SPIS TREŚCI

W skrócie ... 2

Nauka i Technika

Mirosław GUZIK, Grzegorz KOSZAŁKA
Porównanie wybranych schematów różnicowych na przykładzie równania $\dot{x} = t + 2x$
Selected differential schemes comparison by means of the equation $\dot{x} = t + 2x$ ... 8

Rafał WRONA
Wyznaczanie optymalnych algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego
Determining optimum control algorithms of city bus automatic hydromechanical gear ... 13

Aneta TOR
Charakterystyka procesu wytłaczania powlekającego
The characteristic of coating extrusion process ... 18

Jakub GAJEWSKI
Koncepcja oceny stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej do urabiania
Idea of identyfying the status of the cutting tools point used in multi-tool excavating heads ... 23

Andrzej AMBROZIAK, Zbigniew KORALEWICZ, Marcin KORZENIOWSKI, Paweł KUSTROŃ
Zastosowanie fal ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych w czasie rzeczywistym
Ultrasonic quality control during resistance welding process ... 26

Zbigniew MIRSKI, Kazimierz GRANAT, Alicja BULICA
Konstrukcja szczeliny lutowniczej a zjawiska korozji
Clearance construction in brazed joints and corrosion effects ... 30

Zbigniew MIRSKI, Tomasz PIWOWARCZYK
Klejenie węglików spiekanych
Gluing of sintered carbides ... 36

Andrzej AMBROZIAK, Piotr BIAŁUCKI, Artur POROCHOŃSKI
Wybrane właściwości warstw natryskiwanych cieplnie
Chosen properties of coatings obtained by thermal spraying ... 42

Jarosław FLISIAK, Jerzy JÓZWIK, Maciej WŁODARCZYK
Analiza technologii obróbki sworznia w aspekcie poprawy dokładności wymiarowej gotowego wyrobu
Analyzing the machining technology of the bolt for improvement dimensional accuracy of the finished product ... 48

Jerzy LIPSKI, Paweł LONKWIC
Wpływ procesu zużycia pary kinematycznej koło – lina na zjawisko zakleszczania liny nośnej dźwigu elektrycznego
The effect of wear process of „wheel - rope" kinematic couple on suspension rope jaming ... 53

Maciej ZWIERZCHOWSKI
Procesy zużywania elementów układów rozrządu silników ZS
Wears process of diesel engines timing gear systems ... 57

Andrzej AMBROZIAK, Zbigniew KORALEWICZ, Marcin KORZENIOWSKI, Paweł KUSTROŃ
Metody kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym
ON-LINE quality control methods during spot resistance welding process ... 61

Mariusz WALCZAK, Barbara SUROWSKA, Jarosław BIENIAŚ
Próba podwyższenia trwałości połączenia układu metal-ceramika do zastosowań w protetyce stomatologicznej
Durability test of rice the metal-ceramics connection to application in dental prosthetics ... 67

Maciej WŁODARCZYK, Jarosław FLISIAK
Analiza wpływu charakterystyki materiału kleju na rozkład naprężenia w połączeniu klejowym
Analysis of influence of glue characteristics on stress distribution in adhesive joint ... 72

GUZIK M.: **Porównanie wybranych schematów różnicowych na przykładzie równania $\dot{x} = t + 2x$** ; EiN nr 2/2005, s. 8-12.

W artykule przedstawiono niektóre metody numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych na wybranym przykładzie. Dokonano próby porównania użytych schematów numerycznych pod względem dokładności i kosztu obliczeń.

Wrona R.: **Wyznaczanie optymalnych algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego**; EiN nr 2/2005, s. 13-17.

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania optymalnych algorytmów przełączania biegów stopniowych układów napędowych pojazdów. Analizie poddano fazę rozpędzania pojazdu jako najbardziej energochłonną fazę ruchu. Zastosowano dwa kryteria optymalizacji: minimalizację czasu rozpędzania i minimalizację zużycia paliwa w fazie rozpędzania. Metodykę zilustrowano przykładem syntezy optymalnych algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego.

TOR A.: **Charakterystyka procesu wytłaczania powlekającego**; EiN nr 2/2005, s. 18-22.

Proces wytłaczania powlekającego należy do jednych z najczęściej stosowanych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych, a jego ciągły rozwój determinuje głównie stosowanie coraz to nowocześniejszych konstrukcji głowic wytłaczarskich a także linii technologicznych. Sam proces wytłaczania powlekającego może być przeprowadzony dwiema metodami, jednak wybór metody jest ściśle związany z odpowiadającą mu konstrukcją głowicy wytłaczarskiej. W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące ogólnej charakterystyki procesu wytłaczania powlekającego z uwzględnieniem rozwiązań konstrukcyjnych głowic wytłaczarskich oraz linii technologicznych.

GAJEWSKI J.: **Koncepcja oceny stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej do urabiania**; EiN nr 2/2005, s. 23-25.

Artykuł prezentuje propozycję identyfikacji stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej do urabiania węgla za pomocą sztucznej sieci neuronowej. Omówiono również wstępne wyniki badań nad identyfikacją stanu ostrza jednego narzędzia skrawającego. Opisano planowane badania eksperymentalne zużycia ostrzy noży pracujących zespołowo w głowicy wielonarzędziowej oraz wykorzystanie pewnych cech sygnałów danych pomiarowych jako danych wejściowych do SSN.

AMBROZIAK A, KORALEWICZ Z, KORZENIOWSKI M, KUSTROŃ P.: **Zastosowanie fal ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych w czasie rzeczywistym**; EiN nr 2/2005, s. 26-29.

W artykule przedstawiono jedną z nowatorskich metod obserwacji przebiegu procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego w czasie rzeczywistym. Oparta jest ona na pomiarze parametrów, przechodzącej przez zgrzeinę, fali ultradźwiękowej. Przeprowadzone badania wykazały, iż omawiana metoda pozwala na uzyskanie jednoznacznej informacji o stanie, powstającego jądra zgrzeiny. Uzyskane w ten sposób dane mogą być użyte, nie tylko w celu oceny jakości powstającej zgrzeiny, ale również sterowania przebiegiem całego procesu. Zapewnianie wysokiej jakości zgrzein jest niewątpliwie bardzo istotnym zagadnieniem, szczególnie wobec masowego zastosowania tej technologii w wielu gałęziach przemysłu. Szerokie zainteresowanie rozwiązaniami, pozwalającymi kontrolować przebiegiem procesu tworzenia się jądra zgrzein, wynika głównie z możliwości ograniczenia wpływu zakłóceń na proces (przyczyn występowania niezgodności w powstających złączach) a nie, jak to dotychczas miało miejsce, jedynie obserwacji ich skutków, po fakcie powstania zgrzeiny.

MIRSKI Z., GRANAT K., BULICA A.: **Konstrukcja szczeliny lutowniczej a zjawiska korozji**; EiN nr 2/2005, s. 30-35.

W procesach lutowania i lutospawania ważną rolę odgrywają czynniki konstrukcyjne i technologiczne. Istotne znaczenie dla konstrukcji i wytrzymałości złącza jest odpowiedni kształt oraz szerokość szczeliny. Przez dobór szerokości szczeliny można wpłynąć na wytrzymałość złączy oraz ich podatność na wystąpienie korozji. Przedstawiono przykłady zróżnicowanej konstrukcji złączy, a także skutki nieprawidłowego przygotowania krawędzi łączonych rur. Zamieszczono następujące przykłady złączy: z sanitarnej instalacji miedzianej znajdującej się we Wrocławiu (od 1920 r.), konstrukcji stalowych grzejników łazienkowych i instalacji wykonanej ze stalowych rur ocynkowanych.

MIRSKI Z., , PIWOWARCZYK T.: **Klejenie węglików spiekanych**; EiN nr 2/2005, s. 36-41.

W artykule przedstawiono klejenie węglików spiekanych ze stalą w aspekcie wytwarzania narzędzi. Porównano klejenie z procesami lutowania twardego. Zwrócono szczególną uwagę na różnice we właściwościach łączonych materiałów i wynikające z nich problemy łączenia. Wykonano połączenia klejowe przy użyciu kleju anaerobowego LOCTITE 638. Przedstawiono wyniki statycznej próby ścinania połączeń klejowych węglików spiekanych gat. S 20 ze stalą 45 (C45 wg PN EN 10083 – 1) oraz WC – 45, kobalt – 45 i 45 – 45. Wykazano wyraźne różnice we własnościach wytrzymałościowych połączeń klejowych metali i węglików spiekanych, które są zaliczane do materiałów pasywnych przy łączeniu klejami anaerobowymi.

GUZIK M.: **Selected differential schemes comparison by means of the equation $\dot{x} = t + 2x$** ; EiN nr 2/2005, s. 8-12.

The article presents selected methods of numerical solving of ordinary differential equations. An attempt has been made to compare applied differential schemes in respect of their precision and their cost of computations.

Wrona R.: **Determining optimum control algorithms of city bus automatic hydromechanical gear**; EiN nr 2/2005, s. 13-17.

The methodology of determining optimum algorithms of gear switching in graded power transmission systems of vehicles has been presented in the paper. The phase of vehicle acceleration, which is considered the most energy-consuming motion phase., is the subject of analysis. Two optimization criteria were applied: acceleration time minimization and fuel consumption minimization in the acceleration phase. The methodology has been illustrated with an example of the synthesis of optimum control algorithms of the city bus automatic hydromechanical gear.

TOR A.: **The characteristic of coating extrusion process**; EiN nr 2/2005, s. 18-22.

Coating extrusion process is one of the most frequently applied methods of polymer plastics processing, and its constant evolution is mostly determined by using more and more modern constructions of extrusion heads as well as more advanced processing lines. Coating extrusion process as such can be carried out by applying two methods however, selection of a method is closely connected to relevant construction of extrusion head. The article presents the issues concering the general characteristics of coating extrusion process, with considerations of construction solutions of extrusion heads and processing lines.

GAJEWSKI J.: **Idea of identyfying the status of the cutting tools point used in multi-tool excavating heads**; EiN nr 2/2005, s. 23-25.

The paper presents research necessary to identify rock excavating process with a given head, and construct adaptation systems for control of excavating process with such a head. This article describes also results of preliminary research on utilizing neural networks to classification excavating cutting tool's condition used in multi-tool excavating heads of mechanical coal miners.

AMBROZIAK A, KORALEWICZ Z, KORZENIOWSKI M, KUSTROŃ P.: **Ultrasonic quality control during resistance welding process**; EiN nr 2/2005, s. 26-29.

This article presents some information about quality control in resistant welding process. There are many methods which can give us information about quality of weld after it's arise. Resistant welding is very sensitive for lots of factors like: electric power excursion, electrodes and material surface's condition, electrical by-pass, etc. It usually causes worse quality of the connection. To prevent this factor's influence, welding process should be controlled in the real time. One of the promising methods is Ultrasonic Control System. It is based on measuring amplitude of ultrasonic wave, which flow across the weld. Theoretical characteristic of ultrasonic transmission was shown on fig.3. This curve shows that ultrasonic method can give many, important information about welding process, like: size of welding nuggets, it's arise and crystallization moment but first of all, current switching-off moment. All abilities of this method can be used to find weld quality, controlling welding process and prevent many dangerous factors in the time of weld arising.

MIRSKI Z., GRANAT K., BULICA A.: **Clearance construction in brazed joints and corrosion effects**; EiN nr 2/2005, s. 30-35.

In soldering and braze welding processes constructional and technological factors play an important role. Proper shape and width of the clearance is essential for construction and resistance of the joints. Modification of clearance width can influence on joint resistance and susceptibility to corrosion. Examples of different joint construction and effects of incorrect pipes edges preparatiion are presented. The following examples are presented: joints in Wrocław copper sanitary system (since 1920), joints in structure of bathroom steel heaters and joints in systems made from galvanizing steel pipes.

MIRSKI Z., , PIWOWARCZYK T.: **Gluing of sintered carbides**; EiN nr 2/2005, s. 36-41.

In this article presented is gluing of sintered carbides with steel in aspect of tool fabrication. Gluing and hard soldering processes were compared. Particularly attention was drawn to the differences in properties of joint materials and resulting from this bonding problems. Glue joints were executed with usage of anaerobes glue LOCTITE 638. The results of static shearing test of glue joints of sintered carbides grade S 20 with steel 45 (C45 according to PN EN 10083 – 1) and WC – 45, cobalt – 45 and 45 - 45 are presented. Distinct differences in shear strength properties of glue joints of metals and sintered carbides, which are classified as a materials passive during bonding, are showed.

AMBROZIAK A., BIAŁUCKI P., POROCHOŃSKI A.: **Wybrane właściwości warstw natryskiwanych cieplnie**; EiN nr 2/2005, s. 42-47.

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości warstw z brązu aluminiowego, warstw ze stali X46Cr13 oraz warstw natryskanych z drutu proszkowego gat. Spray-Arc 100. Wytrzymałość na rozciąganie natryskanych warstw zmieniała się zależnie od odległości natryskiwania oraz od rodzaju natryskiwanego materiału. Wytrzymałość warstw ze stali X46Cr13 osiągnęła wartość ponad 180 MPa. W warstwach wytworzonych z drutu proszkowego twardość osnowy metalicznej wynosiła ok. 530 HV0.2, natomiast twardość wydzieleń w warstwie wynosiła od 1030 – 1800 HV0.5. Badania metalograficzne wykazały, że warstwy z brązu aluminiowego charakteryzowały się wysoką jakością, zwartą, drobnoziarnistą budową i zawierały najmniejszą, spośród badanych warstw, ilość widocznych porów.

AMBROZIAK A., BIAŁUCKI P., POROCHOŃSKI A.: **Chosen properties of coatings obtained by thermal spraying**; EiN nr 2/2005, s. 42-47.

This paper describes results of research tests of sprayed coatings of aluminium bronze, steel X46Cr13 and flux–cored wire Spray – Arc 100. The influence of a stand off distance or a sort of material on the tensile strength of coatings was investigated. The tensile strength of X46Cr13 was reached the maximum value circa 180 MPa. Microhardness of coatings of Spray–Arc 100 in metal matrix is 530 HV0,2, and in grain releases is 1030 – 1800 HV0,5. It was found that the quality of sprayed layers of alumina bronze is high, low porosity, fine – grained and compact structure in metallographic observations.

FLISIAK J., JÓZWIK J., WŁODARCZYK M.: **Analiza technologii obróbki sworznia w aspekcie poprawy dokładności wymiarowej gotowego wyrobu**; EiN nr 2/2005, s. 48-52.

W artykule zaprezentowano proces optymalizacji technologii obróbki elementu podatnego typu wałek. Jako kryteria optymalizacji przyjęto dokładność wymiarową gotowego wyrobu oraz główny czas obróbki. Do symulacji wartości ugięcia toczonego elementu wykorzystano metodę elementów skończonych MES. Wyniki zamieszczono w postaci rysunków, tabel i wykresów.

FLISIAK J., JÓZWIK J., WŁODARCZYK M.: **Analyzing the machining technology of the bolt for improvement dimensional accuracy of the finished product**; EiN nr 2/2005, s. 48-52.

In the article are presented optimization process of cutting technology flexible element type shaft. As criteria of the optimization are accepted the dimension- accuracy finished product and the main cut time. To the simulation of the value of deflection turned element are used The Finite Elements Method (FEM). Results of conducted research were showed with the aid of diagrams, tables and some illustrations.

LIPSKI J., LONKWIC P.: **Wpływ procesu zużycia pary kinematycznej koło – lina na zjawisko zakleszczania liny nośnej dźwigu elektrycznego**; EiN nr 2/2005, s. 53-56.

W artykule przedstawiono rezultaty teoretycznych rozważań nad wpływem procesu zużycia pary kinematycznej koło – lina na zjawisko zakleszczenia liny nośnej w rowkach linowych. Rozważania teoretyczne wydają się być niezbędne w celu wykonania badań nad wspomnianym zjawiskiem. Zakleszczenie liny w rowku linowym jest zjawiskiem niebezpiecznym z punktu bezpieczeństwa podróżujących oraz eksploatacji urządzenia. W związku z powyższym wydaje się być słusznym podjęcie prób zdiagnozowania wspomnianego zjawiska.

LIPSKI J., LONKWIC P.: **The effect of wear process of „wheel - rope" kinematic couple on suspension rope jaming**; EiN nr 2/2005, s. 53-56.

The paper deals with results of theoretical consideration of influence of wear process of kinematical pair of sheave – rope on jam effect of rope in the lifting groove. Theoretical considerations seem to be indispensable for future tests of this effect. Rope jamming in the lifting groove is a danger event from the lift users and lift exploitation point of view. Taking into consideration the above said it seems to be motivated do diagnose such effect by test.

ZWIERZCHOWSKI M.: **Procesy zużywania elementów układów rozrządu silników ZS**; EiN nr 2/2005, s. 57-60.

W pracy przedstawiono zagadnienia teorii zużycia ruchomych elementów układów rozrządu silników ZS. W pracy przedstawiono poza tym analizę zjawisk zachodzących w styku ślizgowym i matematyczny opis zachodzących procesów.

ZWIERZCHOWSKI M.: **Wears process of diesel engines timing gear systems**; EiN nr 2/2005, s. 57-60.

This article presents problems of wear resistance of diesel engine elements. In the present work, phenomena occuring in sliding contact was reviewed and presents mathematical description of this process.

AMBROZIAK A., KORALEWICZ Z., KORZENIOWSKI M., KUSTROŃ P.: **Metody kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym**; EiN nr 2/2005, s. 61-66.

W obecnych czasach oprócz stosowania tradycyjnych metod kontroli jakości po procesie zgrzewania takich jak badania niszczące (zrywanie, wyłuskiwanie, zgłady metalograficzne) oraz badania nieniszczące (badania ultradźwiękowe, badania rentgenowskie) istnieje silna potrzeba kontroli jakości wykonywanych zgrzein punktowych już w trakcie ich powstawania, w trakcie tworzenia ciekłego jądra zgrzeiny i równocześnie korekcja niezgodności i zakłóceń w procesie zgrzewania oporowego punktowego.

W artykule przedstawiono najbardziej znane metody kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym. Szerzej omówiono trzy metody: kontrolę jakości połączeń zgrzewanych w oparciu o sieci neuronowe, system kontroli jakości na bazie fuzzy logic oraz ultradźwiękową kontrolę jakości zgrzein w czasie rzeczywistym.

AMBROZIAK A., KORALEWICZ Z., KORZENIOWSKI M., KUSTROŃ P.: **ON-LINE quality control methods during spot resistance welding process**; EiN nr 2/2005, s. 61-66.

This article contains some information about the main methods of quality control in spot resistance welding process. There's a lot of factor witch can influence on connection quality. We focused on three main methods, which are used during on-line process control. We present system based on neural-nets, PQS^{weld}, system based on fuzzy logic and Ultrasonic Control System. Two of three mentioned methods investigate and measure the electrical parameters of resistance welding (voltage, welding current, dynamic resistance). The third one, measure the amplitude level of ultrasonic wave.

WALCZAK M., SUROWSKA B., BIENIAŚ J.: **Próba podwyższenia trwałości połączenia układu metal-ceramika do zastosowań w protetyce stomatologicznej;** EiN nr 2/2005, s. 67-71.

Przeprowadzono badania przyczepności dwóch kombinacji połączeń: Ti/SiO_2/Triceram i Ti/Triceram metodą trzypunktowego zginania (wg PN-EN ISO 9693). Powłoki SiO_2 nanoszone były na tytanowe podłoże metodą zol-żel. Otrzymane wyniki badań wykazały większą przyczepność połączenia Ti/SiO_2/Triceram niż porównywany układ połączenia Ti/Triceram bez warstwy przejściowej SiO_2. Ponadto stwierdzono: (1) jednorodność warstw SiO_2 (2) porcelana dentystyczna stosowana na warstwach SiO_2 wykazuje dobrą przyczepność do podłoża tytanowego oraz (3) warstwy pośrednie mogą dostarczyć trwałego połączenia pomiędzy metalem a porcelaną.

WALCZAK M., SUROWSKA B., BIENIAŚ J.: **Durability test of rice the metal-ceramics connection to application in dental prosthetics**; EiN nr 2/2005, s. 67-71.

The bond strength by three-point bending (according to PN-EN ISO 9693) of two combination: Ti/SiO_2/Triceram and Ti/Triceram were evaluated. Coatings of SiO_2 on base titanium were deposited using sol-gel method. Results showed that the bond strength of Ti/SiO_2/Triceram in control group was significantly higher than the Ti/Triceram without intermediate layers SiO_2. The analysis revealed: (1) a compact, homogenous SiO_2 coating, and (2) that dental porcelain on SiO_2 coatings shows good adhesion to base titanium and (3) that intermediate coatings may provide a durable joint between metal and porcelain.

WŁODARCZYK M., FLISIAK J.: **Analiza wpływu charakterystyki materiału kleju na rozkład naprężenia w połączeniu klejowym;** EiN nr 2/2005, s. 72-77.

W pracy podjęto próbę porównania wpływu charakterystyki kleju na rozkład naprężenia w połączeniu klejowym metali. Analizę numeryczną prowadzono dla dwóch modeli kleju: liniowego i nieliniowego z uwzględnieniem różnych wariantów podziału warstwy spoiny, tj. na 2, 3 i 4 warstwy. Zaprezentowano rozkłady naprężeń wzdłuż długości oraz szerokości spoiny klejowej. Jako narzędzie numeryczne wykorzystano system Abaqus. Porównano różne sposoby modelowania i obliczeń połączeń klejowych oraz ich wpływ na wielkość modelu obliczeniowego. Otrzymane wyniki przedstawią jak ważne jest przyjęcie właściwego modelu kleju na rozkłady naprężenia, zwłaszcza w obszarach ich silnych koncentracji determinujących wytrzymałość całego połączenia.

WŁODARCZYK M., FLISIAK J.: **Analysis of influence of glue characteristics on stress distribution in adhesive joint**; EiN nr 2/2005, s. 72-77.

The aim of this work is to compare the influence of glue characteristics on stress distribution in an adhesive joint. The numeric analysis was made for two different types of glue models: linear and non-linear with taking into account different alternative designs of division of an adhesive joint's layer i.e.,2,3,4 layers. The stress distribution was presented along the length as well as the width of a glue joint. The Abaqus system was used as a numeric tool. Different ways of modeling and calculations were compared for the adhesive joints and their influence on the size of the computational model. The received results show how important it is to choose a proper model of glue. The suitable choice influences the stress distribution, especially in places of high stress concentrations determining the strength of the whole connection areas.

W roku 2005 decyzją Zarządu PNTTE do Rady Naukowej kwartalnika „Eksploatacja i Niezawodność" zaproszono kolejne osoby, aktywnie współpracujące dotychczas z Towarzystwem. Są nimi: prof. Zoja Bednarek (Wyższa Oficerska Szkoła Pożarnicza, Warszawa), Dr Ilia Frenkel (Negev Academic College of Engineering, Izrael), prof. Andrzej Seweryn (Politechnika Białostocka) oraz prof. Irina Yatskiv (Instytut Transportu i Telekomunikacji, Ryga, Łotwa).Poniżej prezentujemy krótkie notki biograficzne nowych członków Rady Naukowej naszego wydawnictwa.

St. bryg. prof. dr hab. inż. Zoja Bednarek
Komendant-Dziekan Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Absolwentka Kijowskiego Instytutu Inżynieryjno-Budowlanego Wydziału Budownictwa Przemysłowego i Miejskiego. W 1968 roku rozpoczęła pracę na Politechnice Warszawskiej jako asystent. W 1973 roku ukończyła czteroletnie Studia Doktoranckie na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Po obronie pracy doktorskiej pt.: „Kryteria konstrukcyjno-technologiczne wzmocnienia konstrukcji przez sprężenie" uzyskała w 1975 roku stopień doktora nauk technicznych. W latach 1973-76 pracowała jako projektant, a następnie starszy projektant oraz autor części budowlanej kilkunastu projektów obiektów hutniczych w biurze projektowym „Biprohut". W tym czasie uzyskała uprawnienia projektowe.

W Wyższej Oficerskiej Szkole Pożarniczej rozpoczęła pracę w 1976 roku jako adiunkt w Zakładzie Mechaniki Technicznej, a od października 1980 roku jako kierownik tego Zakładu. W 1979 roku ukończyła Studia Podyplomowe z zakresu Ochrony Przeciwpożarowej.

Opublikowała ponad 60 artykułów naukowych w czasopismach krajowych i zagranicznych z dziedziny wytrzymałości materiałów w wysokich temperaturach oraz ratownictwa technicznego. Jest współautorem dwóch skryptów z tego zakresu oraz opracowania książkowego na temat katastrof budowlanych.

Jest głównym twórcą 12 patentów i wzorów użytkowych sprzętu ratowniczego stosowanego w pożarnictwie.

Prowadzi wykłady z przedmiotów mechanika i wytrzymałość materiałów oraz podstawy analizy ryzyka (w budownictwie). Była promotorem ponad 200 prac inżynierskich i magisterskich.

Bardzo wysoko ceni współpracę z młodzieżą. Zachowuje przyjazne, serdeczne stosunki z absolwentami SGSP. Jest dumna z ich osiągnięć zawodowych. Trzykrotnie była wybierana przez młodzież najsympatyczniejszym wykładowcą SGSP.

W 1997 roku obroniła pracę habilitacyjną pt.: „Wpływ wzrostu temperatury na parametry wytrzymałościowe stali, stosowane przy ocenie bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji żelbetowych".

W styczniu 1998 roku została mianowana na stanowisko profesora SGSP oraz szefa Katedry Techniki Pożarniczej, a od września 2001 r. również na stanowisko prodziekana Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego. Od czerwca 2002 roku jest komendantem-dziekanem tego Wydziału. Jednocześnie pełni kilka innych funkcji. Jest członkiem Rad Naukowych: SGSP, Instytutu Wyrobów Włókienniczych „Moratex" oraz Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej. Jest przewodniczącą Rady Jednostki Certyfikującej Wyroby CNBOP. Jest członkiem Kolegium Redakcyjnego „Przeglądu Budowlanego" oraz członkiem Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa.

Ma męża filologa klasycznego, absolwenta KUL, tłumacza z języka angielskiego literatury filozoficzno-religijnej, dwoje dzieci - córka jest lekarzem, syn fizykiem. Ma trzech wnuków i dwie wnuczki.

Zainteresowania naukowe: wytrzymałość materiałów i konstrukcji budowlanych w podwyższonych i wysokich temperaturach.

Hobby: malarstwo, architektura, sztuka użytkowa, literatura faktu, dzienniki, wspomnienia, szczególnie z okresu międzywojennego.

Dr Ilia Frenkel
Negev Academic College of Engineering, Israel

Studiował zastosowania matematyki na Uniwersytecie w Woroneżu, gdzie uzyskał stopień doktora. Stopień doktora habilitowanego uzyskał w Kijowskim Instytucie Ekonomii. Nastepnie pracował w Instytucie Badań i Planowania, gdzie był kierownikiem Instytutu Komputerowego Planowania Systemów Kontroli, wykładając również w Wołgogradzkim Instytucie Inżynierii. W swojej karierze naukowej był również dyrektorem Instytutu Zastosowań Matematyki i Komputerowego Modelowania. Po wyjeździe do Izraela w 1991 roku objął stanowisko wykładowcy w dziedzinie rachunku różniczkowego, niezawodności i statystyki w Ben Gurion University of the Negev and Sapir Academic College, a następnie został wykładowcą w Instytucie Mechaniki w Negev Academic College of Engineering. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na teorii niezawodności i optymalizacji produkcji. Jest członkiem Amerykańskiego Towarzystwa Statystycznego i twórcą International Editions of Student Research Works Proceedings, wydawaną przez Transport and Telecommunication Institute (Latvia) oraz Negev Academic College of Engineering (Israel).

