości powłoki SiO_2-TiO_2

Wyniki badań przyczepności porcelany dentystycznej przedstawiono w tabeli 1 oraz na rys. 6. Według normy PN-EN ISO 9693 [15] porcelana dentystyczna napalana na metalowe podłoże podczas zginania trzypunktowego powinna wytrzymać minimum 25 MPa. Z analizy otrzymanych wyników (tab. 1), porcelana napalana na podłoże tytanowe z zastosowaniem tradycyjnego piaskowania nie osiąga wartości 25 MPa lub oscyluje w pobliżu tej wartości. Zastosowanie powłoki przejściowej SiO_2-TiO_2 powoduje wzrost przyczepności porcelany o 25,17% w stosunku do podłoża, przy którym zastosowano piaskowanie przed procesem napalania. Taki układ połączenia tytan-ceramika wytrzymuje wówczas naprężenia zginające znacznie większe niż wymagana wartość 25 MPa. Powierzchnia o dużej nierówności powłoki SiO_2-TiO_2 powoduje, że porcelana wnika w drobne nierówności powierzchni tworząc mikroszczepienia, które sprzyjają uzyskaniu wyższej trwałości połączenia układu metal-ceramika. Według badań Michalika i in. [12] warstwy nanoszone metodą zol-żel na powierzchnię tytanu są powłokami o charakterze dyfuzyjnym, co tłumaczyłoby ich dobrą przyczepność do tytanowego podłoża. Dyfuzyjny charakter połączenia potwierdziły również badania autorów publikacji [10, 13].



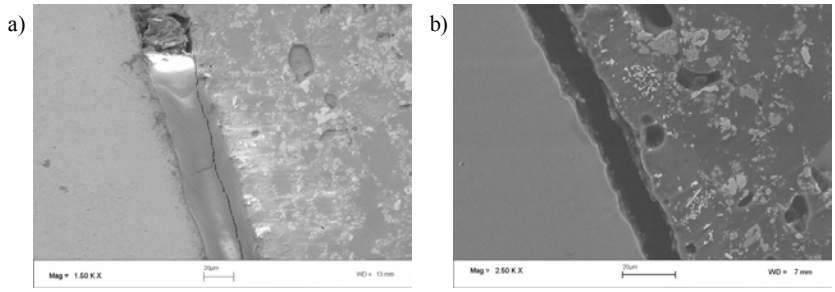
Rys. 6. Histogram średnich wielkości wytrzymałości połączenia badanych materiałów

Tabela 1. Wyniki badań przyczepności pomiędzy metalowy podłożem a porcelaną po badaniach trzypunktowego zginania

Materiał	Wytrzymałość połączenia τ_b [MPa]	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Ti/Triceram	23,04	1,78
Ti/SiO_2-TiO_2/Triceram	28,84	1,17
Remanium 2000/Vita Keramik	46,55	5,48
Remanium 2000/SiO_2-TiO_2/Vita Keramik	44,80	3,32

Podczas testów przyczepności porcelana z próbek bez powłok zol-żel odrywała się niemal natychmiast po uzyskaniu maksymalnej siły gnącej (siły przy której rejestrowano pękanie porcelany). Natomiast w przypadku próbek tytanu z powłokami zol-żel, można było zauważyć jeszcze „trzymanie się" porcelany do materiału podłoża nawet po znacznym przekroczeniu maksymalnej siły gnącej.

Z analizy otrzymanych wyników dla stopu Remanium 2000 wynika (tab.1 oraz rys. 6), że porcelana napalana na podłoże metalowe z zastosowaniem warstwy zol-żel jak i bez warstwy osiąga znacznie większą wartości niż wymagana minimalna 25 MPa. Zastosowanie powłoki przejściowej zol-żel w przypadku stopów CoCrMoW nie podwyższa wytrzymałości połączenia metal-porcelana, a otrzymane wyniki są zbliżone do rezultatów uzyskiwanych z zastosowaniem tradycyjnych technik przygotowania i napalania dentystycznych koron. Nieco niższe wyniki otrzymane dla próbek z powłoką SiO_2–TiO_2, są wynikiem licznych spękań powłoki zol-żel powstających podczas wysokiej temperatury (900÷950°C) stosowanej do napalania wysokotopliwej porcelany. Pęknięcia te są zbyt głębokie i powodują utratę przyczepności ceramiki do metalowego podłoża.



Rys. 7. Mikrostruktura SEM przekrojów poprzecznych układu podłoże metalowe-pośrednia powłoka-porcelana po trzypunktowym zginaniu: (a) Ti/ SiO_2–TiO_2/Triceram oraz (b) Remanium 2000/ SiO_2–TiO_2/ Vita Keramik

Z analizy SEM próbek tytanu po testach przyczepności (rys. 7a), można zauważyć, że pęknięcie występowało na granicy powłoka zol-żel – porcelana oraz w strefie opakera (masa podstawowa porcelany). Taki charakter pękania świadczy o dobrym przyleganiu warstwy zol-żel do tytanowego podłoża. Badania przyczepności wskazują na uzyskanie połączenia tytan-warstwa przejściowa-porcelana o dobrych właściwościach adhezyjnych.

W przypadku próbek z Remanium 2000 (rys. 7b) pęknięcia występują na granicy metal-warstwa zol-żel. Zastosowanie wyższej temperatury napalania porcelany w przypadku stopu kobaltowego powoduje większe spękanie fazy szklistej SiO_2. Stąd rezultaty nie są tak zadawalające jak ma to miejsce w przypadku próbek z podłożem tytanowym.

3. Wnioski

W oparciu o wyniki badań własnych i przeprowadzoną dyskusję można sformułować następujące wnioski:

1. Metoda zol-żel i technika wynurzania stanowią właściwy sposób nakładania cienkich amorficznych lub niskokrystalicznych, przyczepnych powłok bioceramicznych na dentystycznych wyrobach tytanowych.
2. Odpowiednio dobrana do rodzaju podłoża metalowego powłoka w czasie kontrolowanej obróbki termicznej jest zdolna do reakcji chemicznej z metalem bazowym i z porcelaną dentystyczną, co zwiększa adhezję całej warstwy ceramicznej do podłoża metalicznego i jej wytrzymałość mechaniczną.
3. Badania mikrostrukturalne powłok zol-żel wykazały, że struktura powłok SiO_2-TiO_2 jest zwarta, bez widocznych nieciągłości strukturalnych o stosunkowo niskiej grubości (rzędu 3÷5 μm).
4. Zastosowanie powłok przejściowych SiO_2-TiO_2 pomiędzy metalem bazowym: tytanem a porcelaną dentystyczną powoduje wzrost wytrzymałości połączenia o 25,17% w porównaniu do metalu bazowego poddanego jedynie konwencjonalnej obróbce-piaskowania. Natomiast w przypadku stopu kobaltowego Remanium 2000, zastosowanie powłok SiO_2-TiO_2 nie powoduje wzrostu przyczepności układu metal-ceramika ze względu na zbyt wysoką temperaturę podczas procesu napalania wysokotopliwej porcelany. Wytrzymałość połączenia układu Remanium 2000/Vita Keramik otrzymanego przy użyciu konwencjonalnej obróbki piaskowania w zupełności spełnia kryterium wytrzymałości wg normy ISO 9693.

Literatura

1. Adachi M., Mackert J.R, Parry E.E., Fairhurst C.W.: Oxide adherence and porcelain bonding to titanium and Ti-6Al-4V alloy. Journal of Prosthetic Dentistry, Vol. 69, No. 6, 1990, pp. 1230-1235.
2. Bieniaś J., Surowska B., Stoch A., Matraszek H., Walczak M.; The influence of SiO_2 and SiO_2-TiO_2 intermediate coatings on bond strength of titanium and Ti6Al4V alloy to dental porcelain. Dental Materials; 2009, 25, pp. 1128-1135.
3. Coeffy J., Anusavice K.J., DeHoff P.H., Lee R.B, Hojjatie B.: Influence of contraction mismatch and cooling on flexural failure of PFM system. Journal of Dental Research, Vol. 67, 1988, pp 61-65.
4. Craig R.G. [ed]: Restorative dental materials, 9th ed. St. Louis. Mosby-Year Book, 1993, p. 492.
5. Craig R.G.: Restorative dental materials. 11th ed St. Louis. Mosby, 1993.
6. Craig R.G., Powers J.M., Wataha J.C., pod red. Limanowskiej-Shaw H.: Materiały stomatologiczne. Wyd. Medyczne Urban & Partner, Wrocław 2000.
7. DeHoff P.H., Anusavice K.J.: Viscoelastic stress analysis of thermally compatible and incompatible metal-ceramic system. Dental Materials, Vol. 14, 1998, pp. 237-245.
8. Joias R.M. et al.: Shear Bond strength of a ceramic to Co-Cr alloys. The Journal of Prothetics Dentistry, 99, 2008, pp. 54-59.
9. Lautenschlager E.P, Monaghan P.: Titanium and titanium alloys as dental materials, International Dental Journal, 43, 1993, pp. 245-253.

10. Matraszek H., Stoch A., Brożek A., Długoń E., Paluszkiewicz Cz.: Wykorzystanie metody zol-żel do wzmocnienia w technice dentystycznej i implantoprotetyce. Implantoprotetyka, Nr 4, 2003, 2-5.
11. Matraszek H., Stoch A., Paluszkiewicz Cz., Brożek A., Długoń E.: Zastosowanie metody zol-żel w praktyce dentystycznej. Inżynieria Biomateriałów, Nr 23-25, 2002, s. 72-74.
12. Michalik R.: Łaskawiec J., Klisch M.: Powłoki ochronne wytwarzane metodą zol-żel na implantach. Inżynieria Materiałowa, Nr 5, 2002, s. 372-375.
13. Paluszkiewicz Cz., Stoch A.: FT-IR microscopic imaging of metal-ceramics joint. Vibrational Spectroscopy, Vol. 35, 2004, pp. 183-187.
14. Pang I.-Ch., Gilbert J.L., Chai J., Lautenschlager E.P.: Bonding characteristics of low-fusing porcelain bonded to pure titanium and palladium-copper alloy. Journal of Prosthetic Dentistry, Vol. 73, No. 1, 1995, pp. 17-25.
15. PN-EN ISO 9693:2002: Ceramika dentystyczna do napalania na metalowe materiały. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002, Metal-ceramic dental restorative systems, 2nd ed. Switzerland, International Organization for Standardization, ISO 9693:1999.
16. Setz J., Schwickerath H.: Aspekty materiałoznawstwa, w: Koecka B. i in.: Protetyka stomatologiczna. Korony i mosty, tłumaczenie Maślanka T.: Wydawnictwo Medyczne Urban&Partner Wrocław 2000.
17. Surowska B., Bieniaś J., Walczak M., Sangwal K., Stoch A.: Microstructure and mechanical properties of ceramic coatings on Ti and Ti –based alloy. Applied Surface Science, 238, 2004, pp. 288-294.
18. Tsetsekou A., Papadopoulos T., Adamopoulos O.: Microstructure effect on the properties of a commercial low-fusing dental porcelain. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Vol. 13, No. 4, 2002, pp. 407-416.
19. Walter M., Böning K., Reppel P.: Clinical Performance of machined titanium restorations. Journal of Dentistry, 22, 1994, p.346.
20. Zinelis S., Tsetekou A., Papadopoulos T.: Thermal expansion and microstructural analysis of experimental metal-ceramic titanium alloys. Journal of Prosthetic Dentistry, 90, 2003, pp. 332-338.

APPLICATTION OF THE SIO_2-TIO_2 COATINGS IN DENTAL PROSTHETICS

Summary. The bond strength by three-point bending (according to PN-EN ISO 9693) of four combinations Ti /Triceram, Ti/SiO_2-TiO_2/Triceram, Remanium 2000/Vita Keramik and Remanium 2000/ SiO_2-TiO_2/Vita Keramik was evaluated. Coatings SiO_2-TiO_2 on base titanium and cobalt alloy were deposited using sol-gel method. The results showed that the bond strength of Ti/SiO_2-TiO_2/Triceram and Ti/SiO_2/Triceram in control group was significantly higher than the Ti/Triceram without intermediate layers sol-gel. Application of SiO_2-TiO_2 intermediate sol-gel coating on CoCrMoW alloy doesn't increase bond strength of metal-porcelain, and the results obtained are similar to the commercial techniques. The purposefulness of the application of the intermediate ceramic layer on base titanium was been confirmed.

Key words: dental porcelain, metal-ceramic bonding, three-point bond test, sol-gel coatings

Mariusz Walczak*, Łukasz Różycki

ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ W TWARDYCH TKANKACH ZĘBÓW NA PRZYKŁADZIE DOLNEGO SIEKACZA Z WYKORZYSTANIEM METODY MES

Streszczenie. Do analizy stanu naprężeń i odkształceń w przypadku złożonych układów mechanicznych często stosowana jest metoda elementów skończonych (MES). Metoda ta jest powszechnie wykorzystywana w procesie projektowania w dziedzinie mechaniki i inżynierii, a także w medycynie i stomatologii. Celem tej pracy było opracowanie dla twardych tkanek zęba modelu numerycznego. Utworzono trójwymiarowy model dolnego siekacza przy wykorzystaniu oprogramowania do wspomagania projektowania – CATIA V5. Obliczenia wytrzymałościowe wykonano w programie ABAQUS. Do wykonania całego modelu użyto elementów czworościennych C3D4.

Słowa kluczowe: dolny siekacz, twarde tkanki zębów, analiza naprężeń, metoda elementów skończonych

Wprowadzenie

Metoda elementów skończonych jest stosowana do analizy stanu naprężeń w wielu skomplikowanych układach mechanicznych. Za pomocą metody MES można badać wytrzymałość konstrukcji, dynamikę, kinematykę i statykę, symulację odkształceń, naprężeń, przemieszczenia, a także przepływy cieczy i ciepła. Od wielu lat jest ona powszechnie stosowana w wielu dziedzinach techniki, a także w medycynie i bioinżynierii [4, 5]. W stomatologii stosowana jest do analizy zjawisk związanych z patologią narządu żucia i leczeniem [6]. Ponadto stwarza ona szerokie pole do badań symulacyjnych na modelach fizycznych i numerycznych, stanowiących alternatywę lub uzupełnienie prac wstępnych prowadzonych in vitro lub in vivo [2].

Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy numerycznej twardych tkanek zębów pozwala lepiej poznać rozkład naprężeń oraz odkształceń powstających pod wpływem obciążeń panujących w jamie ustnej człowieka [4]. Znajomość sił wywieranych na zęby i występujących przez to naprężeń pozwala zminimalizować negatywne skutki podczas rekonstrukcji uzębienia aparatami protetycznymi. Poprawna ocena zdolności do przenoszenia obciążeń przez tkankę kostną stanowi jeden z zasadniczych czynników determinujących powodzenie przy leczeniu braków zębowych z wykorzystaniem np. implantoprotez [2]. Z punktu biomechaniki wielkość sił, wyzwalanych przez mięśnie przywodzące żuchwę, jest zależna od stopnia zmęczenia i siły napięcia mięśni podczas trwania skurczu, a także ich napięcia spoczynkowego [4, 10].

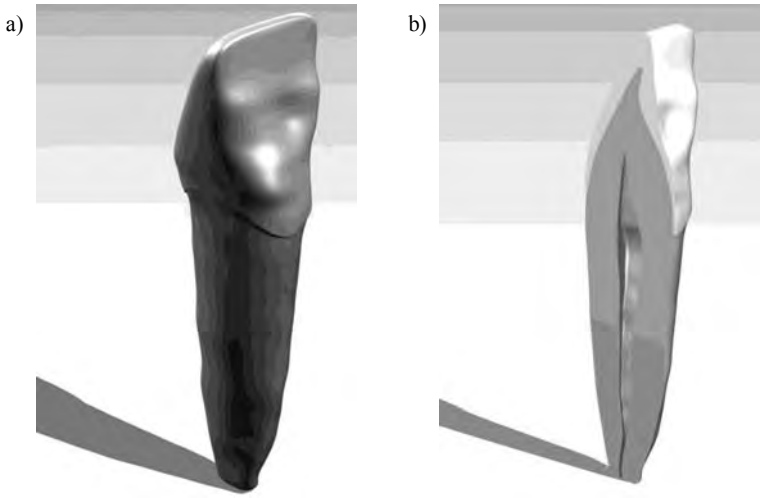
* *Katedra Inżynierii Materiałowej, Politechnika Lubelska, m.walczak@pollub.pl*

Do oceny wytężenia twardych tkanek stosowane są różne hipotezy m. in. Huberta-Misesa-Hencky'ego, Treski-Guesta, Burzyńskiego, de Saint-Venanta oraz Tsai-Wu [1, 4, 7, 9, 12]. Według analiz MES i wyników otrzymanych przez Milewskiego [9] jedynie słuszne i uzasadnione jest stosowanie hipotez Huberta-Misesa-Hencky'ego, Treski-Guesta oraz de Saint-Venanta w przypadku oceny wytężenia dla twardych tkanek zębów, jakimi są szkliwo i zębina.

Celem przedstawionej pracy jest ocena wytężenia twardych tkanek dolnego siekacza przeprowadzona wg hipotezy Huberta-Misesa-Hencky'ego z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

1. Metodyka badań

Obiekt badań stanowił dolny siekacz. Obliczenia numeryczne MES przeprowadzono dla modelu przestrzennego 3D odwzorowującego dokładną geometrię analizowanego zęba. Model geometryczny uzyskano na podstawie zdjęć przekrojów zęba [11], w oparciu o które opracowano geometrię bryłową siekacza o anatomicznych kształtach. Model geometrii bryłowej zęba opracowano w programie CATIA V5. Opracowany model geometryczny siekacza przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Model 3-D twardych tkanek siekacza: (a) widok całego modelu, (b) przekrój poprzeczny

Stworzenie modelu twardych struktur zęba sprowadzało się do wykonania geometrii dla miazgi, zębiny oraz szkliwa. Należy tutaj zwrócić uwagę, iż miazga nie jest tkanką twardą, a zamodelowanie jej ma posłużyć jako kanał miazgowy – tj. pusta przestrzeń w zębinie.

W celu przeprowadzenia analizy numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych na podstawie modelu geometrycznego 3D siekacza opracowano model dyskretny. Analizę naprężeń w tkankach twardych zamodelowanego zęba przeprowadzono w środowisku ABAQUS w wersji 6.9.

Dla opracowanego modelu, pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcji (szkliwem i zębiną) zastosowano interakcje typu *Tie*. Interakcja *Tie* nadaje wiązanie tzw. „zszycie" ze sobą siatek elementów skończonych wewnętrznej powierzchni szkliwa z zewnętrzną częścią korony zębiny w celu zapewnienia sztywnego przenoszenia dostępnych stopni swobody.

Kolejnym etapem była definicja warunków brzegowych i obciążenia. Nadanie warunków brzegowych opierało się na odebraniu odpowiednich stopni swobody badanego ciała poprzez utwierdzenie węzłów znajdujących się na zewnętrznej powierzchni zębiny (rys. 2).

Według danych z pozycji literaturowej [3] przeciętne siły zgryzowe kształtują się od 180 do 580 N, zwiększając się od siekaczy w kierunku zębów trzonowych. Wzorując się na badaniach prowadzonych przez Milewskiego [9] przyjęto do analizy siłę 500N. Przyłożono ją w linii siecznej zęba, gdzie stykają się ząb dolny z górnym, w celu odwzorowania symulacji dla zgryzu prostego (zwanego też często obcęgowym).

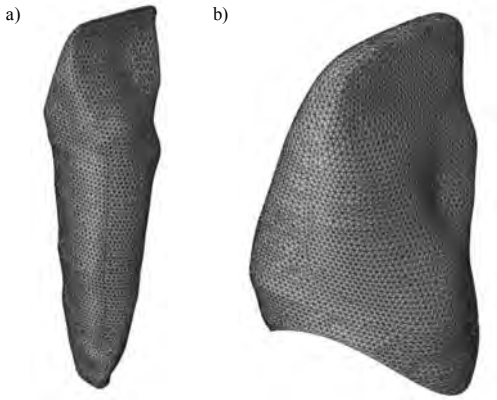
Ważnym etapem przy użyciu preprocesora jest dyskretyzacja układu czyli podział na elementy skończone. Jest to również jedna z ważniejszych, o ile nie najważniejsza czynność tworzenia zadania w metodzie elementów skończonych.

Rys. 2. Warunki brzegowe oraz rozkład obciążenia zastosowany do modelu zęba

Wyniki analizy w dużym stopniu zależą od doboru odpowiednich elementów oraz gęstości siatki. Jeżeli chodzi o wybór elementów skończonych, mamy do dyspozycji podstawowe główne elementy takie jak:

- *Hex* – elementy sześcienne,
- *Tet* – elementy czterościenne,
- *Wedge* – graniastosłupy o podstawie trójkąta.

W przypadku tak skomplikowanej geometrii, jaką niewątpliwie reprezentuje ludzki ząb, zastosowano elementy *Tet* pierwszego rzędu, świetnie nadające się do takich przypadków. Do dyskretyzacji tkanek twardych zęba wybrano elementy typu C3D4 (4-węzłowe elementy objętościowe z liniową funkcją kształtu, posiadające po 3 stopnie swobody w każdym węźle). Na rys. 3 przedstawiono dyskretne modele struktury zębiny i szkliwa. Model zębiny składa się z 226 837 węzłów, natomiast szkliwa z 44 080.



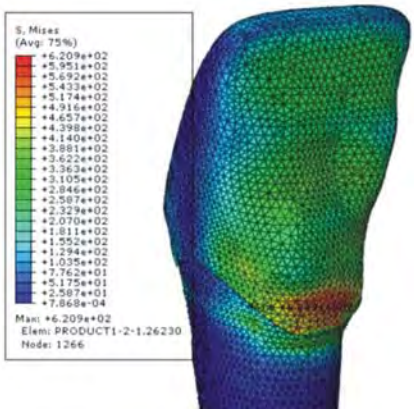
Rys. 3. Widok siatki: (a) zębiny, (b) szkliwa

Właściwości mechaniczne struktur zęba (o charakterystyce liniowo-sprężystej) zdefiniowano na podstawie poz. [9]:

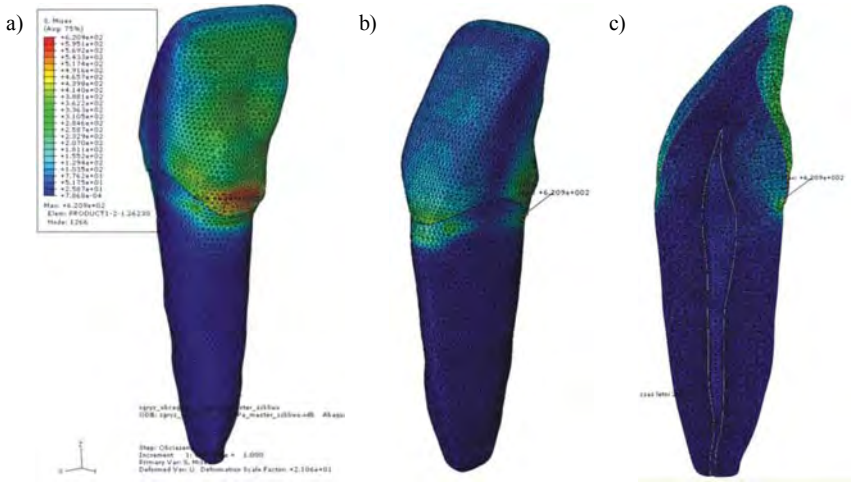
– szkliwo: moduł Younga E = 84 100 MPa, liczba Poissona ν = 0.33,
– zębina: moduł Younga E = 18 600 MPa, liczba Poissona ν = 0.31.

2. Wizualizacja wyników analizy MES

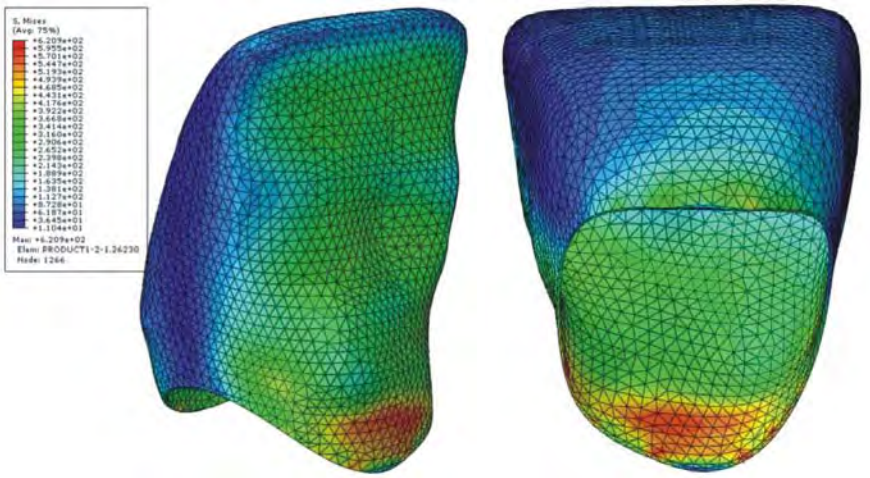
Otrzymane wyniki analizy MES pozwalają na dokonanie oceny stopnia wytężenia twardych tkanek zębów dolnego siekacza pod działaniem obciążenia 500 N. Analizie poddano rozkłady naprężenia zredukowanego wyznaczonego na podstawie hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Hencky'ego (*H-M-H*) dla poszczególnych elementów składowych struktury zęba. Wyniki zaprezentowano na rys. 4-8 w formie kolorowych zrzutów ekranowych reprezentujących rozkład naprężeń zredukowanych dla poszczególnych struktur jak i całego modelu.



Rys. 4. Rozkład naprężenia von Mises'a w modelu korony zęba



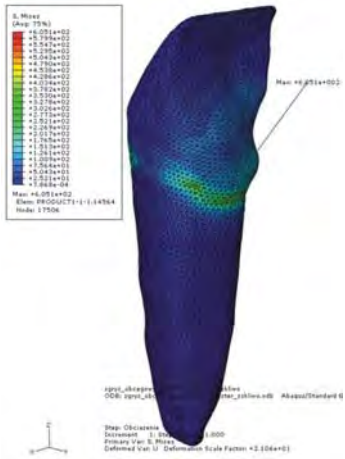
Rys. 5. Rozkład naprężenia zredukowanego w całym modelu: (a) strona dystalna, (b) strona mezjalna, (c) przekrój poprzeczny



Rys. 6. Naprężenia zredukowane w szkliwie

Z przeprowadzonej analizy wynika, że maksymalne wartości naprężenia zredukowanego H-M-H dla całego modelu wyniosły 620 MPa, a rozkład największych naprężeń obserwowany był w okolicach szyjki zęba, w strukturze szkliwa. Miejsce to jest newralgiczne ze względu na swoje położenie, gdzie występuje przejście struktur u podnóża korony zęba. W miejscu tym szkliwo na swojej granicy ma najmniejszy przekrój poprzeczny. Milewski [9] przeprowadzając badania doświadczalne zniszczenia koron siekaczy zauważył dwa dominujące typowe rodzaje złomów zniszczeniowych koron. Pierwszy dominujący przypadek to złom przebiegający skośnie przez koronę zęba od kontaktu zgryzowego do podstawy tej korony po stronie wargowej. Natomiast drugi rodzaj złomu to złamanie korony zęba u pod-

stawy, czyli przypadek potwierdzający sytuacje, w której otrzymaliśmy największe zredukowane naprężenia (rys. 4 i 5). Na linii siecznej szkliwa (w miejscu przyłożenia obciążenia) naprężenia sięgają 112 MPa. Analizując rozkład naprężenia zredukowanego w modelu zębiny (rys. 7.) można zauważyć, że maksymalne naprężenie wynosi 605 MPa i związane jest ściśle z geometrią modelu zębiny. Mamy w tym miejscu do czynienia z nagłym zejściem „guzka", czyli zmianą przekroju poprzecznego, gdzie obserwowany jest efekt oddziaływania mikrokarbów. W obszarze tym zanotowano największe odkształcenia rzędu 0,03 mm (kolor jasny szary – rys. 8). Pozycje literaturowe [4, 8] wskazują, że szczególnie narażony na szkodliwe działanie sił jest właśnie obszar szyjki zęba. Dlatego też, długotrwale utrzymujące się lub powtarzające działanie naprężeń rozciągających w tym obszarze może prowadzić ostatecznie do odłamywania się pryzmatów szkliwa i tworzenia ubytków o charakterystycznym kształcie klina i gładkich powierzchniach [4, 8].



Rys. 7. Rozkład naprężenia w zębinie

Rys. 8. Rozkład odkształceń w całym modelu siekacza

W pozostałych obszarach siekacza gradienty naprężenia zredukowanego osiągają średnie wartości: $\sigma_z = 36 \div 61$ MPa (rys. 6) dla materiału szkliwa i $\sigma_z = 25$ MPa dla zębiny (rys. 7).

3. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie metody elementów skończonych do budowy i analizy modeli numerycznych ułatwia opis pól naprężeń i odkształceń w twardych tkankach zęba w różnych sytuacjach klinicznych. Metoda elementów skończonych umożliwia realną ocenę wytężenia twardych tkanek zębów i może pozwolić na opracowanie bardziej racjonalnych metod zapobiegania uszkodzeniom zębów powstałym pod wpływem sił zgryzowych.

Maksymalne wartości naprężenia zredukowanego H-M-H dla siekacza dolnego wyniosły 620 MPa i występowały w strukturze szkliwa w miejscach o najmniejszym polu przekroju w okolicy „guzka". Ogólny poziom naprężenia zredukowanego w materiale szkliwa wynosił średnio $\sigma_z = 20 \div 33$ [MPa] i zębiny $\sigma_z = 25$ MPa.

W rzeczywistości w dużej mierze na rezultaty występujących naprężeń ma wpływ anatomiczny kształt zębów, kształt łuku zębodołowego, wzajemne położenia zębów, budowa twarzy, a także indywidualne ruchy żuchwy wykonywane podczas codziennych fizjologicznych czynności.

Literatura

1. Ausiello P., Apicella A., Davidson C.L., Rengo S.: 3D – finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites. Journal of Biomechanics 2001, 34, pp. 1269-1277.
2. Chladek W.: Biomechanika inżynierska narządu żucia. Zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
3. Craig R.G., Powers J.M., Wataha J.C., pod red. Limanowskiej-Shaw H.: Materiały stomatologiczne. Wyd. Medyczne Urban & Partner, Wrocław 2000.
4. Dobosz A., Panek H., Dobosz K.: Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy naprężeń w twardych tkankach zębów. Dent. Med. Probl. 2005, 42, s.651-655.
5. Dobosz A., Panek H., Napadłek P.: Zastosowanie analizy numerycznej do oceny naprężeń w twardych tkankach zębów odbudowanych wybranymi rodzajami protez stałych. Dent. Med. Probl. 2005, 42, s.657-662.
6. Grzebieluch W., Ścigała K., Będziński R., Kaczmarek U.: Wstępna analiza numeryczna i doświadczalna rozkładu naprężeń w koronie zęba przedtrzonowego. Czas. Stomat. 2005, 7, s.473-479.
7. John A.: Hipotezy wytężeniowe w numerycznej analizie kości miednicy człowieka. Acta of Bioengineering and Biomechanics, 1999, 1, s. 215-218.
8. Lee W. C., Eakle W. S.: Stress−induced cervical lesion: Review of advances in the past 10 years. J. Prosthet. Dent. 1996, 75, pp. 487–494.

9. Milewski G. Wytrzymałościowe aspekty interakcji biomechanicznej tkanka twarda – implant w stomatologii. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. seria Mechanika nr 89, Kraków 2002.
10. Pichut M.: Czynniki wpływające na siły zgryzowe generowane w układzie stomatognatycznym. Porad. Stomat., 2003, 9, s. 20-23.
11. Różycki Ł.: Analiza naprężeń w twardych tkankach zębów przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Praca magisterska, Politechnika Lubelska, Lublin 2010.
12. Sorrentino R., Aversa R., Ferro V., Auriemma T., Zarone F., Ferrari M., Apicella A.: Three-dimensional finite element analysis of strain and stress distributions in endodontically treated maxillary central incisors restored with diferent post, core and crown materials. Dental Materials 2007, 23, pp. 983-993.

ANALYSIS OF STATE STRESSES IN HARD TISSUES OF TEETH ON EXAMPLE OF LOWER INCISOR BY USING FEM METHOD

Summary. The finite element method (FEM) is often used in complex mechanical systems in order to analyse stress and strain distribution. This method is commonly used in the process of designing in mechanics and engineering as well as in medicine and dentistry. The aim of this study is to create a finite element model of the hard tissues of tooth. Three-dimensional model of lower incisor was made by means of Computer Aided Design software – CATIA V5. The software ABAQUS was used as the calculator in the simulation. Tetrahedral elements C3D4 were used for the entire model.

Key words: lower incisor, hard tissues of teeth, stress analysis, finite element method

Łukasz Wojciechowski*

TRIBOLOGICZNY ASPEKT ANALIZY SKŁADOWYCH STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY WIERZCHNIEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono tribologiczny punkt widzenia na zmiany stanu energetycznego zachodzące w warstwie wierzchniej. Zmiany stanu energetycznego wywoływano mechanicznie stosując obróbkę nagniataniem naporowym stali 42CrMo4 z różnymi siłami docisku narzędzi. Stan energetyczny badano w oparciu o wyznaczanie wartości swobodnej energii powierzchniowej obliczanej metodami: dyspersyjno-polarną i kwasowo-zasadową. Dla obu metod stwierdzono wzrost swobodnej energii powierzchniowej w zależności od siły nagniatania. Otrzymane wyniki badań (wraz ze składowymi charakterystycznymi dla obliczeń swobodnej energii powierzchniowej) poddano dyskusji w kontekście odporności na zacieranie adhezyjne i współpracy warstwy wierzchniej z substancją smarującą.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, stan energetyczny, swobodna energia powierzchniowa, adhezja

Wprowadzenie

We współczesnej tribologii coraz większą uwagę zwraca się na energetyczne aspekty konstytuowania warstwy wierzchniej, w których to upatruje się źródła implikacji niektórych zjawisk oraz procesów (np. zacierania adhezyjnego). Pojęcie stanu energetycznego warstwy wierzchniej przedstawić można jako ilościową charakterystykę jej potencjału termodynamicznego, będącego efektem poziomu energii jaki zmagazynowany został w elementarnych składnikach jej struktury (atomach, cząsteczkach i łączących je wiązaniach) oraz wynikającego z ukształtowania jej sieci krystalicznej [11]. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest poszukiwanie optymalnego parametru charakteryzującego stan energetyczny warstwy wierzchniej, którego obserwacje i pomiary umożliwiłyby sterowanie własnościami tej warstwy pod kątem jej odporności na zużywanie. Wydaje się, że parametrem, który obecnie najlepiej nadaje się do tego celu jest swobodna energia powierzchniowa. Wielkość ta określana jest co prawda bezpośrednio na powierzchni ciała stałego, ale jej wartość wynika m. in. ze struktury elektronowej warstwy wierzchniej – co pozwala na obserwację zmian jej stanu energetycznego.

Problematyka wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej ciała stałego (zwłaszcza stopów metali) uznawana jest za stosunkowo trudny obszar fizykochemii powierzchni. Pomimo tego opracowano co najmniej kilka metod eksperymentalno-obliczeniowych pozwalających na określenie wartości swobodnej energii powierzchniowej ciała stałego. Duża część spośród tych metod ma swoje źródło w metalurgii, gdzie zagadnienie wyznaczania

* *Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, lukasz.wojciechowski@put.poznan.pl*

swobodnej energii powierzchniowej metali wiązane jest ściśle z ich napięciem powierzchniowym w stanie ciekłym. Literatura przedmiotu (np. B.C. Allen [1]) podaje, że napięcie powierzchniowe metali w stanie ciekłym jest zależne od temperatury, przy czym zależność ta dla większości metali ma charakter liniowy (w obszarze pomiędzy temperaturą topnienia a temperaturą parowania). Zależność ta odwzorowana została w tzw. równaniu Gibbsa-Helmholtza, którego postać przedstawia się następująco:

$$\gamma_S = \gamma_m + \frac{d\gamma}{dT}(T - T_m) \tag{1}$$

gdzie: γ_S – napięcie powierzchniowe (swobodna energia powierzchniowa) [mJ/m^2] w temperaturze T [K], γ – napięcie powierzchniowe [mJ/m^2] w temperaturze topnienia (T_m) [K], $d\gamma/dT$ – współczynnik temperaturowy (dla metali zawsze ujemny).

W swojej pracy [8] J. Lyklema udowadnia prawdziwość równania (1) również dla temperatur niższych niż temperatura topnienia. Zgodnie zatem z takim założeniem, na podstawie zależności (1) można obliczyć także swobodną energię powierzchniową (ponieważ dla ciał stałych odpowiada ona napięciu powierzchniowemu cieczy). Niestety dużym ograniczeniem tej metody jest fakt, że wartości współczynnika temperaturowego znane są głównie dla pierwiastków metalicznych a nie dla stopów, co znacznie ogranicza jej stosowalność w przypadku materiałów konstrukcyjnych. Znane są badania (ich analizę przedstawiono w pracy [9]) poświęcone wpływowi różnych dodatków do metali (np. węgla lub tlenu do żelaza) na ich napięcie powierzchniowe – jest to jednak niewielka skala oddziaływań w stosunku do tych jakie zachodzą w stopach typu stale, żeliwa itp. Ponadto w metalurgii spotyka się także inne metody określania energii powierzchniowej na podstawie właściwości materiałowych (np. modułu Younga, twardości, modułu Kirchoffa), jednakże wszystkie spośród nich charakteryzują pewne ograniczenia. Jednym z nich jest stosowalność przede wszystkim do pierwiastków metalicznych a nie stopów. Ograniczanie to jest dość istotne w budowie maszyn, w której materiałami konstrukcyjnymi są różnego rodzaju stopy. Inne ograniczenie może dotyczyć konieczności stosowania bardzo wysokich temperatur (nawet temperatury topnienia – jak w metodzie Allena powyżej). W konsekwencji, większość zmian jakie wprowadzane są do warstwy wierzchniej przez metody obróbkowe jest niwelowana. Nie można zatem zidentyfikować ich wpływu na stan energetyczny warstwy wierzchniej.

Wymienione ograniczenia można wyeliminować stosując inną, najpowszechniejszą metodę wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej opartą o badania zwilżalności analizowanych powierzchni. W przypadku, kiedy na powierzchni ciała stałego tworzy się kropla cieczy, należy uznać, że jej zwilżanie jest niecałkowite. Tendencja do zwilżalności ciała stałego przez ciecz związana jest przede wszystkim z pracą adhezji i pracą kohezji. Pierwsza z wymienionych wielkości charakteryzuje pracę konieczną do oderwania cieczy od jednostkowej powierzchni ciała stałego z równoczesnym utworzeniem dwóch nowych powierzchni o tej samej wielkości: powierzchni ciecz-gaz i ciało stałe-gaz.

Pracę adhezji W_a można przedstawić jako:

$$W_a = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} \tag{2}$$

gdzie: γ_S – napięcie powierzchniowe ciała stałego (czyli swobodna energia powierzchniowa) [mJ/m^2], γ_L – napięcie powierzchniowe cieczy [mJ/m^2], γ_{SL} – napięcie międzyfazowe na granicy ciała stałego i cieczy [mJ/m^2].

W przypadku, kiedy na powierzchni ciała stałego tworzy się kropla cieczy, należy uznać, że jej zwilżanie jest niecałkowite. Zjawisko to opisuje się za pomocą kąta zwilżania, wykorzystując tzw. równanie Younga:

$$\gamma_S \cos\Theta = \gamma_L - \gamma_{SL} \tag{3}$$

gdzie: Θ – kąt zwilżania.

Podstawiając równanie Younga do zależności na obliczenie pracy adhezji, otrzyma się bardziej użyteczną zależność do obliczenia tej wielkości, zwaną równaniem Younga-Dupré:

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos\Theta) \tag{4}$$

Równanie to charakteryzują duże możliwości wykorzystania praktycznego, ponieważ współczesna nauka proponuje metody stosunkowo dokładnego, doświadczalnego wyznaczania kąta zwilżania. Jeżeli do zwilżania zastosowana zostanie ciecz o znanym napięciu powierzchniowym – w dość prosty sposób wyznaczyć można pracę adhezji W_a. Oszacowanie tego parametru może mieć szczególne znaczenie dla wyjaśnienia zjawiska adhezji i czynników ją wywołujących. Jest to interesujące zwłaszcza w kontekście tarcia metali, którego konsekwencją może być implikacja procesu zużywania adhezyjnego, wraz z jego najbardziej patologiczną formą – zacierania. Ponadto, możliwość pomiaru kąta zwilżania stanowi punkt wyjścia do obliczeń analitycznych, których efektem jest ilościowe oszacowanie swobodnej energii powierzchniowej ciała stałego. Warto także zauważyć, że możliwe jest określenie nie tylko energii jako wartości całkowitej ale także jej składowych, co może stanowić asumpt do analizy powierzchni także pod kątem jej współpracy z substancjami smarującymi. Współcześnie wykorzystuje się dwa podejścia do tej problematyki: dyspersyjno-polarne oraz kwasowo-zasadowe.

Podejście dyspersyjno-polarne, nazywane także podejściem Owensa-Wendta [10] zakłada, że swobodna energia powierzchniowa stanowi sumę składowej dyspersyjnej γ_S^d oraz składowej polarnej γ_S^p, w skład której wchodzą przede wszystkim wiązania wodorowe oraz oddziaływania dipol-dipol. Wykorzystując to założenie sformułowano zależność określającą napięcie międzyfazowe na granicy ciała stałego i cieczy [7]:

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 2\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d}\,2\sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} \tag{5}$$

gdzie: γ_S^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej, γ_S^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej, γ_L^d – składowa dyspersyjna napięcia powierzchniowego cieczy, γ_L^p – składowa polarna napięcia powierzchniowego cieczy.

Porównując zależność Owensa-Wendta z równaniem Younga (3), otrzymuje się równanie o następującej postaci [7]:

$$\gamma_L(1 + \cos\Theta) = 2\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d}\,2\sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} \tag{6}$$

Wyznaczanie swobodnej energii powierzchniowej dla tej podejścia dyspersyjno-polarnego opiera się na pomiarach kąta zwilżania dla dwóch różnych cieczy na tej samej powierzchni (w praktyce są to zwykle woda oraz dijodometan).

Za bardziej dokładne chemicznego punktu widzenia uważa się podejście Van Ossa (np. w pracy [14]), w którym swobodną energię powierzchniową dzieli się na składową Lifshitza-Van der Waalsa (oznaczaną indeksem „LW" we wzorze (7)), składową kwasową (oznaczenie „A" we wzorze (7)) oraz składową zasadową (oznaczenie „B" we wzorze (7)). Uwzględniając równanie Younga i rozpisując założenia Van Ossa dla przypadku ciało stałe-ciecz otrzymuje się zależność [7]:

$$\gamma_L(1+\cos\Theta)=2\left(\gamma_L^{LW}\gamma_S^{LW}\right)^{1/2}+2\left(\gamma_L^{B}\gamma_S^{A}\right)^{1/2}+2\left(\gamma_L^{A}\gamma_S^{B}\right)^{1/2} \quad (7)$$

Do pomiarów kąta zwilżania w metodzie Van Ossa używa się trzech cieczy wzorcowych, którymi są, stosowane już w metodzie polarno-dyspersyjnej woda i dijodometan, a także dodatkowo formamid.

Podsumowując kwestię wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej metodami Owensa-Wendta oraz Van Ossa należy wyraźnie podkreślić, że metody te nie pozwalają na obliczenie jej całkowitej wartości. Możliwe jest jednak oszacowanie niektórych jej składowych, które pozwalają na analizę stanu energetycznego warstwy wierzchniej pod kątem jej współpracy z substancjami smarującymi i odporności na niektóre formy zużywania tribologicznego.

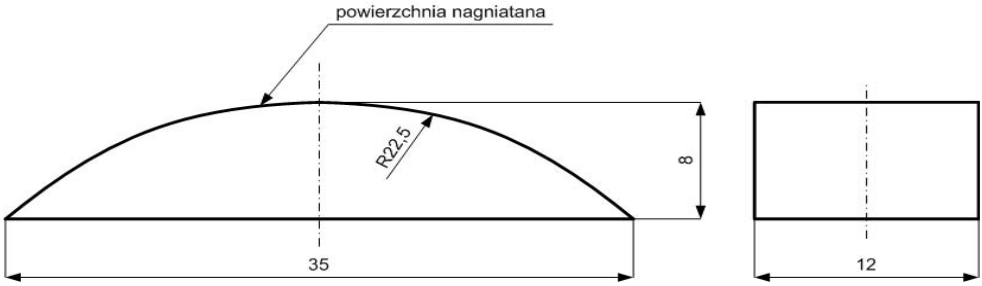
Uwzględniając przedstawione pokrótce rozważania dotyczące wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej zrealizowano cel pracy, którym była ocena stanu energetycznego warstwy wierzchniej stali 42CrMo4 po nagniataniu.

1. Metodyka badań

Próbki wykorzystane w badaniach wykonano ze stali 42CrMo4 w formie pierścieni o średnicy zewnętrznej 45 mm i szerokości 12 mm. Powierzchnie cylindryczne wszystkich próbek poddano szlifowaniu, aż do osiągnięcia na nich parametru chropowatości powierzchni Ra = ok. 0,5 μm. Następnie próbki dzielono wstępnie na sześć partii, z których każda przeznaczona była do nagniatania naporowego z inną siłą docisku. Nagniatanie prowadzono na stanowisku hydraulicznym, wyposażonym w narzędzie nagniatające w postaci dwóch symetrycznie usytuowanych rolek o średnicy 60 mm i efektywnej szerokości styku z obrabianą powierzchnią równej 18 mm. Dobór parametrów nagniatania oparto na doniesieniach literaturowych [2, 5] oraz przeprowadzonych badaniach wstępnych. Próbki nagniatano z sześcioma różnymi wartościami siły, równymi odpowiednio: 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 i 4.8 kN. Pozostałe parametry miały następujące wartości: prędkość nagniatania – 100 m/min, posuw nagniatania – 0,08 mm/obr., liczba przejść narzędzia – 2. Obróbkę prowadzono stosując smarowanie mieszaniną oleju maszynowego oraz nafty w stosunku 1:1.

Swobodną energię powierzchniową wyznaczano na podstawie pomiarów statycznego kąta zwilżania na powierzchni próbek. Do tego celu zastosowano goniometr PG3 firmy Fibro

System AB, w którym próbki umieszczano po uprzednim czyszczeniu w acetonie i suszeniu. Z uwagi na fakt ograniczonych wymiarów komory badawczej goniometru, z pierścieni nagniatanych wycinano (automatyczną przecinarką taśmową w obecności cieczy chłodząco-smarującej) próbki o wymiarach i kształcie pokazanych na rys. 1.



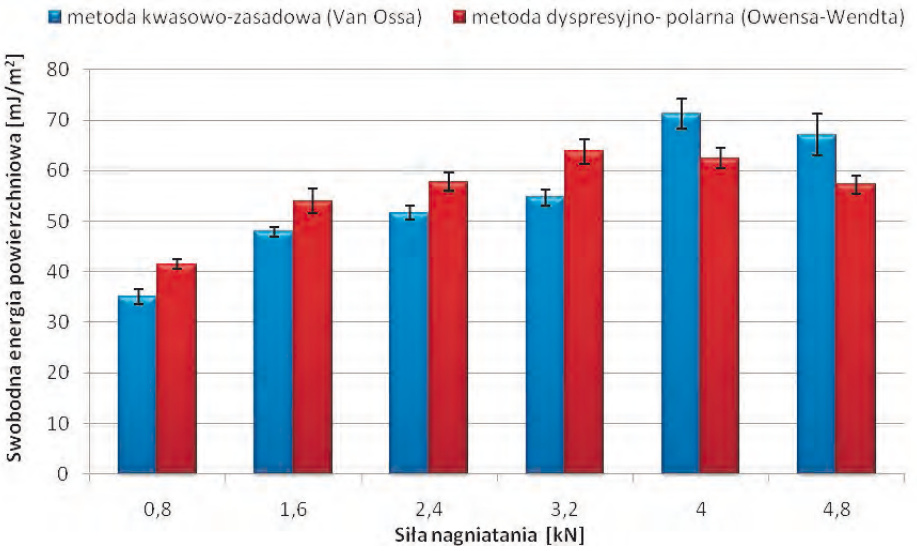
Rys. 1. Kształt i wymiary próbek przeznaczonych do badania kąta zwilżania

Na powierzchni tak przygotowanych próbek osadzano krople wody o specjalnej czystości oraz dijodometanu i formamidu, o objętości 2 µl. Krople osadzono metodą tzw. kropli uwięzionej, polegającej na tym, że jest ona uwalniana z aplikatora natychmiast po tym, jak nastąpi kontakt z podłożem. Kąt zwilżania pomiędzy powierzchnią próbki a płaszczyzną styczną do powierzchni kropli mierzono po ustaleniu warunków równowagi. Za stan równowagi przyjmowano warunki, w których wartość kąta zwilżania stabilizowała się (tj. przestawała zmniejszać się w wyniku rozpływu kropli po powierzchni). Procedurę pomiaru kąta zwilżania powtarzano 10-krotnie, po czym dla uzyskanej wartości średniej obliczano swobodną energię powierzchniową oraz jej elementy składowe. Do obliczeń wykorzystano zarówno metodę dyspersyjno-polarną Owensa-Wendta jak i kwasowo-zasadową Van Ossa. Całą procedurę, tj. pomiary kąta zwilżania i obliczanie swobodnej energii powierzchniowej powtarzano dla 3 losowo wybranych próbek z każdej partii.

2. Wyniki badań i ch dyskusja

Na rys. 2 pokazano wartości swobodnej energii powierzchniowej wyznaczonej metodą dyspersyjną-polarną oraz kwasowo-zasadową w zależności od siły nagniatania. Analiza przedstawionego wykresu wskazuje na wyraźny wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej wraz ze wzrostem siły nagniatania. Wzrost ten można zaobserwować dla obydwu metod obliczeniowych: kwasowo zasadowej i dyspersyjno-polarnej. W przypadku pierwszej metody podwyższenie swobodnej energii powierzchniowej wyniosło 36,2 mJ/m^2 (od 35,1 mJ/m^2 dla siły nagniatania 0,8 kN do 71,3 mJ/m^2 dla siły nagniatania 4,0 kN). Dla metody Owensa-Wendta stan energetyczny warstwy wierzchniej podniósł się o 22,3 mJ/m^2 (od 41,5 mJ/m^2 dla siły nagniatania 0,8 kN do 63,8 mJ/m^2 dla siły nagniatania 3,2 kN). Optimum wartości swobodnej energii powierzchniowej w metodzie dyspersyjno-polarnej otrzymano dla siły nagniatania 3,2 kN, warto jednak zauważyć, że dla siły 4,0 kN jej

spadek ma niewielką wartość 1,3 mJ/m^2 (uwzględniając wartości odchyleń standardowych średnich trudno tutaj mówić o istotnych statystycznie różnicach). Uogólniając zatem, można stwierdzić, że stan energetyczny osiąga najwyższy poziom w przedziale sił nagniatania (3,2÷4,0) kN, po czym następuje jego spadek – co potwierdzają obydwie z zastosowanych metod obliczeniowych. Tendencja ta lepiej uwidacznia się jednak dla wartości otrzymanych metodą Owensa-Wendta.



Rys. 2. Zależność swobodnej energii powierzchniowej od siły nagniatania

Spadek wartości swobodnej energii powierzchniowej dla najwyższej siły nagniatania ma prawdopodobny związek ze zjawiskiem „nasycenia zgniotem". Stopień upakowania ziaren materiału jest już tak duży, że dalsze odkształcenia plastyczne nie powodują już umocnienia warstwy wierzchniej ale rozpoczynają proces jej niszczenia. Zjawisko to jest obserwowalne także dla innych właściwości warstwy wierzchniej takich jak chropowatość czy też mikrotwardość.

Przebieg wykresów na rys. 2 wydaje się dość oczywisty z uwagi na fakt, że podczas nagniatanie część dostarczonej energii mechanicznej pozostaje zmagazynowana w materiale powodując wzrost jego energii wewnętrznej. Zakumulowana w taki sposób energia może stać się siłą napędową wielu zjawisk zachodzących na powierzchni odkształconego metalu i powodować wzrost aktywności adsorpcyjnej i chemicznej warstwy wierzchniej oraz zdolności do dyfuzji. W efekcie warstwa wierzchnia łatwiej oddziałuje z tlenem oraz wykazuje większą skłonność do tworzenia sczepień adhezyjnych, jako konsekwencji ułatwienia osiągnięcia i przekroczenia progu energetycznego, niezbędnego do powstawania silnych wiązań metalicznych. To z kolei przekładać się może na inicjację procesu zacierania, a w konsekwencji do zatarcia i awaryjnego unieruchomienia węzła tarcia.

Dla dokładniejszej analizy stanu energetycznego warstwy wierzchniej, w tab. 1 zestawiono wartości swobodnej energii powierzchniowej wraz z ich składowymi charaktery-

stycznymi dla poszczególnych metod obliczeniowych. Łatwo zauważyć prawidłowość, która dotyczy obu przypadków: początkowy wzrost, a następnie utrzymywanie się na zbliżonym poziomie stałej dyspersyjnej γ_S^d oraz odpowiadającej jej (chociaż nie do końca tożsamej) stałej Lifshitza-van der Waalsa γ_S^{LW} w metodzie Van Ossa.