Prof. Irina Yatskiv
Riga Transport and Telecommunication Institute, Latvia
Instytut Transportu i Telekomunikacji, Ryga, Łotwa

Obecne stanowisko:
- Dyrektor Katedry Metod Matematycznych i Modelowania na Wydziale Elektroniki i Informatyki
- Dyrektor Wydziału Strategii i Rozwoju Instytutu Transportu i Telekomunikacji
- Prorektor ds. Nauki i Badań w Instytucie Transportu i Telekomunikacji

Wykształcenie:
- Riga Civil Aviation Engineering Institute, Stopień doktora w dziedzinie mechaniki (1990)
- Studia podyplomowe odbyła w katedrze ACS, Riga Aviation University, Riga, Latvia (1990)
- Riga Civil Aviation Engineering Institute, Faculty of Automation and Computer Science, Riga, Latvia, Otrzymała stopień w specjalności "Computer Based Control System" qualification "Engineer-systems technician" (1982)

Praktyka zawodowa:
- Profesor Instytutu Transportu i Telekomunikacji (od 1999r.).
- Zajmowała się badaniami w procesie kształcenia na Uniwersytecie w Oxfordzie w Instytucie Statystyki (August 1997).
- Kierownik projektu, Komputerowe systemy kontroli w przemyśle lotniczym „SochiSpecAvia" (1995-1997).
- Główny specjalista projektu, Komputerowe systemy kontroli Pilot Subvision in Arkhangelsk and Adler Airports (1991-1994).
- Uczestniczka projektu, Komputerowe systemy kontroli w fabryce minibusów w Rydze (1990-1991).
- Główny specjalista projektu, Komputerowej kontroli w diagnostyce silników D-36 (1987-1990).

Działalność zawodowa:
- Dyrektor Latvian Operation Research Society (od 2003)
- Członek Baltic Operation Research Society (od 2003)
- Członek Organisation Committee "Application of Simulation (ИММОД-2003)", Sankt-Petersburg (2003)
- Współtwórca, Proceedings of Student Research Works, Latvia (2002- aktualnie)
- Członek Editorial Board, International Journal "Air Transportation World Wide", USA (from 2001 - aktualnie)
- Członek the International Society for Computer Simulation (od 1995)
- Członek the Latvian Simulation Society (od 1994).

Prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn
Politechnika Białostocka

Tytuł naukowy i data nadania:
- profesor nauk technicznych, nadany przez Prezydenta RP 20 maja 2004 r.

Reprezentowana dziedzina, dyscyplina, specjalność:
- nauki techniczne, mechanika, wytrzymałość materiałów, mechanika uszkodzeń i pękania, mechanika ośrodków ciągłych.

Osiągnięcia w kształceniu kadry naukowej:
- promotor 2 zakończonych przewodów doktorskich:
  - Andrzej Łukaszewicz – Modelowanie zagadnień kruchego pękania elementów z karbami w dwuosiowym stanie obciążenia (Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, 2004 r., praca wyróżniona)
  - Adam Tomczyk – Modelowanie propagacji pęknięć zmęczeniowych w dwuosiowym stanie obciążenia (Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, 2004 r.)
- promotor w otwartym przewodzie doktorskim:
  - Adam Adamowicz – Modelowanie osobliwych pól naprężeń w zagadnieniach mechaniki pękania z wykorzystaniem metody elementów skończonych (Politechnika Warszawska, Wydział SiMR);
- opiekun w przygotowanych do otwarcia 3 przewodach doktorskich
- recenzje rozpraw doktorskich – 2; habilitacyjnych – 3 (w tym 1 wydawnicza).

Zajmowane stanowiska:
- konstruktor w Toruńskich Zakładach Urządzeń Okrętowych (1986 - 1988r.),
- asystent na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej (1988 - 1993r.),
- adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej (1993 - 1998r.),
- profesor nadzwyczajny na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej (od 1998r.),
- kierownik Katedry Mechaniki Stosowanej (od 1 października 1999 roku),
- Dziekan Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej (od 1 września 2002 roku).

Członkostwo w organizacjach naukowych (krajowych i zagranicznych):
- członek Komitetu Mechaniki PAN od 2003 roku,
- członek Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich od 1987 roku, zastępca przewodniczącego Koła Uczelnianego w Politechnice Białostockiej w latach 1995-1998 r.,
- członek Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej od 2002 roku,
- członek Sekcji Mechaniki Ośrodków Ciągłych Komitetu Mechaniki PAN w latach 1996- 2002,
- członek Sekcji Mechaniki Materiałów Komitetu Mechaniki PAN od 2003 roku,
- członek Sekcji Mechaniki Konstrukcji Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN od 2003 roku,
- członek Rady Naukowej Polskiej Grupy Pękania od 1999 roku,
- członek Międzysekcyjnego Zespołu Mechaniki Pękania i Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji od 1999 roku.

Główne tematy prac naukowych:
- modelowanie zagadnień pękania i kumulacji uszkodzeń w złożonych stanach obciążeń,
- teoretyczna, doświadczalna i numeryczna analiza osobliwych pól naprężeń,
- modelowanie rozwoju szczelin pod wpływem obciążeń zmęczeniowych,
- nośność graniczna elementów konstrukcyjnych,
- metoda elementów skończonych w zastosowaniach do mechaniki pękania,
- modelowanie zagadnień obróbki plastycznej,
- analiza procesów zagęszczania ośrodków sypkich.

Publikacje (wsumie 147):
- monografie opublikowane przez renomowane wydawnictwa lub instytucje naukowe – 1 (Biblioteka Mechaniki Stosowanej, IPPT PAN)
- monografie opublikowane przez ośrodki uczelniane – 3 (w tym 1 zagraniczna)
- redakcja naukowa monografii – 1
- podręczniki i skrypty – 1
- rozdziały w monografiach opublikowane przez renomowane wydawnictwa lub instytucje naukowe – 5
- rozdziały w monografiach opublikowanych przez ośrodki uczelniane – 5

- artykuły w czasopismach z listy filadelfijskiej – 13 (Int. J. of Mechanical Sciences, Engng Fract. Mech. (6), J. Eng. Mech. ASCE, Int. J. Solids Struct.(2), J. de Physique (2), Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.);
- artykuły w innych czasopismach renomowanych o zasięgu międzynarodowym–7
- artykuły w czasopismach o zasięgu krajowym – 13
- artykuły w czasopismach lokalnych – 36
- publikowane referaty na międzynarodowych konferencjach organizowanych przez renomowane instytucje naukowe – 12
- publikowane referaty na innych międzynarodowych konferencjach – 5
- publikowane referaty na konferencjach krajowych – 44
- patenty i wzory użytkowe – 2
- cytowania wg Science Citation Index (bez autocytowań) – 61

Inne osiągnięcia:

- patenty i wzory użytkowe - 2,
- kierownictwo 3 projektów badawczych (grantów) Komitetu Badań Naukowych realizowanych w Politechnice Białostockiej: główny wykonawca w 4 projektach badawczych Komitetu Badań Naukowych,
- kierownik 4 projektów badawczych „własnych" oraz 2 prac statutowych,
- recenzowanie prac w pismach: International Journal of Solids and Structures, International Journal of Fracture, European Journal of Mechanics, Mechanics of Machines, Archiwum Budowy Maszyn, Archiwum Mechaniki Stosowanej, Eksploatacja i Niezawodność, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, seria: Mechanika oraz Budowa i Eksploatacja Maszyn,
- recenzje podręczników i monografii - 3,
- recenzje projektów badawczych (grantów) KBN - 4,
- cytowania wg Science Citation Index (bez autocytowań) - ponad 50,
- opracowania naukowe niepublikowane - 4,
- znaczący udział w opracowaniu planów studiów i programów nauczania dla specjalności: komputerowe wspomaganie projektowania oraz mechanika i informatyka stosowana na dziennych studiach magisterskich i inżynierskich na kierunku: mechanika i budowa maszyn,
- stypendium Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej w 1993r.,
- nagroda Komitetu Mechaniki PAN II stopnia w 2000r.,
- członek Komitetów Naukowych konferencji:
  - VII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce-Cedzyna, wrzesień 1999,
  - VIII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce-Cedzyna, wrzesień 2001,
  - IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce-Cedzyna, wrzesień 2003,
  - XVIII Sympozjum: Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska, maj 2000,
  - XIX Sympozjum: Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska, maj 2002,
  - Ogólnopolska Konferencja Studenckich Kół Naukowych i Młodych Pracowników Nauki, Budownictwo, Inżynieria Środowiska, Architektura, Mechanika, październik, 1999,
  - Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów, maj 2001,
  - II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów, czerwiec 2003,
  - 14th European Conference on Fracture, Cracow, September 2002 (national committee),
  - II Ogólnopolska Konferencja: Zagadnienia Mechaniki Pękania i Skrawania Materiałów, Kazimierz Dolny n. Wisłą, listopad 2001,
  - współzałożyciel Międzynarodowej Sieci Naukowej „Advanced Materials and Structures",
- przewodniczący Komitetu Organizacyjnego Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów 2001 oraz II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów 2003.
- Redaktor Naukowy Zeszytów Naukowych Politechniki Białostockiej, Seria: Mechanika w latach 1999 - 2003.

Mirosław GUZIK
Grzegorz KOSZŁKA

PORÓWNANIE WYBRANYCH SCHEMATÓW RÓŻNICOWYCH NA PRZYKŁADZIE RÓWNANIA $\dot{x} = t + 2x$

SELECTED DIFFERENTIAL SCHEMES COMPARISON BY MEANS OF THE EQUATION $\dot{x} = t + 2x$

W artykule przedstawiono niektóre metody numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych na wybranym przykładzie. Dokonano próby porównania użytych schematów numerycznych pod względem dokładności i kosztu obliczeń.

***Słowa kluczowe**: schemat różnicowy, metody numeryczne, równanie różniczkowe*

The article presents selected methods of numerical solving of ordinary differential equations. An attempt has been made to compare applied differential schemes in respect of their precision and their cost of computations.

***Keywords:** differential scheme, numerical method, differential equation*

1. Wstęp

Budowa modeli matematycznych opisujących zjawiska w różnych dziedzinach wiedzy wiąże się najczęściej z koniecznością wykorzystania równań różniczkowych. Równania różniczkowe bardzo rzadko dają się rozwiązać metodami analitycznymi. Zdarza się to prawie wyłącznie w przykładach specjalnie dobranych do celów dydaktycznych. Istnieją jednak metody rozwiązywania równań różniczkowych za pomocą schematów różnicowych, które najczęściej są stosowane w modelach numerycznych. Schematy różnicowe różnią się pomiędzy sobą dokładnością i „kosztem" obliczeń, przekładającym się na czas obliczeń.

2. Obliczenia wybranymi schematami różnicowymi

Równanie różniczkowe pierwszego rzędu można zapisać w postaci $\dot{x} = f(t, x)$, gdzie t jest zmienną niezależną (najczęściej czas), natomiast $x = x(t)$. Za pomocą schematów różnicowych można znaleźć przybliżone rozwiązanie równania różniczkowego w poszczególnych „chwilach" t, oddalonych od siebie o założony krok całkowania h. Rozwiązanie ma postać ciągu par liczb (t_k, x_k), gdzie k oznacza kolejne liczby całkowite. Pierwsza para dana jest w postaci warunku początkowego $x(t_0) = x_0$.

Formalny rząd schematu określa się na podstawie wzoru Taylora, będącego rozwinięciem wyrażenia $x(t + h)$. Jest równy rzędowi najwyższych uwzględnionych w schemacie wyrazów. Im wyższy rząd schematu, tym większa dokładność obliczeń.

Wybór kroku całkowania w istotny sposób wpływa na dokładność rozwiązania, gdyż jest ono zbieżne do rozwiązania dokładnego przy $h \to 0$. W związku z tym, obliczenia każdym z rozpatrywanych schematów przeprowadzono z jednakowym krokiem $h = 0{,}2$. Jako warunek początkowy przyjęto $x(1) = 1$. Całkowanie przeprowadzono w granicach 1 do 5.

Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu komputerowego napisanego w języku C++. W tekście znajdują się fragmenty kodu będące numeryczną realizacją rozpatrywanych schematów.

2.1. Otwarty schemat Eulera

Otwarty schemat Eulera wyraża się wzorem:

$$x_{k+1} = x_k + hf_k \tag{1}$$

gdzie: f_k oznacza wartość funkcji podcałkowej w punkcie (x_k, t_k).

Do obliczenia przykładowego równania schematem Eulera posłużyły w programie poniższe funkcje:

```
float f(float t, float x){
return(t + 2.0 * x);
}

/*********************************************************/
float euler(float t, float x, float h){
return(x + h * f(t, x));
}
```

2.2. Otwarty schemat Taylora

Otwarty schemat Taylora dany jest wyrażeniem:

$$x_{k+1} = x_k + hf_k + \frac{h^2}{2} f_{t,k} + \frac{h^2}{2} f_{x,k} f_k \tag{2}$$

gdzie $f_{t,k}$,$f_{x,k}$ oznaczają odpowiednio wartości pochodnych f_t oraz f_x funkcji podcałkowej w punkcie (x_k, t_k). Rząd schematu Taylora wynosi 2, ponieważ w rozwinięciu Taylora uwzględnia wyrazy rzędu h^2.
Schemat został ujęty w następującym fragmencie programu:

```
float f(float t, float x){
return(t + 2.0 * x);
}
float ft(float t, float x){
return(1.0);
}
float fx(float t, float x){
return(2.0);
}

/*********************************************************/
float taylor(float t, float x, float h){
return(x + h * f(t, x) + h * h / 2.0
          * (ft(t, x) + fx(t, x) * f(t, x)));
}
```

2.3. Zamknięty schemat, zwany schematem trapezów

Schemat jest dany następującym wzorem:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2}(f_k + f_{k+1}) \tag{3}$$

Nazwa wynika z faktu, iż w kolejnym kroku obliczeń do wartości x_k dodawane jest pole wycinka powierzchni znajdującej się pod wykresem funkcji podcałkowej, w kształcie trapezu o wysokości równej h.

W programie, schemat realizowany jest za pomocą poniższych funkcji:

```
float f(float t, float x){
return(t + 2.0 * x);
}

/*********************************************************/
float trapez(float t, float x, float h){
return((x + h / 2.0 * (f(t, x) + t + h)) / (1.0 - h));
}
```

Czteropoziomowy, otwarty schemat Rungego-Kutty

W celu porównania, wybrano jeden z najpopularniejszych otwartych, 4-poziomowych schematów Rungego-Kutty, dany wzorami:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \tag{4}$$

$$K_1 = f(t_k, x_k)$$

$$K_2 = f(t_k + \frac{h}{2}, x_k + \frac{h}{2} K_1)$$

$$K_3 = f(t_k + \frac{h}{2}, x_k + \frac{h}{2} K_2)$$

$$K_4 = f(t_k + h, x_k + hK_3)$$

Schemat jest 4-tego rzędu, więc w rozwinięciu Taylora uwzględnia wyrazy do h^4.

Został zrealizowany w następującym fragmencie programu:

```
float f(float t, float x){
return(t + 2.0 * x);
}

/*********************************************************/
float runkut(float t, float x, float h){
float k1, k2, k3, k4;
k1 = f(t, x);
k2 = f((t + h / 2.0), (x + h / 2.0 * k1));
k3 = f((t + h / 2.0), (x + h / 2.0 * k2));
k4 = f((t + h), (x + h * k3));

return(x + h / 6.0 * (k1 + 2.0 * k2 + 2.0 * k3 + k4));
}
```

3. Obliczenia metodą ze zmiennym krokiem

Obliczenia metodą ze zmiennym krokiem przeprowadzono za pomocą następującego algorytmu całkowania:

1. Dane są trzy wartości $\{t_k, x_k, h_0\}$, gdzie (t_k, x_k) jest punktem na przybliżonej krzywej całkowej, a h_0 krokiem całkowania.
2. Przy użyciu wybranego schematu różnicowego, wyznaczane są wartości x_{k+1} i x_{k+2}, całkując dwukrotnie z krokiem h_0 z punktu (t_k, x_k) oraz wartość ω_{k+2}, całkując z krokiem $2h_0$.
3. Wykorzystują wartości ω_{k+2}, x_{k+2} i h_0 obliczane jest wyrażenie:

$$\gamma \approx \left(\frac{E_g h /(T - t_0)}{\left|\omega_{k+1} - x_{k+1}\right| /(2^p - 1)} \right)^{1/(p+1)} \qquad (5)$$

gdzie: E_g – założona dokładność obliczeń, p – rząd schematu, T – górna granica całkowania.

Wyznaczana jest nowa wartość kroku: $h_1 = c\gamma h_0$, gdzie c jest to współczynnik mający na celu ograniczenie zbyt częstych zmian długości kroku. Zwykle przyjmuje się $c=0,8$ z dodatkowym ograniczeniem $0,2h_0 \le h1 \le 5h_0$.

4. Jeśli $h_1 < h_0$, to sprawdzany jest warunek:

$$\frac{\left|x_{k+1} - \omega_{k+1}\right|}{2^p - 1} \le E_g \frac{h}{T - t_0}, \quad z\ h = h_0 \qquad (6)$$

Jeśli jest spełniony, to wartości x_{k+1}, x_{k+2} są akceptowane jako rozwiązanie i obliczenia są kontynuowane od punktu 1) z wartościami $\{t_{k+2}, x_{k+2}, h_0\}$. Jeśli warunek nie jest spełniony, to wartości x_{k+1} i x_{k+2} są odrzucane i obliczenia są powtarzane od punktu 1) z wartościami $\{t_k, x_k, h_1\}$.

5. Jeśli $h_1 > h_0$, to wartości x_{k+1} i x_{k+2} są akceptowane jako rozwiązanie, a obliczenia są kontynuowane od punktu 1) z wartościami $\{t_{k+2}, x_{k+2}, h_1\}$.

Ze względu na dużą objętość nie zamieszczono w artykule kodu realizującego w programie powyższą metodę.

Wyjściowy krok obliczeń przyjęto $h_0 = 0,2$. Obliczenia przeprowadzono stosując w punkcie 2) wszystkie z poprzednio rozpatrywanych schematów numerycznych.

W metodzie ze zmiennym krokiem, błąd obliczeń E_g jest zakładany przed wykonaniem obliczeń. Do obliczenia konkretnych wartości zmiennej x w każdym obiegu pętli programu, wykorzystywany jest przyjęty schemat różnicowy. Algorytm dostosowuje długość kroku obliczeń tak, aby przy zastosowaniu konkretnego schematu uzyskać wartość obliczanej zmiennej z błędem mniejszym lub równym od założonego. Zatem za pomocą tej metody można porównywać ze sobą poszczególne schematy różnicowe, a za miarę ich oceny przyjąć:

a) liczbę wykonanych kroków w metodzie,
b) wielkość założonego błędu wyników.

Większa liczba kroków wykonana przez program świadczy o mniejszej dokładności zastosowanego schematu różnicowego.

4. Analiza wyników

4.1. Wyniki obliczeń uzyskane za pomocą schematów Eulera, Tayloara, trapezów i Rungego-Kutty

Wyniki porównano z dokładnym rozwiązaniem, danym równaniem:

$$x(t) = -\frac{1}{2}t - \frac{1}{4} + \frac{7}{4}\frac{e^{2t}}{e^2} \qquad (7)$$

Wyniki otrzymane w obliczeniach za pomocą pierwszych czterech schematów zamieszczono w tab. 1. Otrzymane wyniki ilustruje wykres zamieszczony na rys. 1.

4.2. Porównanie rozpatrywanych schematów w obliczeniach metodą ze zmiennym krokiem

Posługując się w metodzie ze zmiennym krokiem schematem Taylora 2-go rzędu, do osiągnięcia wyników z założonym błędem 10-3, potrzebne było wykonanie 810 kroków.

Wykorzystując w metodzie zamknięty schemat trapezów, do uzyskania tej samej dokładności wyników, wystarczyło 597 kroków obliczeń.

Przy zastosowaniu w metodzie 4-poziomowego schematu różnicowego Rungego-Kutty, do uzyskania wyników z błędem tego samego rzędu, program wykonał zaledwie 28 kroków.

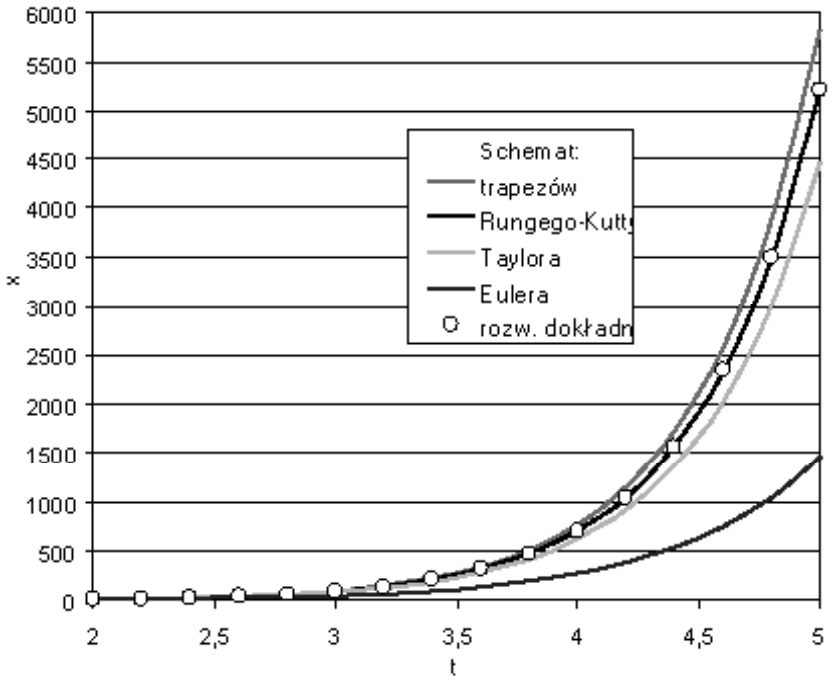
Stosując w metodzie schemat Eulera, dopuszczono 10-krotnie większy błąd obliczeń. Wykonano 150 000 kroków, co wystarczyło na uzyskanie wyników jedynie do wartości zmiennej niezależnej $t = 2,86757$. Wraz ze wzrostem wartości zmiennej niezależnej t, bardzo silnie malała długość kroku h i po wykonaniu ok. 3000 kroków była ona rzędu 3x10-7.

5. Wnioski

Najmniejszym kosztem obliczeń spośród rozpatrywanych metod charakteryzuje się otwarty schemat Eulera. Jednak otrzymane wyniki, przy założonym kroku obliczeń, bardzo odbiegają od dokładnego rozwiązania. Większą dokładność wyników można

Tab. 1. Wyniki obliczeń rozwiązania równania za pomocą poszczególnych schematów różnicowych
Tab. 1. Results of solving computations of the equation by means of individual differential schemes

t	x rozwiązanie dokładne	x -wyznaczone metodą:			
		Eulera	Taylora	trapezów	Rungego-Kutty
1,0	1,0	1	1	1	1
1,2	1,8	2	2	2	2
1,4	2,9	2	3	3	3
1,6	4,8	4	5	5	5
1,8	7,5	6	7	8	8
2,0	11,7	8	11	12	12
2,2	17,9	12	17	19	18
2,4	27,3	17	26	28	27
2,6	41,4	24	39	43	41
2,8	62,4	35	58	66	62
3,0	93,8	49	86	99	94
3,2	140,7	69	129	150	141
3,4	210,7	97	191	225	211
3,6	315,2	137	284	339	315
3,8	471,1	192	421	509	471
4,0	703,8	270	624	764	703
4,2	1050,9	379	925	1147	1050
4,4	1568,8	531	1370	1722	1567
4,6	2341,5	744	2029	2584	2339
4,8	3494,2	1043	3004	3877	3490
5,0	5213,9	1461	4446	5816	5208



Rys. 1. Wykres przedstawiający rozwiązanie równania za pomocą poszczególnych schematów różnicowych
Fig. 1. Graph showing a solution of the equation by means of individual differential schemes

uzyskać stosując mniejszy krok obliczeń, jednak przyjęcie nawet skrajnie małego kroku w kilku tysiącach cykli obliczeń, nie zbliżyło zadawalająco rozwiązania tym schematem do rozwiązania dokładnego.

W otwartym schemacie Taylora uwzględniane są wyrazy rzędu h^2 w rozwinięciu Taylora. Przyczynia się to do znacznie większej dokładności obliczeń. Konieczne staje się jednak obliczenie dwóch pochodnych cząstkowych równania w każdym kroku obliczeń, co zwiększa koszt obliczeń numerycznych.

Jeszcze bliższy dokładnemu rozwiązaniu jest zamknięty schemat zwany schematem trapezów. Jednak jego zastosowanie wymaga rozwiązania równania, w którym obliczana wartość w danym kroku obliczeń, znajduje się po obu stronach znaku równości. Jest to szczególnie kłopotliwe przy rozwiązywaniu równań nieliniowych, gdyż obliczenia w każdym kroku trzeba wykonywać „metodą kolejnych przybliżeń". W przypadku rozpatrywanego, przykładowego równania różniczkowego, możliwe było wyrugowanie obliczanej zmiennej x_{k+1}, dzięki czemu koszt obliczeniowy tego schematu nie był większy od kosztu otwartego schematu Eulera.

Najdokładniejsze wyniki uzyskano stosując czteropoziomowy, otwarty schemat Rungego-Kutty. Uzyskane wyniki na przedstawionym wykresie (rys. 1) pokrywają się z rozwiązaniem dokładnym. Metoda ta charakteryzuje się niskim kosztem obliczeń przy dużej dokładności. Wywołanie funkcji, obliczającej tym schematem rozwiązanie równania w każdym kroku, wygląda identycznie jak wywołanie funkcji obliczającej schematem Eulera. Zatem nie wpływa na pogorszenie czytelności lub skomplikowanie kodu programu.

Zastosowanie rozpatrywanych schematów różnicowych w metodzie ze zmiennym krokiem potwierdziło dokładność schematu Rungego-Kutty. Wykazało ponadto, że zmniejszanie kroku całkowania w schematach niższego rzędu, jakim jest np. schemat Eulera, nie zawsze pozwala uzyskać zadawalającą dokładność obliczeń. Było to możliwe tylko w początkowym, wąskim przedziale całkowania.

6. Literatura

[1] Palczewski A.: *Równania różniczkowe zwyczajne, teoria i metody numeryczne z wykorzystaniem komputerowego systemu obliczeń symbolicznych*. WNT, Warszawa, 2004.
[2] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: *Metody numeryczne*. WNT, Warszawa, 2005.
[3] Gręboszj J.: *Symfonia C++*. Oficyna Kallimach, Kraków, 2004.

Mgr inż. Mirosław GUZIK
Dr inż. Grzegorz KOSZAŁKA
Katedra Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin
tel. 081 538 12 59
e-mail: mirguzik@op.pl, g.koszalka@pollub.pl

Rafał WRONA

WYZNACZANIE OPTYMALNYCH ALGORYTMÓW STEROWANIA AUTOMATYCZNEJ PRZEKŁADNI HYDROMECHANICZNEJ AUTOBUSU MIEJSKIEGO

DETERMINING OPTIMUM CONTROL ALGORITHMS OF CITY BUS AUTOMATIC HYDROMECHANICAL GEAR

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania optymalnych algorytmów przełączania biegów stopniowych układów napędowych pojazdów. Analizie poddano fazę rozpędzania pojazdu jako najbardziej energochłonną fazę ruchu. Zastosowano dwa kryteria optymalizacji: minimalizację czasu rozpędzania i minimalizację zużycia paliwa w fazie rozpędzania. Metodykę zilustrowano przykładem syntezy optymalnych algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego.