Tabela 1. Składowe swobodnej energii powierzchniowej wyznaczonej metodami Van Ossa i Owensa-Wendta

Rodzaj próbki	Swobodna energia powierzchniowa [mJ/m^2]				
	Wyznaczona metodą Van Ossa[1)]			Wyznaczona metodą Owensa-Wendta[2)]	
Nagniatana siłą **0,8 kN**	γ_S=35,1			γ_S=41,5	
	γ_S^{LW}=32,5	γ_S^{AB}=2,6		γ_S^d=32,1	γ_S^p=9,4
		γ_S^A=9,4	γ_S^B=0,18		
Nagniatane siłą **1,6 kN**	γ_S=47,9			γ_S=54,0	
	γ_S^{LW}=44,4	γ_S^{AB}=3,5		γ_S^d=44,6	γ_S^p=9,3
		γ_S^A=3,2	γ_S^B=1,0		
Nagniatane siłą **2,4 kN**	γ_S=51,7			γ_S=57,8	
	γ_S^{LW}=42,0	γ_S^{AB}=9,7		γ_S^d=42,3	γ_S^p=15,5
		γ_S^A=4,1	γ_S^B=5,7		
Nagniatane siłą **3,2 kN**	γ_S=54,7			γ_S=63,8	
	γ_S^{LW}=42,4	γ_S^{AB}=12,2		γ_S^d=42,8	γ_S^p=21,0
		γ_S^A=0,9	γ_S^B=42,6		
Nagniatane siłą **4,0 kN**	γ_S=71,3			γ_S=62,5	
	γ_S^{LW}=44,5	γ_S^{AB}=26,7		γ_S^d=44,7	γ_S^p=17,8
		γ_S^A=3,8	γ_S^B=46,5		
Nagniatane siłą **4,8 kN**	γ_S=68,3			γ_S=57,3	
	γ_S^{LW}=44,2	γ_S^{AB}=22,9		γ_S^d=44,4	γ_S^p=12,9
		γ_S^A=4,0	**γ_S^B=32,8**		

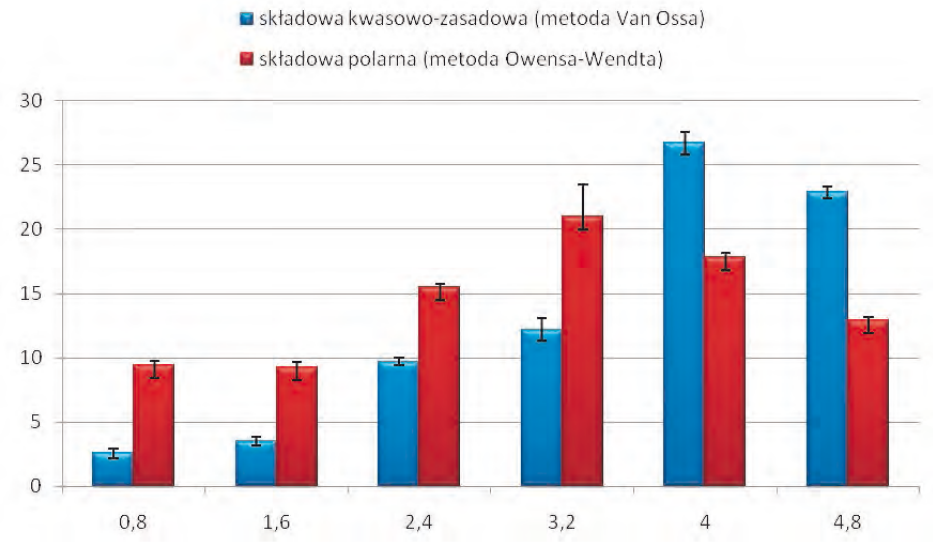
[1)] Oznaczenia składowych swobodnej energii powierzchniowej dla metody Van Ossa: γ_S^{LW} – składowa Lifshitza-van der Waalsa, γ_S^{AB} – składowa kwasowo-zasadowa (γ_S^A – składowa kwasowa, γ_S^B – składowa zasadowa).

[2)] Oznaczenia składowych swobodnej energii powierzchniowej dla metody Owensa-Wendta: γ_S^d – składowa dyspersyjna, γ_S^p – składowa polarna.

Oznacza to, że tylko pomiędzy siłami nagniatania 0,8 kN, a 1,6 kN składowe te miały istotny udział we wzroście wartości swobodnej energii powierzchniowej. Taki stan rzeczy jest być może związany z tym, że w odkształcenia plastyczne w swej początkowej fazie mają największy wpływ na ukształtowanie struktury krystalograficznej warstwy wierzchniej, co mogło przełożyć się na zmianę oddziaływań dyspersyjnych. Stosowanie kolejnych sił nagniatania w mniejszy sposób wpływało na ukierunkowanie krystalograficzne, a bardziej na gęstość upakowania krystalitów i akumulację energii mechanicznej. Uwzględniając tribologiczny aspekt tego zagadnienia należy zaznaczyć, że siły dyspersyjne mają co prawda istotne znaczenie dla zjawiska adhezji, ale w tym przypadku (mechanicznej aktywacji energetycznej

warstwy wierzchniej) nie one decydować będą o ewentualnym zwiększeniu skłonności materiałów skojarzenia tarciowego do powstawania sczepień adhezyjnych. Nie będzie miało to także wpływu na oddziaływania powierzchnia stali-środek smarowy, przy zastosowaniu standardowych środków smarowych, tj. takich, do kompozycji których nie zastosowano dodatków tribochemicznych (przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych). Węglowodory tworzące środki smarowe są apolarne, tak więc ich oddziaływanie z powierzchnią zależy od sił dyspersyjnych oraz ujętych w składowej γ_S^{LW} oddziaływań wodorowych. W związku z tym, że dla większości rozpatrywanych przypadków składowe γ_S^{LW} oraz γ_S^{d} utrzymują stały lub zbliżony poziom, nie będą one miały większego znaczenia dla zachowania systemu tribologicznego w kontekście odporności na zużywanie adhezyjne i współpracy ze środkiem smarowym bez dodatków AW i EP.

Inaczej niż dla składowych γ_S^{LW} oraz γ_S^{d} zmiany składowej polarnej oraz kwasowo-zasadowej są w wyraźny sposób uzależnione od wzrostu siły nagniatania (a więc stopnia akumulacji energii mechanicznej w warstwie wierzchniej). Celem ułatwienia analizy zmian tych składowych w zależności od siły nagniatania, na rys. 3 przedstawiono je w postaci wykresów. Dla podejścia Van Ossa zaobserwować można stały wzrost składowej kwasowo-zasadowej γ_S^{AB} począwszy od siły nagniatania równej 0,8 kN aż do jej wartości równej 4 kN. Całkowite podwyższenie wartości tej składowej wyniósł 24,1 mJ/m^2 (z 2,6 mJ/m^2 dla nagniatania z siłą 0,8 kN do 26,7 mJ/m^2 dla nagniatania z siłą 0,8 kN). Dopiero dla najwyższej siły nagniatania – 4,8 kN zaobserwowano stosunkowo niewielki spadek wartości tej składowej (o 3,8 mJ/m^2).



Rys. 3. Wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej: kwasowo-zasadowej oraz polarnej w zależności od siły nagniatania

Składowa kwasowo zasadowa γ_S^{AB} ma oczywiście ścisły związek z teorią kwasów i zasad Lewisa. W myśl tej teorii można scharakteryzować właściwości kwasowe i zasadowe związków chemicznych poprzez określenie ich zdolności akceptorowych i donorowych.

Rozpatrując teorię Lewisa należy dokładnie wyjaśnić wykorzystywane w niej pojęcia kwasu i zasady. Zgodnie zatem z tą teorią kwas należy rozumieć jako związek chemiczny, którego cząsteczka lub jon mogą stworzyć wiązanie koordynacyjne z inną cząsteczką poprzez wspólną parę elektronową, której źródłem jest ta druga cząsteczka. Do kwasów Lewisa zalicza się m. in. kationy metali, w tym trójwartościowego żelaza, dlatego też to ten pierwiastek stanowi prawdopodobnie komponent kwasowy rozpatrywanej składowej kwasowo-zasadowej w analizowanym przypadku. Zasada w teorii Lewisa określona jest w sposób stosunkowo uogólniony i oznacza związek chemiczny, którego cząsteczka lub jon posiada wolne pary elektronowej i może stać się ich donorem w reakcji z kwasem Lewisa. Fakt ten może zostać wykorzystany w konfigurowaniu systemu tribologicznego w układzie ciało stałe-ciecz. Jeżeli założymy bowiem, że kationy metali w istocie będą zachowywać się jak akceptory to wprowadzenie do systemu węglowodorowego środka smarowego o zasadowym (zgodnie z teorią Lewisa) charakterze może prowadzić do tworzenia trwałych warstewek granicznych. Innym potwierdzeniem takiego stanu rzeczy jest to, że składowa γ_S^{AB} świadczy także (co jest oczywiste w kontekście teorii Lewisa) o wiązaniach jonowych powstających w układzie kwasowo zasadowy. Wiązania jonowe powstają najczęściej w konfiguracji metal-niemetal, w związku z czym rosnąca (wraz z siłą nagniatania) wartość składowej kwasowo-zasadowej może stanowić asumpt do tworzenia warstewek granicznych. Warto jednak nadmienić, że opracowana przez Van Ossa i jego współpracowników metoda należy do stosunkowo młodych propozycji i przez niektórych Autorów uznawana jest za nieco kontrowersyjną (np. [4, 9, 14]), a wyniki otrzymywane tą drogą za niejednoznaczne w interpretacji i różniące się od wartości uzyskiwanych alternatywnymi metodami.

Zmiany składowej polarnej (rys. 3) w metodzie Owensa-Wendta wskazują na jej maksymalną wartość dla siły nagniatania 3,2 kN. Utrzymująca się na podobnym poziomie wartość składowej dyspersyjnej sprawia, że to właśnie składowa polarna wpływa na całościowe zmiany swobodnej energii powierzchniowej. Wzrost składowej γ_S^p może mieć bardzo ścisły związek ze wzrostem składowej kwasowo-zasadowej γ_S^{AB}. Źródłem takiego a nie innego zachowania jest to, że wspominane wcześniej wiązania jonowe należą do wiązań szczególnie mocno spolaryzowanych, więc wzrost tej składowej może potwierdzać w jakimś stopniu spostrzeżenia zawarte dla rezultatów obliczeń metodą Van Ossa.

3. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badaniach wskazują na istotny wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej stali 42CrMo4 wraz ze wzrostem siły nagniatania, które to zastosowano jako metodę obróbki wprowadzająca do warstwy wierzchniej energię mechaniczną. Otrzymane rezultaty uzyskano dwoma metodami: dyspersyjno-polarnej Owensa-Wendta oraz kwasowo-zasadowej opracowanej przez Van Ossa i współpracowników. Na podstawie analizy składowych swobodnej energii powierzchniowej stwierdzono, że odpowiedzialne za jej wzrost w tym eksperymencie są składowa kwasowo-zasadowa (w metodzie Van Ossa) i polarna (w metodzie Owensa-Wendta). Opierając się na teorii kwasów i zasad Lewisa oraz polaryzacji wiązań jonowych stwierdzić można, że zmiany w takiej postaci mogą zostać

wykorzystane do przygotowania warstwy wierzchniej pod kątem jej współpracy z substancją smarującą. Wniosek ten ma jednak tylko podłoże teoretyczne i należałoby eksperymentalnie potwierdzić jego słuszność.

Wykonane badania stanowią uzupełnienie wcześniejszych prac Autora (np. [12, 13]) poświęconych stanowi energetycznemu warstwy wierzchniej i jego wpływem na odporność na zacieranie adhezyjne oraz współpracę z substancją smarującą. Wyniki tych badań pozwalały dość jednoznacznie stwierdzić, że wzrost stanu energetycznego dla materiałów żelaznych (stale, żeliwa) przekłada się na pogorszenie ich odporności na zacieranie. Przyczyny należy dopatrywać się właśnie w podwyższonym stanie energetycznym, który może być akceleratorem wielu zjawisk i procesów na poziomie molekularnym, w tym także inicjatorem sczepiania adhezyjnego. Otrzymane wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej w tym eksperymencie nie pozwalają na proste i jednoznaczne powiązanie z wynikami wcześniejszych studiów nad odpornością na zacieranie. Być może sama aktywacja energetyczna i „pobudzenie" powierzchni energią mechaniczną są wystarczającym impulsem do przyspieszenia zjawiska adhezji w kontekście styku metalicznego (nie ma tutaj mowy o aktywacji energią cieplną, gdyż ta jest uwalniana podczas samej obróbki). Innego wyjaśnienia można dopatrywać się także w kontekście polaryzacji wiązań. Na tym etapie dokładności analizy trudno jednoznacznie powiedzieć czy wzrost składowej polarnej świadczy o powstawaniu wiązań jonowych czy też ma związek z postępującą polaryzacją metalicznych wiązań kowalencyjnych. Taki punkt widzenia mógłby być, przynajmniej częściowym wytłumaczeniem pogorszenia odporności na zacieranie wraz ze wzrostem swobodnej energii powierzchniowej.

Podwyższony stan energetyczny można jednak wykorzystać do kształtowania podwyższonej odporności na zacieranie. Jak wykazały cytowane wcześniej prace Autora, fakt ten można wykorzystać przy smarowaniu skojarzenia substancją smarującą zawierającą aktywne chemicznie dodatki przeciwzatarciowe. Także i w tym przypadku wzrost swobodnej energii powierzchniowej stanowi akcelerator, który pozwala na szybsze i skuteczniejsze generowanie warstewek granicznych chroniących powierzchnię metalu przed zacieraniem. W tym przypadku jest to jednak kwestia bardzo zindywidualizowana i zależy od konkretnej konfiguracji na linii powierzchnia metalu-swobodna energia powierzchniowa-dodatki EP do substancji smarującej.

Wydaje się, że wskazane jest prowadzenie dalszej, bardziej szczegółowej analizy otrzymanych wyników składowych energii powierzchniowej – co może przełożyć się na przybliżenie mechanizmów rządzących procesami zacierania adhezyjnego i współpracy powierzchni metali z dodatkami tribochemicznymi do olejów.

Literatura

1. Allen B.C.: Liquid metals, chemical and physics. (ed. Beer S.Z), M. Dekker Inc., New York 1972.
2. Black A.J., Kopalinsky E.M., Oxley P.L.B.: Analysis and experimental investigation of a simplified burnishing process. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 39, 1997, s. 629-641.

3. Clint J.H.: Adhesion and components of solid surface energies. Current Opinion in Colloid & Interface Science, vol. 6, 2001, p. 28-33.
4. Della Volpe C., Siboni S.: Some reflections on acid-base solid surface free energy theories. Journal of Colloids and Interface Science, vol. 195, 1997, s.121-136.
5. El-Axir M.H., El-Khabeery: Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials. Journal of Materials Processing Technology, vol. 132, 2003, s. 82-89.
6. Kwok D.Y.: The usefulness of the Lifshitz–van der Waals/acid–base approach for surface tension components and interfacial tensions. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 156, 1999, s.191-200.
7. Kwok D.Y., Neumann A.W.: Contact angle measurement and contact angle interpretation. Advances in Colloid and Interface Science, vol. 81 (1999), s. 167÷249.
8. Lyklema J.: Fundamentals of interface and colloid science. vol. 1. Fundamentals, Academic Press, 1991.
9. Missol W.: Energia rozdziału faz w metalach. Biblioteka Fizyki Metali, Warszawa, 1975.
10. Owens D.K., Wendt R.C.: Estimation of the surface free energy of polymers. Journal of Applied Polymer Science, vol. 13, 1969, 1741-1747.
11. Wojciechowski Ł.: Rozważania nad wykorzystaniem swobodnej energii powierzchniowej do charakterystyki stanu energetycznego warstwy wierzchniej. Tribologia nr 1/2009, str. 177÷197.
12. Wojciechowski Ł., Nosal S.: The preparation of surface layer of non-alloyed steel to cooperation with lubricating medium. Journal of KONES, nr 1/2009, str. 523÷532.
13. Wojciechowski Ł., Pawełczyk K.: Kształtowanie warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie. Inżynieria Materiałowa, nr 6/2008, str. 1058÷1063.
14. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchnie tworzyw wielocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

THE ANALYSIS OF SURFACE LAYER ENERGY CONDITIONS COMPONENTS IN THE TRIBOLOGICAL ASPECT

Summary. The tribological point of view on energy conditions changes proceeded in the surface layer was presented in this article. Energy conditions changes in 42CrMo4 steel specimens were created by utilization of pressure burnishing treatment with different forces of tool pressure. Energy conditions were investigated in base of free surface energy determination by two methods: polar-dispersive and acid-base. Occurred research results (including free surface energy components) were submitted for discussion in the context of adhesive scuffing resistance and cooperation of surface layer with lubricating mediums.

Key words: surface layer, energy conditions, free surface energy, adhesion

Mariusz Matejski*, Tadeusz Graczyk*

TECHNOLOGIA BADAÑ PODWODNYCH W BA£TYKU Z ZASTOSOWANIEM ZDALNIE STEROWANYCH POJAZDÓW G£ÊBINOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono technologiê badañ podwodnych z zastosowaniem bezza³ogowych zdalnie sterowanych pojazdów g³êbinowych. Zaprezentowano doœwiadczenia zespo³u badawczego projektuj¹cego i eksploatuj¹cego pojazdy na Wydziale Techniki Morskiej i Transportu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Przedstawiono rezultaty badañ poligonowych przeprowadzonych w Ba³tyku oraz w warunkach laboratoryjnych.

S³owa kluczowe: technologia podwodna, monitoring podwodny, pojazdy g³êbinowe.

1. WPROWADZENIE

Problemami ochrony i monitorowaniem œrodowiska naturalnego zwi¹zanego z Morzem Ba³tyckim zajmuje siê Konwencja Helsiñska, ratyfikowana przez Polskê w 1999 r. Ju¿ wczeœniejsza (1974 r.) „Konwencja o Ochronie Œrodowiska Morskiego Obszaru Morza Ba³tyckiego" nakazywa³a objêcie monitoringiem obszarów zatopienia amunicji i bojowych œrodków chemicznych oraz zalegaj¹cych wraków, w których taka amunicja i œrodki mog³yby byæ przewo¿one [5].

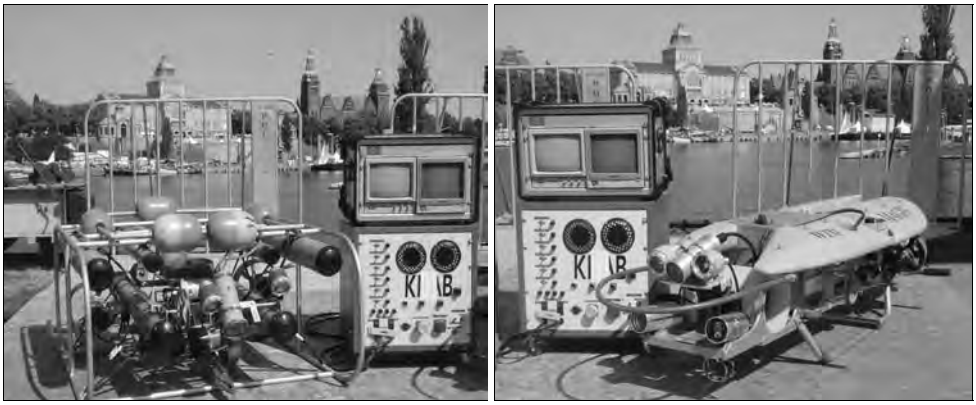
Wywi¹zanie siê z podpisanych zobowi¹zañ mo¿na zrealizowaæ na wiele sposobów. Monitoring mo¿ne byæ prowadzony z wykorzystaniem:

- nurków podczas nurkowania saturowanego,
- za³ogowych pojazdów g³êbinowych,
- zdalnie sterowanych bezza³ogowych pojazdów g³êbinowych typu ROV (ang. remotely operated vehicle).

Na Wydziale Techniki Morskiej i Transportu (WTMiT) ZUT w Szczecinie (dawna Politechnika Szczeciñska) od pocz¹tku lat 80-tych prowadzone s¹ badania zwi¹zane z budow¹ i eksploatacj¹ zdalnie sterowanych pojazdów g³êbinowych [1]. Efektem tych badañ by³o powstanie g³êbokowodnych systemów do penetracji œro-

* Wydzia³ Techniki Morskiej i Transportu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

dowiska wodnego SWOT i TODS wyposa¿onych w pojazdy g³êbinowe KRAB i MAGiS, fot. 1 [3, 4].



Fot. 1. Bezza³ogowe pojazdy g³êbinowe KRAB (po lewej) i MAGiS (po prawej) na nabrze¿u portowym Starówka w Szczecinie

2. METODYKA BADAÑ PODWODNYCH Z ZASTOSOWANIEM POJAZDÓW G£ÊBINOWYCH

Metodyka badañ g³êbinowych z zastosowaniem pojazdów, wypracowana przez Zespó³ Techniki G³êbinowej WTMiT, obejmuje trzy etapy postêpowania, a mianowicie: przygotowania do badañ, badania bezpoœrednie i prace w bazie po zakoñczeniu badañ [2].

Przygotowania do badañ obejmuj¹:

- okreœlenie za³o¿eñ i celu badañ;
- okreœlenie zakresu badañ: badanie strefy przydennej pod k¹tem zalegania obiektów technicznych, badanie fauny i flory w strefie przydennej zbiornika wodnego, badanie linii brzegowej (nabrze¿a), badanie parametrów fizykochemicznych wody zbiornika (na zadanej g³êbokoœci lub ró¿nych g³êbokoœciach wg wybranego profilu penetracji), inspekcja obiektów technicznych;
- rozpoznanie logistyczne stanowiska badawczego: drogi dojazdowe, rodzaj nabrze¿a, dostêp z brzegu, wodne œrodki transportu, mo¿liwoœæ wodowania (masa pojazdów: KRAB – 70 kg, MAGiS – 120 kg) z u¿yciem urz¹dzenia spustowo-podnoœnego;
- wyposa¿enie w urz¹dzenia pomocnicze (bosaki, boje, liny) i œrodki bezpieczeñstwa;
- okreœlenie mo¿liwoœci zasilania energetycznego: w³asne i sprawdzone Ÿród³o zasilania (przenoœny agregat pr¹dotwórczy) lub zewnêtrzny system zasilania z jednostki p³ywaj¹cej lub nabrze¿a (dopasowanie systemu);

- okreœlenie mo¿liwoœci komunikacji zewnêtrznej (Internet, telefon stacjonarny);
- rozpoznanie geograficzne i charakterystyka akwenu: g³êbokoœæ akwenu, prêdkoœæ pr¹du, stan wody (p³ywy dla morza i jezior przymorskich), przejrzystoœæ wody, temperatura wody, rodzaj dna, roœlinnoœæ, przeszkody i obiekty podwodne – na podstawie map lub te¿ badañ wstêpnych wykonywanych przy u¿yciu sonaru lub przez sondowanie;
- okreœlenie konfiguracji sprzêtu: dobór i usytuowanie wyposa¿enia opcjonalnego pojazdu, oœwietlenia, kamer, manipulatora, magnetometru (w celu lokalizacji trudnych do zauwa¿enia obiektów pokrytych osadami dennymi i roœlinnoœci¹), systemu pozycjonowania hydroakustycznego (w celu dok³adnej lokalizacji wykrytych obiektów). Usytuowanie kamer i oœwietlenia: pojazdy wyposa¿one s¹ w dwa tory wizyjne umo¿liwiaj¹ce zainstalowanie zarówno kamery kolorowej i monochromatycznej oraz cztery reflektory. Standardowo jedna z kamer (kamera 1) montowana jest na platformie przechylnej (tilt) wraz z przynajmniej jednym reflektorem. Druga kamera w zale¿noœci od realizowanych zadañ dubluje kamerê 1 lub montowana jest z boku lub z ty³u pojazdu. Czêsto, w zale¿noœci od widocznoœci pod wod¹, obraz z kamery monochromatycznej wyraŸniej oddaje szczegó³y techniczne np. spoiny spawalnicze czy g³êbokoœæ w¿erów korozyjnych. Bardzo wa¿nym jest dobór usytuowania oœwietlenia wzglêdem kamer oraz wyregulowanie natê¿enia œwiat³a, dziêki czemu mo¿na uzyskaæ efekt stosunkowo dobrej widzialnoœci nawet w ma³o przejrzystej wodzie;
- opracowanie scenariusza badañ uwzglêdniaj¹cego zakres badañ i zastosowane wyposa¿enie;
- dobór techniki prowadzenia pojazdu wzglêdem monitorowanego obiektu lub penetrowanego obszaru, co w szczególnoœci dotyczy obiektów hydrotechnicznych i wraków zalegaj¹cych na dnie akwenu oraz monitoringu konstrukcji oceanotechnicznych, w tym poszycia jednostek p³ywaj¹cych i ich uk³adów napêdowych;
- przygotowanie warsztatowe systemu pojazdu – przegl¹d z³¹czy, uszczelek, sprawdzenie poprawnoœci dzia³ania systemu w stanie suchym, sprawdzenie stanu urz¹dzeñ zasilaj¹cych, kompletnoœci urz¹dzeñ pomocniczych i zabezpieczaj¹cych, przygotowanie materia³ów do rejestracji badañ, ewentualne badania ruchowe i funkcjonalne w basenie doœwiadczalnym;
- rozpoznanie historyczne i prawne rejonu badañ (dzia³ania wojenne, aktywnoœæ gospodarcza, aktywnoœæ kulturowa, prawo w³asnoœci lub nadzoru);
- uzyskanie stosownego zezwolenia na przeprowadzenie badañ (jeœli konieczne);
- przewidywanie pogody;
- powo³anie g³ównej i pomocniczej ekipy badawczej;
- ubezpieczenie systemu i ekipy badawczej.

Badania bezpoœrednie obejmuj¹:

- transport systemu do miejsca badañ;
- instalacjê systemu;

- próby poprawnoœci systemu dzia³ania w warunkach rzeczywistych, kalibracjê urz¹dzeñ;
- korektê scenariusza w oparciu o warunki rzeczywiste;
- badania zasadnicze;
- zabezpieczenie artefaktów, próbek i zarejestrowanych danych;
- deinstalacjê systemu;
- transport systemu do bazy.

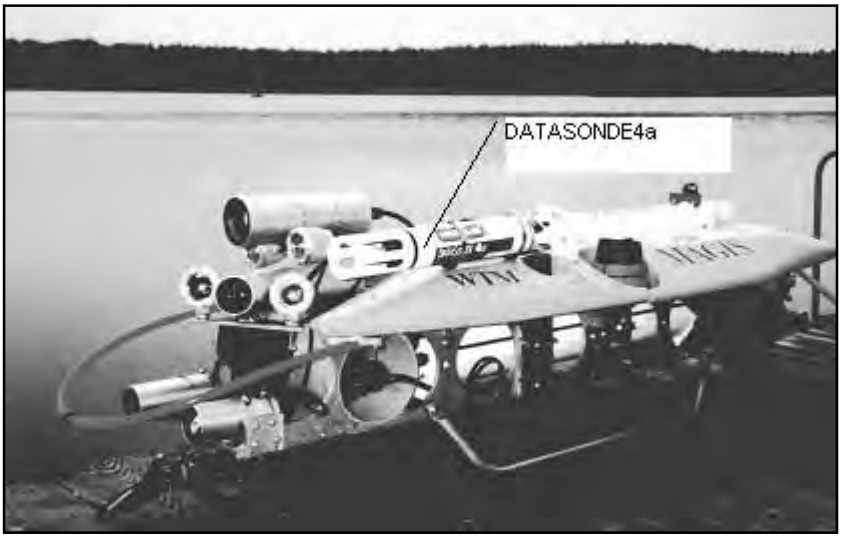
Prace w bazie po zakoñczeniu badañ obejmuj¹:
- prace konserwacyjne systemu pojazdu, specyfikacjê koniecznych remontów i zakupów;
- wstêpny przegl¹d artefaktów, próbek i zarejestrowanych danych;
- sprawozdanie z przeprowadzonych badañ;
- badania laboratoryjne danych pomiarowych;
- opracowanie wyników badañ, raport naukowy;
- publikacjê na ³amach czasopisma bran¿owego.

3. MONITORING ŒRODOWISKA WODNEGO

Monitoring z wykorzystaniem pojazdów g³êbinowych typu ROV mo¿e byæ prowadzony w zakresie badania parametrów œrodowiska wodnego oraz stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych i obiektów zalegaj¹cych na dnie akwenu.

Miejsca zalegania bojowych œrodków chemicznych, w przypadku ich uwolnienia z pojemników, charakteryzuj¹ siê anomaliami sk³adu chemicznego wody morskiej. Anomalie te mog¹ byæ identyfikowane i okreœlane poprzez:
- stacjonarny pobór próbek wody (ze statków lub ³odzi) z rejestracj¹ miejsca poboru próbki i g³êbokoœci; próbki te w dalszej kolejnoœci poddawanie s¹ analizie w laboratoriach stacjonarnych;
- dynamiczny pomiar parametrów fizyko-chemicznych wody, pozwalaj¹cy na stworzenie profilu zmian tych parametrów dla badanej czêœci akwenu wodnego. Wykorzystuje siê do tego celu pojazdy g³êbinowe typu ROV wyposa¿one w automatyczne sondy pomiarowe do badania wybranych parametrów wody (fot. 2).

Pojazdy KRAB i MAGiS eksploatowane na WTMiT s¹ wyposa¿ane w sondê DATASONDE 4a firmy Hydrolab (fot. 3) posiadaj¹c¹ mo¿liwoœæ pomiaru nastêpuj¹cych parametrów fizykochemicznych wody na g³êbokoœci roboczej (Depth) do 100 m w funkcji czasu (Time), tabela 1:
- napiêcia zasilania sondy (IBV Syr)
- temperatury (temp °C)
- kwasowoœci (pH),
- konduktywnoœci-zasolenia (SpCond),
- zawartoœci tlenu (DO),



Fot. 2. Pojazd podwodny MAGiS z zamontowan¹ sond¹ pomiarow¹ DATASONDE 4a

Tabela 1. Protokó³ pomiarów wykonanych przez sondê DATASONDE 4a – przyk³ad

Zatoka Pomorska - 3 Mm.
Badanie parametrów wody.
Badanie wykonano przy u¿yciu sondy pomiarowej DATA SONDE 4a firmy HYDROLAB
Setup Date (MMDDYY) : 052211
Setup Time (HHMMSS) : 113651
Wiatr 1-2 °B N-W.
Pozycja: 2
Time IBVSvr Temp pH SpCond DO% DO BP Svr Sal Depth ORP Res HHMMS Volts °C
Units mS/cm Sat mg/l kPa ppt m. mV kW-cm

113651 7.7 14.68 8.33 11885 138.6 13.38 101.1 6.79 0.4 378 0.084
113718 7.6 14.66 8.31 12033 128.9 12.44 101.3 6.88 1.4 373 0.083
113740 7.6 14.65 8.29 12248 127.4 12.30 101.3 7.01 2.2 371 0.082
113756 7.6 14.57 8.26 12425 124.9 12.07 101.3 7.12 3.2 370 0.080
113816 7.6 14.53 8.24 12688 122.1 11.80 101.3 7.28 4.4 369 0.079
113834 7.6 14.54 8.24 12705 120.9 11.67 101.3 7.30 5.4 367 0.079
113850 7.6 14.53 8.23 12717 120.7 11.66 101.4 7.30 6.4 366 0.079
113904 7.6 14.18 8.15 12696 116.1 11.29 101.4 7.29 7.4 368 0.079
113924 7.6 13.84 8.10 13014 110.5 10.82 101.4 7.48 8.2 378 0.077
113935 7.6 13.04 7.78 13237 98.5 9.81 101.3 7.62 8.4 381 0.076
113948 7.6 12.00 7.49 13450 91.7 9.34 101.3 7.75 9.4 396 0.074
Recovery finished at 052211 113948

- ciœnienia barometrycznego (BP Syr),
- zasolenia (Sal),
- potencja³u Redox (ORP),
- opornoœci (Res),
- a po zastosowaniu dodatkowych czujników tak¿e: mêtnoœci, chlorofilu, stê¿enia jonów azotanowych, chlorkowych i innych.

Zastosowanie systemu hydroakustycznego z super krótk¹ baz¹ TRACKPOINT 4 (fot. 4) pozwala na okreœlenie po³o¿enia pojazdu w toni wodnej (g³êbokoœæ i odleg³oœæ od stacji bazowej-jednostki p³ywaj¹cej lub punktu na brzegu). Umo¿liwia to okreœlenie przestrzennego profilu zmian parametrów fizykochemicznych wody w badanym akwenie i sporz¹dzenie odpowiedniej mapy przestrzeni wodnej.

Fot. 3. Sonda pomiarowa DATA SONDE 4a

Fot. 4. System pozycjonowania pojazdu z super krótk¹ baz¹

4. DOŒWIADCZENIA BADAWCZE ZESPO£U

4.1. Monitoring obiektów oceanotechnicznych

Do zadañ najczêœciej wykonywanych przez pojazdy g³êbinowe typu ROV jest monitoring obiektów oceanotechnicznych i penetracja obiektów zalegaj¹cych na dnie akwenu. Badania prowadzi siê wykorzystuj¹c urz¹dzenia wizyjne, pozwalaj¹ce naocznie stwierdziæ i zarejestrowaæ stan obiektów. Pomocne s¹ sonary i urz¹dzenia magnetometryczne zamontowane na jednostkach p³ywaj¹cych lub bezpoœrednio na pojazdach g³êbinowych.

Zespó³ badawczy WTMiT realizowa³ badania stanu technicznego rozmaitych konstrukcji i obiektów hydrotechnicznych, w tym: morskiej platformy wydobywczej gazu, nabrze¿y portowych w Szczecinie i Œwinouj◌ciu, przystani promowej w Œwinouj◌ciu, g³êbi dokowej w Szczeciñskiej Stoczni Remontowej „Gryfia", sztucznej rafy w Zatoce Pomorskiej, wraków u wybrze¿y P³w. Helskiego i Ko³obrzegu.

Monitoring konstrukcji platformy samopodno◌nej „Petrobaltic" polega³ na sprawdzeniu i udokumentowaniu stanu technicznego konstrukcji nóg platformy oraz stanu po³¹czeñ spawanych w zakresie g³êboko◌ci do 80 m, a tak¿e inspekcji otoczenia odwiertu.

W pierwszej fazie badañ pojazd KRAB zosta³ zwodowany z platformy i p³ywaj¹c swobodnie dokonywa³ oglêdzin konstrukcji, co bez przeszkód mo¿liwe by³o do g³êboko◌ci ok. 30 m. Dalej wyst¹pi³y trudno◌ci ze sterowaniem pojazdem zwi¹zane z oddzia³ywaniem d³ugiej kabloliny, a ponadto zaistnia³o ogromne niebezpieczeñstwo zapl¹tania siê jej w elementy konstrukcyjne platformy. Trudno◌ci te eliminowa³ specjalny uk³ad stabilizacji po³o¿enia pojazdu na wiêkszych g³êboko◌ciach przy pomocy liny prowadnikowej z kotwic¹ i szaklami prowadz¹cymi, zak³adanymi sukcesywnie co 15 m w miarê posuwania siê w g³¹b akwenu. Za³o¿enie pierwszej szakli na kablolinie w odleg³o◌ci 30 m od punktu zaczepienia pojazdu pozwala³o na trzydziestometrow¹ swobodê jego operowania, co wystarcza³o do prawid³owego i bezpiecznego wykonywania zadañ. Ograniczeniu uleg³o równie¿ niebezpieczeñstwo zapl¹tania siê kabloliny w elementach konstrukcyjnych platformy.

Operator obserwowa³ na monitorach przestrzeñ przed pojazdem. Ogólnej obserwacji konstrukcji dokonano u¿ywaj¹c kamery kolorowej, a detali po³¹czeñ spawanych – kamery monochromatycznej. Na fotografiach 5 i 6 przedstawiono elementy konstrukcyjne nóg platformy „Petrobaltic" na g³êboko◌ci 60 m. Na tej g³êboko◌ci pojazd utkn¹³ pomiêdzy sko◌nymi wspornikami konstrukcji. Tylko dziêki intuicji operatora uda³o siê go stamt¹d wypl¹taæ.

Fot. 5. Spoiny konstrukcji platformy „Petrobaltic"

Fot. 6. Zêbatka nogi platformy „Petrobaltic"

4.2. Monitoring obiektów zalegaj¹cych na dnie akwenu

Monitoring ten obejmuje inspekcjê ruroci¹gów podwodnych oraz penetracjê wraków. Kontrola ruroci¹gów podwodnych jest operacj¹ ¿mudn¹ i wyczerpuj¹c¹ dla operatora z uwagi na d³ugotrwa³e przemieszczanie pojazdu i œledzenie nitki ruroci¹gu, ale nie niesie za sob¹ szczególnego niebezpieczeñstwa dla eksploatowanego pojazdu. Doœwiadczenia zespo³u WTMiT dotycz¹ inspekcji ujêcia wody dla Szczecina w Jez. Miedwie, tj. inspekcji konstrukcji czerpni i ruroci¹gów na g³êbokoœci oko³o 20 m.

Penetracja wraków jest zadaniem o wiele trudniejszym. Odbywa siê w ró¿nych warunkach pogodowych, niekiedy przy stanie morza dochodz¹cym do 4-5 °B. Kapitanowie jednostek p³ywaj¹cych niechêtnie kotwicz¹ w pobli¿u wraków obawiaj¹c siê utraty kotwic, st¹d istnieje niebezpieczeñstwo dryfu jednostki i wzmo¿one oddzia³ywanie d³ugiej kabloliny na pojazd g³êbinowy.

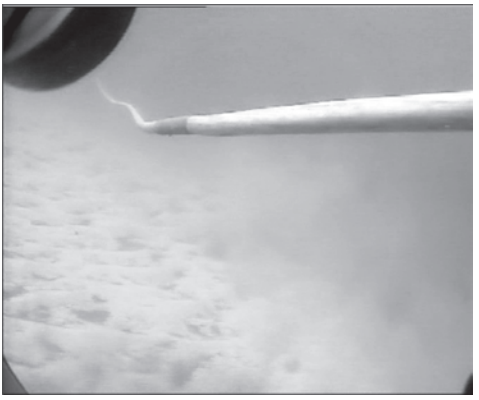
Zespó³ badawczy WTMiT prowadzi³ w 2011 roku badania zwi¹zane z penetracj¹ wraków w okolicach Ko³obrzegu. Badania prowadzone by³y z jednostki m/s Nurek. W trakcie badañ spenetrowano wraki kontrtorpedowca i kutra rybackiego. Badania poprzedzono analiz¹ warunków w jakich bêd¹ realizowane. Pierwszym ograniczeniem by³ brak mo¿liwoœci kotwiczenia w pobli¿u obiektu, drugim, ¿e wrak jest powa¿nie uszkodzony i posiada wiele wystaj¹cych, ostrych, skorodowanych elementów. Powy¿sze uwarunkowania wymusi³y zastosowanie rozwi¹zañ technologicznych umo¿liwiaj¹cych bezpieczne prowadzenie badañ:

- z bêbna magazynowego odwiniêto ca³¹ kablolinê i u³o¿ono na pok³adzie, a nad jej odpowiednim wydawaniem do wody lub wybieraniem czuwa³y dwie osoby;
- zmieniono konfiguracjê mocowania kamer: jedna kamera, zamocowana na przechylnej platformie (tilt), umo¿liwiaj¹cej zmianê po³o¿enia w granicach 180°, skierowana by³a do przodu i s³u¿y³a do obserwacji obiektu, a druga, skierowana do ty³u, s³u¿y³a do obserwacji u³o¿enia kabloliny i pozwala³a na bezpieczne wycofanie w wypadku uwik³ania pojazdu w konstrukcji wraku – obrazy z poszczególnych kamer przedstawiono na fot. 7, 8, 9.

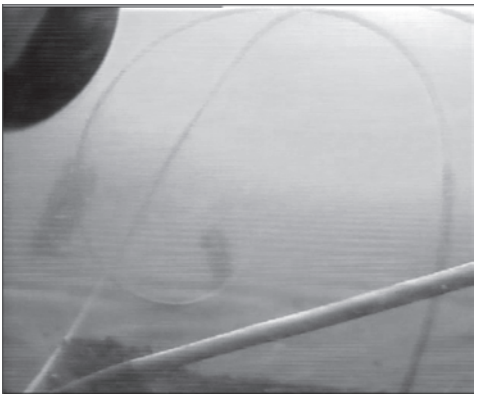
Sygna³ami do wydawania lub wybierania kabloliny by³ sposób jej u³o¿enia obserwowany z kamery tylnej. Napiêcie i prostoliniowy kszta³t u³o¿enia sugerowa³ koniecznoœæ wydawania, natomiast kszta³t pofalowany, o du¿ej liczbie zwojów – konieczno¶æ jej wybierania. Przy kilkunastometrowej widzialnoœci obserwacja kabloliny nie nastrêcza³a trudnoœci. W wodzie o ma³ej przejrzystoœci (bywa³o nawet kilkanaœcie centymetrów) operacje z kablolin¹ zale¿¹ do wyczucia osoby podtrzymuj¹cej jej koñcówkê na pok³adzie jednostki p³ywaj¹cej.

Na uwagê zas³uguje sposób u³o¿enia kabloliny w toni wodnej. W zale¿noœci od zasolenia wody (gêstoœci) kablolina o neutralnej p³ywalnoœci mo¿e p³ywaæ lub tonąæ i uk³adaæ siê na dnie, stwarzaj¹c niebezpieczeñstwo zapl¹tania. I taki przypadek zaistnia³ podczas wyci¹gania pojazdu, gdy nast¹pi³o zablokowanie kabloliny i niewielkie jej uszkodzenie o ostry element konstrukcji wraku. Przed tego rodzaju niebezpie-

Fot. 7. U³o¿enie kabloliny przy dnie akwenu



Fot. 8. Kablolina napiêta



Fot. 9. Kablolina nadmiernie luŸna

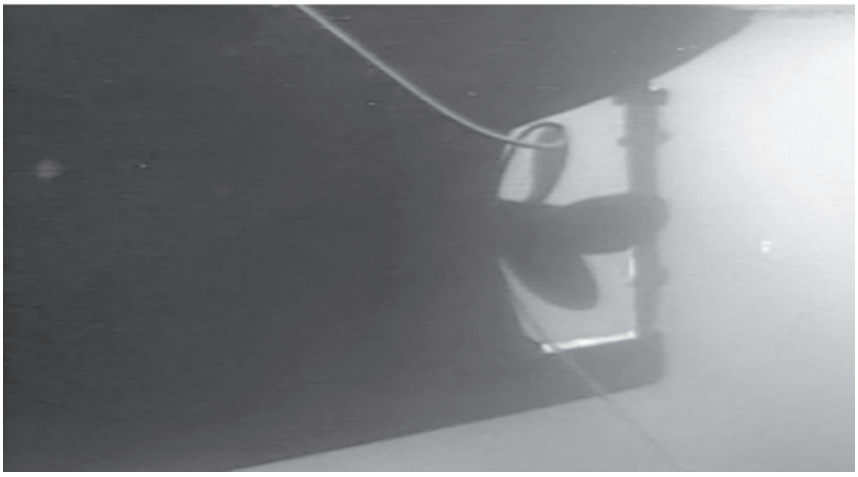
czeñstwem ustrzec siê mo¿na odpowiednio wywa¿aj¹c kablolinê przez zamontowanie na niej dodatkowych p³ywaków zwiêkszaj¹cych jej p³ywalnoœæ.

Istnieje te¿ niebezpieczeñstwo zapl¹tania lub urwania kabloliny przez zespó³ napêdowy statku badawczego. W trakcie wydawania kablolina znalaz³a siê w pobli¿u œruby statku, która na skutek falowania obróci³a siê, zagarniaj¹c kablolinê w okno œrubowe, fot. 10. Sposób wypl¹tania siê z takiej pu³apki okaza³ siê prosty – pojazd zosta³ wyci¹gniêty na pok³ad, kablolina odczepiona od niego, a jej z³±cze zaszczelnione, po czym kablolinê przeci¹gniêto pod statkiem. Po wyci¹gniêciu swobodnej ju¿ kabloliny na pok³ad, przemyciu z³±cza wod¹ destylowan¹ i wysuszeniu, po nastêpnych kilku minutach pojazd by³ znowu gotów do dalszej pracy.

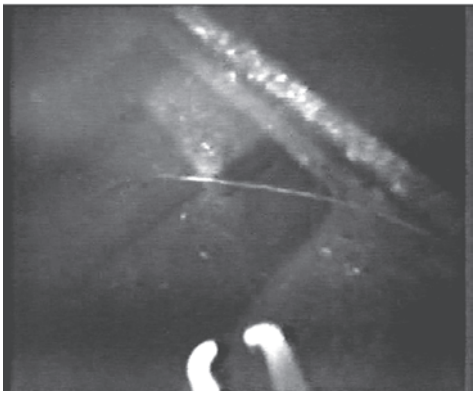
Niebezpieczeñstwo urwania pojazdu g³êbinowego pojawia siê, gdy wyniku dryfowania statku, jego odleg³oœæ od pojazdu g³êbinowego osi¹ga d³ugoœæ kabloliny.

Taki przypadek mia³ miejsce, gdy ruchy statku na fali powodowa³y szarpniêcia, które przenosi³y siê na bêben kabloliny. Szybki manewr pó³-naprzód oraz podci¹gniêcie kabloliny przez obs³ugê za¿egna³y niebezpieczeñstwo.

Zespó³ badawczy WTMiT prowadzi³ tak¿e monitoring elementów konstrukcyjnych o znacznej d³ugoœci, tj. nabrze¿y, poszycia statku oraz monitoring szynowego slipu dla podnoszenia i opuszczania jednostek p³ywaj¹cych, fot. 11 i 12. W tym wypadku nale¿a³o zadbaæ o dok³adn¹ identyfikacjê miejsca, w którym aktualnie prowadzony by³ monitoring, aby w przypadku wykrycia usterki mo¿liwe by³o szybkie dotarcie i naprawa przez wyspecjalizowane ekipy nurków. Stosowane by³y w tym celu znaczniki cyfrowe pozostawiane przez pojazd.



Fot. 10. Kablolina wpl¹tana w okno sterowe statku



Fot. 11. Podmyty fragment torowiska slipu

Fot. 12. Prawid³owo podparte torowisko slipu

5. PODSUMOWANIE

Prowadzenie monitoringu przez zdalnie sterowane pojazdy g³êbinowe jest zadaniem skomplikowanym, wymagaj¹cym przyjêcia odpowiedniej technologii wykonania zadañ, zapewnienia zaplecza technicznego oraz w³aœciwego przygotowania operatorów.

Technologia wykonania zadañ podwodnych musi uwzglêdniaæ stan techniki oraz warunki œrodowiskowe obszaru zadañ. Niezbêdne jest odpowiednie przygotowanie techniczne – dobór systemu g³êbinowego i wspó³pracuj¹cej z nim stacji kontroli oraz sta³ej lub p³ywaj¹cej jednostki wspieraj¹cej. Od operatorów wymaga siê ogromnej wyobraŸni przestrzennej i intuicji. Poza wiedz¹ teoretyczn¹ musz¹ oni wykazaæ przygotowanie praktyczne, które doskonalone jest w warunkach poligonowych na szkoleniach i kursach. Takie przygotowanie zapewnia bezawaryjne wykonanie zadañ podwodnych bez utraty pojazdu lub opóŸnieñ w ich realizacji.

Doœwiadczenia zespo³u badawczego WTMiT wskazuj¹ na mo¿liwoœci rozwoju i upowszechnienia techniki g³êbinowej wykorzystuj¹cej zdalnie sterowane pojazdy g³êbinowe w szerokim zakresie zadañ podwodnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Graczyk T.: Technika podwodna w Zak³adzie Technologii Okrêtów Politechniki Szczeciñskiej. Sympozjum «Problemy rozwojowe techniki okrêtowej», PAN i WTM PS, Szczecin, 6.10.1995, str. 41-49.
2. Graczyk T., Matejski M., Dramski M.: Morskie badania wdro¿eniowo-eksploatacyjne systemu monitoringu g³êbinowego, Polish Hyperbaric Research, 2(27), 2009: 37-47.
3. Matejski M., Graczyk T.: Mo¿liwoœci wykorzystania systemu g³êbinowego SMG do monitoringu œrodowiska naturalnego w obrêbie nieruchomych konstrukcji p³ywaj¹cych i elektrowni wiatrowych. XXX Sympozjum Si³owni Okrêtowych SymSO 2009, Akademia Marynarki Wojennej, Wydzia³ Mechaniczno-Elektryczny, Katedra Si³owni Okrêtowych, Zeszyty Naukowe AMW, Gdynia 19-20.11.2009.
4. Matejski M., Graczyk T.: Pojazdy g³êbinowe – eksploatacja, utrzymanie, zarz¹dzanie systemem, Miêdzynarodowa Konferencja Naukowa „Transport XXI wieku", Politechnika Warszawska - Wydzia³ Transportu, PAN - Komitet Transportu, Warszawa 20-22.09.2004 r.
5. http://www.gios.gov.pl/artykuly/321/Konwencja-Helsinska

TECHNOLOGY OF UNDERWATER RESEARCH IN THE BALTIC SEA APPLYING REMOTELY OPERATED VEHICLES

Summary

Technology of underwater research applying remotely operated vehicles is discussed in an article. There are presented experiences of research team in vehicle design and exploitation at the Faculty of Maritime Technology and Transportation, West Pomeranian University of Technology, Szczecin. Results of in-the-field research in the Baltic Sea and laboratory tests are presented, as well.

Keywords: underwater technology, underwater monitoring, ROVs.

Jacek Mucha*, Waldemar Witkowski*

ANALIZA WYTRZYMA£OŒCI NA ŒCINANIE OKR¥G£YCH PO£¥CZEÑ PRZET£OCZENIOWYCH Z CIENKIEJ BLACHY DC04

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie wytrzyma³oœci okr¹g³ych po³¹czeñ przet³oczeniowych wykonanych dla cienkiej blachy stalowej z materia³u 1.0338 (DC04). Dla blach poni¿ej 1 mm niezwykle istotne jest zachowanie wysokiej sztywnoœci narzêdzi oraz czystoœci powierzchni ³¹czonych elementów. Podczas badañ eksperymentalnych analizowano wytrzyma³oœæ na œcinanie oraz zachowanie siê przet³oczenia podczas testu rozdzielenia. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono pewn¹ niejednorodnoœæ w wartoœciach maksymalnej si³y niszcz¹cej z³¹cze.

S³owa kluczowe: po³¹czenia, clinching, œcinanie po³¹czeñ.

WSTÊP

Do niedawna monta¿ elementów cienkoœciennej konstrukcji odbywaæ siê móg³ za pomoc¹ konwencjonalnych technologii spajania np. zgrzewania czy czasoch³onnego nitowania. Rozwój ogólnie pojêtej techniki pozwoli³ na przemys³owe wdro¿enie do monta¿u wyrobów znanej od lat technologii po³¹czeñ przet³oczeniowych. Po³¹czenia oparte na przet³aczaniu rodzimego materia³u charakteryzuj¹ siê szeregiem cech, z których g³ówne to:

- nie ma potrzeby wykonywania otworów,
- niewielki koszt jednostkowy z³¹cza oraz mniejszy ni¿ przy po³¹czeniu dodatkowym elementem z³¹cznym,
- du¿a powtarzalnoœæ kszta³towania z³¹cza,
- nie wystêpuj¹ naprê¿enia cieplne (formowanie na zimno).

Jej zalety sprawi³y, ¿e jest obecnie coraz czêœciej wykorzystywana w procesach produkcyjnych blaszanych konstrukcji zw³aszcza w przemyœle samochodowym [1, 2, 7, 8]. Prostota wykonania, a przede wszystkim obni¿enie kosztów produkcji gotowego wyrobu poprzez wyeliminowanie kosztów dodatkowego ³cznika czyni j¹ najbardziej rozpowszechnion¹ wœród rodziny po³¹czeñ przet³oczeniowych [9, 11]. Dobór odpowiedniej geometrii matrycy i stempla w zale¿noœci od gruboœci

* Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydzia³ Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

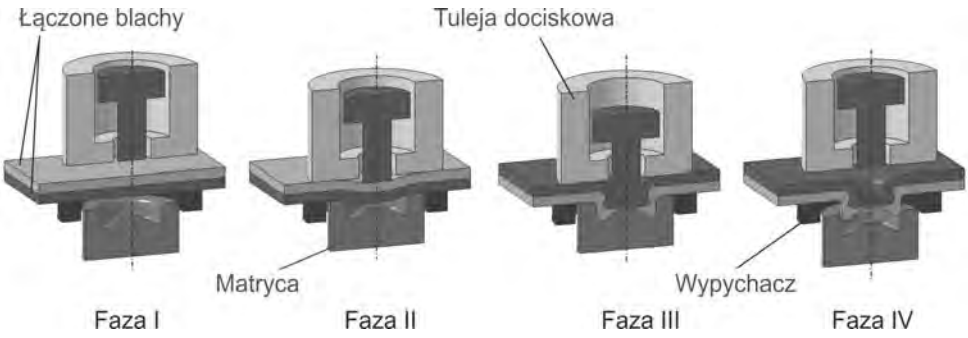
³1czonych elementów, ich w³asnoœci mechanicznych to krok na œcie¿ce optymalizacji procesu ³1czenia z uwzglêdnieniem parametrów eksploatacyjnych tych z³1czy [10].

Poziom rozwi¹zañ technologii monta¿u wyrobów blaszanych za pomoc¹ po³1czeñ przet³oczeniowych jest obecnie na wysokim poziomie [6]. Szereg firm oferuje nowatorskie rozwi¹zania wrêcz unikatowe na skalê œwiatow¹ oferuj¹c rozwi¹zania gotowych specjalizowanych stanowisk monta¿owych. Dostêpne na rynku rozwi¹zania oferowane s¹ w postaci zmodularyzowanej, co u³atwia budowê stanowisk do monta¿u okreœlonych wyrobów. Urz¹dzenia do formowania po³1czeñ przet³oczeniowych oferowane s¹ w szerokiej gamie z napêdem elektrycznym, pneumatycznym i hydraulicznym. Si³owniki czêsto wyposa¿one s¹ w czujniki pomiaru si³y kszta³towania sprzê¿one z przemieszczenia, co u³atwia kontrolê i sterowanie przebiegiem procesu wytwarzania po³1czenia w trakcie monta¿u wyrobu.

W pracy przedstawiono analizê skutecznoœci w przenoszeniu obci¹¿enia œcinaj¹cego przez z³1cza przet³oczeniowe, które zast¹pi³y po³1czenia zgrzewane. Zwrócono równie¿ uwagê na niejednorodnoœæ maksymalnej wytrzyma³oœci po³1czeñ przet³oczeniowych wystêpuj¹cej podczas testów kontrolnych s³u¿¹cych do okreœlenia poprawnoœci wykonania z³1czy z cienkiej blachy.

FORMOWANIE OKR¥G£EGO PO£¥CZENIA PRZET£OCZENIOWEGO

Realizacja okr¹g³ego po³1czenia przet³oczeniowego (zaciskanego przez wyt³aczanie) odbywa siê przez proces miejscowego wyt³aczania ³1czonych blach na zimno przy u¿yciu stempla i matrycy z odpowiedni¹ geometri¹. Podczas procesu scalania elementów w miejscu powstawania z³1cza nastêpuje wciskanie stempla w ³1czone blachy (rys. 1). W miarê zag³êbiania siê stempla w blachach materia³ p³ynnie przemieszcza siê wype³niaj¹c wykrój matrycy. Poprzez wype³nienie wolnej przestrzeni pomiêdzy stemplem a wykrojem w matrycy powstaje ostateczny kszta³t po³1czenia.