Słowa kluczowe: *autobus miejski, przekładnia automatyczna, algorytmy sterowania, kryteria optymalizacji, czas rozpędzania, zużycie paliwa*

The methodology of determining optimum algorithms of gear switching in graded power transmission systems of vehicles has been presented in the paper. The phase of vehicle acceleration, which is considered the most energy-consuming motion phase., is the subject of analysis. Two optimization criteria were applied: acceleration time minimization and fuel consumption minimization in the acceleration phase. The methodology has been illustrated with an example of the synthesis of optimum control algorithms of the city bus automatic hydromechanical gear.

Keywords: *city bus, automatic gear, control algorithms, optimization criteria, acceleration time, fuel consumption*

1. Wstęp

W warunkach miejskich eksploatacji autobusu występuje cykliczność jego ruchu. Dominującą fazą ruchu autobusu w cyklu, która określa i kształtuje jego wskaźniki paliwowo-trakcyjne jest rozpędzanie [1]. Algorytmy zmiany przełożeń układu napędowego samochodu w pozostałych fazach ruchu (toczenie, zwalnianie, hamowanie) nie wykazują istotnego wpływu na te wskaźniki. Dlatego uzasadnione jest opracowanie metodyki optymalnego sterowania zmianą przełożeń układu napędowego przede wszystkim dla fazy rozpędzania autobusu.

Znane metody wyznaczania algorytmów przełączania automatycznej skrzynki biegów, która najczęściej jest przekładnią hydromechaniczną, z reguły dotyczą ruchu samochodu maksymalnie przybliżonego do ruchu ustalonego. Trudności w bezpośrednim wykorzystaniu przyjętych w teorii samochodu kryteriów oszczędności zużywanego paliwa i dynamiki rozpędzania, a także niedoskonałość stosowanych metod matematycznych, uwarunkowały dużą różnorodność stosowanych wskaźników dodatkowych, które w sposób graficzny lub graficzno-analityczny pozwalają określić najdogodniejsze, z ich punktu widzenia, momenty zmiany przełożeń [2].

2. Analityczne metody oceny procesu rozpędzania i kryteria jakości

Budowa nowoczesnych układów napędowych pojazdów z wielostopniowymi przekładniami mechanicznymi i automatycznymi skrzyniami biegów poprzedzana jest analitycznymi badaniami procesu rozpędzania pojazdów. W tym aspekcie również zagadnienia sterowania przełączaniem biegów, jako środka dla optymalizacji procesu ruchu pojazdu nabierają zasadniczego znaczenia.

Wyznaczanie optymalnych momentów przełączania biegów przekładni hydromechanicznej, przy stałym położeniu pedału sterowania dawką paliwa, można sprowadzić do znalezienia takich wartości prędkości ruchu samochodu V_p, przy których należy dokonywać zmiany przełożeń - przełączania biegów

z niższych na wyższe - zapewniających uzyskanie ekstremum funkcjonału jakości procesu rozpędzania. Z uwagi na znaną rozbieżność pomiędzy oceną dynamiki i paliwowej ekonomiczności rozpędzania, wydaje się uzasadnione wykorzystanie w tym celu kilku kryteriów równocześnie. Pozwala to na wzajemne uzupełnianie się przez nie i kontrolę uzyskiwanych rezultatów. W wyniku analizy prac prowadzonych w tym kierunku, zasadnym wydaje się przyjęcie jako wyjściowe kryteria optymalności procesu rozpędzania samochodu:

- czasu rozpędzania samochodu T dla osiągnięcia zadanej końcowej prędkości rozpędzania V_k
- drogi przejechanej S podczas rozpędzania do zadanej prędkości V_k,
- zużycia paliwa Q koniecznego dla osiągnięcia zadanej prędkości końcowej rozpędzania V_k,
- wariacyjnego kryterium zużycia paliwa podczas rozpędzania samochodu uwzględniającego również dynamikę rozpędzania.

Odpowiednie funkcjonały jakości procesu rozpędzania samochodu dla argumentu v można przedstawić w następującej postaci:

Wyodrębnia się dokładną i uproszczoną analizę procesu rozpędzania pojazdu [2, 3] w celu określenia optymalnych chwil przełączenia biegów przekładni hydromechanicznej przy stałym położeniu pedału sterowania dawką paliwa. Istnieje możliwość określenia na drodze analitycznej takich prędkości samochodu, przy których należy dokonać zmiany przełożeń z niższych na wyższe, przy jednoczesnym uzyskaniu największej wartości jakości rozpędzania. Z uwagi na znaną rozbieżność pomiędzy oceną dynamiki a ekonomicznym zużyciem paliwa zasadnym jest określenie właściwej chwili zmiany przełożeń z uwzględnieniem kilku kryteriów równocześnie.

3. Metodyka uproszczonej analizy procesu rozpędzania

Dla celów inżynierskich wystarczającą dokładność zapewnia uproszczona analiza procesu rozpędzania pojazdu wyposażonego w przekładnię hydromechaniczną. Optymalne przełączenie biegów przekładni hydromechanicznej winny być realizowane w chwili osiągnięcia przez rozpędzany pojazd takiej prędkości V_p, przy której spełnione będą następujące warunki:

- dla dynamiki rozpędzania:

$$J_S = \sum_{i=1}^{n} S_i = \sum_{i=1}^{n} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)}\,dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)}\,dv - V_k \left(\int_{V_0}^{V_p} \frac{1}{a_i(v)}\,dv \right) \right] \tag{1}$$

$$J_S = \sum_{i=1}^{n} S_i = \sum_{i=1}^{n} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)}\,dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)}\,dv - V_k \left(\int_{V_0}^{V_p} \frac{1}{a_i(v)}\,dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{1}{a_{i+1}(v)}\,dv \right) \right] \rightarrow min \tag{2}$$

- dla zużycia paliwa:

$$J_Q = \sum_{i=1}^{n} \int_{V_0}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)}\,dv = \sum_{i=1}^{n} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)}\,dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)}\,dv \right] \rightarrow min \tag{3}$$

$$J_\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} Q_i - \sum_{i=1}^{n} \frac{(g_e N_e)_k}{V_k} S_i = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \int_{V_0}^{V_p} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)}\,dv + \int_{Vp}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)}\,dv - \right. \tag{4}$$

$$\left. - \frac{(g_e N_e)_k}{V_k} \left[\int_{V_0}^{Vp} \frac{v}{a_i(v)}\,dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)}\,dv \right] \right\} \rightarrow min$$

gdzie: a - przyśpieszenie samochodu, v - chwilowa wartość prędkości ruchu, V_0, V_k -początkowa i końcowa prędkości rozpędzania, i,n - odpowiednio, indeks i liczba biegów przekładni hydromechanicznej, S_i, t_i - odpowiednio, droga i czas rozpędzania na i-tym biegu przekładni, g_e - jednostkowe zużycie paliwa przez silnik, N_e -efektywna moc silnika.

- dla kryterium czasu rozpędzania do zadanej prędkości:

$$\frac{d}{dv}\left[\int_{V_0}^{V_p}\frac{1}{a_i(v)}dv-\int_{V_p}^{V_k}\frac{1}{a_{i+1}(v)}dv\right]=\frac{1}{a_i(V_p)}-\frac{1}{a_{i+1}(V_p)}=0 \tag{5}$$

- dla kryterium drogi rozpędzania do zadanej prędkości:

$$\frac{d}{dv}\left\{\int_{V_0}^{V_p}\frac{v}{a_i(v)}dv-\int_{V_p}^{V_k}\frac{v}{a_{i+1}(v)}dv-V_k\left[\int_{V_0}^{V_p}\frac{1}{a_i(v)}dv-\int_{V_p}^{V_k}\frac{1}{a_{i+1}(v)}dv\right]\right\}=$$
$$=\frac{V_p}{a_i(V_p)}-\frac{V_p}{a_{i+1}(V_p)}-V_k\left[\frac{1}{a_i(V_p)}-\frac{1}{a_{i+1}(V_p)}\right]=0 \tag{6}$$

- dla kryterium zużycia paliwa:

$$\frac{d}{dv}\left[\int_{V_0}^{V_p}\frac{(g_eN_e)_i}{a_i(v)}dv-\int_{V_p}^{V_k}\frac{(g_eN_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)}dv\right]=\frac{(g_eN_e)_i}{a_i(V_p)}-\frac{(g_eN_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)}=0 \tag{7}$$

- dla wariacyjnego kryterium zużycia paliwa:

$$\frac{d}{dv}\left\{\int_{V_0}^{V_p}\frac{(g_eN_e)_i}{a_i(v)}dv-\int_{V_p}^{V_k}\frac{(g_eN_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)}dv-\frac{(g_eN_e)_k}{V_k}\left[\int_{V_0}^{V_p}\frac{v}{a_i(v)}dv-\int_{V_p}^{Vk}\frac{v}{a_{i+1}(v)}dv\right]\right\}=$$
$$=\frac{(g_eN_e)_i}{a_i(V_p)}-\frac{(g_eN_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)}-\left[\frac{V_p}{V_k}\frac{(g_eN_e)_i}{a_i(V_p)}-\frac{V_p}{V_k}\frac{(g_eN_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)}\right]=0 \tag{8}$$

Warunki (6) i (7) dotyczące dynamiki rozpędzania można sprowadzić do postaci:

$$[a_i(V_p)-a_{i+1}(V_p)](V_p-V_k)=0 \tag{9}$$

Podobnie też warunek optymalności przełączeń biegów ze względu na zużycie paliwa zapisać możemy w postaci:

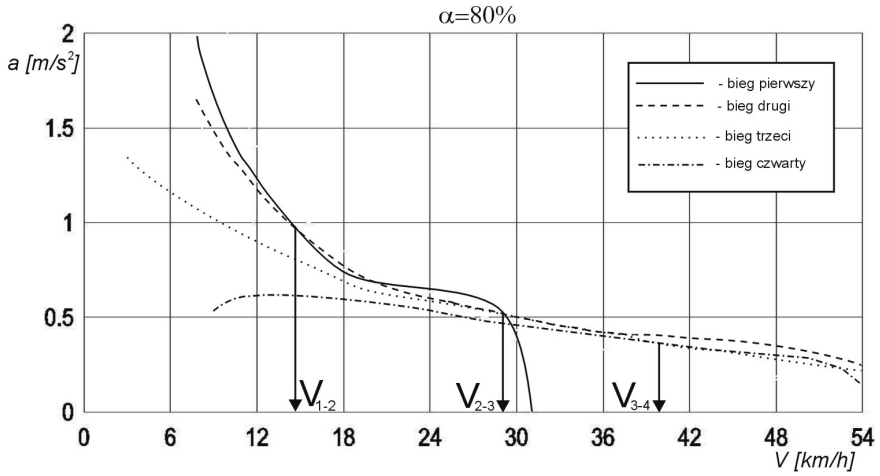
$$\left[\frac{(g_eN_e)_i}{a_i(V_p)}-\frac{(g_eN_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)}\right]\left(1-\frac{V_p}{V_k}\right)=0 \tag{10}$$

Wyznaczając ekstremum przedstawionych wyżej funkcjonałów otrzymamy optymalne chwile przełączania biegów przekładni hydromechanicznej w procesie rozpędzania samochodu, które według kryterium dynamicznego będą określone jako punkty przecięcia krzywych przyspieszenia pojazdu w funkcji prędkości ruchu na biegach sąsiednich. W przypadku braku takiego przecięcia, chwile przełączeń biegów określane będą jako punkty graniczne przedziału możliwych zmian prędkości V_p na biegu poprzednim.

Strategię takiego postępowania ilustruje rys. 1, gdzie przedstawiono przebieg krzywych przyspieszeń na poszczególnych biegach autobusu JELCZ M121M wyposażonego w automatyczną przekładnię hydromechaniczną ZF 5HP500. Punkty przecięcia się tych przyspieszeń określają chwile zmiany biegów reduktora mechanicznego tej przekładni zapewniające maksymalną dynamikę rozpędzania autobusu.

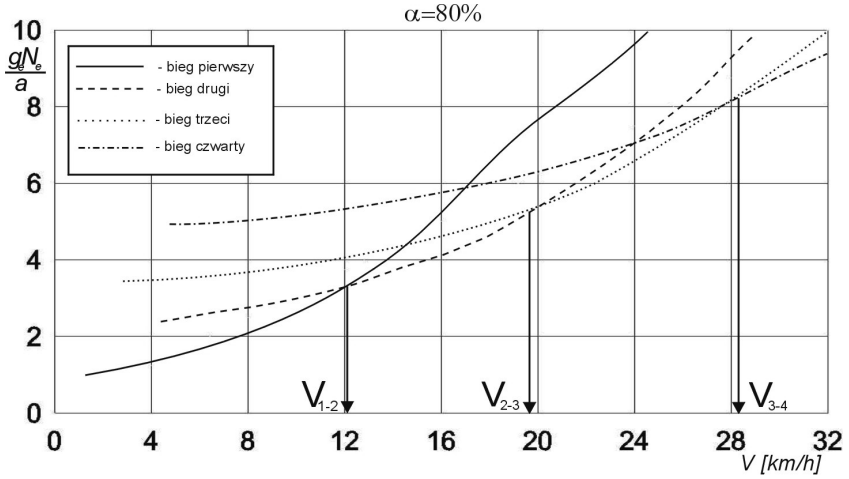
Odpowiednio, wg optymalnego kryterium ekonomicznego, chwile przełączeń biegów określane są punktami przecięcia krzywych wskaźników wyrażonych w postaci: g_eN_e/a w funkcji prędkości ruchu pojazdu na sąsiednich biegach przekładni hydromechanicznej albo też jako obszary graniczne możliwego przedziału zmienności prędkości V_p [2]. Na rys. 2 jest przedstawiony graficznie sposób wyznaczania tych optymalnych chwil zmiany biegów zapewniających minimalizację zużycia paliwa podczas rozpędzania autobusu JELCZ M121M z przekładnią automatyczną ZF 5HP500, jednak z zachowaniem pożądanej dynamiki rozpędzania.

Określone według takich strategii optymalne algorytmy sterowania przełączaniem biegów automatycznej przekładni hydromechanicznej ZF 5HP500 [5] zastosowanej w autobusie miejskim JELCZ M121M zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 3 w postaci linii przełączania biegów dla fazy rozpędzania autobusu. Zostały wyodrębnione zarówno algorytmy realizujące maksymalną dynamikę rozpędzania autobusu, jak też i zapewniające minimalizację zużycia paliwa podczas tego procesu rozpędzania. Oddzielnie zostały zilustrowane również algorytmy przełączania biegów tej przekładni, jakie



Rys. 1. Graficzna interpretacja poszukiwania optymalnych, ze względu na dynamikę rozpędzania, chwil zmiany biegów automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego

Fig. 1. Graphical interpretation of searching for optimum, as regards acceleration dynamics, moments of gear shifts in city bus automatic hydromechanical gear



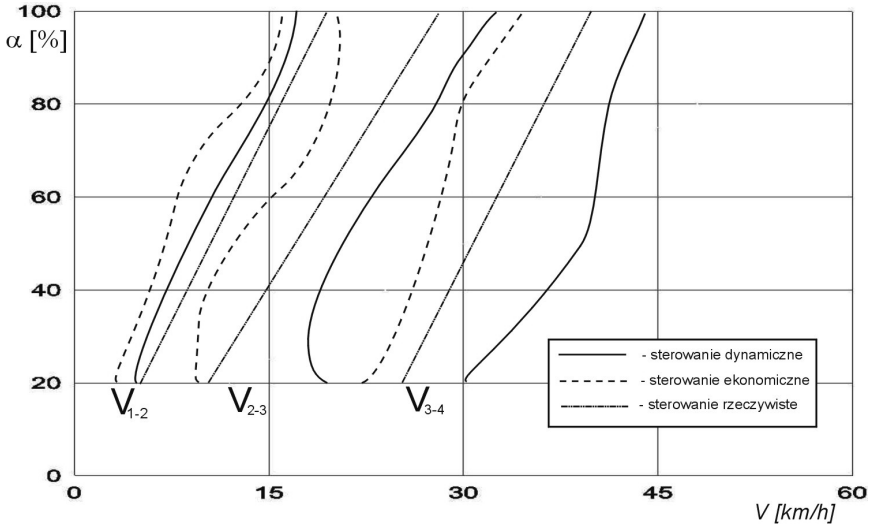
Rys. 2. Graficzna interpretacja poszukiwania optymalnych, we względu na minimalizację zużycia paliwa, chwil zmiany biegów automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego

Fig. 2. Graphical interpretation of searching for optimum, as regards fuel consumption minimization, moments of gear shifts in city bus automatic hydromechanical gear

są realizowane w autobusach będących na wyposażeniu Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Lublinie.

Dla oceny efektywności opracowanych algorytmów sterowania przekładni automatycznej autobusu miejskiego, zostały przeprowadzone symulacyjne badania porównawcze. W komputerowym programie opracowanym zgodnie z modelem rozpędzania autobusu zamieszczonym w pracy [4], zostały zrealizowane przedstawione na rys. 3 algorytmy sterowania przekładnią i wyznaczone wskaźniki jakości procesu rozpędzania autobusu. Analiza porównawcza tych wskaźników pozwala na następujące konstatacje:

- zastosowanie algorytmów optymalnego sterowania dynamicznego prowadzi do zmniejszenia czasu rozpędzania autobusu do prędkości końcowej $V_k = 60$ *km/h* nawet o około 13% w stosunku do algorytmów sterowania, jakie są realizowane w rzeczywistości,
- realizacja optymalnych algorytmów sterowania ekonomicznego dla tych samych porównywanych warunków daje możliwość zmniejszenia zużycia paliwa o około 5,5%, dla oddzielnych porównywanych wariantów procesów rozpędzania przy tylko nieznacznym pogorszeniu jego dynamiki.



Rys. 3. Zestawienie algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej ZF 5HP500 autobusu miejskiego JELCZ M121M

Fig. 3. Statement of control algorithms of ZF 5HP500 hydromechanical gear in JELCZ M121M city bus

4. Podsumowanie

Wykorzystanie różnych kryteriów w celu optymalnego wyznaczania chwil przełączania biegów w procesie rozpędzania pojazdu prowadzi do zróżnicowania ilościowych ocen dynamiki ruchu lub zużycia paliwa.

Wykorzystanie metod analitycznych umożliwia wyznaczanie chwil przełączeń zmiany biegów dla całego obszaru sterowania pracą silnika i jego współpracy w odbiornikiem, co prowadzić może do właściwego z punkty widzenia ekonomii sterowania układem napędowym.

5. Literatura

[1] Gronowicz J.: *Gospodarka energetyczna w transporcie lądowym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004.

[2] Koralewski G.: *Metodyka wyznaczania optymalnych momentów przełączania biegów przekładni hydromechanicznej w czasie rozpędzania samochodu*. Folia Societatis Sientiarum Lublinensis vol.5 nr 1, Lublin, 1996.

[3] Koralewski G.: *Metodogiczieskije aspiekty optimizacji zakonovuprawlienija i paramietrov gidromiechaniczieskich pieriedacz avtomobiliej*. NVF Ukrainski tiechnologii, Lwów, 2000.

[4] Koralewski G., Wrona R.: *Modelling of acceleration of the city bus with hydromechanical automatic transmission.* Problemy techniki Nr 2, Odessa, 2004.

[5] Siedlecki A.: *Skrzynie biegów*. ZF Ecomat Transport – Technika Motoryzacyjna Nr 5, 2000.

Mgr inż. Rafał WRONA

Stowarzyszenie Rzeczoznawców Techniki Samochodowej
i Ruchu Drogowego Oddział w Lublinie
ul. Północna 22a
20-064 Lublin
tel. 600 359 666
rwrona@pinco.pl

Aneta TOR

CHARAKTERYSTYKA PROCESU WYTŁACZANIA POWLEKAJĄCEGO

THE CHARACTERISTIC OF COATING EXTRUSION PROCESS

Proces wytłaczania powlekającego należy do jednych z najczęściej stosowanych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych, a jego ciągły rozwój determinuje głównie stosowanie coraz to nowocześniejszych konstrukcji głowic wytłaczarskich a także linii technologicznych. Sam proces wytłaczania powlekającego może być przeprowadzony dwiema metodami, jednak wybór metody jest ściśle związany z odpowiadającą mu konstrukcją głowicy wytłaczarskiej. W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące ogólnej charakterystyki procesu wytłaczania powlekającego z uwzględnieniem rozwiązań konstrukcyjnych głowic wytłaczarskich oraz linii technologicznych.

Słowa kluczowe: *proces wytłaczania powlekającego, wytłaczarka, głowica wytłaczarska, proces współwytłaczania*

Coating extrusion process is one of the most frequently applied methods of polymer plastics processing, and its constant evolution is mostly determined by using more and more modern constructions of extrusion heads as well as more advanced processing lines. Coating extrusion process as such can be carried out by applying two methods however, selection of a method is closely connected to relevant construction of extrusion head. The article presents the issues concering the general characteristics of coating extrusion process, with considerations of construction solutions of extrusion heads and processing lines.

Keywords*: coating extrusion process, extruder, extrusion head, coextrusion process*

1. Geneza procesu wytłaczania powlekającego

Proces ten należy do najstarszych odmian wytłaczania. Za jego pomocą można powlekać tworzywami różne kształtowniki, w tym rury, taśmy, ale przede wszystkim kable telekomunikacyjne oraz elektryczne.

Początkowo proces wytłaczania stosowano przede wszystkim w przemyśle kablowym do powlekania przewodów gumą oraz do otrzymywania prętów, jednak po opracowaniu nowych tworzyw termoplastycznych wytłaczanie to rozwinęło się bardzo szybko i na szeroką skalę, aż do stanu obecnego. O złożoności problematyki tego procesu świadczy istnienie dużej liczby rozwiązań konstrukcyjnych wytłaczarek ślimakowych, głowic wytaczarskich oraz linii technologicznych [1, 3, 5].

2. Istota procesu wytłaczania powlekającego

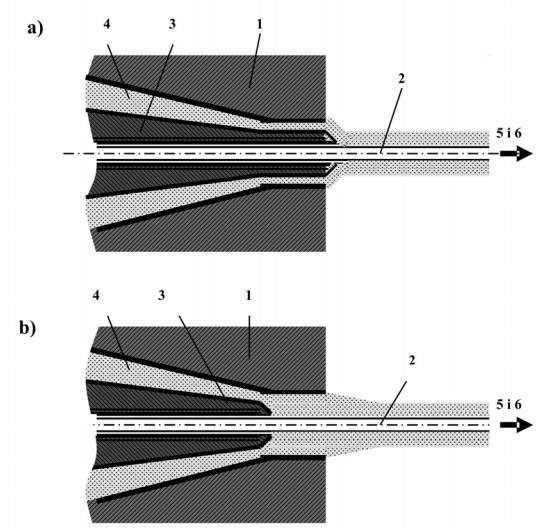
Proces powlekania kształtownika tworzywem odbywa się w głowicy wytłaczarskiej kątowej lub też bezpośrednio za nią. Następuje wówczas adhezyjne połączenie dwóch materiałów: przemieszczającego się ruchem prostoliniowym kształtownika i przepływającego tworzywa. Początkowo tworzywo przepływa pod pewnym kątem do przedmiotu powlekanego, następnie wielokrotnie zmienia kierunek i ostatecznie otacza go powłoką [3, 6, 15].

3. Metody wytłaczania powlekającego

Wyróżnia się dwie podstawowe możliwości wytłaczania powlekającego. W pierwszej, nazywanej wytłaczaniem powlekającym próżniowym (rys. 3.1a) tworzywo i kształtownik łączą się tuż po opuszczeniu głowicy wytłaczarskiej. Jest to w istocie proces wytłaczania rury i obciskania jej na kształtowniku pod wpływem wytworzonego pomiędzy nimi ciśnienia o bardzo małej wartości.

Wadę stanowi w tym przypadku konieczność stosowania układu do wytwarzania ciśnienia o małej wartości tj. pompy próżniowej, przewodu oraz układów pomiarowych i regulacyjnych.

Druga metoda pozwala na połączenie tworzywa z przedmiotem powlekanym bezpośrednio w głowicy wytłaczarskiej. W tym przypadku łączenie odbywa się pod wpływem ciśnienia tworzywa w dyszy, z tego też



Rys. 3.1. Podstawowe możliwości wytłaczania powlekającego: a) próżniowe, b) ciśnieniowe; 1 – końcówka głowicy, 2 – kabel, 3 – prowadnik kabla, 4 – tworzywo, 5 – kierunek ruchu kabla przed powleczeniem i po nim, 6 – kierunek ruchu tworzywa wyjściowego [3]

Fig. 3.1. Elementary possibilities coating extrusion: a) vacuum, b) pressure; 1 – head tip, 2 – cable, 3 – cable guide, 4 – plastic, 5 – direction of cable motion before and after coatting, 6 – direction of plastic exit motion [3]

względu proces ten nosi nazwę wytłaczania powlekającego ciśnieniowego (rys. 3.1b). Zaletą w tym przypadku jest możliwość otrzymywania bardzo cienkich powłok, nawet o grubości 0,01 mm.

Do podstawowych różnic miedzy metodami wytłaczania powlekającego próżniowego a ciśnieniowego należą ilość użytego tworzywa (rys. 3.2) oraz kształt przekroju przedmiotu powlekanego. Dzięki metodzie wytłaczania powlekającego próżniowego istnieje większa możliwość powlekania kształtowników o różnych kształtach przekroju poprzecznego, natomiast w przypadku wytłaczania powlekającego ciśnieniowego występuje ograniczenie do wytwarzania przedmiotów jedynie o przekroju kołowym lub zbliżonym do niego, a także trudność w utrzymaniu jednakowej grubości powłoki na całym obwodzie kształtownika [3].

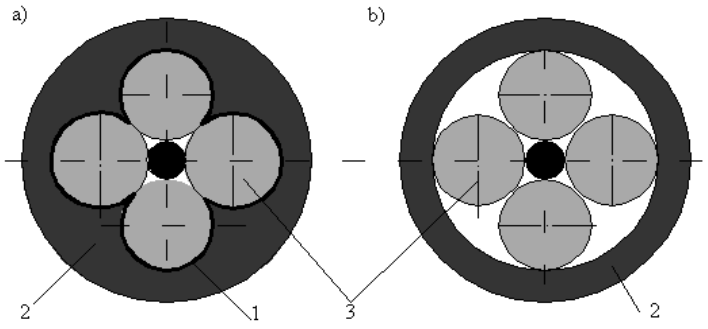
4. Przebieg procesu wytłaczania powlekającego

Proces wytłaczania powlekającego zostanie przedstawiony na przykładzie wytwarzania kabli optotelekomunikacyjnych.

Wyróżnia się następujące etapy procesu technologicznego wytwarzania kabla:

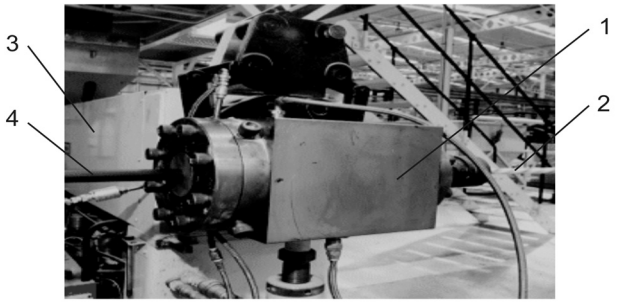
- nakładanie pokrycia pierwotnego na włókna światłowodowe,
- wytłaczanie tuby luźnej i ścisłej, w postaci rur dwuwarstwowych o średnicy od 1,4 do 8 mm metodą współwytłaczania,
- skręcanie tub wokół ośrodka kabla, który następnie jest uszczelniany taśmami poliestrowymi lub polipropylenowymi owiniętymi śrubowo lub wzdłużnie,
- wytłaczanie powłoki zewnętrznej z polietylenu lub tworzyw o zmniejszonej palności na ośrodek kabla owinięty taśmami (rys. 4.1) [12, 14, 16].