Rys. 1. Przebieg formowania po³1czenia przet³oczeniowego
Fig. 1. Clinching joint forming course

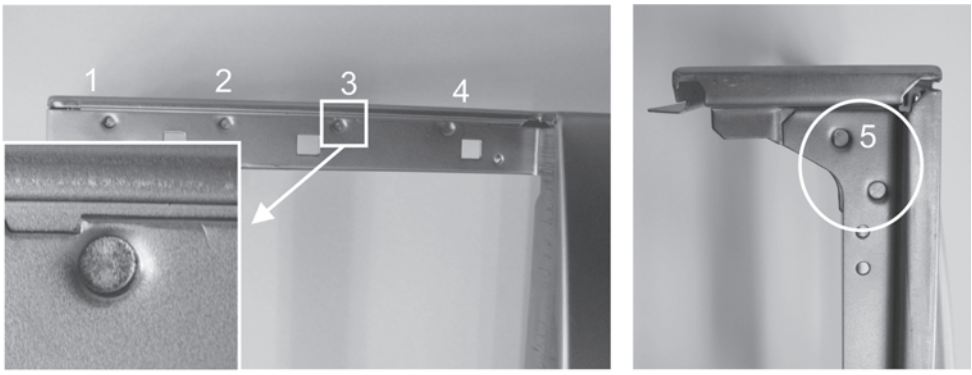
Prostota po³31czenia przet³oczeniowego pozwala na jego zastosowanie zarówno w produkcji seryjnej jak te¿ jednostkowej. Przy wytwarzaniu wielkoseryjnym oraz masowym wykorzystuje siê odpowiednio przystosowane do tego celu roboty (manipulatory) w po³31czeniu z prostymi prasami dla przedmiotów o nieskomplikowanych kszta³tach. Natomiast dla bardziej z³o¿onych elementów stosuje siê specjalizowane stanowiska monta¿owe do wykonywania po³31czeñ przet³oczeniowych [3].

MATERIA£ ORAZ METODYKA BADAÑ

Badania dotyczy³y z³31czy zawartych w konstrukcji panelu przedniego suszarki AGD z blachy stalowej niskowêglowej przeznaczonej do obróbki plastycznej na zimno - DC04 (stal g³êboko t³oczna). Ten gatunek stali jest przeznaczony do niemal wszystkich procesów t³oczenia, stosowany szczególnie w przemyœle motoryzacyjnym oraz AGD.

Po³31czenia wytwarzane by³y z blachy stalowej o gruboœci g = 0,7 mm i materia³u 1.0338 (DC04), dla której podstawowy sk³ad oraz parametry mechaniczne zestawiono w tabelach 1 i 2. Poszczególne próbki po³31czenia przet³oczeniowego odpowiada³y warunkom formowania po³31czeñ w konstrukcji wyrobu (rys. 2). Pojedyncze z³31cze zgrzewane umiejscowione w starej konstrukcji w obszarze zaznaczonym na rysunku 2b zosta³o zast¹pione podwójnym przet³oczeniowym, pozosta³e zaœ bez zmian jak na rysunku 2a. Poziomem zadawalaj¹cym w warunkach przemys³owej produkcji ustroju cienkoœciennego by³a wartoœæ maksymalnej si³y na poziomie 1400 N dla po³31czenia podwójnego.

a) b)



Rys. 2. Fragmenty cienkoœciennej konstrukcji panelu z po³31czeniami przet³oczeniowymi: a) szew czterech z³31czy, b) podwójne po³31czenie

Fig. 2. Fragments of a thin-walled panel design with redrawing joints: a) seam of four joints, b) double joint

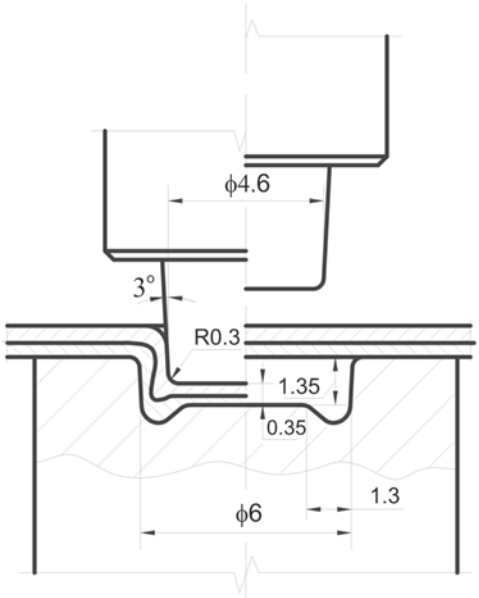
Tabela 1. Zestawienie sk³adu chemicznego stali DC04
Table 1. DC04 steel's chemical composition

Zawartość głównych pierwiastków w %*			
C	**Mn**	**P**	**S**
max 0,08	max 0,40	max 0,03	max 0,03

* PN-EN 10130:2009.

Tabela 2. W³asno¶ci mechaniczne materia³u ³¹czonych blach
Table 2. The mechanical properties of the joined sheet metal material

E [Gpa]	**$R_{p0.2}$** [Mpa]	**R_m** [Mpa]	**$A_{min.}$** [%]	HV0.2	$\sigma_p=C\cdot\varepsilon^n$	
			L_o=80 mm		**n**	**C**
206	176	297	38	107	0,22	415

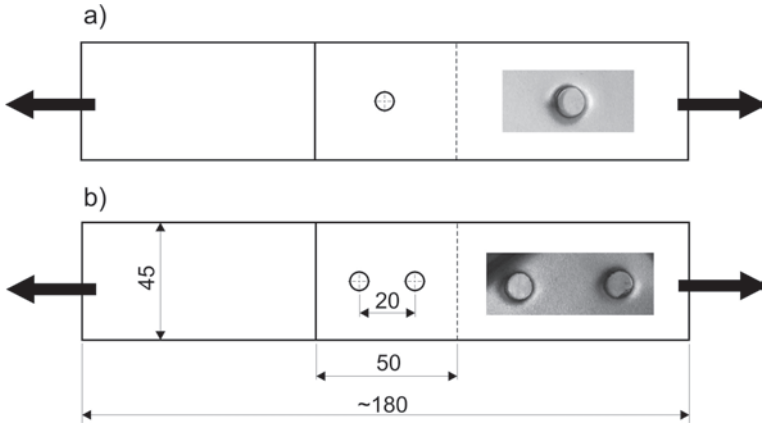


Rys. 3. Podstawowa geometria narzêdzi
Fig. 3. Base tool geometry

Po³¹czenie elementów z cienkiej blachy odbywa³o siê za pomoc¹ odpowiednich narzêdzi zainstalowanych w ramie C kszta³tnej, napêdzanych si³ownikami hydraulicznymi o ustawionym ci¶nieniu roboczym p = 27 MPa oraz czasie przetrzymania stempla w blasze 5 s. Skok stempla formuj¹cego dobrany by³ tak by uzyskaæ grubo¶æ

dna przet³oczenia X = 0,35 mm (25% ³¹cznej grubo¶ci blach). Podstawowe wymiary narzêdzi przedstawiono na rysunku 3.

Dla wybranych piêciu miejsc scalenia w konstrukcji wykonano po trzy próbki z³¹cza pojedynczego oraz podwójnego (rys. 4), w celu okre¶lenia wp³ywu zmiany sztywno¶ci wêz³a (liczby przet³oczeñ) na poziom maksymalnej si³y ¶cinaj¹cej z³¹cze. Testy ¶cinania przeprowadzone by³y w jednakowych warunkach na maszynie wytrzyma³o¶ciowej INSTRON 3382 z g³owic¹ pomiarow¹ do 100 kN przy prêdko¶ci V = 10 mm/min.

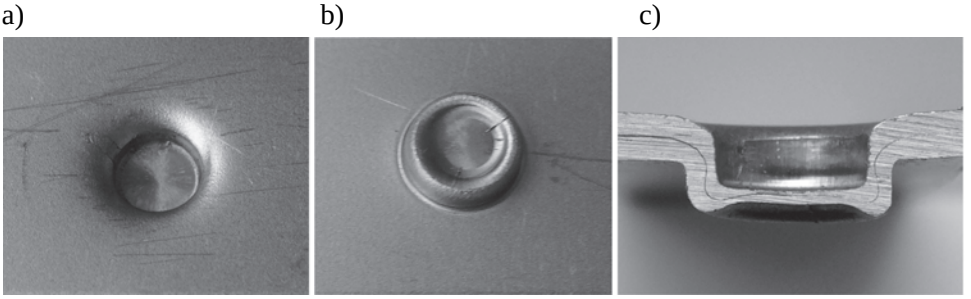


Rys. 4. Geometria próbek do testów ¶cinania i warunki u³o¿enia miejsc scalenia dla: a) pojedynczego, b) podwójnego z³¹cza
Fig. 4. The shearing test specimen geometry and merging area location conditions for: a) single joint, b) dual joint

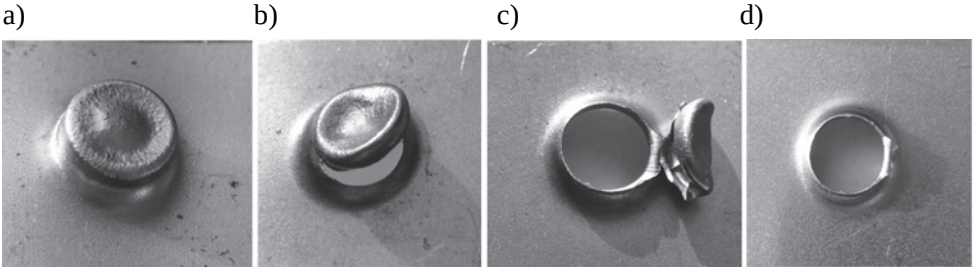
WYNIKI BADAÑ ORAZ ICH ANALIZA

Geometria narzêdzi zainstalowanych w ramach C kszta³tnych pozwala³a na uzyskanie po³¹czenia z poprawnie uformowanym zamkiem w z³¹czach bez utraty spójno¶ci materia³u szyjki oraz zewnêtrznych nieci¹g³o¶ci na zewnêtrznych powierzchniach w miejscu scalenia. Wygl¹d zewnêtrzny przyk³adowego po³¹czenia dla blach z materia³u DC 04 oraz jego przekrój poprzeczny z ujawnion¹ budow¹ wewnêtrzn¹ przedstawiono na rysunku 5.

Najczê¶ciej spotykane formy zniszczenia po³¹czenia „clinching” to rozdzielenie przez rozkleszczenie tj. oddzielenie siê w miejscu scalenia bez utraty spójno¶ci materia³u blach (rys. 6a) inne mo¿liwe i spotykane to separacja warstw w wyniku pêkniêcia czê¶ciowego (rys. 6b, c) lub ca³kowitego (rys. 6d) przet³oczenia blachy górnej z³¹cza w przekroju o najmniejszej grubo¶ci szyjki (przewê¿enia) [4].



Rys. 5. Charakterystyka zewnêtrzna, oraz wewnêtrzna uformowanego okr¹g³ego po³¹czenia z blach o grubo¶ci 0,7 mm: a) wygl¹d od strony stempla, b) wyp³ywka od strony matrycy, c) przekrój poprzeczny z³¹cza.
Fig. 5. The external and internal characteristics of formed round joint made of 0.7 mm sheets: a) view from a punch side, b) flash on a die side, c) joint cross-section.

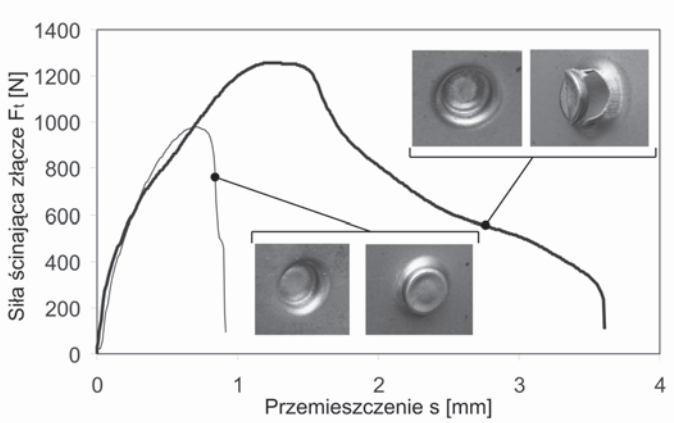


Rys. 6. Wygl¹d przet³oczenia blachy górnej po rozdzieleniu po³¹czenia w wyniku: a) rozkleszczenia, b) i c) oraz d) utraty spójno¶ci szyjki w z³¹czu
Fig. 6. The upper sheet clinching view once the joint is separated due to: a) separation, b), c), and d) material cohesion loss in the joint

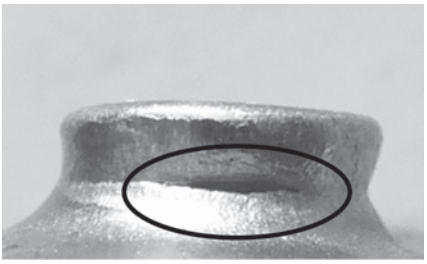
Podczas testów ¶cinania pojedynczych z³¹czy przet³oczeniowych dominuj¹ce by³o rozkleszczenie. W jednym przypadku pojawi³ siê odmienny przebieg krzywej ¶cinania w porównaniu do pozosta³ych powtarzaj¹cych siê charakterystyk si³owych ¶cinania z³¹czy (rys. 7). Warto¶æ absorpcji energii ca³kowitego zniszczenia po³¹czenia rozdzielonego przez ¶ciêcie przet³oczenia w próbie ¶cinania by³a o 340% wiêksza w porównaniu od separacji w wyniku rozkleszczenia.

Mo¿liwo¶æ przenoszenia obci¹¿enia przez tego typu z³¹cze zdeterminowana jest w g³ównej mierze grubo¶ci¹ szyjki i wielko¶ci¹ zamka w z³¹czu oraz stopniem umocnienia materia³u [5].

W innej za¶ ¶ciêtej próbce zauwa¿ono na powierzchni przet³oczenia w blasze górnej zapocz¹tkowane pêkniêcie (obszar zaznaczony na rysunku 8). W tym przypadku no¶no¶æ przekroju szyjki osi¹gnê³a granicê wytrzyma³o¶ci jednak odseparowanie blach nast¹pi³o w wyniku rozkleszczenia zamka. Przy cienkich blachach poni¿ej



Rys. 7. Przebieg odpowiedzi si³owej na œcinanie po³¹czenia dla ró¿nej formy zniszczenia miejsca przet³oczenia
Fig. 7. The force reaction characteristics on joint shearing for various methods of redrawing area destruction



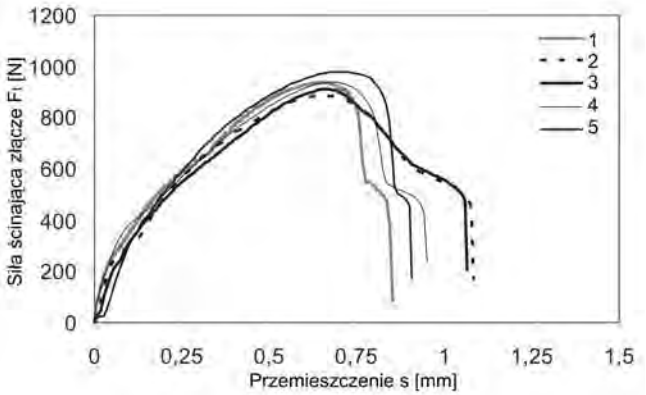
Rys. 8. Pêkniêcie przet³oczenia w blasze górnej po ca³kowitym rozdzieleniu po³¹czenia
Fig. 8. The upper sheet redrawing fracture once the joint is totally separated

1 mm niezwykle istotne s¹ warunki tarcia pomiêdzy powierzchniami roboczymi narzêdzi. Czêsto w przypadku trudnoœci w poprawnym uformowaniu po³¹czenia przet³oczeniowego miejsce scalenia mo¿e byæ nawil¿anie olejem [12]. W przeprowadzonych badaniach u¿yto blachy bez dodatkowego smarowania, o jakoœci odpowiadaj¹cej taœmie rozwijanej z krêgu, u¿ywanej podczas produkcji panelu suszarki AGD.

W przypadku dwóch z³¹czy dla pojedynczych po³¹czeñ z pierwszej serii prób œcinania pojawi³o siê czêœciowe naderwanie przet³oczenia i rozkleszczenie, co zosta³o odzwierciedlone nieco innym przebiegiem krzywej œcinania (krzywa 2 i 3 na rys. 9). Z wszystkich trzech serii prób œcinania dla piêciu miejsc scalenia uzyskano œrednie wartoœci maksymalnej si³y œcinaj¹cej z³¹cze w przedziale 880 – 980 N, co przedstawiono za pomoc¹ wykresu s³upkowego na rysunku 10. W przypadku po³¹czeñ podwójnych w wyniku œcinania odnotowano wzrost maksymalnej si³y niszcz¹cej po³¹czenie jak równie¿ wyd³u¿enie drogi przemieszczenia wymuszaj¹cego odkszta³cenie

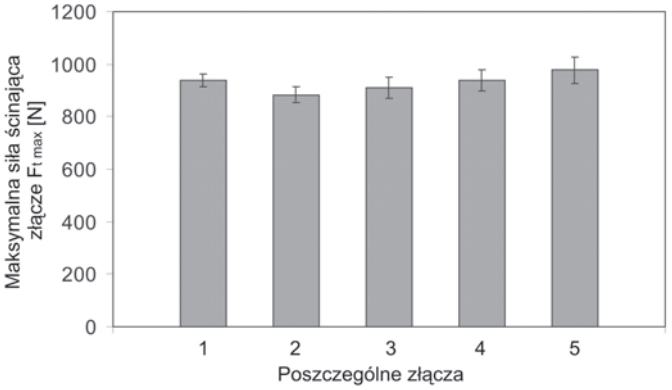
z³¹cza (rys. 11). Wartoœæ absorpcji energii ca³kowitego zniszczenia po³¹czenia podwójnego by³a wiêksza o 502% od wartoœci jak dla z³¹cza pojedynczego. Natomiast maksymalna si³a œcinaj¹ca z³¹cze dla po³¹czeñ podwójnych w porównaniu z pojedynczymi wzros³a o ~100%.

We wszystkich przypadkach rozdzielenie nast¹pi³o przez rozkleszczenie. Jednak w kilku przypadkach przebieg krzywej by³ nieznacznie „wyd³u¿ony" (rys. 12). Spowodowane to by³o czêœciowym pêkniêciem jednego przet³oczenia, lecz separacja blach ostatecznie nast¹pi³a przez rozkleszczenie. Œrednia wartoœæ maksymalnej si³y œcinaj¹cej z³¹cza podwójne waha³a siê od 1765 do 1828 N (rys. 13).



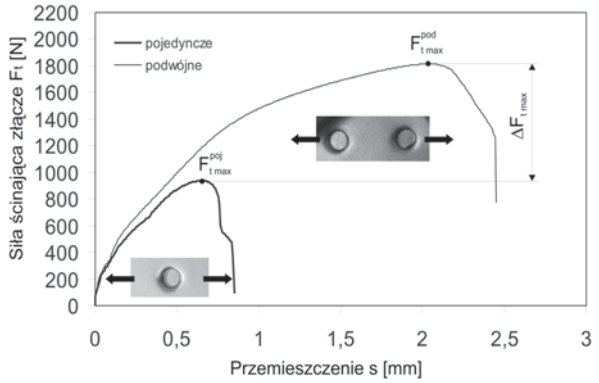
Rys. 9. Przebieg krzywej œcinania z³¹cza pojedynczego dla wybranych piêciu miejsc scalenia z jednej serii prób

Fig. 9. The shearing curve of single joint for five selected merging areas in a single series

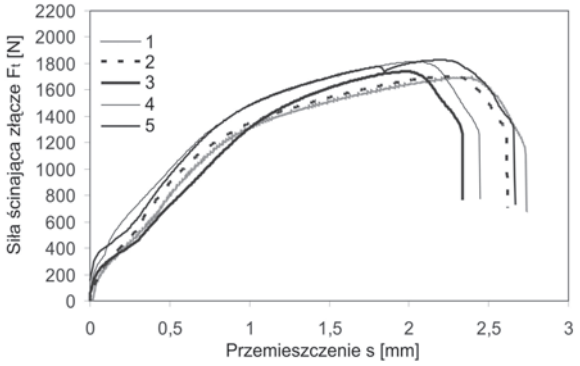


Rys. 10. Zestawienie wartoœci maksymalnych si³ otrzymanych z testu œcinania z trzech serii prób (po³¹czenia pojedyncze)

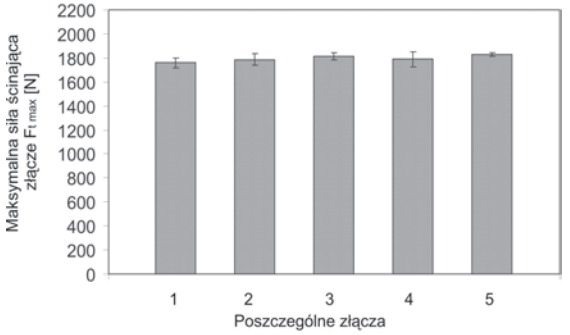
Fig. 10. The maximum force value chart for shearing test in three series (single joints)



Rys. 11. Porównanie przyk³adowego przebiegu krzywej si³y w próbie œcinania dla z³¹cza pojedynczego oraz podwójnego
Fig. 11. The comparison of an example force curve in shearing test for a single and dual joint



Rys. 12. Przebieg krzywej œcinania podwójnego z³¹cza dla wybranych piêciu miejsc scalenia z jednej serii prób
Fig. 12. The shearing curve of double joint for five selected merging areas in a single series



Rys. 13. Zestawienie wartoœci maksymalnych si³ otrzymanych z testu œcinania z trzech serii prób (po³¹czenia podwójne)
Fig. 13. The maximum force value chart for shearing test in three series (double joints)

Reasumuj¹c w wyniku separacji blach przez rozkleszczenie uzyskuje siê mniejsz¹ si³ê œcinaj¹c¹ z³¹cze w porównaniu z przypadkiem zniszczenia przez œciêcie przet³oczenia w miejscu przewê¿enia. Ostatniemu wymienionemu przypadkowi rozdzielenia towarzyszy wy¿sza maksymalna si³a œcinaj¹ca.

PODSUMOWANIE

W przypadku cienkich blach mo¿liwe jest ³¹czenie za pomoc¹ technologii przet³aczania rodzimym materia³em z zachowaniem szczególnej uwagi na czystoœæ powierzchni blach oraz narzêdzi. W trakcie ³¹czenia wykorzystano blachy z ró¿nych fragmentów taœmy stalowej z DC04, czynnik materia³owy równie¿ mógł mieæ wp³yw na formowanie i póŸniejsze przenoszenie obci¹¿eñ przez z³¹cza.

W miejscach gdzie przewidywana si³a obci¹¿aj¹ca z³¹cze jest wy¿sza od dopuszczalnej, dla pojedynczego z³¹cza z racji ma³ych wymiarów scalenia blach przet³aczaniem mo¿na zastosowaæ np. dwa w odpowiednim u³o¿eniu.

W procesie produkcyjnym, podczas monta¿u elementów z cienkich blach poni¿ej 1 mm niezwykle istotne jest zachowanie jednakowej jakoœci materia³u blach, warunków tarcia, wspó³osiowoœci matrycy i stempla, oraz dok³adnego i sztywnego prowadzenia narzêdzi.

Zasilanie si³owników podczas monta¿u elementów na automatycznej linii powinno byæ stale kontrolowane i utrzymywane na jednakowym poziomie.

LITERATURA

1. Gronostajski Z, Polak S. Quasi-static and dynamic deformation of double-hat thin-walled elements of vehicle controlled body crushing zones joined by clinching. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 8/2, 2008, s. 57–65.
2. Gronostajski Z., Polak S.: The application of clinching techniques to join impact energy absorbing thin-walled aluminium sections, Archives of Metallurgy and Materials, 54/3, 2009, s. 695–703.
3. Mucha J.: Wspó³czesne techniki ³¹czenia cienkich blach - zaciskanie przez wyt³aczanie (Clinching). Mechanik, 80/11, 2007, s. 932–939.
4. Mucha J.: The characteristics of H320LA steel sheet clinching joints. Advances in Manufacturing Science and Technology, 34/4, 2010, s. 47–61.
5. Mucha J.: The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint. Materials and Design, 2011, DOI: 10.1016/j.matdes.2011.05.045.
6. Mucha J., Kašèák ¼.: Wybrane aspekty kszta³towania okr¹g³ych po³¹czeñ przet³oczeniowych. Problemy eksploatacji - Maintenance Problems, 79/4, 2010, s. 29–38.
7. Mucha J, Kašèák L, Spišák E. Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11/1, 2011, s. 135–148.

8. Nong N., Keju O., Yu Z., Zhiyuan Q., ChangchenG T., Feipeng L.: Research on press joining technology for automotive metallic sheets. Journal of Materials Processing Technology, 137/1-3, 2003, s. 159–163.
9. Shiming G., Lothar B.: Mechanism of mechanical press joining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 34/5, 1994, s. 641–657.
10. Tubielewicz K., Turczyñski K., Tubielewicz M.: WskaŸniki wytrzyma³oœciowe po³¹czeñ kszta³towych prasowanych na zimno. Technologia i Automatyzacja Monta¿u, 55/3, 2004, s. 67–72.
11. Varis J P.: Ensuring the integrity in clinching process. Journal of Materials Processing Technology, 174/1-3, 2006, s. 277–285.
12. www.tox.pl (10.06.2011).

THE SHEARING STRENGTH ANALYSIS OF ROUND CLINCHING JOINTS MADE OF THIN DC04 SHEET

Summary

This paper presents the strength issue for round clinching joints made of 1.0338 (DC04) thin steel sheet. For sheets of thickness below 1 mm it is important to maintain high tool rigidity and cleanliness of joined element surfaces. Their shearing strength and redrawing joint behavior during separation test was analyzed during experimental researches. Based on achieved results, some heterogeneity in maximum joint breaking force was observed.

Keywords: joints, clinching, joint shearing.

Jerzy Montusiewicz*, Krzysztof Dziedzic*

NAUCZANIE TRÓJWYMIAROWEJ ANIMACJI NA KIERUNKU ETI

Streszczenie. W pracy przedstawiono zagadnienia dotycz¹ce nauczania animacji trójwymiarowej w programie Blender na kierunku Edukacja Techniczno-Informatyczna. Opisano ró¿nice wystêpuj¹ce pomiêdzy procesem animacji a symulacji, a nastêpnie zaprezentowano klasyfikacjê technik animacyjnych dostêpnych we wspó³czesnych programach komputerowych do trójwymiarowego modelowania i wprawiania obiektów w ruch. W koñcowej czêœci pracy zamieszczono przyk³ady animacji obiektów: deformacja kszta³tu obiektu poprzez zastosowanie krzywych IPO oraz wprawianie w ruch obiektu z wykorzystaniem szkieletu.
S³owa kluczowe: animacje 3D, Blender, edukacja.

WSTÊP

Grafika komputerowa, w której mo¿na wydzieliæ obiekty statyczne oraz ruchome jest pasjonuj¹c¹ dziedzin¹ wspó³czesnych dzia³añ w zakresie informatyki stosowanej. Opisanie wszystkich jej funkcji i zastosowañ, które pe³ni we wspó³czesnym œwiecie zajê³oby zbyt wiele miejsca i przekroczy³o zakres tematu tej pracy. Proces powstawania obiektów graficznych jest zale¿ny przede wszystkim od rodzaju grafiki, ale tak¿e w du¿ej mierze od narzêdzi dostêpnych w zastosowanym programie. Obecnie dziêki szybkiemu rozwojowi mo¿liwoœci obliczeniowych domowych komputerów, opracowaniu wielu programów do animacji i wprowadzaniu coraz doskonalszych technik animacyjnych zainteresowanie t¹ dziedzin¹ grafiki komputerowej lawinowo wzrasta. Animacje trójwymiarowe najczêœciej wykorzystywane s¹ w bran¿y filmowej do tworzenia efektów specjalnych, ale tak¿e w reklamach, poniewa¿ dodatkowe efekty stworzone komputerowo s¹ bardzo charakterystyczne i szybciej zapadaj¹ w pamiêci.