Proces wytłaczania powlekającego może się również odbywać przy pomocy dwóch wytłaczarek i jednej głowicy wytaczarskiej, nosi on wówczas nazwę współwytłaczania (rys. 4.2). Tworzywo z pierwszej i drugiej wytłaczarki jest kierowane do głowicy, w której następuje połączenie dwóch warstw tworzywa, zwykle o różnych właściwościach, strukturze, a także odmiennym kolorze.



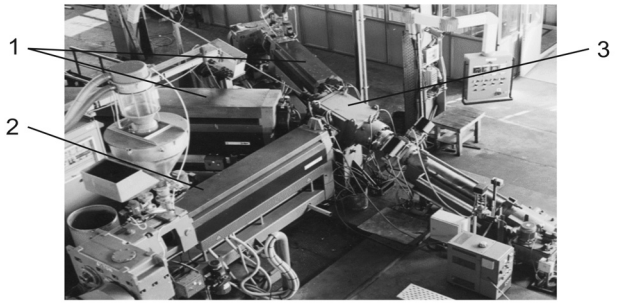
Rys. 3.2. Przekrój kabla wykonanego metodą wytłaczania powlekającego: a) ciśnieniowego, b) próżniowego; 1 – warstwa środka antyadhezyjnego np. talku, 2 – powłoka wytłoczona, 3 – ośrodek kabla [7]

Fig. 3.2. Cable section made by coating extrusion method: a) pressure, b) vacuum; 1 – release agewnt layer e.g. talc, 2 – extruded layer, 3 – cable core [7]



Rys. 4.1. Wygląd głowicy wytłaczarskiej do powlekania: 1 – głowica wytłaczarska krzyżowa, 2 – ośrodek kabla, 3 – wytłaczarka, 4 – ośrodek kabla z wytłoczoną powłoką zewnętrzną [8]

Fig. 4.1. Extrusion head appearance: 1 – extrusion crosshead, 2 – cable core, 3 – extruder, 4 – cable core with extruded external layer [8]



Rys. 4.2. Fragment linii technologicznej współwytłaczania powlekającego: 1 – wytłaczarka główna, 2 – wytłaczarki pomocnicze, 3 – głowica wytłaczarska [8]

Fig. 4.2. Processing line fragment to coating coextrusion: 1 – main extruder, 2 – assistant extruders, 3 – extrusion head [8]

5. Głowice do wytłaczania powlekającego

Konstrukcje głowic wytłaczarskich stosowanych w procesie wytłaczania powlekającego różnią się od siebie w zależności od rodzaju procesu wytłaczania (próżniowe lub ciśnieniowe) oraz od rodzaju, rozmiarów i dokładności wykonania wytworu.

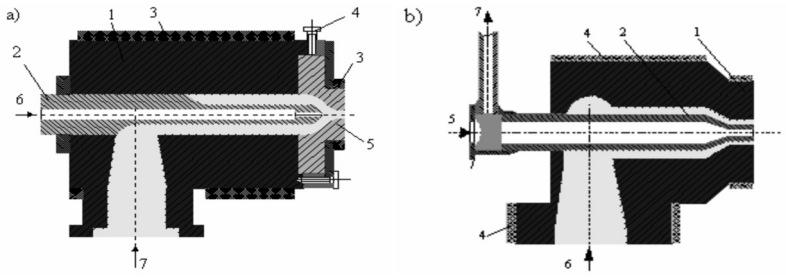
Do powlekania kabli stosowane są głowice kątowe (krzyżowe) o różnym kącie pomiędzy kierunkiem ruchu tworzywa wejściowego a kierunkiem ruchu kształtownika przed powlekaniem i po nim - jest to kąt pomiędzy osią wytłaczarki a osią główną głowicy, wynosi on $\pi/4$, $\pi/3$ lub $\pi/2$ rad (rys. 5.1a i b) [3].

Głowicę o nieco odmiennej budowie stosuje się w przypadku współwytłaczania powlekającego. Posiada ona oddzielne końcówki do wprowadzania żelu, włókien oraz taśm światłowodowych. Żel oraz włókna przemieszczają się po wspólnej prowadnicy osłoniętej przez część korpusu tak, aby nie miała ona styczności z tworzywem uplastycznionym (rys. 5.2).

6. Linie technologiczne stosowane w procesie wytłaczania powlekającego

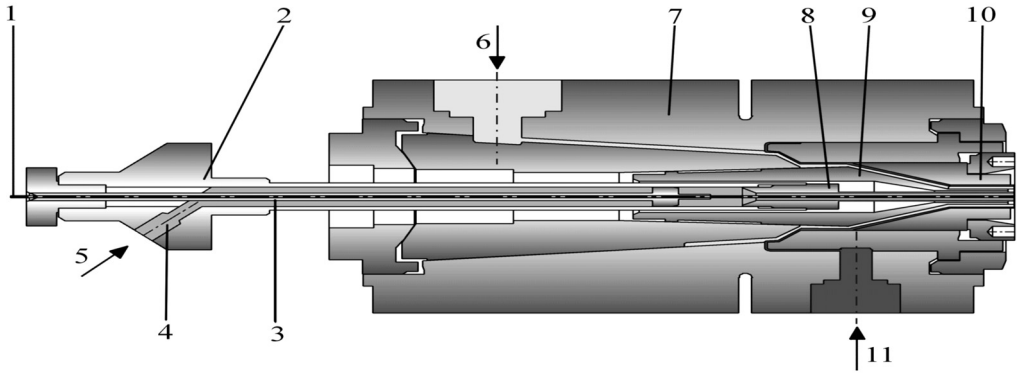
Powszechne stosowanie kształtowników powlekanych przyczyniło się do dynamicznego rozwoju produkcji tych wytworów, a co za tym idzie do postępu w technologii wytłaczania powlekającego.

W skład każdej linii technologicznej wytłaczania powlekającego (rys. 6.1) wchodzi szereg urządzeń



Rys. 5.1. Schematy głowic do wytłaczania powlekającego: a) ciśnieniowego: 1 – korpus, 2 – prowadnica, 3 – grzejniki, 4 – śruba ustalająca, 5 – końcówka głowicy, 6 – kierunek ruchu kabla (oś główna głowicy), 7 – kierunek ruchu tworzywa wejściowego (oś wytłaczarki); b) próżniowego: 1 – korpus, 2 – prowadnica drutu, 3 – uszczelnienie, 4 – grzejniki elektryczne, 5 – kierunek ruchu kabla (oś główna głowicy), 6 – kierunek ruchu tworzywa wejściowego (oś wytłaczarki), 7 – przewód do pompy próżniowej [3]

Fig. 5.1. Coating extrusion heads diagram: a) preassure: 1 – frame, 2 – way, 3 – heaters, 4 – fixing bolt, 5 – head tip, 6 – direction of cable motion (head proncipal axis), 7 – direction of plastic input motion (extruder axis); b) vacuum: 1 – frame, 2 – wire way, 3 – seal, 4 – electric heaters, 5 – direction of cable motion (head proncipal axis), 6 – direction of plastic input motion (extruder axis), 7 – conduit to vacuum pump [3]



Rys. 5.2. Schemat głowicy wytłaczarskiej kątowej stosowanej w procesie współwytłaczania powlekającego: 1 – włókna światłowodowe, 2 – końcówka do wprowadzania żelu, 3 – końcówka do wprowadzania włókien światłowodowych, 4 – żel hydrofobowy, 5 – kierunek ruchu żelu na wejściu, 6, 11 – kierunek ruchu tworzywa wejściowego, 7 – korpus, 8 – prowadnica żelu i włókien światłowodowych, 9 – korpus, 10 – dysza głowicy [11]

Fig. 5.2. Extrusion head diagram applied in coating coextrusion process: 1 – optical fibres, 2 – tip to gel insert, 3 – tip to optical fibres insert, 4 – hydrophobic gel, 5 – direction of gel input motion, 6, 11 – direction of plastic input motion, 7 – frame, 8 – gel and optical fibres guide, 9 – frame, 10 – extruder die [11]

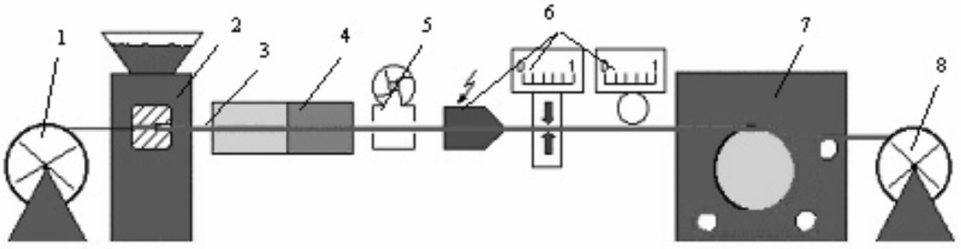
spełniających istotne funkcje w procesie wytłaczania. Należą do nich:

- układ zdawczy (1), który zapewnia podawanie kształtownika z prędkością dostosowaną do prędkości linii,
- wytłaczarka (2) z odpowiednią głowicą wytłaczarską,
- urządzenie chłodzące (4), zapewniające stopniowe chłodzenie tworzywa,
- urządzenie osuszające (5), zapewniające osuszenie kształtownika powleczonego,
- urządzenia pomiarowe tj. próbnik przebicia izolacji (5), miernik średnicy (6), miernik długości (6), sygnalizujące ewentualne odchylenia poszczególnych parametrów od normy,
- urządzenie odciągające (7), stanowiące urządzenie napędzające linię,
- układ odbiorczy (8) zapewnia nawijanie wytłoczyny na szpule i automatyczną zmianę szpul po ich zapełnieniu [2, 6, 10].

Jakość uzyskanej w tym procesie wytłoczyny zależy od szeregu czynników, przede wszystkim od właściwego dostosowania prędkości podawania tworzywa do prędkości przesuwania kształtownika oraz odpowiedniej temperatury tworzywa. Wydajność linii technologicznych jest zróżnicowana i wynosi od 100 m/min do 1200 m/min, natomiast dopuszczalne odchyłki wymiarów powłoki wytłoczonej są na poziomie setnych części milimetra [9].

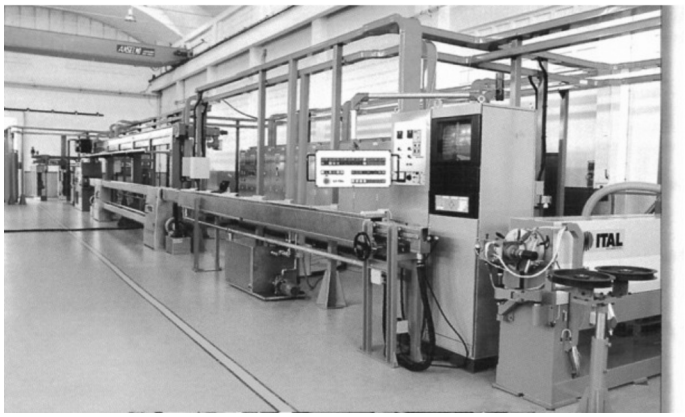
7. Zakończenie

Dzięki wiadomościom, posiadanym na temat wytłaczania powlekającego, jest ono obecnie jedną z najszybciej rozwijających się metod przetwórstwa



Rys. 6.1. Schemat linii technologicznej wytłaczania powłok kabli (przykład): 1 – układ zadawczy, 2 – wytłaczarka, 3 – kabel z powłoką wytłoczoną, 4 – urządzenie chłodzące, 5 – urządzenie do osuszania wytłoczyny, 6 – urządzenia pomiarowe, 7 – urządzenie odciągające, 8 – układ odbiorczy [7]

Fig. 6.1. Processing line diagram to cable coat extrusion moulding (example): 1 – cable core feeder, 2 – extruder, 3 – extruded cable layer, 4 – cooler eqiupment, 5 – drying equipment, 6 – measuring device, 7 – guying equipment, 8 – trolley collector [7]



Rys. 6.2. Fragment linii technologicznej wytłaczania powlekającego [9]

Fig. 6.2. Coating extrusion processing line fragment [9]

tworzyw polimerowych. Ze względu na wysokie wymagania stawiane wytworom jest konieczne ciągłe modyfikowanie oraz unowocześnianie zarówno konstrukcji głowic wytłaczarskich jak również maszyn i urządzeń wchodzących w skład linii technologicznych. Chęć podwyższenia jakości wytworów uzyskiwanych w procesie wytłaczania stawia przed konstruktorami konieczność ciągłego rozwoju i udoskonalania procesu na każdym jego etapie.

W przypadku wytłaczania powlekającego istnieje jeszcze jedna również bardzo interesująca i ważna metoda wytłaczania, a mianowicie wytłaczania powlekającego porującego, wymaga ona jednak oddzielnej prezentacji.

8. Literatura

[1] Rauwendaal Ch.: *Konstrukacja głowicy do wytłaczania*. Plastics Review 2003, 2, 40.
[2] Rauwendaal Ch.: *Troubleshooting the extrusion process*. Hauser Publishers, Münich 2002.
[3] Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
[4] Sikora R.: *Leksykon naukowo-techniczny*. Wydawnictwo Wadim Plast, Lublin 2002.
[5] Sikora R.: *Wytłaczanie – wytłaczarki*. Zarys historyczny, stan aktualny, perspektywy. Polimery 1982, 5, 316.
[6] Wytłaczanie tworzyw sztucznych. Praca zbiorowa. Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych Plastech, Warszawa 1999.
[7] Materiały informacyjne firmy Drut-Plast. http://www.drutplast.com.pl/
[8] Materiały informacyjne firmy Francis Show Wire & Cable Machinery. http.//www.francisshow.co.uk/
[9] Materiały informacyjne firmy Ital. http://www.ital.it/
[10] Materiały informacyjne firmy Manex. http://www.manex.com.pl/
[11] Materiały informacyjne firmy Microdia. http://www.microdia.ch/
[12] Materiały informacyjne firmy Nextrom. http://www.nextrom.com/
[13] Materiały informacyjne firmy Nokia-Maillefer
[14] Materiały informacyjne firmy Telefonika. http://www.tf.com.pl/
[15] PN-EN 1114-1:1999. Wytłaczarki i linie wytłaczania. Wymagania bezpieczeństwa dotyczące wytłaczarek.
[16] PN-EN 60811-4-2:2001. Wspólne metody badania materiałów stosowanych na izolację i powłoki przewodów i kabli elektrycznych oraz światłowodowych.

Mgr inż. Aneta TOR
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Procesów Polimerowych
tel. 081 538-12-24
e-mail: a.tor@pollub.pl

Jakub GAJEWSKI

KONCEPCJA OCENY STANU OSTRZY NOŻY GŁOWICY WIELONARZĘDZIOWEJ DO URABIANIA

IDEA OF IDENTYFYING THE STATUS OF THE CUTTING TOOLS POINT USED IN MULTI-TOOL EXCAVATING HEADS

Artykuł prezentuje propozycję identyfikacji stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej do urabiania węgla za pomocą sztucznej sieci neuronowej. Omówiono również wstępne wyniki badań nad identyfikacją stanu ostrza jednego narzędzia skrawającego. Opisano planowane badania eksperymentalne zużycia ostrzy noży pracujących zespołowo w głowicy wielonarzędziowej oraz wykorzystanie pewnych cech sygnałów danych pomiarowych jako danych wejściowych do SSN.

***Słowa kluczowe**: identyfikacja, sieci neuronowe, zużycie narzędzi*

The paper presents research necessary to identify rock excavating process with a given head, and construct adaptation systems for control of excavating process with such a head. This article describes also results of preliminary research on utilizing neural networks to classification excavating cutting tool's condition used in multi-tool excavating heads of mechanical coal miners.

***Keywords**: identification, neural networks, tool wear*

1. Wprowadzenie

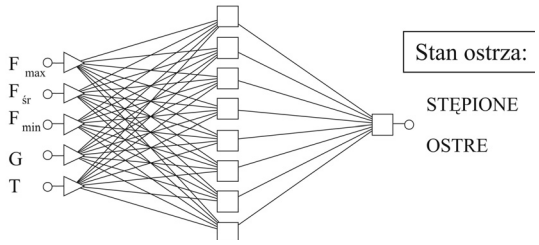
Zmieniające się warunki urabiania wymuszają adaptacyjność sterowania procesem, w czym zastosowanie znajdują metody sztucznej inteligencji, ze szczególnym uwzględnieniem sztucznej sieci neuronowej. Możliwości przez nie stwarzane, szczególnie w sytuacji gdy z uwagi na złożoność problemu trudno o stworzenie modelu danego zagadnienia, oraz gdy działa wiele czynników trudnych do przewidzenia i opisania, sieć neuronowa wydaje się być wyjątkowo przydatna. Można przytoczyć liczne przykłady zastosowania sztucznej inteligencji choćby w celach identyfikacji oraz klasyfikacji, co znajduje się w sferze zainteresowania niniejszego artykułu, gdzie metody nazywane klasycznymi nie są w stanie sprostać naszym oczekiwaniom.

W dziedzinie nauk technicznych należy odnotować szybki rozwój zastosowań sieci neuronowych w monitorowaniu stanu maszyn i urządzeń, co jest szczególnie istotne przy rozpoznawaniu awarii i umożliwia podjęcie szybkich kroków naprawczych. Identyfikacja może odbywać się na podstawie różnych sygnałów, choćby akustycznych czy pomiarów charakterystycznych, dla danego procesu, np. sił. Należy również wspomnieć o zastosowaniach sztucznej inteligencji w dziedzinie sterowania, choćby pracą silnika. Tu monitorowanie połączone jest z bezpośrednim oddziaływaniem on-line na parametry procesu. Budowa takiego układu sterowania stosowanego w złożonych procesach skrawania czy urabiania warunkuje znaczne poprawienie ich efektywności.

Aby można było mówić o sterowaniu procesem urabiania głowicy wielonarzędziowej należy w pierwszym rzędzie zapewnić możliwość identyfikowania stanu ostrzy noży na niej zamontowanych. To właśnie zagadnienie podjęto podczas badań laboratoryjnych i ten temat jest przedmiotem rozważań niniejszego artykułu.

2. Badania wstępne

Badania wstępne ograniczyły się do identyfikacji stanu ostrza jednego noża skrawającego. Poddano w ten sposób weryfikacji przydatność wykorzystania metod sztucznej inteligencji do rozważanego zagadnienia. Po przeprowadzeniu wielu prób, zarówno jeśli chodzi o rodzaj i strukturę sieci neuronowej, jak również metodę jej uczenia, stwierdzono, iż siecią która najlepiej klasyfikuje stan ostrza noża skrawającego jest perceptron wielowarstwowy przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat sieci MLP 5-5:8:1:-1
Fig. 1. A scheme of multilayer perceptron MLP 5-5:8:1-1

Jako dane wejściowe do modelu sieci wykorzystano siły skrawania (F), odpowiednio: -maksymalną, średnią i resztkową oraz podziałkę (T) i głębokość skrawania (G) [1]. Od SSN oczekiwano rozpoznania aktualnego stanu ostrza, zaklasyfikowanego jako ostre lub stępione. Sieć uczona była na podstawie danych uzyskanych z pomiarów prowadzonych nożem ostrym oraz stępionym (zeszlifowano ostrze).

Efektywność wybranej sieci została zaklasyfikowana jako bardzo dobra, błąd RMS (pierwiastek z błędu średniokwadratowego) wyniósł 0,1265.

3. Metodyka badań

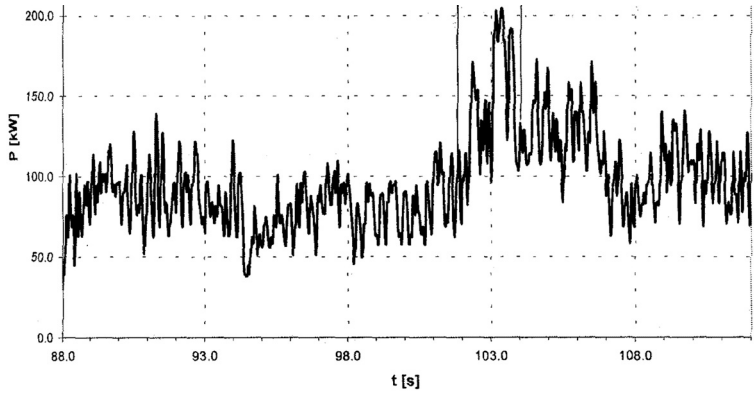
Obciążenie głowicy urabiającej, jako proces szybkozmienny i stochastyczny, jest niezwykle trudne do opisu matematycznego. Na przebieg urabiania wpływ ma szereg czynników, których wpływ na stan ostrzy noży zamontowanych zespołowo w głowicy wielonarzędziowej do urabiania węgla trudny jest do oszacowania.

Do głównych zespołów parametrów wpływające na przebieg urabiania należy zaliczyć:
- rodzaj i właściwości urabianej skały,
- cechy konstrukcyjne narzędzia,
- parametry głowicy,
- technologię urabiania.

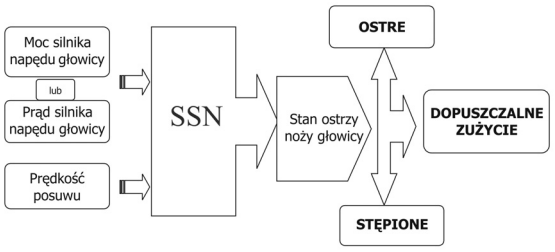
W chwili obecnej nie istnieje system w pełni nadzorujący proces urabiania oraz zapewniający jego pełną automatyzację. Sterowanie procesem odbywa się w sposób bardzo ograniczony i koncentruje się na dostosowaniu prędkości urabiania do aktualnych jego warunków, co szacowane jest na podstawie sygnału prądu silnika napędu głowicy. Praca głowicy urabiającej zależy od subiektywnych ocen operatora, co w znaczący sposób odbiega od optymalnego przebiegu pracy kombajnu. Dla prawidłowej pracy głowicy wielonarzędziowej kluczowy jest stan ostrzy noży na niej zamontowanej. W trakcie pracy głowicy nie ma możliwości sprawdzenia stanu ostrzy tych narzędzi. Fakt ten powoduje, iż w trakcie ruchu roboczego kombajnu nie wiadomo czy urabianie odbywa się wciąż w sposób efektywny, za pomocą noży o zadowalającym stanie ostrzy. Wszelkie zmiany sygnałów mocy lub prądu silnika napędu głowicy mogą być powodowane zarówno zużyciem (nawet katastroficznym) ostrzy noży głowicy urabiającej jak również zmienionymi warunkami urabiania. Wynika stąd, iż system który potencjalnie pozwoli na ocenę stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej powinien „skupić się" na identyfikacji stanu ostrzy noży, a nieczuły winien być na zmieniające się własności i rodzaj urabianego materiału.

Badania stanowiskowe, które pozwolą na zebranie danych pomiarowych służących do opracowania modelu zużycia ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej powinny w sposób istotny eliminować wpływ zmiennych warunków urabiania. Eksperymenty będą szczególnie efektywne dla jednorodnego, izotropowego, twardego materiału.

Badania które zostaną przeprowadzone mają na celu zbadanie możliwości identyfikacji stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej z wykorzystaniem klasyfikacji losowych sygnałów charakterystycznych dla określonych parametrów konstrukcyjnych badanych narzędzi. Niezbędne do tego jest określenie,



Rys. 2. Przebieg czasowy sumarycznej mocy elektrycznej (P) pobieranej przez kombajn podczas urabiania
Fig. 2. Actual course of the absorb power (P) by mechanical coal miners



Rys. 3. Schemat identyfikacji stanu ostrzy noży
Fig. 3. The schema identification of tool condition

które wielkości charakterystyczne dla urabiania skał głowicą wielonarzędziową, oraz które ich cechy mogą być przydatne do identyfikowania stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej (np. moc silnika, rysunek 2). Sygnały rejestrowane w procesie urabiania zostaną poddane dyskretyzacji. (FFT; analiza harmoniczna z określeniem amplitudy i fazy dla częstości harmonicznych pewnej częstotliwości podstawowej).

Badania prowadzone będą dla stałych parametrów urabiania (prędkości obrotowej głowicy, prędkości posuwu) oraz dla jednej konstrukcji głowicy. Eksperymentom poddawane będą różne typy noży o charakterystycznej geometrii z różnym stanem stępienia ostrza (noże stożkowe, dwa rodzaje noży płaskich).

Należy także odpowiedzieć na pytanie: jakie struktury sieci neuronowych, z uwagi na dokładność, czas i metodę uczenia okażą się przydatne do realizacji danego zagadnienia.

4. Podsumowanie i wnioski

Istotne dla powodzenia prowadzonych eksperymentów wydaje się ustalenie jakie sygnały (moc i prąd silnika głowicy, moment obrotowy, prędkość posuwu) oraz które ich cechy (średnia wartość mocy, wariancja, skośność, kurtoza) są najbardziej przydatne do identyfikowania stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej do urabiania węgla. Dalsze badania obejmą poszukiwanie optymalnych struktur sieci oraz metod ich uczenia oraz testowanie SSN, a także opracowanie wytycznych do wykorzystania metod sztucznej inteligencji w badaniach nad identyfikacją pracujących zespołowo noży głowicy wielonarzędziowej.

Ze wstępnej analizy zagadnienia autor wyciąga następujące wnioski:

1. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do identyfikowania stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej, przy wykorzystaniu pewnych cech sygnałów, jest racjonalne.
2. Do uzyskania zadowalających rezultatów identyfikowania przez sieć neuronową stanu ostrzy noży niezbędne jest pozyskanie odpowiednio zasobnej bazy danych pomiarowych.
3. Analiza cech sygnałów uzyskanych w badaniach doświadczalnych ma na celu wyodrębnienie charakterystycznych wielkości przydatnych do identyfikacji stanu ostrzy noży pracujących zespołowo.

5. Literatura

[1] Gajewski J., Jonak J.: Klasyfikacja sygnałów siły skrawania za pomocą sieci neuronowej, Eksploatacja i Niezawodność nr 2/2004 Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa 2004.
[2] StatSoft®: STATISTICA Neural Networks, 1998.
[3] Rosół. M., Sapiński B., Zastosowanie specjalizowanego mikrokontrolera w symulacji Hardware in the Loop, IV Krajowa Konferencja MSK'03 – Metody i systemy komputerowe, Kraków 2003.
[4] Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
[5] Jonak J.: Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi, Wydawnictwo Naukowe „Śląsk", Katowice 2001.
[6] Jonak J.: Identyfikacja stanu ostrza z wykorzystaniem sieci neuronowej , IV Krajowa Konferencja MSK, Kraków 2003.

Mgr inż. Jakub GAJEWSKI
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36; 20-618 Lublin
e-mail: j.gajewski@pollub.pl

Andrzej AMBROZIAK
Zbigniew KORALEWICZ
Marcin KORZENIOWSKI
Paweł KUSTROŃ

ZASTOSOWANIE FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH DO OCENY JAKOŚCI POŁĄCZEŃ ZGRZEWANYCH W CZASIE RZECZYWISTYM

ULTRASONIC QUALITY CONTROL DURING RESISTANCE WELDING PROCESS

W artykule przedstawiono jedną z nowatorskich metod obserwacji przebiegu procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego w czasie rzeczywistym. Oparta jest ona na pomiarze parametrów, przechodzącej przez zgrzeinę, fali ultradźwiękowej. Przeprowadzone badania wykazały, iż omawiana metoda pozwala na uzyskanie jednoznacznej informacji o stanie, powstającego jądra zgrzeiny. Uzyskane w ten sposób dane mogą być użyte, nie tylko w celu oceny jakości powstającej zgrzeiny, ale również sterowania przebiegiem całego procesu. Zapewnianie wysokiej jakości zgrzein jest niewątpliwie bardzo istotnym zagadnieniem, szczególnie wobec masowego zastosowania tej technologii w wielu gałęziach przemysłu. Szerokie zainteresowanie rozwiązaniami, pozwalającymi kontrolować przebiegiem procesu tworzenia się jądra zgrzein, wynika głównie z możliwości ograniczenia wpływu zakłóceń na proces (przyczyn występowania niezgodności w powstających złączach) a nie, jak to dotychczas miało miejsce, jedynie obserwacji ich skutków, po fakcie powstania zgrzeiny.

***Słowa kluczowe**: zgrzewanie rezystancyjne punktowe, kontrola jakości zgrzein w czasie rzeczywistym, badania ultradźwiękow*

This article presents some information about quality control in resistant welding process. There are many methods which can give us information about quality of weld after it's arise. Resistant welding is very sensitive for lots of factors like: electric power excursion, electrodes and material surface's condition, electrical by-pass, etc. It usually causes worse quality of the connection. To prevent this factor's influence, welding process should be controlled in the real time. One of the promising methods is Ultrasonic Control System. It is based on measuring amplitude of ultrasonic wave, which flow across the weld. Theoretical characteristic of ultrasonic transmission was shown on fig.3. This curve shows that ultrasonic method can give many, important information about welding process, like: size of welding nuggets, it's arise and crystallization moment but first of all, current switching-off moment. All abilities of this method can be used to find weld quality, controlling welding process and prevent many dangerous factors in the time of weld arising.

***Keywords**: resistance welding, ultrasonic welding control*

1. Wprowadzenie

Zgrzewanie rezystancyjne punktowe należy do najbardziej rozpowszechnionych metod łączenia miejscowego różnorodnych konstrukcji metalowych. Istota metody pozostaje niezmieniona od ponad 125 lat [1]. Ma ona szereg charakterystycznych zalet, do których przede wszystkim zaliczyć należy stosunkowo niskie zużycie energii elektrycznej, szybkość wykonania jednego połączenia oraz brak konieczności stosowania materiałów dodatkowych. Fakty te decydują o tak powszechnym zastosowaniu tej technologii. Jak podają dane statystyczne, w Polsce wykonuje się około 2 miliardów zgrzein punktowych rocznie. Najczęściej znajduje ona zastosowanie przy produkcji karoserii samochodowych, maszyn rolniczych, konstrukcji budowlanych, jak również sprzętu gospodarstwa domowego. Ewolucja procesów zgrzewania rezystancyjnego obejmuje zarówno materiały łączone, o coraz to wyższych własnościach eksplo-

atacyjnych, jak i same zgrzewarki, wyposażane m. in. w różnego rodzaju urządzenia sterujące.

2. Opis zastosowanej metody - stanowisko pomiarowe

Podstawowymi czynnikami, ujemnie wpływającymi na jakość powstających złącz zgrzewanych punktowo są:

- stan powierzchni łączonych elementów,
- stan elektrod,
- wahania napięcia w sieci zasilającej urządzenie,
- bocznikowanie,
- odkształcenia blach.

Przedstawione wyżej zjawiska w znacznym stopniu przyczyniają się do powstawania zgrzein wadliwych. Powstałe niezgodności są z reguły trudne do wykrycia i ujawniają się dopiero w okresie eksploatacji wyrobu.

Do najczęściej spotykanych wad złącz zgrzewanych punktowo należą:

- przyklejenie,
- zbyt mała średnica jądra zgrzeiny,
- pęknięcia,
- pory,
- nadtopienie powierzchni,
- wyprysk (ekspulsje).

Powszechność procesów zgrzewania rezystancyjnego punktowego oraz zastosowanie zgrzein w konstrukcjach odpowiedzialnych spowodowały, że tradycyjne metody kontroli złączy, takie jak badania penetracyjne, magnetyczne i rentgenowskie, mogą być stosowane jedynie jako metody uzupełniające do badań wytrzymałościowych i metalograficznych. Z tego powodu konieczne jest sterowanie i kontrola jakości rezystancyjnego zgrzewania już w czasie trwania tego procesu, w celu zminimalizowania liczby zgrzein wadliwych oraz dla bieżącej kontroli przebiegu procesu i stanu urządzeń.

Istnieje bardzo szeroka gama metod, pozwalających wnioskować o jakości powstających połączeń. Oparte są one najczęściej na pomiarze:

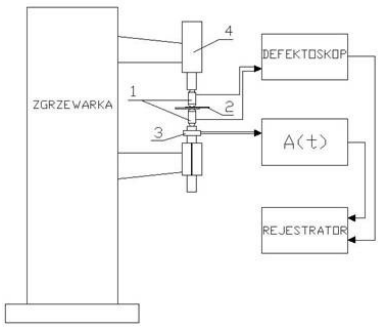
- prądu, napięcia i rezystancji dynamicznej,
- tłumienia i prędkości fal ultradźwiękowych,
- energii zgrzewania,
- rozszerzalności cieplnej złącza,
- promieniowania podczerwonego,
- emisji akustycznej.

Metody te mają zarówno szereg zalet jak i wad. W przypadku metod kontroli przemieszczenia elektrod w trakcie zgrzewania, emisji akustycznej, promieniowania podczerwonego czy metody ultradźwiękowej, konieczne jest zastosowanie skomplikowanej aparatury pomiarowej. Dużą popularność zyskuje obecnie metoda oparta na pomiarze rezystancji dynamicznej [2]. Każda z wymienionych metod pozwala jednak na uzyskanie tylko określonych informacji o procesie tworzenia zgrzeiny. Metoda ultradźwiękowa jest bardzo czułym narzędziem, pozwalającym na uzyskanie informacji z poszczególnych etapów powstawania jądra zgrzeiny, jego rozrostu oraz krzepnięcia.

Istnieje wiele metod pomiaru transmisji (tłumienia) fal ultradźwiękowych. Najczęściej stosowane to metoda echa oraz metoda przepuszczania. Metoda echa polega na wykorzystaniu jednej głowicy (nadawczo-odbiorczej), metoda przepuszczania wykorzystuje dwie głowice, z których jedna pracuje jako głowica nadawcza, druga jako odbiorcza [3]. W badaniach wykorzystano drugą z wymienionych metod - metodę przepuszczania.

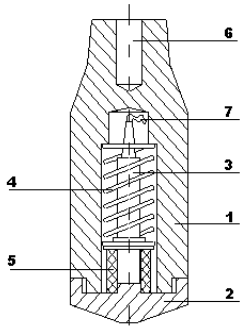
W celu kontroli procesu zgrzewania punktowego wykorzystano właściwości fal ultradźwiękowych. Rejestracja przebiegu krzywych transmisji fal w czasie powstawania złącza, pozwoliła na otrzymanie grupy charakterystyk umożliwiających wnioskowanie o jakości zgrzeiny na podstawie kształtu tych krzywych.

Jako generator fal ultradźwiękowych wykorzystano defektoskop, który sprzężono z komputerem. W czasie wykonywania zgrzeiny rejestrowano amplitudę wiązki fal ultradźwiękowych przechodzących przez elementy zgrzewane. Wartość amplitudy, zamieniona na sygnał elektryczny, rejestrowana była przez komputer. Rejestrator wyników (komputer PC) wyposażono w kartę pomiarową z procesorem DSP, która umożliwiła zapis i obróbkę odbieranego z defektoskopu sygnału. Równocześnie, w trakcie procesu mierzono i rejestrowano prąd zgrzewania za pomocą urządzenia Pp-7d. Do pomiarów wykorzystano zgrzewarkę produkcji polskiej ZPa-80 (rys. 1).



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe:
1 – głowice ultradźwiękowe, 2 – materiał zgrzewany, 3 – toroid – pomiar prądu zgrzewania, 4 – siłownik pneumatyczny.
Fig. 1. Ultrasonic data acquisition system:
1 – electrode, 2 – material (sheet iron plate), 3 – current measurement system, 4 - pneumatic actuator,

Do generacji i odbioru fal akustycznych wykorzystano głowice ultradźwiękowe UNIPAN LN4LN7, które umieszczono w odpowiednio skonstruowanych elektrodach (rys. 2). Głowice te mogą pracować zarówno jako nadajniki jak i odbiorniki sygnałów ultradźwiękowych. Ich częstotliwość pracy wynosi 4 MHz.



Rys. 2. Budowa elektrody z głowicą ultradźwiękową: 1 – obudowa, 2 – czoło elektrody, 3 – głowica ultradźwiękowa, 4 – sprężyna dociskowa, 5 – tuleja dystansowa, 6 - kanał cieczy chłodzącej, 7 – przewód sygnałowy

Fig. 2. Welding electrode with ultrasonic head: 1 – casing, 2 – electrode head, 3 – ultrasonic head, 4 – spring, 5 – distance sleeve, 6 – cooling channel, 7 – signal cable

3. Wpływ zmian parametrów zgrzewania na uzyskiwane przebiegi transmisji

Celem badań było ustalenie wpływu parametrów zgrzewania na przebieg tłumienia fali ultradźwiękowej. Zastosowano zmianę parametrów zgrzewania w celu uzyskania różnego rodzaju zgrzein – prawidłowych oraz nieprawidłowych (brak zgrzania, przegrzanie, przyklejenia, ekspulsje, itp.).

Poniżej przedstawiono teoretyczny przebieg „tłumienia" fali ultradźwiękowej, wraz z podziałem na charakterystyczne etapy [4].

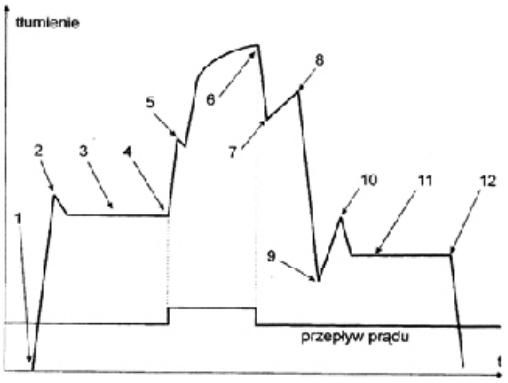
W trakcie procesu tworzenia prawidłowej zgrzeiny można wyróżnić następujące etapy:

1. moment połączenia elektrod z materiałem zgrzewanym,
2. dociskanie nierówności na powierzchni zgrzewanych blach,
3. stabilizacja przepływu strumienia fali ultradźwiękowej,
4. moment włączenia prądu zgrzewania, gwałtowny wzrost temperatury,
5. rozpoczęcie tworzenia się ciekłego jądra zgrzeiny,
6. wyłączenie prądu zgrzewania, spadek temperatury zgrzeiny,

7 i 8. krystalizacja i chłodzenie się ciekłego jądra zgrzeiny,

9 i 10. zaburzenia przepływu fali na skutek skurczu materiałów podczas spadku ich temperatury,

11. docisk końcowy,
12. rozchylenie elektrod.



Rys. 3. Typowy przebieg tłumienia dla prawidłowej zgrzeiny

Fig. 3. Typical damping vs time dependence

Teoretycznie, w przypadku utworzenia się prawidłowej zgrzeiny, każdy z wymienionych etapów winien uwidocznić się na krzywej „tłumienia" fal ultradźwiękowych.

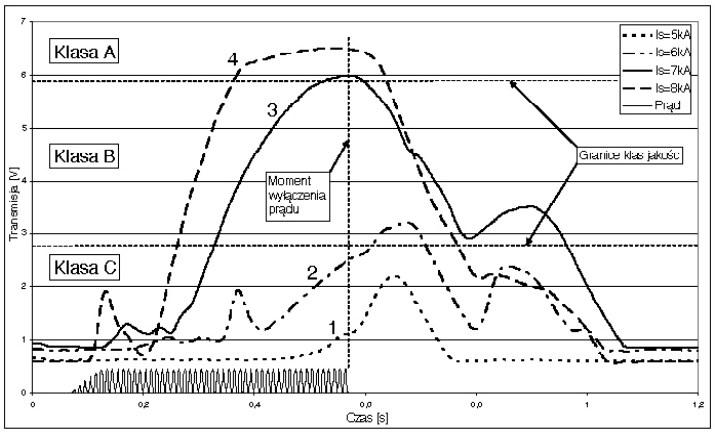
Dla wszystkich próbek dokonywano pomiaru transmisji fali ultradźwiękowej. Mierzono amplitudę fali akustycznej przechodzącej przez zgrzeinę.

Badania przeprowadzono na próbkach ze stali S235JRG2 o grubości 1.5mm. W celu uzyskania różnorodnych połączeń zmieniano parametry zgrzewania (Is = 5 ÷ 8 kA, rys. 4) . Następnie uzyskane połączenia poddawano próbie wytrzymałościowej – próbie ścinania wg PN-74 M-69020 [5].

Poniżej przedstawiono wybrane z uzyskanych przebiegów rzeczywistych.

Na rys. 4 pokazano cztery z zarejestrowanych charakterystycznych przebiegów transmisji fali przechodzącej przez zgrzeinę w czasie zgrzewania. Porównując je z przebiegiem teoretycznym (rys. 3) można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem wartości prądu i czasu zgrzewania, rośnie również wartość transmisji przechodzącej badanej fali, oraz znacząco zmienia się kształt wykresu.

Przyporządkowania wykonanych zgrzein oraz towarzyszących im charakterystyk tłumienia fal ultradźwiękowych do odpowiedniej klasy jakości dokonano na podstawie normy. Podstawą klasyfikacji są tu: minimalna wartość siły niszczącej, wymiary zgrzeiny, dopuszczalne wady wewnętrzne i wygląd zewnętrzny. Przedstawione poniżej wykresy opisują zależność siły niszczącej złącze od czasu i prądu zgrzewania. Pokazano również przedziały badanej siły, przedstawiające



Rys. 4. Rzeczywiste przebiegi transmisji dla stałego czasu 0,52s oraz czterech różnych nastaw natężenia prądu zgrzewania

Fig. 4. Real damping vs. time dependence for four different current values

zakresy odpowiednich klas jakości. Ostatecznej oceny powstałych zgrzein dokonano uwzględniając wszystkie wyżej wymienione kryteria.

Zarówno z punku widzenia oceny jakości powstającej zgrzeiny, jak i sterowania przebiegiem procesu, najważniejszym elementem charakterystyki transmisji (rys. 4) jest obszar, w którym zostaje wyłączony prąd zgrzewania. Na podstawie obserwacji, rejestrowanych przebiegów stwierdzono, że najdokładniej oddaje on informacje o jakości zgrzeiny.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy uzyskanych wyników (rys. 4) można zauważyć, iż dla przebiegów transmisji oznaczonych jako 1 i 2 wartość transmisji jest stosunkowo mała, co wskazuje na zbyt małą średnicę jądra zgrzeiny lub przyklejenie. Wynika stąd również mniejsza wytrzymałość złączy, a więc zostały one zakwalifikowane do klasy jakości C.

Natomiast złącza w klasie A opisane są za pomocą krzywych transmisji 3 i 4 (rys. 4). Wynika z nich, że przy stosowaniu większych wartości prądu uzyskano żądaną wartość transmisji fal ultradźwiękowych, charakterystyczną dla poprawnie wykonanych zgrzein.

Przeprowadzone badania wskazują na ścisły związek między jakością otrzymanej zgrzeiny a wartością transmisji fal ultradźwiękowych przy wykonywaniu zgrzein punktowych. Potwierdzają to badania wytrzymałościowe (statyczne próby ścinania złączy ze stali S235JRG2 o grubości 1,5 mm).

5. Literatura

[1] Kozaczyński J., Mikno Z., Stodolny P.: *System do kontroli jakości połączeń zgrzewanych w oparciu o sieci neuronowe*, Gliwice, Instytut Spawalnictwa, 2004.

[2] Straube A., Torzewski A., Winzen B.: *Stabilizacja procesu zgrzewania poprzez logiczne reakcje na jego przebieg podczas zgrzewania punktowego*, Niemcy, Harms&Wende, 2004.

[3] Talarczyk E.: *Podstawy techniki ultradźwięków*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1990.

[4] Ambroziak A., Krynicki L., Koralewicz Z.: *Określenie przydatności badań ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych punktowo*, Przegląd Spawalnictwa Nr 7-8/2000.

[5] Polska Norma PN-74 M-69020, *Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych*.

Dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK prof. ndzw. PW
Dr inż. Zbigniew KORALEWICZ
Mgr inż. Marcin KORZENIOWSKI
Mgr inż. Paweł KUSTROŃ

Politechnika Wrocławska
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji
Wrocław ul. Łukasiewicza 3/5
e-mail: pawel.kustron@pwr.wroc.pl

Zbigniew MIRSKI
Kazimierz GRANAT
Alicja BULICA

KONSTRUKCJA SZCZELINY LUTOWNICZEJ A ZJAWISKA KOROZJI

CLEARANCE CONSTRUCTION IN BRAZED JOINTS AND CORROSION EFFECTS

W procesach lutowania i lutospawania ważną rolę odgrywają czynniki konstrukcyjne i technologiczne. Istotne znaczenie dla konstrukcji i wytrzymałości złącza jest odpowiedni kształt oraz szerokość szczeliny. Przez dobór szerokości szczeliny można wpłynąć na wytrzymałość złączy oraz ich podatność na wystąpienie korozji. Przedstawiono przykłady zróżnicowanej konstrukcji złączy, a także skutki nieprawidłowego przygotowania krawędzi łączonych rur. Zamieszczono następujące przykłady złączy: z sanitarnej instalacji miedzianej znajdującej się we Wrocławiu (od 1920 r.), konstrukcji stalowych grzejników łazienkowych i instalacji wykonanej ze stalowych rur ocynkowanych.

***Słowa kluczowe**: lutowanie, lutospawanie, konstrukcja złącza, szerokość szczeliny, zjawiska korozji*

In soldering and braze welding processes constructional and technological factors play an important role. Proper shape and width of the clearance is essential for construction and resistance of the joints. Modification of clearance width can influence on joint resistance and susceptibility to corrosion. Examples of different joint construction and effects of incorrect pipes edges preparatiion are presented. The following examples are presented: joints in Wrocław copper sanitary system (since 1920), joints in structure of bathroom steel heaters and joints in systems made from galvanizing steel pipes.

***Keywords:** soldering, braze welding, joint construction, clearance width, corrosion effects*

1. Wstęp

Na własności połączeń lutowanych wpływa wiele czynników konstrukcyjnych i technologicznych. Należą do nich: konstrukcja złącza lutowanego, przygotowanie powierzchni, metody i parametry lutowania oraz postać i właściwości materiałów lutowniczych [7 - 9]. W przypadku konstrukcji złącza olbrzymie znaczenie ma szerokość szczeliny lutowniczej. Wpływa ona na budowę strukturalną lutowiny i własności mechaniczne złączy we wszystkich procesach lutowania. Należy podkreślić, że zwłaszcza podczas łączenia materiałów różnoimiennych szczelina lutownicza ma fundamentalne znaczenie dla uzyskania funkcjonalnego połączenia lutowanego [7 - 9]. Ukształtowanie szczeliny lutowniczej czy też odstępu w lutospawaniu i ich wypełnienie lutem odgrywa istotną rolę w odporności złączy na korozję.

2. Lutowanie miedzianych instalacji sanitarnych

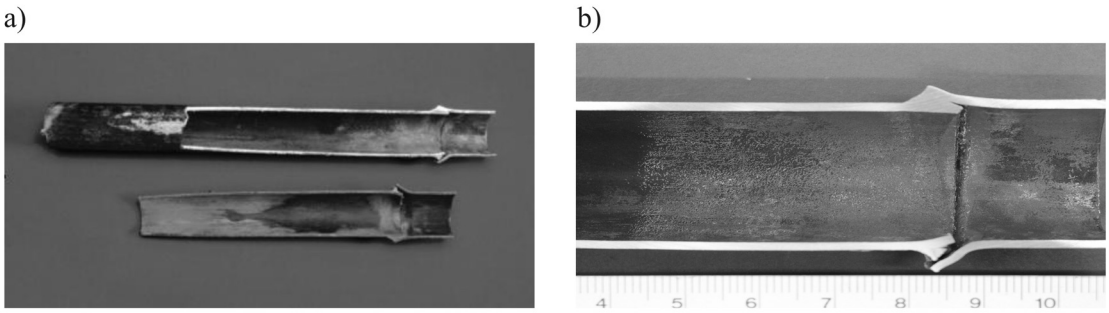
Dobór szerokości szczeliny lutowniczej powinien być poprzedzony analizą zjawisk fizykochemicznych w procesach spajania materiałów, szczególnie materiałów różnoimiennych. Punktem wyjścia do oceny lutowności materiałów jest znajomość zjawisk powierzchniowych. W przypadku spajania materiałów szczególnie o różnych właściwościach fizycznych należy wziąć pod uwagę przede wszystkim ich rozszerzalność liniową. Ma ona decydujący wpływ na zachowanie się szczeliny, która zmienia się podczas nagrzewania obydwu materiałów od temperatury otoczenia do temperatury lutowania [8].

Kolejną cechą charakterystyczną dla konstrukcji złącza lutowanego jest kształt połączenia dotyczący wykonanej szczeliny. Niedopuszczalne są szczeliny o kształcie klina, gdyż taka konstrukcja uniemożliwia

kapilarne wypełnienie szczeliny lutowniczej. Charakterystyczny wygląd złącza ze szczeliną rozwartą pokazuje rysunek 1 a i b.

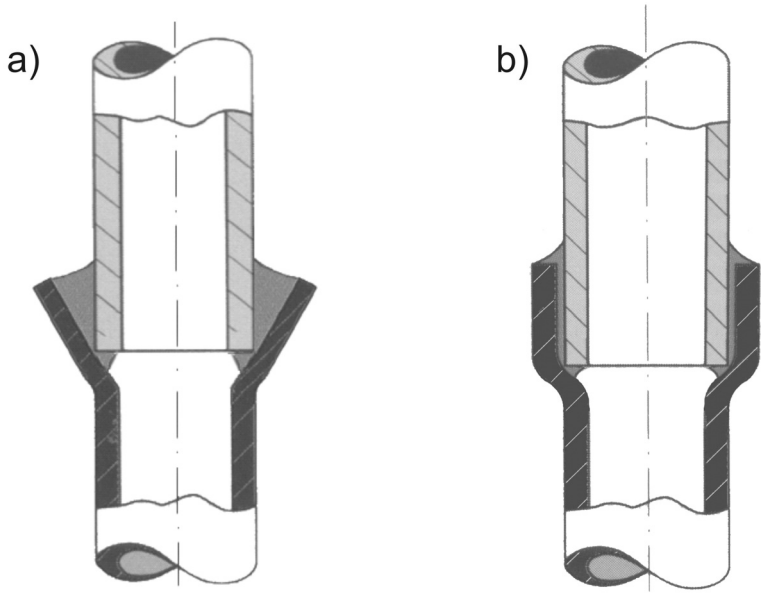
Przedstawione wyżej złącze pochodzi z instalacji wody zimnej wykonanej w 1920 r. we Wrocławiu. Jest to złącze wykonane właściwie przez lutospawanie gazowe przy użyciu lutu mosiężnego. Instalacja ta funkcjonuje do dnia dzisiejszego, a rura miedziana pobrana do badań jest gładka, bez wżerów i innej korozji lokalnej. Podczas przeprowadzanych badań, przy wzdłużnym cięciu złącza, nastąpiło jednak rozdzielenie połączenia po jednej stronie. Jest to wynikiem małej wytrzymałości mechanicznej złącza w obszarze zbyt szerokiej szczeliny lutowniczej.

Obecnie przygotowanie szczeliny o kształcie klina w miedzianych instalacjach sanitarnych (rys. 2a) jest już niedopuszczalne. Obok utraty własności kapilarnych lutu w takich szczelinach, występuje duże prawdopodobieństwo braku szczelności połączenia przez pory i braki wypełnienia. Dochodzi również do nadmiernego zużycia dodatkowych materiałów lutowniczych. Skutkiem wadliwego przygotowania rur do lutowania jest częste zmniejszenie przekroju czynnego, występujące zawirowania przepływu, szumy, straty ciśnienia oraz erozja połączenia [7]. W przypadku lutospawania może dojść do podobnych zjawisk przez nadmierny wyciek lutowia po wewnętrznej stronie złącza. Obecnie w łączeniu instalacji sanitarnych z miedzi rury i złączki o średnicy do 28 mm włącznie powinny być przygotowane do lutowania miękkiego ze szczeliną równoległą o szerokości 0,05 – 0,20 mm (rys. 2 b) [7].



Rys. 1. Konstrukcja złącza lutowanego ze szczeliną rozwartą (1920 r.): a) wycinek złącza z instalacji miedzianej, b) złącze lutospawane [7, 10]

Fig 1. Brazed joint structure with obtuse clearance (1920): a) part of joint from copper system, b) braze welding joint [7, 10]

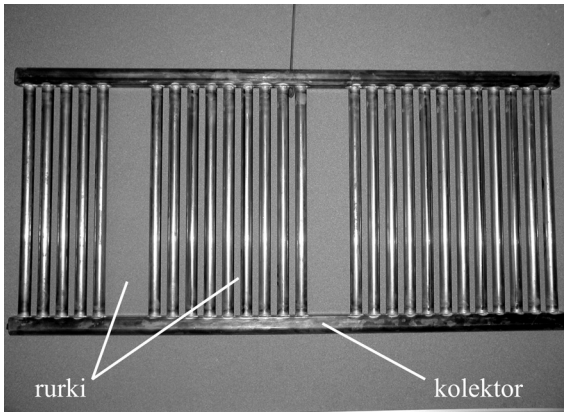


Rys. 2. Schemat konstrukcji szczeliny lutowniczej złącza kielichowego: a)niedopuszczalna szczelina rozwarta, b) zalecana szczelina równoległa

Fig. 2. Schematic of clearance construction in brazed joints in socket joint: a) inadmissible obtuse clearance, b) recommended parallel clearance

3. Lutowanie i lutospawanie stalowych grzejników łazienkowych

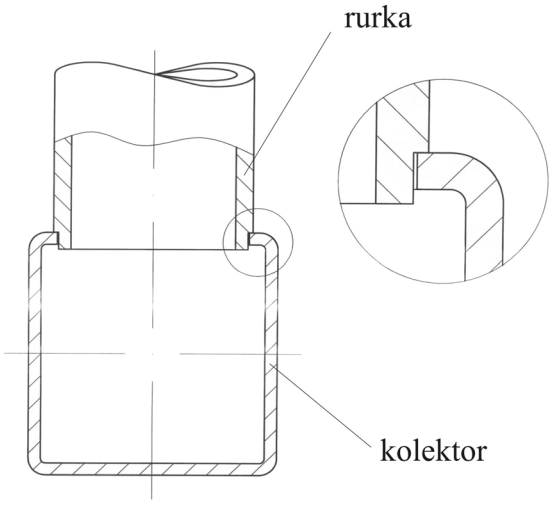
W konstrukcji stalowych grzejników łazienkowych łączenie kolektora z rurkami stalowymi (rys. 3) odbywa się najczęściej za pomocą procesów lutowania.