Wychodz¹c naprzeciw tym trendom na kierunku Edukacja Techniczno-Informatyczna na II° studiów wprowadzono dla studentów specjalnoœci zwi¹zanej z grafik¹ komputerow¹ zajêcia poœwiêcone animacji trójwymiarowej. Przedmiot sk³ada siê z wyk³adu, laboratorium, a w kolejnym semestrze z projektu. Studenci zainteresowani tymi zagadnieniami mog¹ równie¿ pisaæ z tego zakresu prace dyplomowe. G³ówne cele, jakie przyœwiecaj¹ prowadz¹cym zajêcia to: wprowadzenie studentów w terminologiê

* Katedra Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

dotycz¹c¹ animacji trójwymiarowych, omówienie podstawowych technologii animacji, wykonanie przez studentów kilku podstawowych æwiczeñ w oparciu o przygotowane instrukcje laboratoryjne, wykonanie samodzielnych projektów przy pomocy nowych technik animacji oraz zachêcenie studentów do dalszego zg³êbiania tej tematyki.

PREZENTACJA PROGRAMU BLENDER

Na naszym rynku jest wiele polskojêzycznych programów komercyjnych, które umo¿liwiaj¹ modelowanie obiektów przestrzennych oraz ich animacjê. Najwa¿niejsze z nich to: Softimage XSI (np. efekty specjalne w filmie Terminator II), 3ds Max (np. film animowany pt. Katedra T. Babiñskiego), Maya, Cinema 4D firmy MAXON oraz Zbrush firmy Pixologic (np. polska gra WiedŸmin). Trzy pierwsze zosta³y wykupione przez firmê Autodesk, która jest równie¿ w³aœcicielem programu AutoCAD

Wœród programów niekomercyjnych najbardziej atrakcyjnie pod wzglêdem swoich mo¿liwoœci przedstawia siê program Blender, który jest obecnie rozpowszechniany na licencji GNU GPL przez fundacjê Blender Foundation po wykupieniu praw od firmy Not a Number (NaN) w 2002 roku. Program jest dostêpny w wielu ró¿nych systemach, miêdzy innymi MS Windows, Mac OS X oraz Linux w wersji 32 oraz 64 bitowej.

Blender posiada bardzo szeroki wachlarz narzêdzi do modelowania trójwymiarowego. Oprócz standardowych narzêdzi modelarskich w Blenderze zawarte s¹ te¿ zaawansowane modu³y do teksturowania, projektowania oœwietlenia oraz renderowania. Ponadto program posiada zaawansowane technologicznie modu³y do animacji, generowania efektów specjalnych oraz przeprowadzania symulacji. Blender pozwala tworzyæ i wprawiaæ w ruch oprócz klasycznych obiektów 3D równie¿ takie, jak: p³yny, tkaniny, w³osy oraz generowaæ ró¿ne zachowania cz¹stek. Pewn¹ trudnoœci¹ dla wielu pocz¹tkuj¹cych, ale tak¿e zaawansowanych grafików jest doœæ nietypowy interfejs, co w du¿ej mierze odstrasza od bli¿szego zapoznania siê z tym bardzo dobrym programem. Blender Foundation dla przekonania potencjalnych u¿ytkowników do swojego produktu stworzy³a 15 minutowy film pt. „Big Buck Bunny", udowadniaj¹c wszystkim jaki potencja³ drzemie w tym programie.

Program Blender, którego podstawowa wersja jêzykowa to wersja angielska, mo¿na przestawiæ na polecenia pisane po polsku. Zazwyczaj jednak u¿ytkownicy tego nie robi¹ ze wzglêdu na fakt, ¿e w Internecie dostêpnych jest du¿o pomocy dydaktycznych, które zamieszczaj¹ u¿ytkownicy z ca³ego œwiata. Wiele praktycznych informacji o programie mo¿na znaleŸæ na stronach internetowych, np. Blenderownia.pl [18]. Na polskim rynku ukaza³o siê równie¿ kilka pozycji ksi¹¿kowych napisanych przez krajowych autorów [1, 2, 4, 5], jak i w polskim t³umaczeniu [7, 9] oraz prace angielskojêzyczne [3, 6]. Wiele ciekawych opisów mo¿na równie¿ znaleŸæ w czasopismach Komputer Œwiat Ekspert [10, 12, 13, 14, 15], 3D FX Magazyn [11, 16] oraz internetowym BlenderArt Magazine [17].

KLASYFIKACJA ANIMACJI TRÓJWYMIAROWYCH

Animacja komputerowa umo¿liwia wprowadzenie obiektów w ruch bez wnikania w istotê zjawisk fizycznych wystêpuj¹cych w obiekcie lub otoczeniu. Mo¿na na przyk³ad wys³aæ obiekt ku górze nie pokazuj¹c, ¿e istnieje si³a ci¹gu, która bêdzie pokonywa³a si³ê grawitacji, lub rozci¹gn¹æ belkê bez jej zerwania maj¹c œwiadomoœæ, ¿e ¿aden materia³ konstrukcyjny na bazie stopu metalu nie wytrzyma³by takiego wyd³u¿enia. Animacja mo¿e pokazywaæ sekwencje koniecznych ruchów do monta¿u elementów sk³adowych z³o¿onego obiektu konstrukcyjnego nie zwracaj¹c uwagi na to, ¿e elementy „wisz¹" w przestrzeni trójwymiarowej i nie spadaj¹. Ponadto animacja czêsto wykorzystywana jest do dokumentowania procesu wytwarzania lub naprawy produktu, skracaj¹c przy tym rzeczywiste czasy trwania poszczególnych operacji. Obecnie animacja wykorzystywana jest najczêœciej w reklamie produktów oraz w filmach animowanych, ignoruj¹c rzeczywiste prawa fizyki. Podsumowuj¹c, animacja komputerowa nie jest procesem dok³adnym, odzwierciedla jedynie bezpoœrednie pomys³y twórcy.

Symulacja nie jest synonimem terminu animacja. Symulacja komputerowa w sensie wykonywanych obliczeñ jest metod¹ dok³adn¹, poniewa¿ operuje na modelu matematyczno-fizycznym rzeczywistego obiektu i uwzglêdnia relacje czasowe, które tam wystêpuj¹. Symulacja, poprzez przypisanie do obiektu w³aœciwoœci materia³owych oraz wprowadzenie w jego otoczenie pola rzeczywistych si³, generuje precyzyjny model komputerowy zachowania obiektu w przestrzeni wirtualnej i pokazuje go na monitorze komputera. Dok³adnoœæ obliczeñ symulacyjnych jest uzale¿niona przede wszystkim od zastosowanej metody rozwi¹zywania powsta³ych równañ ró¿niczkowych opisuj¹cych analizowan¹ sytuacjê. U¿ytkownik ma na to wp³yw wybieraj¹c stosown¹ metodê do tworzonej sceny.

W programach do tworzenia animacji trójwymiarowej u¿ytkownik czêsto traci rozeznanie, która z zastosowanych technik wprawiania obiektu w ruch jest animacj¹, a która symulacj¹. Bardzo czêsto w praktyce komputerowej o obu procesach mówi siê po prostu animacja.

We wspó³czesnych programach komputerowych mamy wiele ró¿norodnych technik komputerowych s³u¿¹cych do wprawiania wymodelowanych obiektów 3D w ruch. Istniej¹ce techniki animacji 3D mo¿na podzieliæ na kilka podstawowych grup:

- wykorzystuj¹ce ruch po œcie¿ce,
- wykorzystuj¹ce technikê klatek kluczowych,
- wykorzystuj¹ce ruch elementów sk³adowych obiektu z u¿yciem szkieletu,
- ruch obiektów typu cz¹stki,
- ruch obiektów z uwzglêdnieniem ich logicznego powi¹zania,
- animacjê wykorzystuj¹c¹ materia³y filmowe typu wideo (rotoscoping),
- animacjê postaci poprzez technikê motion capture,
- animacjê zwan¹ morfingiem.

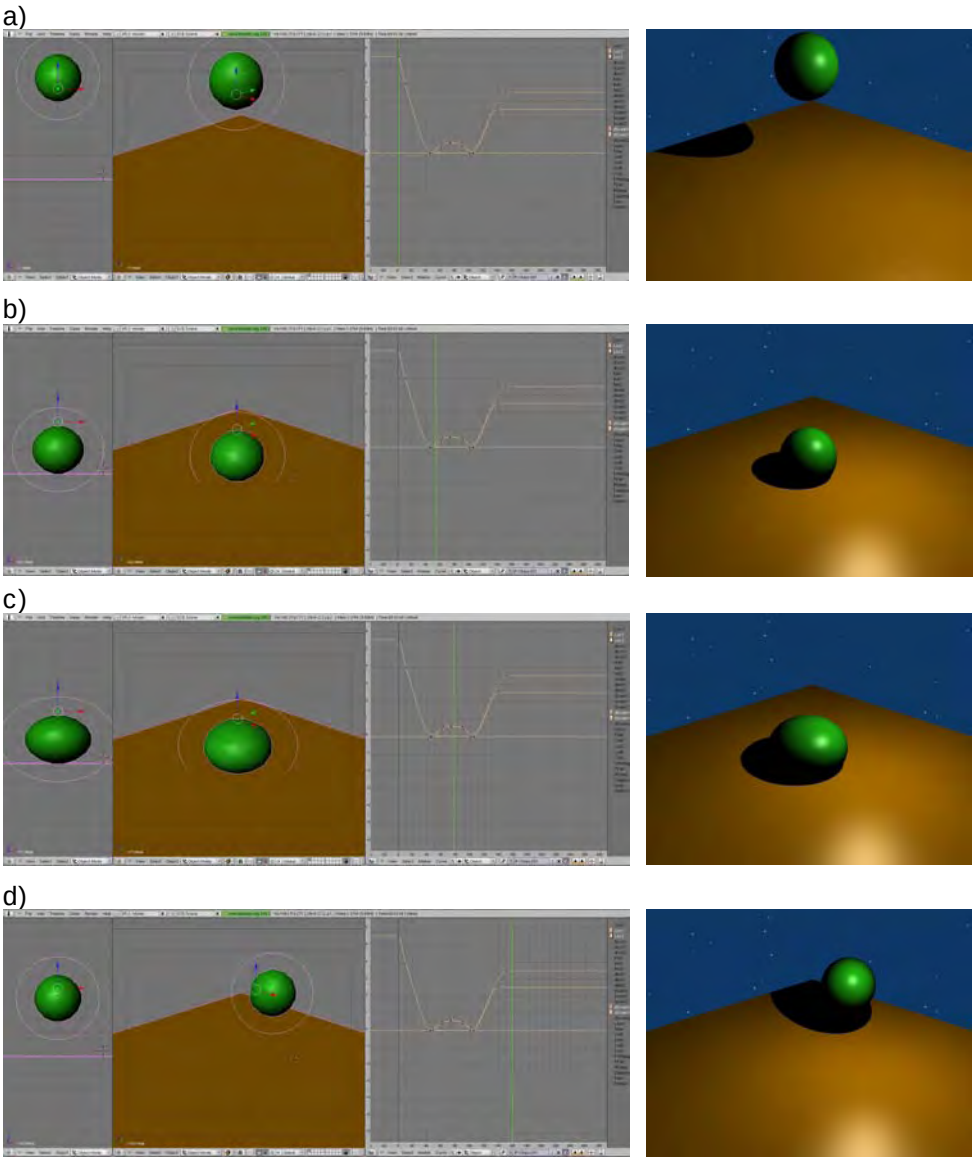
Tworzone animacje komputerowe s¹ uzale¿nione od typu obiektu, którego dotycz¹. Jego w³aœciwoœci bêd¹ decydowa³y o tym, które atrybuty mog¹ podlegaæ zmianie. Gdy obiektem jest kamera, przez któr¹ ogl¹damy zaprojektowan¹ scenê, istnieje mo¿liwoœæ, oprócz wprawiania jej w ruch, tak¿e zmiany ogniskowej obiektywu czy wartoœci przys³ony. W przypadku obiektu typu œwiat³o mo¿emy dodatkowo zmieniaæ takie jego parametry, jak kolor i jasnoœæ. Programy pozwalaj¹ równie¿ zmieniaæ tekstury powlekaj¹ce powierzchnie obiektów geometrycznych, czy parametry „œwiata", w którym rozgrywa siê zamodelowana akcja.

ZAKRES TEMATYCZNY ÆWICZEÑ DO ANIMACJI

Do prowadzenia zajêæ laboratoryjnych z przedmiotu Animacja 3D opracowano dla studentów zestaw instrukcji æwiczeniowych obejmuj¹cych u¿ycie podstawowych technik animacji realizowanych w programie Blender [8]. W ramach przedmiotu pominiête s¹ zagadnienia z modelowania. Æwiczenia wykonywane s¹ na gotowych obiektach wymodelowanych wczeœniej. Instrukcje pogrupowano tematycznie zgodnie z klasyfikacj¹ technik animacji dostêpnych w programie, a æwiczenia zosta³y opatrzone szczegó³owym opisem i ilustracjami obrazuj¹cymi poszczególne etapy ich wykonywania. Instrukcje wraz z potrzebnymi plikami zosta³y udostêpnione studentom na stronie internetowej w celu samodzielnego rozwijania umiejêtnoœci. Pracê z programem studenci zaczynaj¹ od poznania dostêpnych w programie technik animacji. Na kolejnych zajêciach omawiane s¹ szczegó³owo podstawy ka¿dej z nich, miêdzy innymi animacja po œcie¿ce, wed³ug klatek kluczowych, animacja za pomoc¹ systemu „koœci", a tak¿e efekty cz¹steczkowe czy symulacja cieczy.

Doskona³ym przyk³adem realizowanych æwiczeñ jest animacja z u¿yciem edytora krzywych IPO (skrót pochodzi od s³owa interpolacja), który jest jednym z rodzajów animacji zastosowania klatek kluczowych. Dziêki temu mo¿emy wskazywaæ np. punkt pocz¹tkowy i koñcowy animacji, a program wyliczy jej punkty poœrednie. Poszczególne krzywe dodawane s¹ do animowanych obiektów w edytorze IPO, a nastêpnie nadawanie im odpowiednie wartoœci, np.: po³o¿enie na osi X, Y, Z, zmiana k¹ta obrotu wzglêdem osi X, Y, Z. W ten sposób obiekty w czasie mo¿na poruszaæ, obracaæ lub je deformowaæ. Po³o¿enie obiektu przypisywane jest do klatek, które nastêpnie tworz¹ animacjê. Na rys. 1 pokazano kolejne etapy zastosowania krzywych IPO do utworzenia animacji spadaj¹cej kulki, która po zetkniêciu siê z pod³o¿em ulega deformacji i odbiciu. W celu lepszego zobrazowana deformacji kulki wprowadzono przesadnie du¿e wartoœci, aby by³y dobrze widoczne w czasie pokazu. Na rys. 1a) widzimy stan pocz¹tkowy obiektu, od którego zaczyna siê ruch. Jak mo¿na zauwa¿yæ okno programu jest podzielone na trzy obszary: po lewej obserwujemy widok z góry, w œrodku ustawiony jest widok 3D z kamery, po prawej umieszczone jest okno edytora krzywych IPO, w którym widzimy krzywe definiuj¹ce ruch kulki. Pionowa linia wyznacza aktualn¹ klatkê, w której siê znajdujemy. Na kolejnych rysunkach 1b), 1c), 1d)

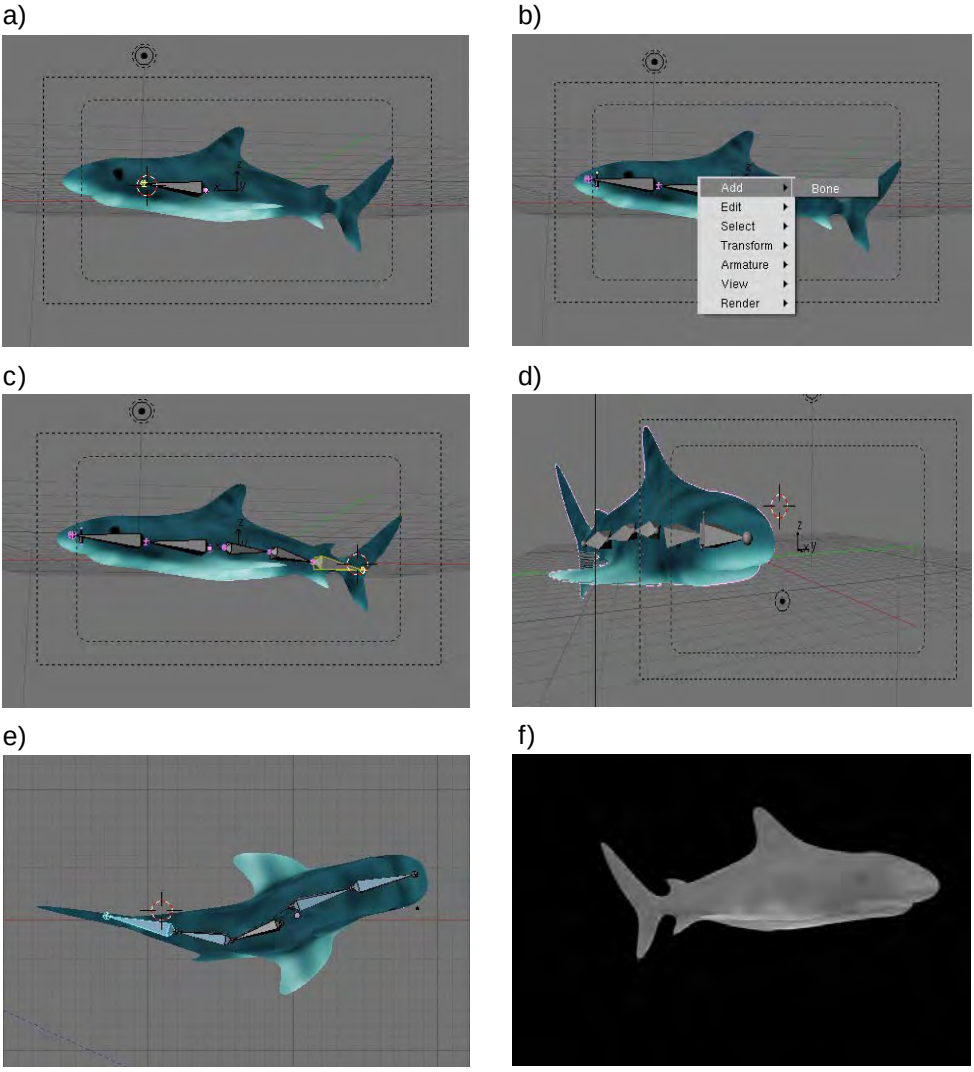
widzimy zmianê po³o¿enia linii pokazuj¹cej klatkê, co od razu przenosi siê na zmianê po³o¿enia i wygl¹d animowanej kulki. Po prawej stronie pokazano efekt wykonanej animacji dla wskazanej klatki. Wygenerowany ogl¹d po renderingu pokazuje cieñ rzucany przez kulkê, co znacznie u³atwia nam okreœlenie po³o¿enia kulki wzglêdem



Rys. 1. Kolejne etapy animacja spadaj¹cej kulki, która po zetkniêciu z pod³o¿em ulega deformacji oraz odbija siê od niego: a) stan pocz¹tkowy – klatka 0, b) stan poœredni – klatka 50, c) maksymalna deformacja kulki – klatka 75, d) stan koñcowy – klatka 160

p³aszczyzny, na któr¹ spada. Na rys. 1b) pokazano animacje w punkcie poœrednim – klatka 50, rys. 1c) ukazuje maksymaln¹ deformacjê kulki w klatce nr 75, a na rys. 1d) przedstawiono po³o¿enie koñcowe kulki w klatce o numerze 160 (kulka ponownie znajduje siê powy¿ej powierzchni).

Maj¹c na uwadze zró¿nicowany poziom umiejêtnoœci informatycznych studentów stopieñ trudnoœci kolejnych æwiczeñ laboratoryjnych jest stopniowo zwiêkszany. Æwiczenia trudniejsze wymagaj¹ zastosowania jednoczeœnie ró¿nych technik anima-



Rys. 2. Kolejne etapy animacja rekina z u¿yciem systemu koœci: a) stan pocz¹tkowy, b) dodawanie koœci, c) kompletny szkielet, d) ruch g³ow¹, e) ruch ogonem, f) klatka z animacji po renderingu

cji oraz po³¹czenia ich w jeden ci¹g zdarzeñ. Takie podejœcie ma to na celu przygotowanie studentów do wykonywania samodzielnie projektu animacji w kolejnym semestrze. Studenci wykorzystuj¹c zdobyt¹ wiedzê i poznane techniki maj¹ zaprojektowaæ i wykonaæ animacjê wed³ug w³asnego scenariusza. Jako przyk³ad mo¿na podaæ animacjê z u¿yciem systemu „koœci". Animacja ta polega na nadaniu trójwymiarowemu modelowi obiektu uk³adu „koœci" tworz¹cych szkielet, dziêki któremu mo¿emy wprawiaæ w ruch wybrane fragmenty modelu 3D. Do takich æwiczeñ mo¿na wykorzystaæ gotowe modele dostêpne na forach internetowych dotycz¹cych programu Blender [17, 18]. Nastêpnie przy wykorzystaniu np. animacji wed³ug klatek kluczowych mo¿emy przygotowaæ zaplanowan¹ animacjê. Technika ta bardzo czêsto wykorzystywana jest do animowania ruchu postaci. Jako przyk³ad, na rys. 2 pokazane s¹ kolejne etapy tworzenia szkieletu oraz nadawania ruchu modelowi rekina z wykorzystaniem systemu „koœci".

Zamieszczone przyklady pokazyj¹ jakie efekty koñcowe mog¹ uzyskaæ studenci na zajêciach laboratoryjnych wykorzystuj¹c przygotowane instrukcje laboratoryjne do animacji w programie Blender. Fundacja Blender nieustannie rozwija swój program dziêki czemu powstaj¹ nowe oraz coraz bardziej dopracowane techniki animacji.

ZAKOŃCZENIE

Komputerowa animacja trójwymiarowa to obecnie bardzo szybko rozwijaj¹ca siê dziedzina grafiki komputerowej, któr¹ mo¿na realizowaæ przy u¿yciu wielu ró¿nych programów wybieraj¹c stosowne narzêdzia i opcje oraz ustawiaj¹c odpowiednie wartoœci parametrów. Pokazanie na raz dzia³ania du¿ej liczby poleceñ, przy jednoczesnym wprowadzeniu nowego programu stanowiæ mo¿e du¿e obci¹¿enie dla studentów uczestnicz¹cych w zajêciach. Z tego wzglêdu æwiczenia laboratoryjne przygotowano tak, aby do minimum ograniczyæ proces modelowania, wykorzystuj¹c do animacji obiekty istniej¹ce w programie, tzw. *prymitywy* oraz pliki dostêpne na stronach internetowych.

Przygotowywane przez studentów projekty oraz prace dyplomowe œwiadcz¹ o tym, ¿e wielu z nich opanowa³o ró¿norodne techniki animacji oraz symulacji na wysokim poziomie i na dobre „zarazili" siê t¹ dziedzin¹ grafiki. Wykonane przez nich prace wymaga³y równie¿ opanowania wiedzy z zakresu modelowania, mapowania, projektowania oœwietlenia oraz renderowania.

Uzyskane efekty dydaktyczne na przestrzeni dwóch lat prowadzenia zajêæ pozwalaj¹ stwierdziæ, ¿e wprowadzenie nowego programu do grafiki trójwymiarowej mo¿na z powodzeniem rozpocz¹æ od nauki narzêdzi do projektowania animacji i tworzenia symulacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Bociek B., Blender. Podstawy modelowania. Gliwice, 2007, wyd. Helion, ss. 312
2. Halber M., Blender. Æwiczenia praktyczne. Gliwice, 2008, wyd. Helion, ss. 232
3. Hess R.: Animating with Blender, Focal Press, Elsevier Inc., 2009, ss. 366
4. Kolmaga J., Blender. Od planowania, modelowania oraz teksturowania do animacji i rendering. Praktyczne projekty. Gliwice 2008, wyd. Helion, ss. 328
5. Kuklo K., Kolmaga J.., Blender. Kompendium. Gliwice, 2007, wyd. Helion, ss. 880
6. Mulle T.: Bounce, Tumble, and Splash, Simulating the Physical World with Blender 3D, Wiley Publishing, Inc., 2008, ss. 403
7. Mullen T.: Blender Mistrzowskie animacje 3d, wyd. Helion, Gliwice 2010, ss. 496
8. Montusiewicz J., Dziedzic K.: Grafika 3D – animacja. Zestaw æwiczeñ laboratoryjnych, PL WPT KPT, Lublin 2009, ss. 34
9. Roosendaal T., Selleri S.: Oficjalny podrêcznik Blender, wyd. Helion 2005, ss. 452
10. Dziomdziora M., Nadchodzi trzeci wymiar, Komputer Œwiat Ekspert 2/2007, ss. 40-43
11. Grzegorczyn A.: Blender, Normal Map Workflow & Blender 3D, 3D FX Magazyn. nr 04/2008, ss. 50-52
12. Najpierw podstawy, poznajemy Blender, cz. 1, art. redakcyjny, Komputer Œwiat Ekspert, nr 08/2006, ss. 32-35
13. Poœwiata w Blenderze, art. redakcyjny, Komputer Œwiat Ekspert, nr 11/2007, s. 46
14. Symulacja natury, porady Blender, art. redakcyjny, Komputer Œwiat Ekspert, nr 12/2006, ss. 36-39
15. Szybki kurs animacji, poznajemy Blender, cz. 2, art. redakcyjny, Komputer Œwiat Ekspert, nr 09/2006, ss. 32-35
16. Vazquez P.: P³yñ Merlinie, p³yñ, 3D FX Magazyn. nr 02/2008, ss. 46-47
17. http://blenderart.org/issues/
18. www.blender.art.pl

TEACHING 3D ANIMATION WITHIN THE ETI FIELD OF STUDY

Summary

The study shows issues concerning the teaching of 3D animation using the Blender program to students of the education in technology and informatics. Differences between the processes of animation and simulation are described, followed by a classification of animation techniques available in contemporary computer programs for 3D modelling and animating objects. The final part of the study gives examples of animation: deformation of the shape of an object with IPO curves and animating an object by using riggings.

Keywords: 3D animations, Blender, education.

Zygmunt Lenik*

ZASTOSOWANIE MULTIMEDIALNYCH ŒRODKÓW DYDAKTYCZNYCH W PROCESIE NAUCZANIA

Streszczenie. W artykule omówiono problematykê stosowania multimedialnych œrodków dydaktycznych w procesie nauczania. Zwrócono uwagê zarówno na pozytywne aspekty takich dzia³añ, jak i na mo¿liwe negatywne wp³ywy.

S³owa kluczowe: komputer, proces nauczania, technologia informacyjna, multimedialne œrodki dydaktyczne.