Rys. 3. Konstrukcja stalowego grzejnika łazienkowego [6]
Fig. 3. Construction of bathroom steel heaters [6]

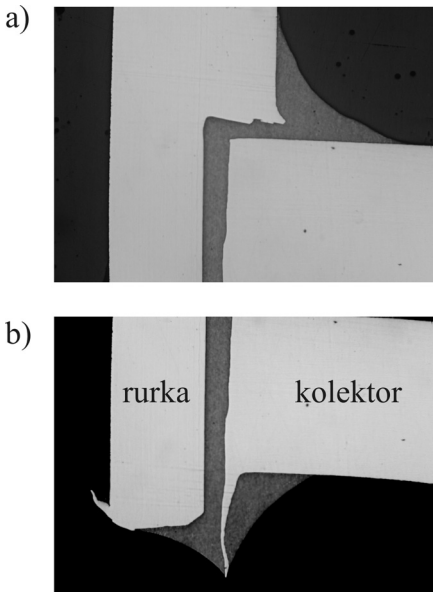
Istotne znaczenie dla pracy grzejnika ma konstrukcja elementów w obszarze łączenia, a także właściwości lutownicze spoiwa i zastosowana osłona przed utlenianiem [6].

Konstrukcja elementów grzejnika przygotowanych do lutowania, pokazana na rysunku 4, jest korzystna z punktu podstawowych zjawisk lutowania. Rura o średnicy 22 x 1,5 mm jest lutowana z kolektorem o przekroju kwadratowym 30 x 30 x 1,2 mm.



Rys. 4. Schemat przygotowania kolektora z rurką stalową do lutowania
Fig. 4. Preparation process schematic of collector with steel pipe for soldering process

Tak wykonane złącze, o szerokości szczeliny do 0,30 mm, jest dobrze wypełnione lutem (rys. 5 a, b).



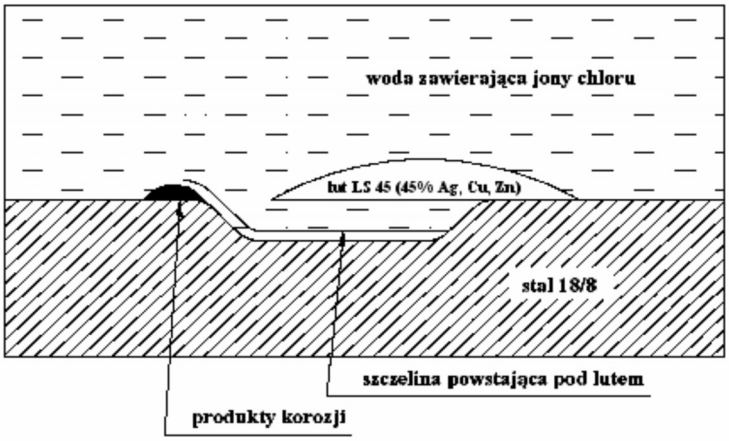
Rys.5. Złącze lutowane w konstrukcji grzejnika łazienkowego: a) lico lutowiny, b) dolna część złącza [6]
Fig. 5. Brazed joint in bathroom heater structure: a) front of braze joint, b) bottom part of the joint [6]

Nie usunięty grat po wierceniu otworu w kolektorze sprzyja kapilarnemu wypełnieniu szczeliny. Jednak, takie niedopatrzenie (zaniedbanie) jest niepożądane zarówno z punktu zawężenia przekroju czynnego, zużycia większej ilości lutu jak i pojawienia się niepożądanych zjawisk korozji [1, 6].

Szczególnie narażone na powstanie korozji są tu instalacje wodne, zasilane wodą zawierającą jony chloru. Otwarte złącze lutowane w kontakcie z wodą chlorowaną staje się ogniwem elektrochemicznym.

Grzejniki łazienkowe są wykonywane zwykle z niskowęglowej stali konstrukcyjnej, coraz częściej stosuje się jednak chromowo – niklowe stale kwasoodporne typu 18/8. Niekorzystne jest połączenie takiej stali z lutem srebrnym, który stanowi tu metal bardziej szlachetny. W reakcjach elektrochemicznych rolę katody spełnia lut, natomiast rolę anody – stal wysokostopowa, która ulega procesowi rozpuszczania [11].

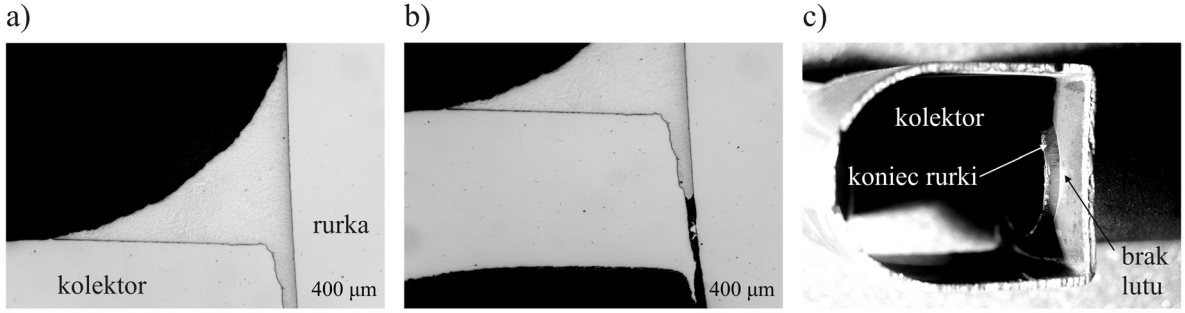
Dochodzi wtedy do zjawiska korozji nożowej, pokazanej schematycznie na rysunku 6. Opóźnienie wystąpienia zjawiska korozji nożowej zaobserwowano w złączu ze stali X10CrNiMoTi1810 przy użyciu lutu srebrnego B – Ag56CuInNi-620/730 według ISO 3677, nie zawierającego cynku i kadmu [12].



Rys. 6. Schemat korozji nożowej w złączu lutowanym ze stali kwasoodpornej [12]
Fig. 6. Scheme of knife – line attack in brazed joint made from acid-proof steel [12]

W celu uniknięcia korozji wskazany jest brak kontaktu złącza z jonami chloru, które znajdują się w wodzie. Konstrukcja złącza pokazana na rysunku 7 w znacznym stopniu to umożliwia, gdyż występuje tu odstęp o kształcie klina, a nie klasyczna szczelina równoległa [6].

Jedną z najczęściej stosowanych technologii łączenia stalowych rur ocynkowanych jest lutospawanie gazowe. Zamiast klasycznych topników dających szklisty, silnie przyczepny żużel potopnikowy, coraz częściej stosowany jest topnik lotny. W tym

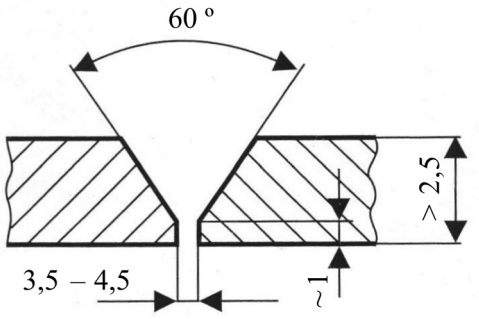


Rys. 7. Złącze lutospawane z konstrukcją szczeliny o kształcie klina: a), b) w stanie nietrawionym, c) widok złącza od wewnątrz [6]
Fig. 7. Brazed joint with wedge shaped clearance: a), b)unetched, c) internal view of the joint [6]

Rura stalowa o średnicy 26 x 1,0 mm, użyta do łączenia, jest na końcu zwężona w taki sposób, że udaje się ją wcisnąć do oporu w wytłaczany otwór w kolektorze. Złącze powstaje w dużym stopniu przez lutospawanie, a uzyskana spoina z lutu mosiężnego L – CuZnMnSn zapewnia połączeniu szczelność i wytrzymałość mechaniczną. Zastosowanie topnika lotnego w procesie łączenia ogranicza kapilarne wpłynięcie lutu do szczeliny.

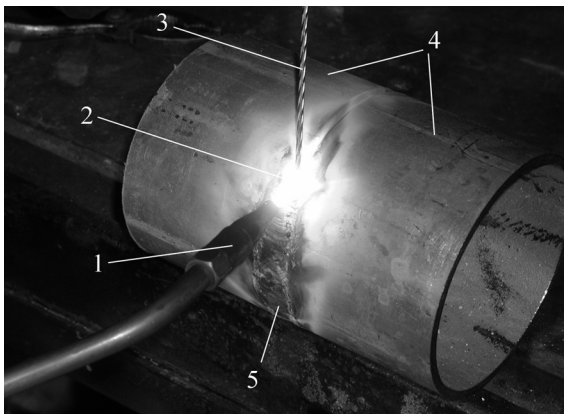
4. Lutospawanie stalowych rur ocynkowanych

Rury stalowe ocynkowane, o grubości ścianki powyżej 2,5 m przygotowane są do lutospawania, zgodnie z rysunkiem 8.



Rys. 8. Przygotowanie stalowych rur ocynkowanych do lutospawania [2]
Fig. 8. Preparation process of galvanizing steel pipes for braze welding [2]

przypadku związkami boru nasycony jest płomień gazowy (rys. 9).



Rys. 9. Schemat lutospawania gazowego stalowej rury ocynkowanej przy użyciu topnika lotnego: 1 - palnik gazowy, 2 - utleniający płomień gazowy z topnikiem lotnym, 3 - lut Drilldraht, 4 - stalowe rury ocynkowane, 5 - lutospoina [9]

Fig. 9. Schematic of gas braze welding of galvanizing steel pipe using volatile flux: 1 - torch, 2 - oxidizing gas flame with volatile flux, 3 - Drilldraht solder, 4 - galvanizing steel pipes, 5 - solder weld [9]

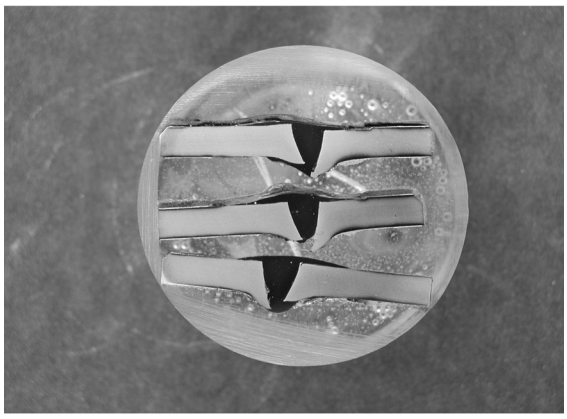
Pozostałości topnika lotnego nie są korozyjnie czynne (nie wywołują korozji) i łatwo można je usunąć przez spłukanie wodą [9]. Temperatura aktywnego działania topnika lotnego leży w zakresie 750 – 950 ^{0}C i jest dopasowana głównie do lutów mosiężnych, które powszechnie stosowane są w procesach lutospawania gazowego [9].

Jako lutu użyto spoiwa mosiężnego Drilldraht (CU 106 według DIN EN 1044 i B – Cu59ZnSn(Ni)(Mn)(Si) – 870/890 według DIN EN ISO 3677) [3], o temperaturze topnienia 870 – 890 ^{0}C. Konstrukcja spoiwa polega na skręceniu czterech drutów o średnicy 1,0 mm, między którymi znajduje się niewielka ilość topnika.

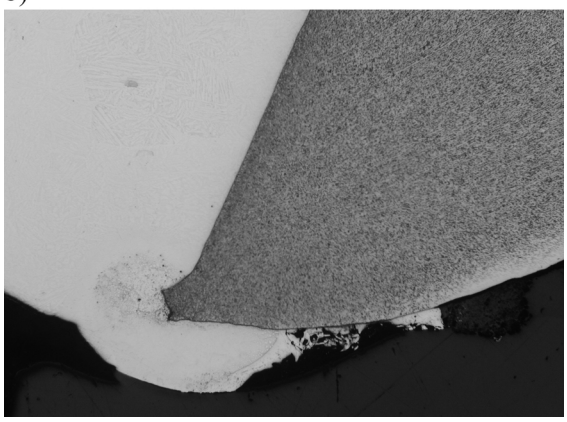
Niewłaściwe przygotowanie powierzchni krawędzi stalowych rur ocynkowanych o średnicy 114,3x4,0 mm prowadzi do uzyskania wadliwych złączy lutospawanych (rys. 10 a, b). Dolne krawędzie rur wywinięte są do wewnątrz, co po uzyskaniu złącza powoduje wyraźne zmiejszenie średnicy czynnej przewodu. Nadmierny wyciek lutowia w grani (rys. 10 b) umożliwia ponadto powstanie warunków sprzyjających korozji.

Podczas przepływu wody w tak wykonanych instalacjach stalowych rur ocynkowanych występuje niebezpieczeństwo erozji lutowia mosiężnego i wytrącenia się cząstek miedzi, które osadzają się na powłoce

a)



b)



Rys. 10. Złącza lutospawane stalowych rur ocynkowanych po wadliwym przygotowaniu krawędzi rur (a), fragment grani lutospoiny (b) [5]

Fig. 10. Braze welding joint of galvanizing steel pipe after incorrect pipes edges preparation process (a) fragment of the root of weld (b) [5]

cynkowej za lutospoiną. Może to doprowadzić w krótkim czasie do powstania korozji wżerowej [4].

5. Podsumowanie

Konstrukcja szczeliny lutowniczej odgrywa podstawową rolę w procesach lutowania. Szerokość szczeliny powinna umożliwić jej kapilarne wypełnienie lutem. W procesach lutowania miedzianych instalacji sanitarnych, przygotowanie rur i złączek powinno zapewnić uzyskanie szczeliny równoległej.

W określonych przypadkach, np. w konstrukcji stalowych grzejników łazienkowych, szczelina o kształcie klina uniemożliwia bezpośredni kontakt złącza złożonego z różnych materiałów z agresywnym oddziaływaniem wody chlorowanej. Złącze powstaje przede wszystkim w wyniku procesu lutospawania.

Lutospawanie stosowanie jest zwykle do łączenia stalowych rur ocynkowanych. Nie występuje już tutaj klasyczna szczelina lecz odstęp i przygotowanie krawędzi na V, podobnie jak przy spawaniu. Niewłaściwe przygotowanie krawędzi łączonych rur sprzyja uzyskiwaniu wadliwych złączy i uwrażliwianiu ich na zjawiska korozji wżerowej.

6. Literatura

[1] Baszkiewicz J., Kamieński M.: *Podstawy korozji materiałów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
[2] Castolin – Eutectic: *Technologia lutospawanych rur ocynkowanych*, Prospekt firmowy, 2001.
[3] Chemet: *Lieferprogramm*, Wirges (Niemcy) 2004.
[4] Lingscheidt G.: *Hartlöten verzinkter Rohre und Profile*, Metall, nr 4, 1979, s. 365 – 369.
[5] Mirski Z., Granat K.: *Lutospawanie gazowe ocynkowanych rur stalowych*, Przegląd Spawalnictwa, 2003, nr 2 – 3, s. 19 – 21.
[6] Mirski Z., Granat K.: *Lutowanie twarde stalowych grzejników łazienkowych*, Przegląd Spawalnictwa, 2004, nr 8 – 9, s. 23 – 26.
[7] Mirski Z.: *Spajanie termiczne instalacji miedzianych*, Polski Instalator, 2001, nr 4, s. 14 – 20.
[8] Mirski Z.: *Sterowanie szerokością szczeliny lutowniczej w procesach spajania materiałów różnoimiennych*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, seria: Monografie nr 22, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
[9] Mirski Z., Bulica A.: *Topniki lotne*, Polski Instalator, 2005, nr 1, s. 40 – 44.
[10] Polskie Centrum Promocji Miedzi: *Miedź mądry wybór*, Cu for you, Materiały szkoleniowe, Wrocław 2000.
[11] Pourbaix M.: *Wykłady z korozji elektrochemicznej*, PWN, Warszawa 1978.
[12] Steffens H. – D., Wielage B., Brandl W.: *Untersuchungen zum Ablauf der Messerschnittkorrosion an Silberh artlötverbindungen*, Schweissen und Schneiden, 1988, nr 3, s. 134 – 140.

Dr hab. inż. Zbigniew MIRSKI
Mgr inż. Alicja BULICA
Dr inż. Kazimierz GRANAT

Politechnika Wrocławska
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji
Wrocław ul. Łukasiewicza 3/5
e-mail: zbigniew.mirski@pwr.wroc.pl, tel. 320 21 42
e-mail: alicja.bulica@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 21 42
e-mail: kazimierz.granat@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 29 96

Zbigniew MIRSKI
Tomasz PIWOWARCZYK

KLEJENIE WĘGLIKÓW SPIEKANYCH

GLUING OF SINTERED CARBIDES

W artykule przedstawiono klejenie węglików spiekanych ze stalą w aspekcie wytwarzania narzędzi. Porównano klejenie z procesami lutowania twardego. Zwrócono szczególną uwagę na różnice we właściwościach łączonych materiałów i wynikające z nich problemy łączenia. Wykonano połączenia klejowe przy użyciu kleju anaerobowego LOCTITE 638. Przedstawiono wyniki statycznej próby ścinania połączeń klejowych węglików spiekanych gat. S 20 ze stalą 45 (C45 wg PN EN 10083 – 1) oraz WC – 45, kobalt – 45 i 45 – 45. Wykazano wyraźne różnice we własnościach wytrzymałościowych połączeń klejowych metali i węglików spiekanych, które są zaliczane do materiałów pasywnych przy łączeniu klejami anaerobowymi.

Słowa kluczowe: *klejenie, węgliki spiekane, przygotowanie powierzchni, wytrzymałość na ścinanie*

In this article presented is gluing of sintered carbides with steel in aspect of tool fabrication. Gluing and hard soldering processes were compared. Particularly attention was drawn to the differences in properties of joint materials and resulting from this bonding problems. Glue joints were executed with usage of anaerobes glue LOCTITE 638. The results of static shearing test of glue joints of sintered carbides grade S 20 with steel 45 (C45 according to PN EN 10083 – 1) and WC – 45, cobalt – 45 and 45 - 45 are presented. Distinct differences in shear strength properties of glue joints of metals and sintered carbides, which are classified as a materials passive during bonding, are showed.

Keywords: *gluing, sintered carbides, surface preparation, shear strength*

1. Wprowadzenie

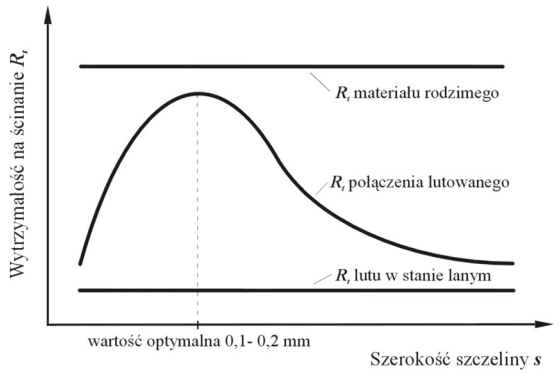
Narzędzia z kształtkami z węglików spiekanych często pracują w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych. Zalicza się do nich specjalne narzędzia do obróbki skrawaniem i obróbki plastycznej, narzędzia górnicze wykorzystywane w kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi oraz narzędzia do obróbki drewna i kamienia. Połączenia z węglikami spiekanymi powinny być wykonane przy użyciu techniki zapewniającej długą, bezpieczną i efektywną pracę narzędzi. Najbardziej pożądanymi parametrami, na które powinni zwrócić uwagę konstruktorzy i technolodzy to duża odporność połączeń na obciążenia udarowe oraz plastyczność warstwy pośredniej między łączonymi materiałami. Pozwala to na przejęcie nadmiernych naprężeń powstających w złączu, a przez to zapobiega się odkształceniom stali i pęknięciom węglików spiekanych. Szeroko stosowane metody spajania węglików spiekanych takie jak lutowanie twarde i wysokotemperaturowe, wykazują często niekorzystne oddziaływanie wysokiej temperatury, co prowadzi do uzyskania połączeń o niezadowalającej jakości. Aby tego uniknąć, zwrócono się w kierunku klejenia wykazującego szereg zalet, niezbędnych przy łączeniu materiałów różnoimiennych.

2. Problemy występujące przy łączeniu węglików spiekanych ze stalą

Spajanie węglików spiekanych ze stalą odbywa się przede wszystkim za pomocą lutowania twardego i wysokotemperaturowego, rzadko za pomocą spawania, zgrzewania dyfuzyjnego czy tarciowego [1,2]. Główne trudności łączenia tych materiałów wynikają z ich zróżnicowanych właściwości fizycznych i mechanicznych. Na korpusy narzędzi najczęściej stosowane są stale charakteryzujące się wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie (w granicach 700-1000 MPa). Warunek ten spełniają stale węglowe konstrukcyjne oraz stale stopowe do ulepszania cieplnego o zawartości węgla od 0,45 do 0,7 % wag [3]. Spośród częściej używanych należy wymienić stale węglowe konstrukcyjne gat. 45 i 55 oraz, w przypadku większych wymagań wytrzymałościowych, stale stopowe do ulepszania cieplnego gat. 35 HGS, 40 H i 40 HM [1]. Węgliki spiekane charakteryzują się prawie 3-krotnie mniejszym współczynnikiem

rozszerzalności liniowej (α = 4,5 ÷ 7 10^{-6} 1/K) i zwykle 2-krotnie większą przewodnością cieplną właściwą (λ = 80 ÷ 100 W/mK) w porównaniu ze stalami węglowymi konstrukcyjnymi i stopowymi (α = 11 ÷ 14 10^{-6} 1/K, λ = 35 ÷ 55 W/mK) [4,5]. Struktura węglików spiekanych, stosowanych w górnictwie, składa się najczęściej z fazy węglikowej WC oraz kobaltu stanowiącego fazę wiążącą. W grupach spieków narzędziowych przeznaczonych do obróbki skrawaniem występują ponadto węgliki tytanu, tantalu i niobu. Podstawowe właściwości wybranych węglików spiekanych gat. S20 o składzie według PN – 88/H – 89500, węglików wolframu WC, kobaltu i stali 45 (C45 według PN EN 10083 – 1) zamieszczono w tabeli 1.

Różnice w rozszerzalności liniowej łączonych materiałów powodują powstawanie podczas chłodzenia połączenia lutowanego niekorzystnych naprężeń rozciągających, które mogą doprowadzić do pęknięć w węglikach spiekanych. Dlatego też lutowina powinna być plastyczna i o takiej szerokości, aby przejąć zarówno naprężenia skurczowe powstające podczas studzenia, jak i naprężenia eksploatacyjne. Zaleca się, aby szerokość szczeliny przy łączeniu węglików spiekanych ze stalą wynosiła minimum 0,2 ÷ 0,3 mm (dla silnie obciążonych połączeń nawet 0,5 ÷ 0,6 mm) [1,2]. Należy się także liczyć z tym, że przy stosowaniu szerokich szczelin, następuje utrata właściwości kapilarnych lutu i pojawiają się trudności z ich wypełnieniem [2]. Zwykle optymalna szczelina dla połączeń materiałów jednoimiennych leży w zakresie 0,1 – 0,2 mm, dla lutowania pod osłoną topnika, i jest zależna od rodzaju lutu. Ogólną zależność wytrzymałości na ścinanie połączeń w funkcji szerokości szczeliny pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólna zależność wytrzymałości na ścinanie połączenia lutowanego R_t od wartości szerokości szczeliny s dla lutowania pod osłoną topnika [7]

Fig. 1. General relation of soldered joint shear strength R_t and the value of gap width s for soldering under flux shield [7]

3. Zalety i wady klejenia w porównaniu z lutowaniem twardym narzędzi z kształtkami z węglików spiekanych

Klejenie węglików spiekanych z metalami uważane jest za technologię przyszłości. Podjęto już próby łączenia tych materiałów, np. w krzyżowych koronkach wiertniczych przy użyciu kleju na bazie żywicy metakrylowej [8] (rys. 2). Próbowano również wklejać płytki węglikowe w narzędziach do obróbki plastycznej klejem na bazie kauczuku i żywicy fenolowej oraz w 12 – segmentowej pile tarczowej klejem opartym na żywicy epoksydowej [9].

Podstawowe czynniki, które ograniczają stosowanie techniki klejenia w produkcji narzędzi to stosunkowo niewielka wytrzymałość na ścinanie R_t połączeń, zwykle nie przekraczająca 40 MPa, oraz brak odporności na wysokie temperatury. Jednakże dynamiczny rozwój techniki klejenia w ostatnich latach spowodował znaczny wzrost parametrów wytrzymałościowych i odporności na wysokie temperatury dostępnych na rynku materiałów klejowych. Obecnie oferowane przez producentów kleje konstrukcyjne często mają wytrzymałość na ścinanie R_t większą niż 40 MPa (np. kleje epoksydowe utwardzane przez dodatkowe nagrzewanie indukcyjne). Dodatkowo można ją jeszcze zwiększyć stosując kleje o budowie kompozytowej, składające się z osnowy (matrycy) kleju właściwego i napełniacza – fazy obcej w postaci:

Tab. 1. Podstawowe właściwości węglików spiekanych gat. S20, węglika wolframu, kobaltu i stali 45 [2,5,6]
Tab. 1. Basic properties of sintered carbides grade S20, wolfram carbide, cobalt and steel 45 [2,5,6]

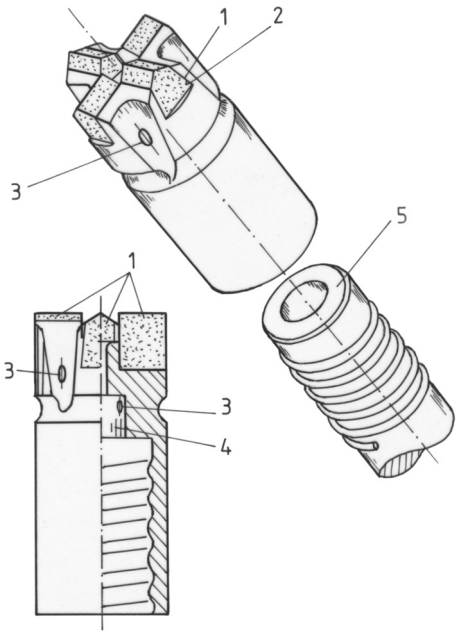
Materiał	Skład chemiczny % wag			Gęstość ρ g/cm^3	Twardość	HV30	Współczynnik rozszerzalności liniowej α 10^{-6} 1/K
	WC	TiC+TaC+NbC	Co				
S20	78	14	8	11,6	1500	5,8	42
WC	100	—	—	15,7	1790	5,7-7,2	—
kobalt	—	—	100	8,9	125	13,2	96
stal 45	0,42÷0,5%C; 0,5÷0,8%Mn; 0,1÷0,4%Si; max po 0,3% Cr,Ni,Cu; max po 0,04% P i S;			8,0	190-260	13,6	52 w 0 °C

cząstek, włókien i siatek. Wstępne próby modyfikacji klejów w Zakładzie Spawalnictwa ITMiA PWr przyniosły wzrost wytrzymałości na ścinanie R_t o 30% (klej metakrylowy + napełniacz w postaci proszku aluminiowego, w stosunku obj. 1:1 do zawartości kleju) w porównaniu z klejem bez zbrojenia [10]. Innym sposobem zwiększania funkcjonalności połączeń klejowych jest odpowiednia konstrukcja złącza, przy wykorzystaniu możliwie największej powierzchni łączenia oraz wyeliminowaniu niekorzystnych obciążeń powodujących oddzieranie i rozszczepianie złączy (rys. 3 c,d). Powinny być one projektowane przede wszystkim jako złącza zakładkowe, pracujące na ścinanie (rys. 3a). Naprężenia rozciągające mogą być dobrze przenoszone, ale przez duże powierzchnie (rys. 3b). Poprawa konstrukcji złącza to nie tylko zmniejszenie naprężeń, ale także ich równomierne rozłożenie. Bardzo korzystnym rozwiązaniem jest usytuowanie kształtki z węglików spiekanych w tzw. jaskółczym ogonie (rys. 2). Narzędzia z wklejonymi kształtkami węglikowymi pracują prawidłowo, gdy działają na nie naprężenia ściskające.