1. WSTÊP

Wykorzystanie komputera i wdro¿enie do pracy w szkole technologii informacyjnych [1] z ich znacznym potencja³em przetwarzania oraz magazynowania informacji nie zmienia podstawowej struktury programu kszta³towania umiejêtnoœci informacyjnych w procesie edukacji. W rzeczywistoœci wprowadzenie technologii informacyjnej do szkó³ nie oznacza, ¿e nale¿y wymagaæ od uczniów przyswojenia umiejêtnoœci zgo³a odmiennych, ni¿ nabywanych w dotychczasowym procesie kszta³cenia. W wyniku coraz szerszego stosowania komputerów w nauczaniu, istnieje potrzeba nowego spojrzenia na okreœlenie celów w kszta³ceniu wspieranym technologi¹ komputerow¹. Doceniaj¹c rolê multimediów we wspó³czesnym œwiecie szko³a powinna stworzyæ ucz¹cym siê pe³ne mo¿liwoœci zapoznania siê z podstawami technologii informacyjnej, a ka¿dy uczeñ powinien mieæ szansê zetkniêcia siê z t¹ technologi¹ na swojej drodze zdobywania wykszta³cenia ogólnego.

Reforma oœwiaty jak i samo wyra¿enie „nowoczesna szko³a" niejako obliguje placówkê do posiadania i sta³ego modernizowania pracowni komputerowej. Mo¿liwoœæ zakupu wyposa¿enia niezbêdnego do stworzenia takiego zaplecza nie jest jednak jednoznaczna z mo¿liwoœciami finansowymi bud¿etów szkolnych, czy te¿ czêœci¹ bud¿etów gminnych przeznaczonych na szkolnictwo. Wci¹¿ nie wszystkie szko³y posiadaj¹ odpowiedni sprzêt, by móc w pe³ni realizowaæ zadania programowej œcie¿ki medialnej lub organizowaæ pozalekcyjne zajêcia komputerowe. Mimo powszechnego dostêpu do multimedialnych œrodków dydaktycznych na ryku oraz znacz-

* Wydzia³ Podstaw Techniki, Katedra Metod i Technik Nauczania, Politechnika Lubelska.

nego wzrostu efektywnoœci nauczania przy ich stosowaniu, z przyczyn g³ównie finansowych, nie „dotar³y" one do wszystkich szkó³.

Istotn¹ spraw¹ jest tak¿e wykszta³cenie nauczycieli oraz studentów kierunków nauczycielskich postaw proinformatycznych z zakresu wykorzystania w edukacji nowoczesnych technologii informacyjnych.

2. DOSTÊPNOŒÆ I POWSZECHNOŒÆ MULTIMEDIALNYCH POMOCY NAUKOWYCH

Prace nad multimedialnymi programami dydaktycznymi rozpoczê³y siê ju¿ na pocz¹tku lat dziewiêædziesi¹tych XX wieku. Wtedy to zarysowa³y siê dwa kierunki prac nad tymi programami. Jednym z nich by³o tworzenie programów, których celem jest stymulowanie do myœlenia systemowego przez badanie zjawisk i procesów.

Tego rodzaju œrodki dydaktyczne wprowadzaj¹ w zrozumienie funkcjonowania otaczaj¹cych nas systemów. Pozwalaj¹ te¿ kojarzyæ znacznie oddalone od siebie fakty i zdarzenia, przez co przyczyniaj¹ siê do rozwijania myœlenia twórczego. Wiedza zawarta w tego typu programach ma charakter interdyscyplinarny, co pozwala na ukazanie wielop³aszczyznowoœci i wspó³zale¿noœci wielu systemów. Pomoce oparte na technice hipertekstowej s¹ drugim rodzajem edukacyjnych programów komputerowych [8].

Obecnie pomys³owoœæ producentów multimedialnych programów edukacyjnych nie zna granic. Przeœcigaj¹ siê oni w treœci, stylu, a nade wszystko w formie tworzonych aplikacji. W tego typu programach komputerowych z dydaktycznego punktu widzenia szczególnie wa¿ne jest zagadnienie strony graficznej. Jest to istotne, gdy¿ stanowi zazwyczaj g³ówny sk³adnik formy programu, który jednoczeœnie z poprawn¹ koncepcj¹ wychowawcz¹ i w³aœciwie dobran¹ treœci¹ decyduje o jego jakoœci. Nale¿y podkreœliæ, ¿e prawie wszystko, co dotyczy zasad budowy i tworzenia oprogramowania dydaktycznego, stanowi jednoczeœnie podstawowe kryteria jego oceny. Coraz czêœciej do przeprowadzenia oceny komputerowych programów dydaktycznych, stymuluj¹cych dzia³ania twórcze, stosuje siê kryterium funkcji, jakie te programy pe³ni¹ w procesie kszta³cenia.

W przygotowywaniu multimedialnych nowinek edukacyjnych specjalizuje siê m.in. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne oraz Wydawnictwo Nowa Era, które opracowuje produkty edukacyjne w postaci zestawów p³yt z treœciami uzupe³niaj¹cymi tradycyjny materia³ podrêcznikowy. Wspó³pracuje ono z twórcami tzw. edu-ROM-ów – Young Digital Poland [10]. Ich programy multimedialne charakteryzuj¹ siê nowoczesnym sposobem przekazu, utrwalania oraz sprawdzania wiedzy pozwalaj¹ce m.in. na samodzieln¹ pracê ucznia w domu.

Pogramy edukacyjne nie musz¹ byæ ani drogie, ani nudne. Nie mog¹ one dublowaæ zawartoœci podrêcznika, lecz s¹ jego uzupe³nieniem. Oprócz æwiczeñ uczeñ mo¿e w nich znaleŸæ ciekawostki powi¹zane z ksi¹¿kowymi informacjami, filmami, animacjami oraz zdjêciami ilustruj¹cymi i wyjaœniaj¹cymi pogl¹dowo zagadnienia z pod-

rêcznika. Komputerowa lekcja sk³ada siê zwykle z krótkiego przedstawienia podstawowych informacji, filmowego lub interaktywnego rozwiniêcia oraz testów sprawdzaj¹cych. Zalet¹ tych opracowañ jest mo¿liwoœæ wyboru kolejnoœci zapoznawania siê z materia³em, a uczeñ nie ma obowi¹zku korzystania ze wszystkich pomocy – mo¿e siê na przyk³ad ograniczyæ siê do wykonania wybranych æwiczeñ czy przejrzenia animacji. Z myœl¹ o starszych uczniach przed rokiem szkolnym 2006/07 wprowadzono na rynek multimedialny program edukacyjny – Szko³a œrednia na CD [6]. W pakiecie zajmuj¹cym dwie p³yty CD-ROM u¿ytkownicy znajd¹ zagadnienia z zakresu szko³y œredniej, z przedmiotów: jêzyk polski, historia, matematyka, fizyka, chemia, biologia i geografia. Program zawiera prawie 1000 artyku³ów i wyk³adów, wzbogaconych 110 sekwencjami filmowymi, 800 zdjêciami i rysunkami oraz 200 mapami. Ponadto udostêpniono testy wykorzystywane w poprzednich latach podczas egzaminów wstêpnych na ró¿nego typu uczelnie (m.in. Uniwersytet Warszawski, Politechnikê Warszawsk¹) u³atwiaj¹cych sprawdzenie zdobytej wiedzy. W programie znajduje siê te¿ omówienie wszystkich epok literackich, od staro¿ytnoœci po literaturê wspó³czesn¹. Uwagê nale¿y zwróciæ równie¿ na du¿¹ popularnoœæ multimedialnych encyklopedii, których oferta jest niezwykle bogata. Istniej¹ równie¿ encyklopedie internetowe, bezp³atne b¹dŸ z mo¿liwoœci¹ korzystania po dokonaniu op³aty i zarejestrowaniu siê.

Obok gotowych aplikacji multimedialnych uzupe³niaj¹cych programy nauczania nauczyciele tworz¹ tak¿e w³asne pomoce wykorzystywane w kszta³ceniu. Wynika to z faktu, ¿e ka¿dy z popularnych pakietów biurowych (*Microsoft Offiice, Corel WordPerfekt Office, Lotus Smart Suite, Star Division Office, itp.*) zawiera aplikacjê prezentacyjn¹ [3, 5]. Samodzielne jej wykonanie nie nale¿y do zbyt trudnych zadañ, natomiast wa¿ne jest osi¹gniêcie za³o¿onego rezultatu co mo¿na uzyskaæ dobieraj¹c odpowiednie œrodki techniczne i treœci. Powodzenie prezentacji multimedialnych jest zale¿ne m. in. od prostoty ich obs³ugi oraz zawartego potencja³u edukacyjnego. Ponadto narzêdzia umo¿liwiaj¹ce ³¹czenie tekstu i elementów graficznych z efektami animacji i dŸwiêku pozwalaj¹ na uatrakcyjnienie pokazu oraz przyci¹gniecie uwagi podczas jego trwania. Programy do tworzenia prezentacji multimedialnych z uwagi na powszechnoœæ i popularnoœæ przyczyniaj¹ siê przede wszystkim do czêstszego stosowania prezentacji jako œrodka dydaktycznego oraz du¿ej popularnoœci tej formy demonstrowania wiedzy.

Wa¿nym zagadnieniem jest kompleksowe opracowanie standardów multimedialnych. Obecnie obserwujemy etapowe opracowywanie standardów dla wszystkich systemów multimedialnych. Funkcjonuj¹ce na rynku standardy mo¿na podzieliæ na telekomunikacyjne i informatyczne [2]. Systemy telekomunikacyjne to:

- wideotelefonie,
- systemy telekonferencyjne.

Do systemów informatycznych zalicza siê:

- biurowe,
- przeznaczone do archiwizacji i wyszukiwania informacji,

- hipermedia (systemy przeznaczone do rozrywki, edukacji i innych komercyjnych zastosowañ).

W tabeli 1 zestawiono klasyfikacjê systemów multimedialnych z podaniem przyk³adów ich zastosowañ.

Tabela 1. Klasyfikacja systemów multimedialnych [2]
Table 1. Classification of multimedia systems [2]

Klasa systemu	Typ danych	Przykłady zastosowań
Systemy konwersacyjne	Ruchome obrazy Dźwięk Dane cyfrowe Dokumenty	▪ Wideotelefonia, wideokonferencje, systemy informacyjne audio/wideo ▪ Transmisje dźwięku różnej jakości ▪ Szybkie przesy³anie dużej ilości danych cyfrowych ▪ Przesy³anie obrazów wysokiej jakości, inne systemy przesy³ania dokumentów
Systemy przesyłania wiadomości	Ruchomy obraz i dźwięk Dokumenty	▪ Poczta elektroniczna - wideo ▪ Poczta elektroniczna - teksty
Systemy wyszukiwania informacji	Teksty, dane, grafika, dźwięk, obrazy nieruchome i ruchome	• Systemy wideotekstu, systemy wyszukiwania informacji wideo dla dokumentów i obrazów
Systemy udostępniania informacji bez interakcyjnego udziału użytkownika	Wideo	▪ Telewizji wysokiej jakości (HDTV)
	Teksty, grafika, nieruchome obrazy	▪ Systemy dystrybucji instrumentów
	Dane	▪ Systemy szybkiej dystrybucji danych cyfrowych
	Wideo	▪ Informacyjny serwis wideo
Interakcyjne systemy udostępniania informacji	Teksty, grafika, dźwięk, nieruchome obrazy	▪ Wideografia

3. PERCEPCJA PRZEZ UCZNIÓW MULTIMEDIALNYCH ŒRODKÓW DYDAKTYCZNYCH

Z technologi¹ informacyjn¹ zwi¹zana jest jedna z g³ównych umiejêtnoœci kszta³conych w szkole – poszukiwania, porz¹dkowania i wykorzystywania informacji z ró¿nych Ÿróde³. Technologia informacyjna mo¿e wspomagaæ i wzbogacaæ wszechstronny rozwój uczniów, zwiêkszaæ mo¿liwoœci rozwijania umiejêtnoœci poprzez u³atwienie docierania do rzeczywistych zasobów informacji. Wzmaga tym samym twórcz¹ aktywnoœæ uczniów, pomaga w rozwijaniu zainteresowañ oraz kierowania w³asnym rozwojem. Wzbogaca te¿ umiejêtnoœci porozumiewania siê. Kszta³towanie w³aœciwego korzystania z tej technologii to równie¿ wyrabianie œwiadomoœci bezpiecznego

pos³ugiwania siê technik¹. Stopniowe wprowadzanie uczniów w pos³ugiwaniu siê technologi¹ informacyjn¹ umo¿liwia realizacjê zadañ szko³y na kolejnych etapach kszta³cenia, ukierunkowuj¹c jednoczeœnie ich zainteresowania i uzdolnienia oraz w konsekwencji pomagaj¹c w dokonaniu ¿yciowych wyborów kierunków dalszego kszta³cenia, a w przysz³oœci podjêciu odpowiedniej pracy zawodowej. Wprowadzenie komputera do kszta³cenia b¹dŸ samokszta³cenia przyczynia siê do poszerzania umiejêtnoœci informacyjnych oraz intelektualnych. Uzyskuje siê to m. in. poprzez tworzenie prezentacji komputerowych, mo¿liwoœæ rejestrowania, gromadzenia, selekcjonowania i przesy³ania informacji, symulowania zjawisk i procesów, indywidualizowania procesu uczenia siê oraz dzia³ania twórcze. Jednak¿e w przypadku prawie wy³¹cznie kontaktu z technologi¹ komputerow¹, kreowany œwiat w znacznej czêœci mo¿e siê przeistoczyæ w œwiat wirtualny zastêpuj¹cy rzeczywistoœæ, co wp³ynie na modelowanie okreœlonej osobowoœci, nie zawsze zgodnej z oczekiwaniami spo³ecznymi. Zjawisko to niew¹tpliwie jest wyzwaniem dla pedagogiki a szczególnie dydaktyki. W ca³ym procesie edukacji musz¹ siê znaleŸæ proekologiczne treœci kszta³cenia. Powszechnie przyjmuje siê, ¿e celem umieszczenia technologii informacyjnej w programie kszta³cenia ogólnego powinno byæ [1, 7]:

- wykszta³cenie w ka¿dym uczniu rozumienia podstaw technologii informacyjnej oraz umiejêtnoœci jej stosowania, odpowiednio do jej mo¿liwoœci, korzyœci i ograniczeñ;
- umo¿liwienie uczniom osi¹gniêcia odpowiedniego poziomu stosowania technologii informacyjnej jako pomocy w sytuacjach, gdy jest to odpowiednie (po¿yteczne);
- stosowanie technologii informacyjnej w ró¿nych obszarach programu kszta³cenia, jako pomocy, œrodka do poszerzania i wzbogacania nauczania i uczenia siê.

Wyró¿nione przez M. Sys³o cele technologii informacyjnej w programach nauczania i w samej jego realizacji nie odnosz¹ siê bezpoœrednio do ¿adnego przedmiotu lub grupy przedmiotów wystêpuj¹cych w obecnym planie nauczania dla szkó³. Cele te zreszt¹ s¹ tak sformu³owane, ¿e ich realizacja nie mo¿e i nie powinna byæ zawê¿ona do wybranego przedmiotu. Wszêdzie tam, gdzie dane obiekty multimedialne mog¹ pomóc w zrozumieniu tematu, wzbogaciæ zajêcia dydaktyczne nale¿y je stosowaæ. Zajêcia wzbogacone o technologiê informacyjn¹ dostarczaj¹ uczniom:

- wiedzy o stosowaniu tej technologii, w tym o Ÿród³ach informacji, narzêdziach, takich jak edytory tekstów, bazy danych, arkusze kalkulacyjne oraz oprogramowanie do obróbki dŸwiêku i obrazów oraz symulacji i modelowania,
- umiejêtnoœci w³aœciwego korzystania ze Ÿróde³ informacji i odpowiednich narzêdzi do jej przetwarzania,
- zrozumienie nowych mo¿liwoœci, jakich dostarcza ta technologia, jej efektów dzia³ania i ograniczeñ.

Bernd Steinbrink [9] pisze, i¿ warstwa tekstowa pozostawiona samej sobie nie bêdzie tak skutecznym narzêdziem dydaktycznym jak jej po³¹czenie z obiektami multimedialnymi. W kszta³ceniu multimedialnym, w którym oddzia³uje siê na prawie

wszystkie zmys³y cz³owieka, w odró¿nieniu od nauczania konwencjonalnego uzyskujê siê m.in. nastêpuj¹ce wyniki [9]:

- skuteczno¶æ nauczania wy¿sza o 56%
- zrozumienie tematu wy¿sze o 50 – 60%
- tempo nauczania wy¿sze o 60%
- zakres przyswojonej wiedzy wy¿szy o 25 – 50%
- nieporozumienia przy przekazywaniu wiedzy mniejsze o 20 – 40%
- oszczêdno¶æ czasu 38 – 70%.

Zastosowanie multimedialnych ¶rodków dydaktycznych w procesie kszta³cenia znacznie skraca czas pracy, podnosi efekty nauczania, wyd³u¿a okres przechowywania informacji w pamiêci [4], jak równie¿ wyzwala du¿e zainteresowanie i wspomaga aktywno¶æ uczniów w porównaniu z innymi ¶rodkami dydaktycznymi. Jednak¿e wa¿nym warunkiem podwy¿szenia skuteczno¶ci nauczania technologi¹ informacyjn¹ jest odpowiedni dobór oprogramowania dostosowanego do wieku i mo¿liwo¶ci uczniów. Dobrze dostosowane programy edukacyjne pozwalaj¹ dzieciom uczyæ siê i bawiæ jednocze¶nie odkrywaj¹c tajemnice nauki. Symbole graficzne u¿yte w programach multimedialnych, prezentowane tre¶ci oraz ich uk³ad na monitorze powinna cechowaæ du¿a komunikatywno¶æ, dostosowana do poziomu ucznia. W zwi¹zku z tym na ekranie monitora (ekranie projekcyjnym) powinno siê prezentowaæ tylko niezbêdne informacje. Wszelkie dodatkowe rozpraszaj¹ uwagê obserwatora i utrudniaj¹ obserwacjê przebiegu symulowanego procesu.

4. ZAGRO¯ENIA WYNIKAJ¥CE Z ZASTOSOWAÑ MULTIMEDIÓW W PROCESIE NAUCZANIA

Technika multimedialna, obok wielu udogodnieñ i zalet, niesie za sob¹ równie¿ pewne zagro¿enia i trudno¶ci w dydaktyce. Mo¿liwe negatywne strony dotycz¹ nie tylko problemów technicznych i finansowych, ale tak¿e wychowawczych.

Komputer integruj¹c w sobie inne media mo¿e je zastêpowaæ. Ale nie oznacza to zubo¿enia form i ¶rodków ekspresji stosowanych w pracy pedagoga. Wiadomo jednak, ¿e komputer nie zast¹pi bezpo¶redniego kontaktu ucznia z nauczycielem. Wa¿ne w tym miejscu jest do¶wiadczenie, które pozwoli wyk³adowcy stosuj¹cemu prezentacjê multimedialn¹, czy inne multimedialne ¶rodki dydaktyczne, znaleŸæ odpowiedni¹ relacjê pomiêdzy tym, co ukazuje prezentacja, a tym, co on sam ma do powiedzenia. Tak zwana aktywizacja odbiorców – s³uchaczy zale¿y od pomys³owo¶ci, mo¿liwo¶ci, a tak¿e umiejêtno¶ci osoby prowadz¹cej zajêcia. Komputer powinien byæ narzêdziem, rola pedagoga natomiast polega miêdzy innymi na organizacji procesu nauczania.

Z pewnym dystansem nale¿y odnosiæ siê do tych u¿ytkowników rzutników multimedialnych, którzy u¿ywaj¹ ich dok³adnie tak jak rzutników pisma. Faktycznie jednak pokazuje on przez ca³y czas konspekt prezentacji. W takiej sytuacji znu¿eni, ju¿ po

kilkunastu minutach s³uchacze czêsto bezmyœlnie wodz¹ oczami po slajdach, a w najlepszym przypadku przepisz¹ dane zagadnienie, nie wg³êbiaj¹c siê zbytnio w jego sens.

Pamiêtaæ nale¿y, ¿e nie zawsze wprowadzenie komputera na lekcji powoduje wzrost zainteresowania uwagi. Łatwoœæ i szybkoœæ z jak¹ komputer generuje wyniki powoduje, ¿e uczniowie mog¹ zaczynaæ biernie obserwowaæ obrazy na ekranie monitora. Widaæ wiêc, ¿e metody tradycyjne (wykonywane obliczenia, rysunki czy wykresy na tablicy) i metody oparte na wykorzystaniu komputera powinny siê wzajemnie uzupe³niaæ. Niebezpieczeństwo wyp³ywa z faktu fascynacji ogromnymi mo¿liwoœciami komputera i d¹¿enia do zast¹pienia nim innych narzêdzi i œrodków, a nawet samego nauczyciela, co jak by³o ju¿ zauwa¿one, absolutnie nie jest celem. Potencjalny uczeń, wyrêczaj¹cy siê jedynie komputerem, czêsto niestety:

- nie potrafi rysowaæ rêcznie wykresów funkcji (odpowiednio dobraæ dziedziny, zakres pomiarów, skoku itp.),
- nie zna procedury obliczeń prowadzonych komputerowo (nie umie rozwi¹zaæ zadania samodzielnie, oszacowaæ i zinterpretowaæ wyników końcowych),
- nie zna zjawisk fizycznych, chemicznych, biologicznych itp.
- nudzi siê po kilkunastu pytaniach testowych i naciska „byle jakie” przyciski, aby szybciej zobaczyæ plansze końcowe,
- nie umie przeprowadziæ doœwiadczenia, tym bardziej nie potrafi dokonaæ jego obróbki i interpretacji wyników pomiarów,
- skacze bezmyœlnie po dokumentach hipertekstowych.

Zagro¿enia œrodkami medialnymi nie zawsze jest rozumiane przez ucznia. Zwi¹zane jest to z faktem, ¿e sami uczniowie dostrzegaj¹ znacznie mniej zagro¿eń ze stosowania komputerów, ni¿ pedagogowie szkolni czy psychologowie. Z punktu widzenia pedagogów istniej¹ zagro¿enia w postaci uzale¿nień od komputera, zachwianego systemu wartoœci ucznia, jako m³odego cz³owieka. Sami zainteresowani g³ównie dostrzegaj¹ jedynie skutki natury fizycznej, takie jak znu¿enie. Nie chodzi tutaj o to by w szko³ach nie by³o w ogóle komputerów, natomiast wa¿ne jest by nie stawa³y siê one celem samym w sobie, nie zniewala³y cz³owieka i nie spycha³y pracy nauczyciela z uczniem na boczny tor. Komputer i multimedia w szkole powinny byæ tylko i wy³¹cznie pomoc¹ dydaktyczn¹ pozwalaj¹c¹ uczniom na ³atwiejsze zrozumienie pewnych zagadnień oraz nabywanie przez nich konkretnych umiejêtnoœci, zaœ nauczycielom u³atwiaj¹c¹ przekazywanie nowoczesnych treœci dydaktycznych. Komputer natomiast nie mo¿e zast¹piæ klasycznego procesu nabywania podstawowych wiadomoœci i umiejêtnoœci przez ucznia i to zarówno w zakresie przedmiotów œcis³ych jak i humanistycznych, jego wykorzystanie powinno byæ niejako zwieńczeniem ca³ego procesu nauczania w szkole. Wtedy dopiero m³ody cz³owiek maj¹cy odpowiedni¹ bazê w postaci zdobytych gruntownych wiadomoœci i umiejêtnoœci z wielu dziedzin, mo¿e go w sposób rozumny i celowy wykorzystaæ. Oznacza to, ¿e nie jest w³aœciwym obserwowana czasami w Polsce rosn¹ca tendencja polegaj¹ca na rozpoczynaniu kszta³cenia w zakresie wielu przedmiotów i to w najm³odszych klasach, w³aœnie

od komputera. Widoczny jest tak¿e nag³y wzrost iloœci ró¿nego rodzaju „pracowni internetowych”, maj¹cych byæ lekarstwem dos³ownie na wszystkie k³opoty szko³y, których w¹tpliwy jest walor dydaktyczny.

5. ZAKOÑCZENIE

Omówiona problematyka wprowadzania we w³aœciwy sposób procesu nauczania z wspomaganiem multimedialnym ukazuje bardzo du¿e jego zalety, ale i mo¿liwe zagro¿enia. Zagadnienia te zwi¹zane s¹ te¿ z tzw. edukacj¹ internetow¹. Jest ona w³aœnie g³ównie oparta na wykorzystaniu osi¹gniêæ technologii informacyjnej. Oznacza to drogê do sta³ego rozszerzania sposobów organizowania i prowadzenia procesów nauczania daj¹cego uczniom mo¿liwoœci wyboru w³asnych dróg, poznawania i rozwoju dostosowanych do ich mo¿liwoœci.

BIBLIOGRAFIA

1. Bremer A., S³awik M.: Technologia informacyjna z informatyzacj¹, cz. 1. Videograf edukacja, Katowice 2002.
2. Duch W.: Fascynuj¹cy œwiat komputerów. Wydawnictwo NACOM, Poznañ 1999.
3. Grygrowski D.: Prezentacja multimedialna w edukacji. [W:] III Miêdzynarodowa Konferencja „Media a edukacja” Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Zak³ad Technologii Kszta³cenia, Poznañ 2000, s. 353.
4. Kie³tyka L. (red.): Multimedia w organizacjach gospodarczych i edukacji. Centrum Doradztwa i Informacji Delfin, Warszawa 2006, s. 220.
5. Laurie Ann Ulrich: Microsoft Office 2003 PL. Wydawnictwo Edition, Kraków 2005.
6. Paj¹k A.: Multimedialne podrêczniki, www.nowaera.pl/multimedia/ (07.05.2007).
7. Sys³o M.: Komputer i technologia informacyjna w kszta³ceniu ogólnym, cz. 1. Wychowanie Techniczne w Szkole, nr 4, 1996, s. 29.
8. Siemieniecki B.: Mo¿liwoœci zastosowania nowych technologii komputerowych w rozwoju myœlenia problemowego i twórczego, Toruñskie Studia Dydaktyczne, nr 1(I), 1992, s. 202-209.
9. Steinbrink B.: Multimedia u progu technologii XXI wieku. Przek³ad z ang. Waœko M., Robomatic, 1992.
10. Walczyñski K.: Podrêczniki z p³ytami multimedialnymi – nowy wymiar kszta³cenia. Chip, nr 3, 2005, s. 32.

APPLICATIONS OF MULTIMEDIA TEACHING AIDS IN THE PROCESS OF LEARNING

Summary

The article discusses issues in the teaching of multimedia teaching aids. Attention was paid not only on the positive aspects of such activities, but also on the possible negative influences.

Keywords: computer, teaching, information technology, multimedia teaching aids.

Ma³gorzata Mrozik*

MODEL OF VEHICLE SPEED DETERMINATION BASED ON CAR BODY STRAIN

Abstract. The article presents the model of the motor car speed determination based on failures of the car body structure. Based on statistical analysis of studied road accidents the model of functional relation, taken from the ruched factographic database, was determined. The model allows for quick determination of speed based on the strain of the car body structure at the moment of a road accident.

Keywords: speed, road accident, car accidents causes, car body.

INTRODUCTION

Browsing through papers regarding problems of road traffic safety and, what is more, the reconstruction of car accidents where passenger cars were involved, advances in car construction and traffic congestion it can be noticed that reconstruction of a real car accident can be quite difficult. It is caused mostly by covering the tracks of the accident or by difficulties revealing them. Such situations indicate that reconstruction of the particular car accident requires extensive analysis which could exclude circumstances that do not fulfill conditions of the coherence of the physical process of events and other circumstances coming out from the file, which led to the collision and condition after the accident. In practice, a very common type of collision is the car impact where the evidence is related only to the position of the vehicle after the accident, approximate determination of the scope and the location of damages, as well as conflicting testimony of persons involved in the accident, especially about the causes of the crash. Evidence of the accident usually does not contain material data connected with the location of the accident and involved cars' tracks just before the collision. According to physical law, obtaining data about the particular location of the vehicles after the accident can be done at any place of the collision but the necessary requirement is to know the suitable parameters of the vehicle track before the accident and the strains regarding those parameters. That is why the analysis of the course of the accident must be conducted for the whole area of a possible place of the

* Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, Wydzia³ In¿ynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

collision, including the conditions of the accident. A very important issue at a reconstruction of the course of the accident is to use as much information as it is possible after the accident. However, the problem is that the information must be processed onto the parameters which determine behavior of people involved in the accident both at a time preceding the threat of the accident and during the attempt to avoid the accident. Ability to process the information requires the knowledge of laws that combine these values. Basic knowledge of Physics or Mechanics is not enough here. Phenomena of an accident are quite complicated and they do not allow for a simple mathematical description. That is why in most cases relevant information about relations between the extent of effects after the accident and the causes of the accident can be obtained from experiments, laboratory tests or detailed analysis of previous accidents. They allow recording the motion parameters of the people involved in the accident.

The situation described above causes the necessity of solving the following research problems:

- Searching for a better way of using data about the extent and location of car damages that would allow determining the strain dimensions occurred during the collision.
- Verifying the traditional methodology of the road accident course reconstruction and determining the vehicle speed during the impact by means of it.
- Formulating a method of quick estimation of the vehicle speed based on damages of the vehicle during the accident.

That is why the aim of the article is to formulate the model that will allow estimating the vehicle speed on the basis of damages of car body structure at a time of the accident.

STUDY OF LITERATURE

Problem of road traffic safety contains different fields. So far the issue of safety on the roads has not been featured in a special way. However, a very high accident rate and threat to life in road traffic caused that this part of science is still being intensively developed, for example by different conferences and papers about that topic. But debates on most important definitions and measures of the road safety traffic are still open.

Among the works, wider in scope, devoted to the topic of road traffic safety, the paper by Witold Konczykowski „Zagadnienie pracy odkszta³cenia pojazdu podczas zderzenia" could be worth mentioning. The paper contains the issues of car strain at a time of car impact. The author mostly presents the character and size of car strain after the road accident. A problem of energy-consuming structure of the vehicle has been the topic of theoretical contemplation for a long time. Many physical models

enabling the estimation of the amount of energy necessary to obtain given car deformation have been built. However, a ground-breaking development was the introduction of obligatory tests to improve the safety on the roads. The author emphasizes that one of essential car tests was an attempt to strike a rigid barrier. Such a test is usually performed under specific conditions with the registration of motion parameters of the car, from a moment immediately before hitting the obstacle until the time of ending the motion, after bouncing from the obstacle. The results of such tests allow for determination of much data required for reconstruction of the course of car accident, in which car strain appeared. Figure 1 presents the result of factory test collision for one of European cars. There are three lines in it: lines of delays run *b(t)*, lines of changes in traffic speed *v(t)* and lines of displacement (crease) of vehicle's front part *s(t)*.

During such a test, the delays run of car movement is registered immediately. Figutre 2 presents that kind of run.

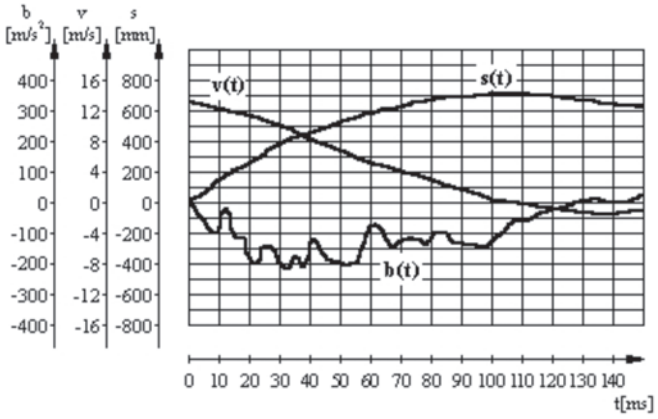


Fig. 1. Result diagram of a factory test collision for one of European cars [7]

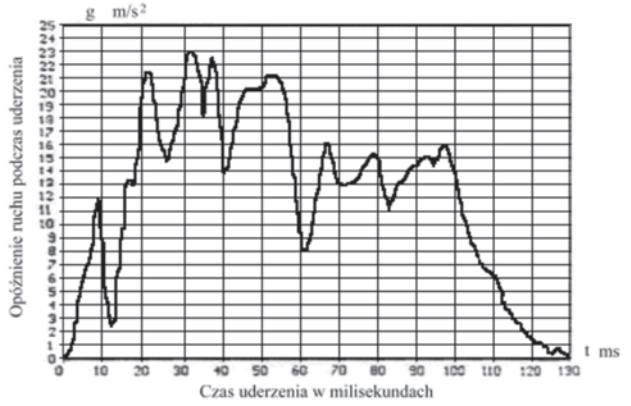


Fig. 2. Example of delays run of car movement [7]

As the delay (retardation) is a derivative of speed in time, the changes of speed at a time of bounce run can be determined by integration of delays run and by separate measure of initial velocity determined in a standard way in conditions of carrying through the test.

An interesting way of determining the bounce speed on the basis of the extent of car damages was presented in a paper "Determining of bounce speed based on car damages extent".

The authors emphasize that during the car accidents and collisions evaluations a necessary thing is to determine the speed of the vehicle based on its structure strain. The decrease is a measure of the part of lost kinetic energy of the vehicle that was dissipated during its movement at a time of the car accident. On the basis of the tests of strain it is possible to define the range and the character of the strain and, especially, to determine the main dimensions of the deformed part: depth, width and height. The data allows determining so called Energy Equivalent Speed (EES). Earlier that kind of speed was named Equivalent Barrier Speed or Equivalent Test Speed.

Energy Equivalent Speed is determined by the relationship:

$$EES_{\text{of the vehicle}} = (2 \cdot E_{\text{absorbed by a car}}/m)^{0,5} \tag{2.1}$$

where:

$$E_{\text{absorbed by a car}} = E_{\text{kinetic before collission}} - E_{\text{absorbed by obstacle}} - E_{\text{transverse displacement}} - E_{\text{longitudinal displacement}}$$

Results of impact tests helped to work out simplified method of determining amount of work required to obtain the particular car strain and then to determine the speed lost during the impact. Strain work E_0 can be determined by the following relation:

$$E_0 = \frac{b \cdot h \cdot f^2}{2} \cdot k \ \text{J} \tag{2.2}$$

where:

f – is an average depth of strains measured in the direction of force impulse vector,

b –is an average width of strains measured perpendicularly to the direction of force impulse vector,

h –is an average height of deformed part of the vehicle.

In the relation k [N/m·m^2] is a coefficient dependent on strength properties of the car structure. In case when the strength structure of the car was broken, coefficient k equals: $k = (9.0 \div 11.0) \cdot 10^5$ N/m·m^2 and when tin or skin elements were damaged $k = (2.0 \div 4.0) \cdot 10^5$ N/m·m^2.

After suitable transformations the relation for speed v (m/s) lost by the car during the impact can be obtained:

$$v = f \cdot \sqrt{\frac{b \cdot h}{m}} \cdot k \tag{2.3}$$

where m means the vehicle weight [6].

Besides, the value of coefficient k depends on the size of a car. That is why the author of the paper included real values of coefficient k for nowadays cars also. For small cars $k = (13.5 \div 22.6) \cdot 10^5$ N/m·m^2, for middle-sized cars $k = (9.1 \div 13.5) \cdot 10^5$ N/m·m^2 and for big cars $k = (5.2 \div 7.2) \cdot 10^5$ N/m·m^2.

Derivative of impact tests is a method of determining the impact speed based on the extent of car damages in a distribution raster of work of the car structure strain [8]. They allow estimating the amount of work required to cause the strain of a particular extent. A step ahead at forming such diagrams was a thesis made by Walter Röhrich in 1976 at Berlin University of Technology. A medium class car of weight $m = 950$ kg and standard power transmission system was tested, that is with engine placed in the front part of a car and with rear-wheel drive. For each direction of a bounce the car was divided into segments, taking into account details of strength structure. Particular amount of work required to obtain the strain of the segment was assigned to each segment. Diagram model of distribution of strain work presents figure 3.

Similar results of the research on the car deformation at a bounce in a rigid fixed wall were published by Keneth L. Campbella on III International Conference on Road Safety in Michigan. They were presented in forms of nomograms. They let to determine the speed of the car bounce in a function of deformation size at a time of impact (frontal or oblique) in a rigid fixed obstacle, with a total loss of kinetic energy.

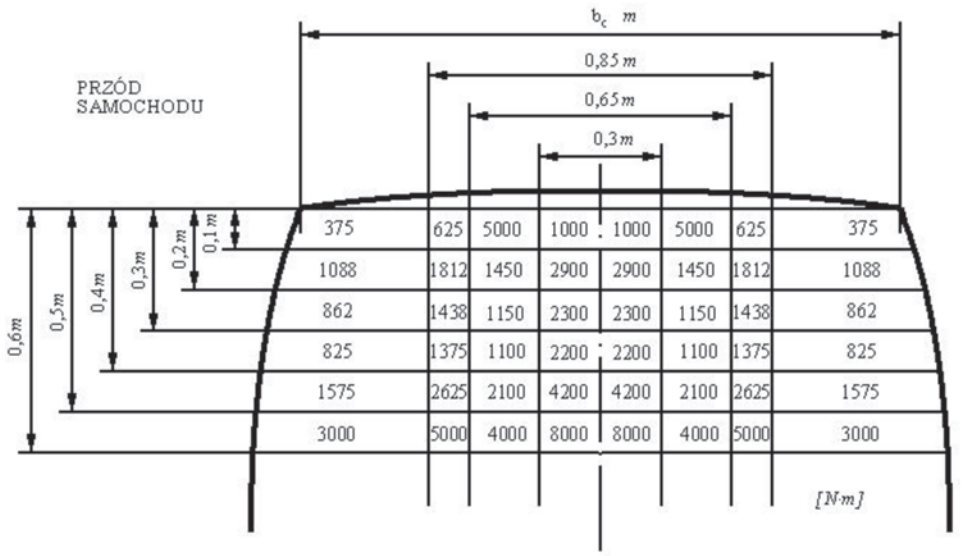


Fig. 3. Results of Walter Röhrich's tests regarding the front part of the car [10]

Those diagrams are related to GMC cars weighing 1100–1500 kg and 1800–2000 kg. Then the approximate speed of the impact can be calculated from the simplified dependences:

- for cars weighing 1100–1500 kg:

$$v = 1.34 + 23.76 \cdot f \text{ m/s} \tag{2.4}$$

- for cars weighing 1800–2000 kg:

$$v = 3.06 + 15.49 \cdot f \text{ m/s} \tag{2.5}$$

As it can be seen, the problem of the road safety traffic, and closer, the reconstruction of the car accidents, has not been specially exposed in theses results because the process of recreating the particular car crash was time-consuming and labor-intensive. Very useful could be the possibility of determining the speed of the vehicle just after the accident. That fact persuaded the author to try to determine the relation between the vehicle speed and the strain of the car body structure, as a model that would help to define the speed of the vehicle before the accident in a reliable and fast way.

MOTOR-CAR BODY DEFORMATIONS AT A FRONTAL IMPACT

Each motor car as a material body with particular mechanical and physical properties is subjected to all laws and rules existing in statistics and dynamics of the material body. Its motion lasts because of energy exchange, coming from the chemical process of fuel combustion, for mechanical energy or because of potential energy exchange for kinetic energy or inversely. Those vehicle properties play a really essential role during evaluation of car accidents. One of the most important results of the motor car impact is its strain. It results from the very basic physical law that if the body of the finite inflexibility is influenced by force, that body undergoes a finite strain. So if there is a relation between the force and strain, there is a relation between work used for this strain and force that induces that strain, too. To evaluate that work it is necessary to know both changes of the shape, which means the strain, and strength properties of the vehicle structure. It is also relevant that the work can be done only when equivalent energy is provided from the outside. In case of any impact, at least one of the colliding bodies must have been in motion before the collision. The impact causes a change of the motion so the speed change of that body occurs, which at the assumption of the constant body mass turns to the kinetic energy change. So in a general way, during the impact the strain work is the result of kinetic energy loss. Carnot Law describes that process in a more precise way: during an impact a reduction of energy corresponding to kinetic energy for “lost speed” is visible. So if the range of car strain is given, “lost energy” can be determined.

In motor cars three sections can be distinguished: the engine compartment, personal (passenger) compartment and the trunk compartment. In most cases, the engine

compartment (engine section) is in the front part of the vehicle and the trunk compartment (trunk section) in its rear part. Description of damaged car elements that are the result of strain at a frontal impact, side impact and oblique impact concerns cars with engine compartment in the front and the trunk compartment it the rear part of the car.

The article shows the most general types of impacts: frontal impacts. Taking into consideration types of damage, car body structure strain was grouped in a following way:

Table 1. Size of car body structure strain versus type of damage

Size of car body structure strain	Type of damage
<10.00%	Front bumper, front reflectors (left and right), turn signals (left and right), front side of the engine part.
<20.00%	Front bumper, front reflectors (left and right), turn signals (left and right), front side of the engine part, engine compartment cover, front fenders (left and right), front suspension and the wheels, engine part damaged in 80%.
<30.00%	Front bumper, front reflectors (left and right), turn signals (left and right), front side of the engine part, engine compartment cover, front fenders (left and right), front suspension and the wheels, engine part damaged totally, windscreen, front pillars.
<40.00%	Front bumper, front reflectors (left and right), turn signals (left and right), front side of the engine part, engine compartment cover, front fenders (left and right), front suspension and the wheels, engine part damaged totally, windscreen, front pillars, driver's and passenger's front doors, dashboard and the steering column, car roof, partly damaged front driver's and passenger's car seats.
<50.00%	Front bumper, front reflectors (left and right), turn signals (left and right), front side of the engine part, engine compartment cover, front fenders (left and right), front suspension and the wheels, engine part damaged totally, windscreen, front pillars, driver's and passenger's front door, dashboard and the steering column, car roof, totally damaged front driver's and passenger's car seats, latch pillar, damages reach the passenger compartment.

RESEARCH SCOPE

The following assumptions were taken into consideration in the research:

- the database involved car accidents in Szczecin area, the north-west of Poland, and its region (up to 10 km),
- only road accidents caused by motor cars with weight up to 3.5 tons were taken into consideration during data gathering,
- road accidents with frontal impacts were considered,
- vehicles taking part in road accidents were classified according to commercial sections. Particular sections were named by the following alphabet letters: A, B, C, D and E. The main criterion of such a vehicle arrangement is the total length of

Table 2. Number of cars taking part in car accidents depending on the car length

Car class	Frontal impacts
A	52
B	59
C	47
D	15
E	8

the vehicle which is the variable connected with the car body. Motor cars in forms of one-box body, two-box body and three-box body belong to those sections. Apart from those sections there are also F, G, H, I and L sections with luxury, general-purpose, sport, off-road and multifunctional cars. In this study only the first five vehicle groups were considered because of very large number of vehicles belonging to all those sections.

- next, the cars were grouped according to the size of a failure of the car body structure. The vehicles were divided into groups of proportional strain of 0% to 50% every 5 percentage points and for each road accident vehicle speed at a moment of the car accident was determined.
- for each accident vehicle speed at a moment of car accident was determined. That was a basis to conduct the dependence diagram of vehicle speed on the size of strain of its car body structure. It was done with statistic methods by linear regression. Linear and exponential functions were matched.

In total, 181 vehicles were used to carry out the frontal impacts tests.

RESULTS AND ANALYSIS OF THE TESTS

On the basis of database concerning the vehicle speed at a moment of impact and the size of car body strain, regression equation of this dependence was built. In the study two forms of regression were used:

1. linear regression $Y = a \cdot x + b$ (5.1)
2. exponential regression $Y = \exp(a \cdot x + b)$ (5.2)

where:
Y – vehicle speed in m/s,
x – size of car body strain in %.

The parameter a in a linear regression shows how much the vehicle speed changes in m/s at a change of strain by 1 percentage point. The parameter a in an expo-

nential regression describes the percentage change of vehicle speed at a change of strain by 1 percentage point. The function was assessed in Statistica version 5.5. For each commercial section of car classes A, B, C, D and E both forms of regression were used [5].

Tables 3 and 4 present the results of calculations at a frontal impact for A class vehicles.

Table 3. Regression results for model $y = a \cdot x + b$

	R = 0.97874195; R^2 = 0.95793581; Correct. R^2 = 0.95709452; p<0.0000					
N = 52	BETA	Statistical error BETA	B	Statistical error B	t(50)	p level
b	–	–	2.628747	0.392252	6.70168	0.000000
a	0.988677	0.021222	0.579409	0.012437	33.74403	0.000000

In table 3, column B two coefficients can be visible: absolute term b = 2.63 and gradient a = 0.579. Directivity factor allows to determine the relative influence of independent variable on dependent variable. The value of gradient a shows that the increase of strain of car body structure by 1 percentage point causes the increase of vehicle speed by (0.58±0.01) m/s. So the form of the assessed regression equation is:

$$Y = 0{,}579 \cdot x + 2{,}629 \tag{5.3}$$

Correlation coefficient square R^2 = 0.957 is high which means that regression line matches the experimental data well. The speed values are determined by that function in 95.7%.

A very important value is the value of statistics t which for coefficient a $t(50)$=33.7 passes the critical value $t_{0,05/50}$ = 2.009 for 50% latitude and at the level of significance of a = 0.05. Thus the hypothesis about the irrelevance of a gradient must be rejected and this way the hypothesis about the irrelevance of dependence between speed and car body strain must be rejected too. The proof for that is also the value p=0.0000 that is less than the assumed value level of significance a = 0.05. The value of statistics t for absolute term equals t = 6.70 and passes the critical value. That means the absolute term is significantly different from zero.

Obtained linear dependence describes the relationship between the vehicle speed and strain of its car body structure adequately.

The second type of dependence in a form of linear regression (exponential function) was also tested:

In table 4 absolute term b = 2.63 and gradient a = 0.579 can be seen. And the following dependence was obtained:

$$\ln y = 0{,}0346 \cdot x + 1{,}882 \tag{5.4}$$

Table 4. Regression results for model $y = \exp(a \cdot x + b)$

	R = 0.98867661; R^2 = 0.97748144; Correct. R^2 = 0.97703107; p < 0.0000					
N = 52	BETA	Statistical error BETA	B	Statistical error B	t(50)	p level
b	–	–	1.882148	0.032338	58.20229	0.000000
a	0.978742	0.029005	0.034599	0.001025	46.58745	0.000000

In both cases *p* levels are much less than the accepted level of significance a = 0.05. That proves the relevance of directivity coefficient *a* and that absolute term is significantly different from zero. Correlation coefficient square R^2 = 0.977 is high, that means the regression and the experimental data were matched properly. Gradient a = 0.0346 indicates that the increase of strain of car body structure by 1 percentage point causes speed increase by (3.46 ± 0.10)%. For example, at 10% strain of car body structure, increase of strain by 1 percentage point (that is from 10% to 11%) causes the speed increase by 3.46% average. Comparison of correlation coefficients square R^2 in two models of function: linear and exponential, shows that the exponential function has a higher coefficient value R^2 (R^2 = 0.977) than the linear function (R^2 = 0.957). That means the exponential function matches the data in a better way. Similar analysis was conducted for remaining classes of cars: B, C, D and E. It was seen that in the other cases exponential function is better to describe the dependence of the vehicle speed on strain of car body structure at a frontal impact.

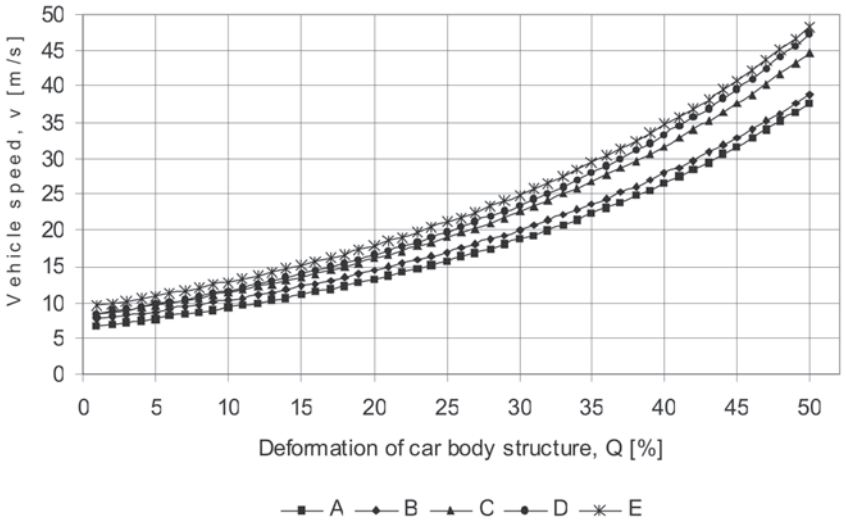


Fig. 4. Theoretical models of dependence of vehicle speed on strain at a frontal impact for A, B, C, D and E classes of vehicles

On the basis of the total theoretical characteristics of dependence of speed on car body structure strain (fig. 4) it was shown that the arrangement of theoretical models depends on a vehicle class.

The undermost exponential function is the theoretical model obtained for vehicles of A class. The noticeable fact is that the locations of models for A and B classes are almost on the same level. Similar dependence can be seen for D and E classes. C class is centered. It is visible on the graph that for particular size of percentage strain the different vehicle speed occurs at a moment of a road accident, depending on its length. For the same vehicle speed at a time of the accident, the lower class of the vehicle the bigger strain size. Gradients *a* of theoretical exponential functions for each vehicle class have the same value. 50% strain of car body structure for a frontal impact is found from 37.79 m/s for the A class vehicles. For the E class vehicles such 50% strain appears only at the speed of 48.23 m/s. For the other classes those speeds are respectively: B – 38.82; C – 44.61; D – 47.32.

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Based on performed analysis of literature regarding the topic of the road accident and the results of the study and the analysis of the measures results additional conclusions can be drawn:

- to describe dependence of the speed vehicle on the strain of the car body structure at a time of the road accident the models of regression can be used.
- that dependency can be described by the linear and exponential functions. Comparison of those two models presents that the exponential function matches the regression line to the study results in a better way. It is indicated by the correlation coefficient obtained during the statistical analysis.
- the location of the models, describing the dependency of the speed vehicle on its car body structure for the particular type of impact, is depended on the class of the vehicle. For the particular percentage strain of the car body structure, the higher class of the vehicle (longer vehicle), the higher speeds at the impact.
- 50% strain of the car body structure, regardless the type of impact, is found at the speed of approximately 30 m/s. Frontal impacts give 50% strain at higher speeds – over 35 m/s.
- it would be beneficial to create a system database containing the basic information for further model cross-check.

Studies conducted so far have shown that the formulated method can be efficient to evaluate the speed of the vehicle at a moment of collision with other vehicle or a static obstacle. Those studies are continued because, like every statistical research based method, it is more reliable the more observations can be described. Confirmation of the universal truth that the basic cause of road accidents is speeding, inadequate to prevailing road conditions, was obtained here.

LITERATURE CITED

1. Buzeman D.: Car-to-car and single car crash compatibility: Individual effects of mass, structure, stiffness and geometry. Thesis for the degree of licentiate in engineering. Chalmers University of Technology 1997.
2. Burckhardt M.: Zur Analyse und Synthese von Reaktionszeiten. Der Verkehrsunfall, 7–8, 1980.
3. Burg H.: Rekonstruktionsunterlagen aus einer Auswertung realer Unfall zwischen Zweirad und Vierradfahrzeugen.Der Verkehrsunfall, 9, 1979.
4. Burhardt E.: Aspekte zur Verkehrssicherheit auf Ausserortsstrassen. Asperg 1988.
5. Chmielewski K., Berczyñski S.: Statystyka matematyczna – æwiczenia laboratoryjne z wykorzystaniem pakietu STATISTICA PL. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczeciñskiej, Szczecin 2002.
6. DiuperoT., Górny A., Wolski E.: Ustalenie prêdkoœci zderzenia w oparciu o zakres uszkodzeñ samochodu. Rzeczoznawca samochodowy, 8, 2000.
7. Koñczykowski W.: Zagadnienie pracy odkszta³cenia pojazdu podczas zderzenia. Rzeczoznawca samochodowy, 1, 1997.
8. Koñczykowski W.: Odtwarzanie i analiza przebiegu wypadku drogowego. Info – Ekspert, Warszawa 1993.
9. Mrozik M.: Oszacowanie prêdkoœci jazdy samochodu osobowego na podstawie analizy wypadków drogowych. Praca doktorska niepublikowana. Politechnika Szczeciñska. Szczecin 2006.
10. Praca zbiorowa pod redakcj¹ Wierciñskiego J.: Wypadki drogowe – elementy analizy technicznej. WKi£, Warszawa 1895.
11. Si³ka W.: Energoch³onnoœæ ruchu samochodu. WNT, Warszawa 1997.
12. Wicher J.: Bezpieczeñstwo samochodów i ruchu drogowego. WKi£, Warszawa 2002.
13. Zieliñski A.: Konstrukcja nadwozi samochodów osobowych i pochodnych. WKi£, Warszawa 2003.

MODEL OKREŒLANIA PRÊDKOŒCI POJAZDU NA PODSTAWIE ODKSZTA£CEÑ NADWOZIA

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób okreœlania prêdkoœci pojazdu na podstawie odkszta³ceñ jego struktury nadwozia. Na podstawie analizy statystycznej zaistnia³ych wypadków drogowych okreœlono zale¿noœci funkcjonalne w postaci modelu wynikaj¹ce z zebranego materia³u faktograficznego. Zastosowanie modelu pozwala na szybkie okreœlenie prêdkoœci pojazdu osobowego na podstawie odkszta³ceñ struktury nadwozia pojazdu w chwili zaistnienia wypadku drogowego.

S³owa kluczowe: prêdkoœæ, wypadek drogowy, przyczyny wypadków drogowych, nadwozie pojazdu.

Lista recenzentów wspó³pracuj¹cych z czasopismem Postêpy Nauki i Techniki:

1. Prof. dr hab. in¿. Klaudiusz Lenik – Politechnika Lubelska
2. Prof. dr hab. in¿. Mykhaylo Pashechko – Politechnika Lubelska
3. Prof dr hab. in¿. Miros³aw Wendeker – Politechnika Lubelska
4. Dr hab. in¿. Marek Jakubowski, prof. PL – Politechnika Lubelska
5. Dr hab. in¿. Antoni Œwiæ, prof. PL – Politechnika Lubelska
6. Dr hab. in¿. Dorota Wójcicka-Migasiuk, prof. PL – Politechnika Lubelska
7. Prof dr hab. in¿. Janusz A. Tomaszek – Politechnika Rzeszowska
8. Prof dr hab. in¿. Czes³awa Rosik-Dulewska – Uniwersytet Opolski
9. Prof. dr hab. in¿. Jan Senatorski – Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie
10. Dr hab. in¿. Wojciech Ozgowicz, prof. PŒl – Politechnika Œl¹ska w Gliwicach
11. Prof. Nelson Barros – University of Fernando Pessoa, Portugal
12. Prof. Álvaro Monteiro – University of Fernando Pessoa, Portugal
13. Prof. Peter Standrin – University of Derby, Great Britain
14. Prof. Karl E. Lorber – Institute for Waste Management and Technology, Austria
15. Prof. Harald Schwarz – Technical University of Cottbus, Germany
16. Prof. Ernest Gondár – Slovak University of Technology, Bratislava
17. Prof. Miros³aw W. Kindraczuk – National Aviation University, Kiev