Problem odporności klejów na wysokie temperatury został już częściowo rozwiązany. Znane są uszczelnienia silikonowe, o zdolnościach klejących, odporne na temperatury w zakresie 300 – 350 °C. Produkowane są również nowoczesne produkty pracujące w temperaturach powyżej 400 °C [2], a nawet uszczelniacze i kleje wytrzymujące zakres do 1200 °C [12]. Przykładem wysokiej odporności termicznej klejów jest zastosowanie ich do łączenia ponad 30 tysięcy płytek krzemowych z powierzchnią promu kosmicznego Columbia. Takie połączenia klejowe wykazywały odporność na temperatury sięgające do 1500 °C [13].

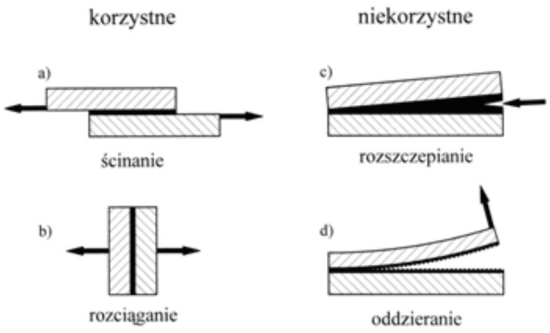
Eliminując powyższe wady klejenia można otrzymać połączenie o dobrej jakości, wykazujące w porównaniu z lutowaniem następujące zalety [1,2,10,14]:

- przejmowanie przez elastyczną warstwę kleju niekorzystnych zmian współczynnika rozszerzalności liniowej materiałów różnoimiennych,
- równomierne obciążenie złącza,
- brak strefy wpływu ciepła w połączeniach,
- pomijalnie małe naprężenia w złączu,
- uszczelnienie połączenia oraz ochrona przed wnikaniem wilgoci i powstawaniem korozji elektrochemicznej w połączeniach materiałów różnoimiennych,
- brak problemów zwilżalności węglików wolframu, a szczególnie węglików tytanu, tantalu i niobu występujących w spiekach narzędziowych (za wyjątkiem klejów anaerobowych),
- przeprowadzanie łączenia zwykle w temperaturze pokojowej, bez potrzeby wykorzystania atmosfer ochronnych lub próżni,
- łatwe uzyskanie powtarzalnej szerokości szczeliny,
- nie jest wymagane studzenie złącza w określonych warunkach po procesie spajania,
- eliminowanie dodatkowych obróbek powierzchniowych po procesie klejenia,
- możliwość łączenia dużych powierzchni, znacznie przekraczających 100 mm^2.



Rys. 2. Koronka wiertnicza z wklejonymi węglikami spiekanymi: kształtka węglikowa (1), gniazdo krzyżowe (2), otwór wodny (3), kanał wodny (4), żerdź (5) [8]

Fig. 2. Drill bit with inserted sintered carbides: carbide shape (1), cross seat (2), water orifice (3), water duct (4), rod (5) [8]



Rys. 3. Korzystne (a, b) i niekorzystne (c, d) obciążenia mechaniczne połączeń klejowych [11]

Fig. 3. Beneficial (a, b) and adverse (c, d) mechanical loads of glue joints [11]

4. Przygotowanie powierzchni węglików spiekanych do klejenia

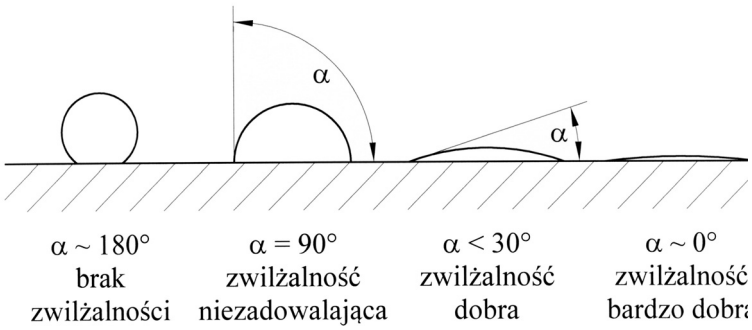
Odpowiednie przygotowanie powierzchni węglików spiekanych, podobnie jak w przypadku lutowania, w znacznym stopniu decyduje o prawidłowej pracy złącza. Przez uzyskanie maksymalnych sił adhezji na granicy klej – materiał łączony, można nawet 4 – krotnie zwiększyć wytrzymałość mechaniczną połączeń. W praktyce stosuje się różne metody przygotowania powierzchni węglików spiekanych, w celu jej rozwinięcia: mechaniczne (szlifowanie, obróbka strumieniowo – ścierna), chemiczne, termiczne (lub łączenie tych metod: chemiczno-termiczne) oraz elektrochemiczne [15]. Optymalną metodą przygotowania powierzchni węglików spiekanych jest trawienie elektrolityczne, polegającą na selektywnym rozpuszczaniu anodowym trudno zwilżalnego węglika wolframu WC, czego efektem jest uzyskanie rozwiniętej warstwy kobaltowej na powierzchni łączenia [2]. Końcowym etapem przygotowania powierzchni jest jej odtłuszczenie zwykle za pomocą rozpuszczalników organicznych. Nie zaleca się stosowania benzyny ekstrakcyjnej, ponieważ zawiera ona kilka procent frakcji tłuszczowych, niekorzystnie wpływających na siły adhezji w połączeniach klejowych [16]. Adhezję właściwą, przy klejeniu węglików spiekanych, można również zwiększyć nanosząc na powierzchnie węglików spiekanych warstwy metalowe z miedzi, niklu czy kobaltu, zwykle metodami elektrochemicznymi. Są one łatwiej zwilżane i klejone, szczególnie przy użyciu klejów anaerobowych. Dla zwiększenia przyczepności kleju i wytrzymałości połączenia, powierzchnie elementów klejonych poddaje się często gruntowaniu tj. nanoszeniu primeru (zwykle w ilości około 5 g/m^2), który zwiększa również odporność połączenia na oddziaływanie wilgoci i korozji.

Dobór metody przygotowania powierzchni bezpośrednio wpływa na adhezję mechaniczną, związaną z chropowatością (wysokość nierówności R_z powinna zawierać się w granicach 15 ÷ 40 μm) i rozwinięciem powierzchni łączonej. Aby klej dokładnie wypełnił wszelkie nierówności, graniczny kąt zwilżania α powinien być jak najmniejszy. Przyjmuje się, że zwilżalność kleju jest optymalna, gdy $\alpha \sim 0^o$ (rys. 4).

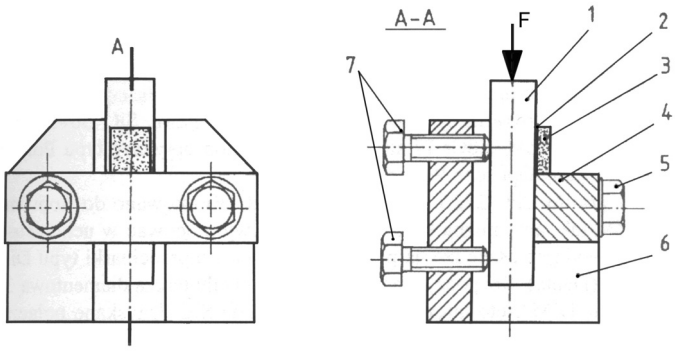
5. Wykonanie połączeń klejowych i statyczna próba ścinania

Łączono stal 45 z płytkami z węglików spiekanych gat. S20 oraz węglikiem wolframu WC. Wykonano także próbne połączenia stal 45 – Co oraz stal 45 – stal 45. Wszystkie złącza wykonano przy użyciu kleju Loctite 638, należącego do grupy klejów anaerobowych, utwardzających się po odcięcia tlenu z powietrza i zapewnieniu kontaktu z metalem. Jest to klej, który może być stosowany do łączenia metali, przy szczelinie dochodzącej nawet do 0,25 mm. Wytrzymałość na ścinanie połączeń stalowych (według ISO 10123) wynosi 22 – 40 MPa w temperaturze pokojowej, natomiast w temperaturze 150 °C zmniejsza się 2 – krotnie [17]. Jako aktywatora użyto jednoskładnikowego produktu Loctite 7649 na bazie rozpuszczalnika (acetonu), przyspieszającego utwardzanie produktów anaerobowych, ale nie wpływającego na adhezję kleju do podłoża. Szczelina klejowa s we wszystkich przypadkach wynosiła 0,05 mm. Powierzchnia stali 45 po frezowaniu charakteryzowała się następującymi parametrami chropowatości: R_a = 1,52 μm i R_z = 9,23 μm. Powierzchnia węglików spiekanych gat. S20 po szlifowaniu miała chropowatość odpowiednio: R_a = 0,17 μm i R_z = 1,49 μm. W celu uzyskania poprawnych połączeń łączone elementy przed procesem klejenia odtłuszczono rozpuszczalnikiem nitro. Powierzchnia klejenia próbek o przekroju kołowym wynosiła 104 mm^2.

Statyczną próbę wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy INSTRON, model 1126, przy następujących parametrach: zakres obciążenia 10000 N, prędkość posuwu belki V_b = 0,2 cm/min oraz prędkość przesuwu papieru V_p = 5 cm/min. Ścinane próbki mocowano w specjalnie skonstruowanym przyrządzie, pokazanym na rys. 5. Umieszczano go między dwoma uchwytami,



Rys. 4. Przypadki zwilżania klejem podłoża klejonego [11]
Fig. 4. Cases of wetting the glued base with glue [11]



Rys. 5. Przyrząd do statycznej próby ścinania połączeń klejowych: 1 - korpus stalowy próbki, 2 - połączenie klejowe, 3 - płytka z węglików spiekanych, 4 - stempel tnący, 5 - śruba mocująca, 6 - korpus przyrządu, 7 - śruby ustalające

Fig. 5. Device for static shearing test of glue joints: 1 - sample steel body, 2 - glue joint, 3 - sintered carbides plate, 4 - punch, 5 - clamping bolt, 6 - device frame, 7 - fixing bolts

z których górny był wahliwy, co zapewniało osiowe obciążanie próbek. Rodzaje próbek, udział aktywatora oraz uzyskane wyniki ze statycznej próby ścinania zamieszczono w tabeli 2. Liczebność próbek klejonych wynika z zestawienia tabelarycznego. Połączenia typu kobalt – stal 45 i stal 45 – stal 45 wykonano wstępnie dla pojedynczych próbek.

Najmniejszą wytrzymałość na ścinanie, średnio 7 MPa, uzyskano dla połączeń czystego węglika wolframu ze stalą 45. Wynika to z właściwości pasywnych fazy WC w obecności kleju anaerobowego. Największe wartości R_t osiągnięto dla połączeń typu metal – metal, dochodzące do 24 MPa. Charakter złomu we wszystkich próbkach wykazywał oznaki zniszczenia adhezyjnego, przy czym dla złączy WC – stal 45 cała warstwa kleju pozostawała na stali. Nie odnotowano wpływu aktywatora na wytrzymałość połączeń klejowych.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Podstawowym czynnikiem ograniczającym stosowanie techniki klejenia do łączenia węglików spiekanych ze stalą w narzędziach jest mała wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych.
- Dla połączeń klejowych węglików spiekanych gat. S20 ze stalą 45 uzyskano wytrzymałość na ścinanie dochodzącą do 20 MPa.
- Istotne znaczenie w połączeniach klejowych wykonanych przy użyciu kleju anaerobowego odgrywa udział fazy metalowej o właściwościach katalitycznych. W węglikach spiekanych uzyskuje się to przez zwiększenie udziału fazy kobaltowej.

Wykonanie przedstawionych w artykule połączeń oraz przeprowadzone próby wytrzymałościowe zapoczątkowały cykl badań połączeń klejowych węglików

Tab. 2. Wyniki statycznej próby ścinania złączy klejowych
Tab. 2. Results of static shearing test of glue joints

Łączone materiały	Nr próbki	Aktywator	Wytrzymałość	na ścinanie R_t MPa
S20 - 45	S20 1	+	11	adhezyjny
S20 - 45	S20 2	+	20	adhezyjny
S20 - 45	S20 3	–	18	adhezyjny
S20 - 45	S20 4	–	19	adhezyjny
WC - 45	WC 1	+	7	adhezyjny
WC - 45	WC 2	+	7	adhezyjny
WC - 45	WC 3	–	6	adhezyjny
WC - 45	WC 4	–	7	adhezyjny
Co - 45	Co	–	19	adhezyjny
45 - 45	45	–	24	adhezyjny

spiekanych ze stalą przeprowadzanych w Zakładzie Spawalnictwa ITMiA Politechniki Wrocławskiej. Będą one uwzględniać szereg czynników, takich jak stan przygotowania powierzchni dla zwiększenia sił adhezji, dobór klejów oraz modyfikacje klejów napełniaczami w postaci siatek, włókien oraz cząstek metalowych i niemetalowych dla zwiększenia sił kohezji w połączeniach.

7. Literatura

[1] Mirski Z., Granat K.: *Poprawa jakości połączeń lutowanych narzędzi z węglikami spiekanymi*, Przegląd Spawalnictwa, nr 8-9, 2004, s. 27-30.

[2] Mirski Z.: *Sterowanie szerokością szczeliny lutowniczej w procesach spajania materiałów różnoimiennych*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, seria: Monografie nr 22, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.

[3] Mahler W., Zimmermann K.F.: *Löten von Hartmetallen, Schriftenreihe der Degussa*, Technik die verbindet, Berichte aus Forschung und Praxis, Zeszyt nr 30, Hanau 1985.

[4] Mirski Z.: *Spoiwa o budowie kompozytowej do lutowania spieków narzędziowych*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 6, 1999, s. 48-53

[5] Paland E-G.: *Technisches Taschenbuch*, INA - Schäffler KG, Herzogenaurach 2002.

[6] BAILDONIT: *Tabelaryczne zestawienie niektórych własności węglików spiekanych produkowanych w Spółce z o.o. Baildonit Węgliki Spiekane*, Katowice 2004.

[7] Hohn H.: *Hartlöten – Allgemeine Regeln für Konstruktion und Fertigung*. Schweisstechnik (A), 1976, Nr. 7, s. 144-145.

[8] Klen Timothy F.: *Bohrenkopf*, Offenlegungschrift Nr.2803735, Patent RFN, 1978.

[9] Schliekelmann R.J.: *Metallkleben – Konstruktion und Fertigung in der Praxis*, Deutscher Verlag für Schweisstechnik (DVS), Düsseldorf 1972.

[10] Mirski Z., Piwowarczyk T.: *Klejenie metali*, Przegląd Spawalnictwa, nr 6, 2003, s. 10-18.

[11] Praca zbiorowa pod redakcją Pilarczyka J.: *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, tom II, rozdz. 17, MIRSKI Z.: Klejenie, WNT, Warszawa 2005, w druku.

[12] Den Braven: *Karta techniczna kleju Fire Sealant 1200 ^{o}C*, , Oosterhout, www.denbraven.pl.

[13] Bernaciak M.: *Seria materiałów informacyjno – szkoleniowych*, Proxima NTR. Bełchatów, 2002.

[14] Mirski Z.: *Wpływ szczeliny na własności mechaniczne połączeń lutowanych*, Przegląd Spawalnictwa, nr 1-2, 1990, s. 10-14

[15] Mirski Z., Drzeniek H.: *Die Benetzbarkeit von Hartmetallen beim Hartlöten*, 5. Internationales Kolloquium: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweissen, Aachen, 16-18 Juni 1998, DVS-Berichte, Bd. 192, Düsseldorf, DVS Verlag 1998.

[16] Kowalczyk S., Raczkowski D.: *Właściwości technologiczne kompozytów regeneracyjnych*, Przegląd Spawalnictwa, 1997, nr 11, s. 7-9.

[17] Loctite: *Arkusz danych technicznych dla produkt 638*, 1995.

Dr hab. inż. Zbigniew MIRSKI
Mgr inż. Tomasz PIWOWARCZYK
Politechnika Wrocławska
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji
Wrocław ul. Łukasiewicza 3/5
tel. 320 21 42
e-mail: zbigniew.mirski@pwr.wroc.pl
e-mail: tomasz.piwowarczyk@pwr.wroc.pl

Andrzej AMBROZIAK
Piotr BIAŁUCKI
Artur POROCHOŃSKI

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI WARSTW NATRYSKIWANYCH CIEPLNIE

CHOSEN PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY THERMAL SPRAYING

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości warstw z brązu aluminiowego, warstw ze stali X46Cr13 oraz warstw natryskanych z drutu proszkowego gat. Spray-Arc 100. Wytrzymałość na rozciąganie natryskanych warstw zmieniała się zależnie od odległości natryskiwania oraz od rodzaju natryskiwanego materiału. Wytrzymałość warstw ze stali X46Cr13 osiągnęła wartość ponad 180 MPa. W warstwach wytworzonych z drutu proszkowego twardość osnowy metalicznej wynosiła ok. 530 HV0.2, natomiast twardość wydzieleń w warstwie wynosiła od 1030 – 1800 HV0.5. Badania metalograficzne wykazały, że warstwy z brązu aluminiowego charakteryzowały się wysoką jakością, zwartą, drobnoziarnistą budową i zawierały najmniejszą, spośród badanych warstw, ilość widocznych porów.

***Słowa kluczowe**: Natryskiwanie cieplne, wytrzymałość na rozciąganie, rapid tooling*

This paper describes results of research tests of sprayed coatings of aluminium bronze, steel X46Cr13 and flux–cored wire Spray – Arc 100. The influence of a stand off distance or a sort of material on the tensile strength of coatings was investigated. The tensile strength of X46Cr13 was reached the maximum value circa 180 MPa. Microhardness of coatings of Spray–Arc 100 in metal matrix is 530 HV0,2, and in grain releases is 1030 – 1800 HV0,5. It was found that the quality of sprayed layers of alumina bronze is high, low porosity, fine – grained and compact structure in metallographic observations.

***Keywords**: Thermal spraying, tensile stregth, rapid tooling*

1. Wstęp

Rozwój metod natryskiwania cieplnego, opracowanie nowych materiałów na warstwy oraz nowoczesne konstrukcje urządzeń do natryskiwania przyczyniły się do znacznego poszerzenia zakresu ich zastosowania. Nadal konwencjonalne natryskiwanie cieplne wykorzystywane jest do regeneracji zużytych części maszyn [1,2], do celów ochrony przed korozją konstrukcji stalowych [3], do zmniejszania ilości wadliwych wyrobów powstałych podczas obróbki skrawaniem, czy usuwania niektórych wad w wyrobach odlewanych [4]. Natomiast nowoczesne zastosowania to świadome kształtowanie szczególnych właściwości powierzchni części maszyn i urządzeń ukierunkowane na określone warunki ich pracy. Mogą to być np. warstwy odporne na kawitację [5], korozję i erozję wysokotemperaturową [6], zwiększające odporność na ścieranie abrazyjne [7], lub też warstwy, które powinny w warunkach pracy ulegać łatwemu ścieraniu – tzw. abradable seals [8]. Nowe metody natryskiwania i nowe materiały znajdują zastosowanie w medycynie – w budowie endoprotez [9]. Metoda natryskiwania cieplnego może być też alternatywną metodą dla precyzyjnego odlewania drobnych części [10].

Szczególne miejsce natryskiwanie cieplne zajmuje w technikach szybkiego wytwarzania form do wtryskiwania tworzyw sztucznych, które stanowią podstawową część składową techniki znanej jako RAPID PROTOTYPING [11]. Za pomocą techniki natryskiwania cieplnego wykonuje się gniazda form wtryskowych do tworzyw sztucznych, jak też matryce i stemple do plastycznego formowania wyrobów z blach [12]. Technologia wykonania takiego oprzyrządowania polega na napyleniu sprężonym gazem (zwykle powietrzem) stopionych cząstek metalu na model wzorcowy. Natryskiwana warstwa metalu lub stopu tworzy formę skorupową, która odwzorowuje powierzchnię i kształt modelu wzorcowego. Po oddzieleniu modelu skorupę metalową wzmacnia się odpowiednim kompozytem oraz dołącza wypychacze

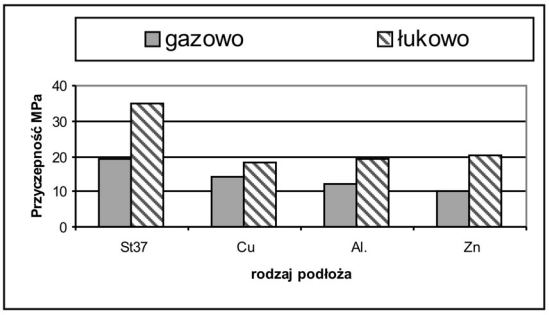
i kanały chłodzące. Następnie gniazdo umieszcza się w płycie formy do wtryskiwania tworzyw sztucznych. Wykonane w ten sposób formy używane są zarówno w konwencjonalnych jak i numerycznych maszynach technologicznych tj. wtryskarkach i i prasach [13].

2. Właściwości natryskanych warstw

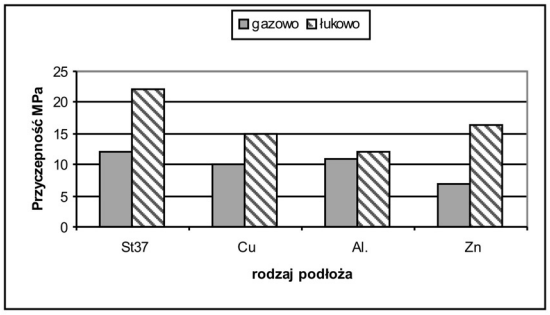
Metody badań właściwości warstw zależą przede wszystkim od warunków pracy oraz od rodzaju obciążeń działających na warstwy podczas eksploatacji. Poddaje się je badaniom twardości, wytrzymałości na ścinanie, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zużycie ścierne, itp. [4, 14]. Najczęściej badaną właściwością warstw natryskiwanych cieplnie jest przyczepność warstw do powierzchni podłoża. Badaniom przyczepności poddaje się również warstwy nakładane np. metodą galwaniczną [16]. Próba przyczepności polega na odrywaniu warstwy od podłoża przy sile działającej prostopadle do warstwy. Chociaż w praktyce taki rodzaj obciążeń występuje bardzo rzadko podczas eksploatacji warstw, to wyniki tej próby wykorzystywane są głównie do oceny jakości powiązania warstwy z powierzchnią natryskiwanego przedmiotu. Próbę przyczepności wykorzystuje się również przy optymalizacji warunków natryskiwania, a także do oceny prawidłowości jej przeprowadzenia i wielu innych. Użyteczność warstwy pracującej razem z natryskanym przedmiotem jest tym większa im mocniej przylegają one do siebie. Przyczepność zależy od wielu czynników; między innymi wpływ na nią mają rodzaj materiału warstwy oraz rodzaj materiału podłoża czy metoda i parametry natryskiwania (rys. 1).

Nieco innych właściwości oczekuje się od warstw, które pracują jako materiał samoistny, bez podłoża, jako część w kształcie tzw. skorupy. Warstwa taka powinna charakteryzować się dużą spójnością wewnętrzną i mieć dobrą wytrzymałość na rozciąganie. Kierunek działania sił rozciągających może być prostopadły do powierzchni warstwy – wówczas określana jest spójność wewnętrzna warstwy lub też prostopadły do przekroju poprzecznego warstwy – wówczas wynik próby stanowi klasyczną własność wytrzymałości na rozciąganie. Badania warstw z metalizacji natryskowej gazowej i łukowej dla różnych materiałów wskazują, że wyniki z takich badań różnią się znacznie [4, 14, 16]. Kształt próbki stosowanej do badań wytrzymałości warstw na rozciąganie w kierunku prostopadłym do jej przekroju porzecznego pokazano na rys. 2, a wyniki badań warstw z metalizacji natryskowej łukowej przedstawiono na rys. 3.

a)

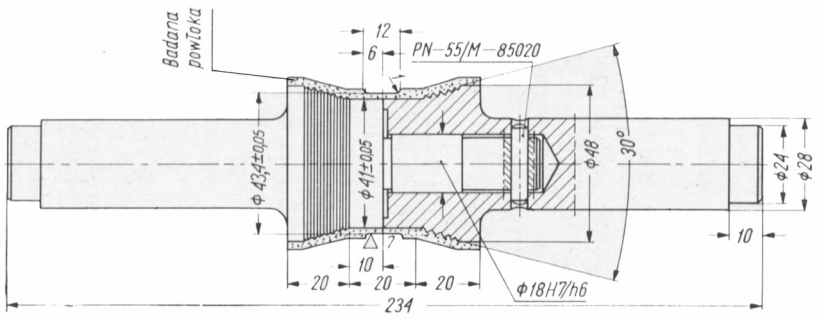


b)

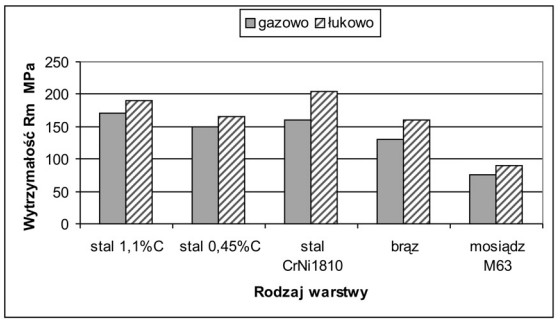


Rys. 1. Porównanie przyczepności warstw natryskanych gazowo i łukowo z różnych materiałów i na różne podłoża. a) warstwa ze stali 0,1%C, b) warstwa Al [14]

Fig. 1. Comparison of coating adhesion obtained by arc – and flame – spraying techniques and using different materials and substrates a) 0,1%C steel coating, b) aluminium coating



Rys. 2.Próbka do badań wytrzymałości warstwy na rozciąganie [14]
Fig. 2. The tensile test piece for sprayed coatings [14]

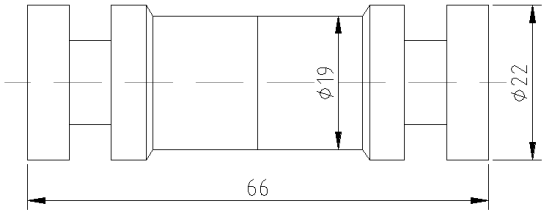


Rys. 3. Wytrzymałość na rozciąganie warstw z metalizacji natryskowej [4]
Fig. 3. The tensile strength of arc spraying coatings [4]

Z porównania wyników badań przyczepności (rys. 1) oraz wytrzymałości na rozciąganie (rys. 3) wynika, że właściwości te różnią się w sposób istotny i że na podstawie jednej właściwości nie można wnioskować o drugiej z uwagi na brak widocznej korelacji. Jedyne, co można zauważyć to w obu przypadkach lepszymi właściwościami cechują się warstwy natryskiwane łukowo w porównaniu do warstw natryskiwanych gazowo.

3. Część badawcza

W pracy badano wytrzymałość warstw metalizacyjnych na rozciąganie przy działaniu siły prostopadłym do przekroju poprzecznego warstwy. Warstwy natryskiwano na próbki wykonane ze stali gat. S235 o kształcie pokazanym na rys. 4. W porównaniu do próbki pokazanej na rys. 2 wprowadzono szereg zmian w jej konstrukcji, zachowując jednak zasadę jej działania. Zmieniono część chwytową, dopasowując ją do oprzyrządowania maszyny wytrzymałościowej oraz wykonano część walcową w miejsce stożkowej pod natryskiwana warstwę. W miejsce montażu części próbek za pomocą kołka zastosowano odpowiednio dopasowaną śrubę przechodzącą przez współosiowe otwory w obu częściach próbki. Również zrezygnowano z nacinania gwintu na powierzchni walcowej pod warstwę ograniczając się tylko do obróbki strumieniowo ściernej elektrokorundem o wielkości ziaren ok. 2.5 mm.



Rys. 4. Składana stalowa próbka cylindryczna do natryskiwania
Fig. 4. The sprayed piece

Proces metalizacji gazowej wykonano przy pomocy pistoletu Spray Jet 88, natomiast metalizację łukową urządzeniem f-my Mogul typu Arc Spray Unit (rys. 5).

Rys. 5. Proces metalizacji łukowej prowadzony urządzeniem Mogul Arc Spray Unit podczas natryskiwania warstw do badań wytrzymałości na rozciąganie
Fig. 5. Arc spraying process leaded by the Mogul Arc Spray Unit

Na warstwy zastosowano druty f-my AMIL [15], wykonane z brązu aluminiowego CuAl8, stali chromowej martenzytycznej X46Cr13 oraz drutu proszkowego Spray-Arc 100 zawierającej 19%Cr i 1.6% C. Zastosowane materiały i oznaczenia próbek przedstawiono w tab. 1.

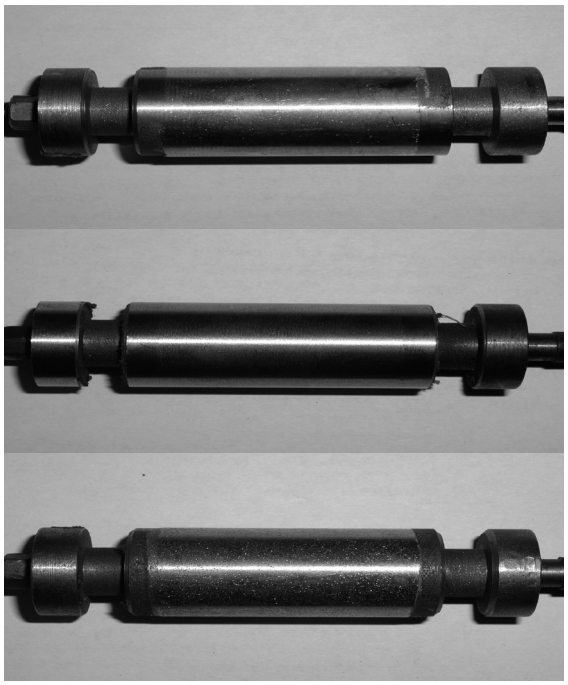
Tab. 1. Materiały na warstwy i oznaczenie próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie.
Tab. 1. Sprayed materials and spraying methods and designation of tensile test pieces.

l.p.	Materiał	Oznaczenie drutu (wg AMIL)	Nr materiału wg DIN EN 1274	Oznaczenie próbek	Odległość pistoletu natryskowego od próbki mm	Metoda natryskiwania
1.	Brąz aluminiowy	CuAl8	4.6	A1	100	gazowo
				A3	200	
2.	Stal nierdzewna	X46Cr13	5.6	A5	200	łukowo
				A6	250	
3.	Drut proszkowy	Spray-Arc 100	-	A7	100	
				A8	150	
				A9	200	

Tablica 2. Zastosowane parametry do procesu natryskiwania.
Table 2. Spraying parameters used in the experiment.

L.p.	Oznaczenie próbek	Materiał natryskiwany	Napięcie łuku U (V)	Natężenie prądu I (A)	Ciśnienie powietrza MPa	Średnica drutu mm
1.	A1	Brąz aluminio- wy	-	-	-	3,17
2.	A3					
3.	A5	Stal nierdzewna	34	-	0,7	1,6
4.	A6					
5.	A7	Drut proszkowy	20	200	0,6	1,6
6.	A8					
7.	A9					

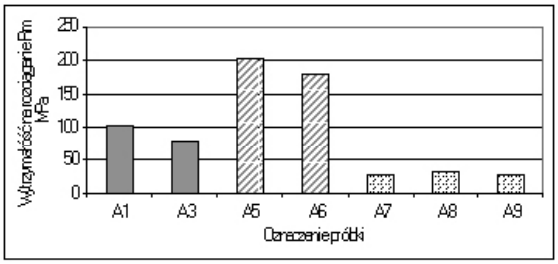
Parametry natryskiwania warstw przedstawiono w tab. 2, a wygląd natryskanych warstw pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Wygląd natryskanych warstw na próbce stalowej od góry A3, A6, A9
Fig. 6. Sprayed coatings: test pieces A3, A6, A9

4. Wyniki badań

Próbki do badania wytrzymałości materiału warstw natryskiwanych przygotowano przez szlifowanie. Zmierzono również średnicę próbek przed i po natryskiwaniu, co pozwoliło na obliczenie grubości i pola przekroju poprzecznego powłoki. Głowica umieszczona na belce maszyny wytrzymałościowej Instron przesuwała się z prędkością 5mm/min. Siła oraz wydłużenie rejestrowane były przez komputer sprzężony z maszyną wytrzymałościową z częstością próbkowania 10 punktów na sekundę. Wyniki z próby wytrzymałości na rozciąganie warstw przedstawiono na rys. 7. Dla warstwy z drutu proszkowego wykonano pomiary twardości, a wyniki przedstawiono w tablicy 3. Struktury warstw natryskiwanych z poszczególnych materiałów przedstawiono na rys. 8.



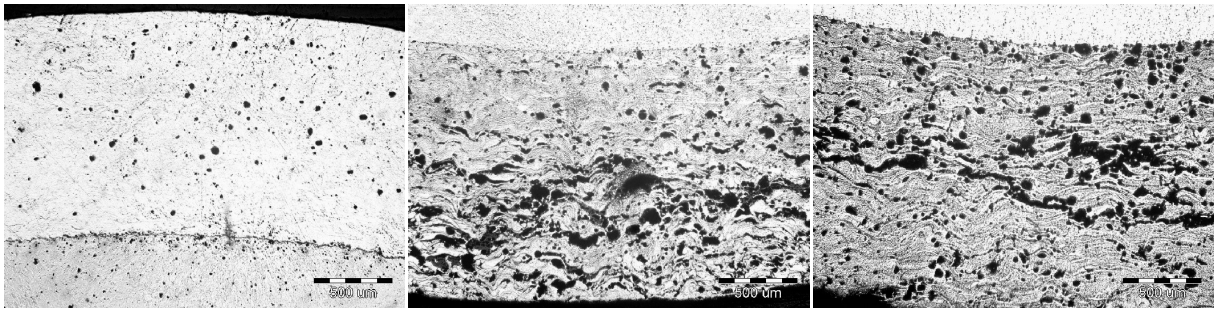
Rys. 7. Wytrzymałość warstw na rozciąganie
Fig. 7. Tensile strength of sprayed coatings

Tab. 3. Twardość warstw natryskiwanych drutem proszkowym.
Tab. 3. Microhardness of coatings Spray–Arc 100.

l.p.	Miejsce pomiaru	Twardość
1.	Osnowa powłoki	550HV0,2
		490HV0,2
		560HV0,2
2.	Wydzielenia w strukturze	1030HV0,5
		1060HV0,5
		1300HV0,5
		1500HV0,5
		1800HV0,5
		1500HV0,5
		1800HV0,5

5. Omówienie wyników badań

Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań można zauważyć znaczne różnice w wytrzymałości warstw natryskanych cieplnie zależnie od rodzaju materiału oraz metody natryskiwania. Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie, wynoszącą ok. 190 MPa, zanotowano dla warstw natryskanych łukowo drutem ze stali chromowej X46Cr13 (odpowiednik 4H13). To potwierdza ogólną opinię o dobrych właściwościach warstw z tej stali i o dużej przydatności do celów



Rys. 8. Struktury warstw natryskiwanych z brązu aluminiowego, stali nierdzewnej, Spray–Arc 100 (w kolejności od góry do dołu), powiększenie 50x

Fig. 8. Cross – section of sprayed layers of aluminium bronze, stainless steel and Spray–Arc 100, magnification 50x

metalizacji natryskowej zwłaszcza w regeneracji części maszyn.

Dobrymi właściwościami podczas natryskiwania cechuje się też brąz aluminiowy BA8. Otrzymana warstwa wykazuje dużą gęstość z małą zawartością tlenków i porów gazowych. Jej wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza od warstwy stalowej i wynosi ok. 90 MPa. Należy zaznaczyć, że warstwa z brązu była natryskiwana tylko gazowo z uwagi na brak odpowiedniego drutu do metalizacji łukowej. Jednak, jak wcześniej przedstawiono w przeglądzie literatury, warstwy z metalizacji łukowej wykazują wyższe właściwości mechaniczne od tych natryskiwanych gazowo, można zatem spodziewać się, że również w tym przypadku osiągnięto by większą wytrzymałość.

Wyraźnie małą wytrzymałość, wynoszącą ok. 30 MPa, odnotowano dla warstw natryskanych z drutu proszkowego gat. Spray–Arc 100. Materiał ten przeznaczony jest głównie do regeneracji części maszyn. W jego strukturze występuje mocna osnowa stalowa o twardości ok. 500 HV0,2 oraz wydzielenia o twardości od 1030 – 1800 HV0,5 co czyni je szczególnie przydatnymi do natryskiwania części maszyn, których powierzchnie podlegają intensywnemu zużyciu ściernemu. Wymagane jednak jest przy tym zastosowanie warstwy podkładowej z materiału, który wykazuje dużą przyczepność, np. warstwę z drutu kompozytowego typu NiAl5. Warstwy natryskane z drutu gat. Spray–Arc 100 mają natomiast mniejszą przydatność do wytwarzania form samoistnych skorupowych, chociaż istnieje możliwość ich wykorzystania w połączeniu tzw. przekładkowym z innym materiałem jako kompozycja dwuwarstwowa. Materiał jest najbardziej porowaty spośród innych natryskanych materiałów i jest kruchy.

6. Literatura

[1] Dziubiński J., Mazur W.: *Zastosowanie natryskiwania łukowego do regeneracji elementów hydrauliki siłowej*. Eksploatacja Maszyn nr 2-3, 1987r, s. 26-28.

[2] Białucki P., Kaczmarek R., Kozerski S.: *Analiza wytrzymałości zmęczeniowej elementów natryskiwanych cieplnie*. Eksploatacja Maszyn nr 2-3, 1987r, s. 19-20.

[3] Seils A.: *Korrosionsschutz von Stahlbauwerken durch Metallspritzen*. Thermische Spritzverfahren, DVS-Sondertagung, Saarbrucken 1963r, s. 78-88.

[4] Kretzschmar E.: *Metall-, Keramik- und Plastspritzen*.VEB Verlag Technik Berlin, 1969r.

[5] Drygas A.: *Flammgespritzte Verschleissschutzbeschichtung in Kaplanturbinen*. Mat. Konf. ITSC'90, Essen 1990r. DVS Berichte, s. 78-81.

[6] Heath G.R., Kammer P.A.: *The high temperature erosion behavior of arc-sprayed coatings*. Mat. Konf. ITSC'96, Essen 1996r. DVS Berichte, s. 76-79..

[7] Sikorski A., Białucki P., Kozerski S.: *Properties of ferrochromium thermal sprayed layers with different carbon contents*. Mat. Konf. ITSC'96, Essen 1996r. DVS Berichte, s. 65-67.

[8] Rhys-Jones T.N.: *Application of thermally sprayed coatings systems in aero engines*. Mat. Konf. ITSC'89, Londyn 1989r. Abington Publishing, Vol. 1 s. 87-100.

[9] Yankee S.J.., Pletka B.J., Luckey H.A., Johnson W.A.: *Process for fabricating hydroxylapatite coatings for biomedical applications*. Thermal Spray and Application. Mat. Konf. NTSC'3, Long Beach, CA, USA 1990, s. 433-438.

[10] Wilden J., Schick T., Wank A.: *Thermal spray moulding – production of microcomponents*. Mat. Konf. ITSC'02, Essen 2002r, s. 144-148.

[11] Chlebus E.: *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping w rozwoju produktu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2003.
[12] Aumueler B., Schneider D.W., Eisnegg K., Krauss H., Kroemmer W.: *Herstellung von Kleinserienwerkzeugen fuer die Blechumformung durch gespritzte Schichten in Schalen-Bauweise*. Mat. Konf. ITSC'02, Essen 2002r, s. 149-152.
[13] Chlebus E.: *Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*. WNT Warszawa 2000.
[14] Milewski W.: *Elektrometalizacja*. WNT Warszawa 1968.
[15] Prospekt reklamowy firmy AMIL, 2004r.
[16] Kostrzewa S., Nowak B.: *Podstawy regeneracji części pojazdów samochodowych*. WKŁ Warszawa 1979.

Dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK, prof. ndzw. PWr
Dr inż. Piotr BIAŁUCKI
Mgr inż. Artur POROCHOŃSKI
Politechnika Wrocławska
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji
Zakład Spawalnictwa,
50-371 Wrocław, ul. Łukasiewicza 3/5
Tel./fax (071) 320-42-55
e-mailartur.porochonski@pwr.wroc.pl

Jarosław FLISIAK
Jerzy JÓZWIK
Maciej WŁODARCZYK

ANALIZA TECHNOLOGII OBRÓBKI SWORZNIA W ASPEKCIE POPRAWY DOKŁADNOŚCI WYMIAROWEJ GOTOWEGO WYROBU

ANALYZING THE MACHINING TECHNOLOGY OF THE BOLT FOR IMPROVEMENT DIMENSIONAL ACCURACY OF THE FINISHED PRODUCT

W artykule zaprezentowano proces optymalizacji technologii obróbki elementu podatnego typu wałek. Jako kryteria optymalizacji przyjęto dokładność wymiarową gotowego wyrobu oraz główny czas obróbki. Do symulacji wartości ugięcia toczonego elementu wykorzystano metodę elementów skończonych MES. Wyniki zamieszczono w postaci rysunków, tabel i wykresów.

***Słowa kluczowe**: optymalizacja, technologia, ugięcie, metoda elementów skończonych MES.*

In the article are presented optimization process of cutting technology flexible element type shaft. As criteria of the optimization are accepted the dimension- accuracy finished product and the main cut time. To the simulation of the value of deflection turned element are used The Finite Elements Method (FEM). Results of conducted research were showed with the aid of diagrams, tables and some illustrations.

***Keywords**: optimization, technology, deflection, The Finite Elements Method (FEM).*

1. Wstęp

Obróbka skrawaniem jest obecnie jedną z najważniejszych metod kształtowania części maszyn i urządzeń. Nawet w przypadku stosowania innego rodzaju obróbki wiele końcowych zabiegów technologicznych wykonuje się przez usunięcie zewnętrznej warstwy materiału przez skrawanie. Jak ważnym czynnikiem w procesie wytwarzania wyrobu jest przygotowanie technologii, świadczy definicja procesu technologicznego: „Proces technologiczny jest to podstawowa cześć procesu produkcyjnego związana bezpośrednio ze zmianą kształtu, wymiarów, jakości powierzchni i właściwości fizykochemicznych przedmiotu obrabianego"[5]. Oczekiwania i wymagania klientów co do dokładności wymiarowo – kształtowej wytwarzanych elementów ciągle rosną.

Stan końcowy wyrobu można zapisać w postaci zależności (1) [5]:

$$S_k = (I, W, M, G) \tag{1}$$

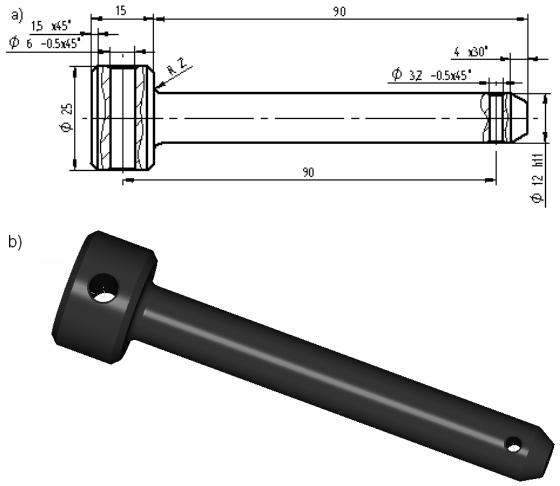
gdzie: *I*-dane identyfikujące rysunek, *W* - wskazówki specjalne, *M* - materiał i obróbka cieplna, *G* - cechy geometryczne i fizyczne przedmiotu.

Wynika stąd, że ugięcia elementu podczas obróbki stanowią jeden z najistotniejszych czynników mających wpływ na stan końcowy produktu, a przez to na jego wysoką jakość oczekiwaną przez klientów. Dlatego bardzo istotnym czynnikiem jest optymalizacja technologii obróbki w aspekcie poprawy dokładności wymiarowej gotowego wyrobu. Duże możliwości daje tu zastosowanie w procesie produkcyjnym obrabiarek sterowanych numerycznie jak również zastosowanie Metody Elementów Skończonych do analizy procesu skrawania na etapie planowania technologii obróbki, o czym świadczą opracowania literaturowe [3,4].

W świetle jasno skrystalizowanych trendów rozwojowych obróbki skrawaniem (obróbki wysokowydajnej z dużymi prędkościami skrawania, obróbki materiałów trudnoskrawalnych i w stanie utwardzonym, ze zminimalizowanym chłodzeniem) jest ciągle problem osiągania wysokiej dokładności geometrycznej odrabianych elementów [1]. Stanowi to duże wyzwanie dla technologa.

2. Metodyka badań

Analizę technologii obróbki prowadzono dla elementu typu wałek przedstawionego na rys.1.



Rys.1. Parametry geometryczne przedmiotu obrabianego (a), widok 3D (b)

Fig.1. Geometrical parameters of the workpiece (a), view 3D (b)

Materiałem wyjściowym był pręt ciągniony o średnicy d=25mm wykonany ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości 45 o R_m= 610Mpa i *KF*=2,5 [6].

Oceny ugięć badanego sworznia dokonano z uwzględnieniem składowej promieniowej siły skrawania F_p. Dane do analizy zaczerpnięto z wcześniej prowadzonych badań eksperymentalnych [2]. Przyjęto: posuw f=0,1mm/obr, głębokość skrawania a_p=1,5mm oraz prędkość skrawania v_c=85m/min. Wartość składowej obwodowej siły skrawania F_c wyznaczono z zależności (2):

$$F_c = KF \cdot R_m \cdot f \cdot a_p \qquad (2)$$

Na podstawie zależności (3) obliczono wartość promieniowej siły skrawania

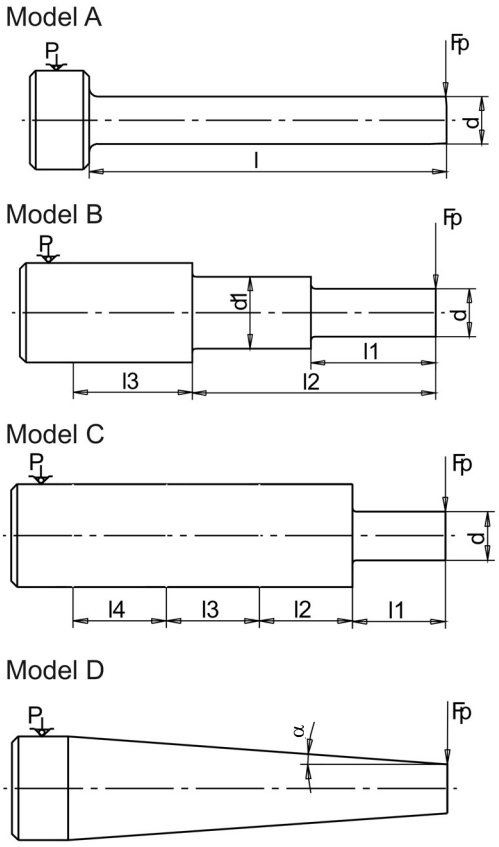
$$F_p = 0{,}4 \cdot F_c \qquad (3)$$

Otrzymano następujące wyniki:

- składowa obwodowa F_c=228,75N;
- składowa promieniowa F_p=91,5N.

Do analizy przyjęto cztery modele technologii obróbki, których parametry geometryczne i schematy obciążenia przedstawiono na rys. 2.

W każdym z modeli przyjęto różne sposoby otrzymania końcowej geometrii wyrobu. W modelu „A" założono tradycyjny sposób obróbki wieloprzejściowej jednocześnie na całej długości sworznia. Dla



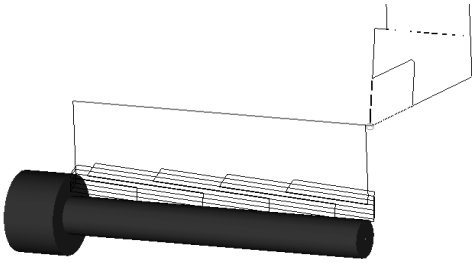
Rys. 2. Schematy obciążenia i parametry geometryczne przyjętych modeli (objaśnienia w tekście)

Fig. 2. Schemas of the weight and geometrical parameters of accepted models (explanations in the text)

modelu „B" obróbka została podzielona na cztery etapy. W pierwszym z nich kształtowany jest odcinek l_2 na ø18. Kolejnym etapem jest wykonanie odcinka l_1 na ø12. Następnie toczony jest odcinek l_2-l_1 i kolejno l_3 na ø12.

Model „C" został podzielony na cztery odcinki l_1,l_2,l_3,l_4 które zostały obrabiane na ø12 w kolejności od l_1 do l_4. W modelu „D" zaproponowano sposób obróbki pod kątem według ścieżki narzędzia jak na rysunku 3.

Modele bryłowe oraz modele dyskretne z zadanym obciążeniem i utwierdzeniem wykonano w programie I-deas. Do dyskretyzacji modeli użyto elementów typu-solid eight-node tetrahedron [7]. Siatkę zagęszczono w przewidywanym miejscu występowania największych odkształceń sprężystych. Ścieżki narzędzia wygenerowano programie I-deas. Jako kryteria optymalizacji technologii obróbki przyjęto dokładność wymiarową gotowego wyrobu oraz główny czas obróbki.



Rys.3. Ścieżka narzędzia dla modelu „D"
Fig.3. The path tools for the model „D"

Ugięcia obrabianych elementów powstałe pod wpływem składowej odporowej siły skrawania obliczono z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

3. Wyniki badań

Analizy przeprowadzono w programie I-deas. Otrzymane dla poszczególnych modeli ugięcia oraz obszary występowania naprężeń przedstawiono na rysunku 4. Dla celów poprawy wizualizacji przyjęto parametr: Maximum Deformation % of model = 10, co uwydatniło odkształcenia elementów [7].

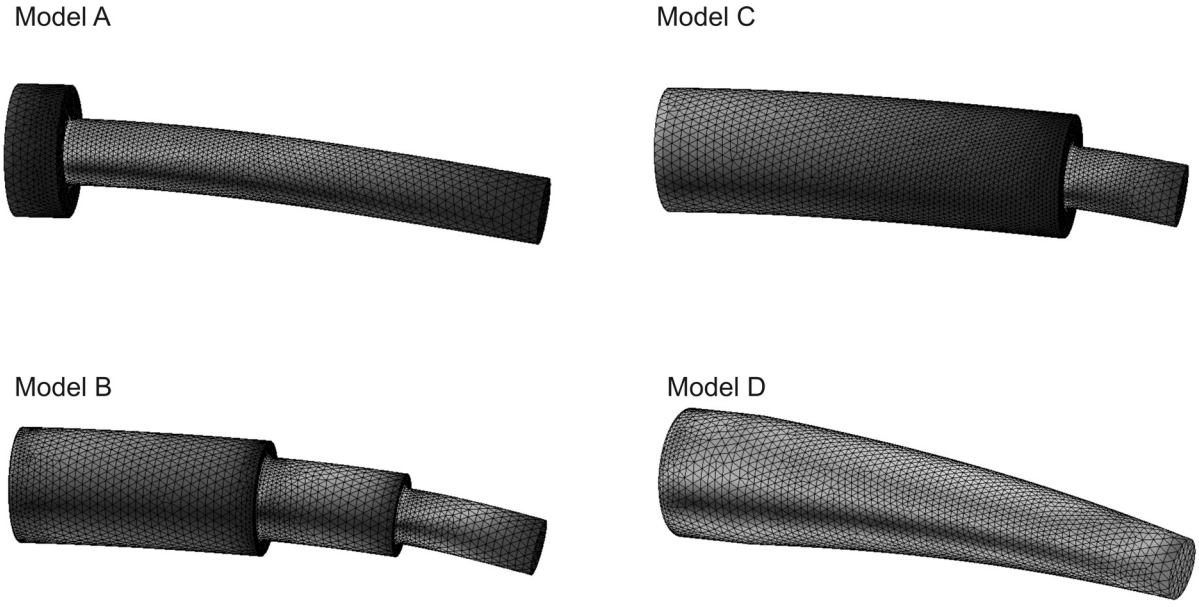
Uzyskane w efekcie obliczeń numerycznych wartości ugięć obrabianego elementu dla schematów obciążenia jak na rys. 2 oraz główne czasy skrawania otrzymane w programie I-deas zestawiono w tab. 2.

Z przedstawionych analiz wynika, że najkorzystniejszym modelem pod względem czasu obróbki jest przypadek „A", lecz jego ugięcia są największe. Najkorzystniejszym modelem pod względem ugięć jest model „C", lecz czas jego obróbki jest najdłuższy. Optymalnym modelem jest model „D" .Model ten jest również korzystny ze względu na czas skrawania. Czas ten jest dłuższy niż w modelu „A" i „B", ale krótszy niż w przypadku "C". Ponadto ugięcia są mniejsze niż dla modeli „B" i „C".

Dla modelu „D", w tabeli 3 zestawiono wartości ugięć w płaszczyźnie działania siły promieniowej oraz sporządzono charakterystykę rozkładu tych odkształceń na całej długości skrawania - rys.5.

Tab. 2. Wartości ugięć i główne czasy skrawania.
Tab. 2. Values of deflections and main times of cutting.

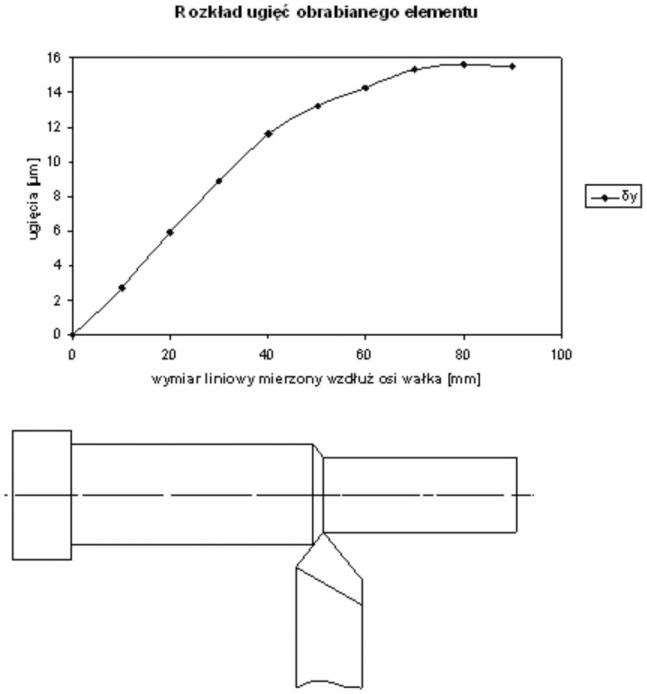
Model	Ugięcie δ_y [μm]	Czas główny skrawania t_s[min]
Model A	101	4,59
Model B	21	4,89
Model C	11	5,38
Model D	15,5	5,07



Rys.4. Ugięcia oraz obszary występowania naprężeń dla poszczególnych modeli
Fig.4. Deflections and areas of stresses appearing for each models

Tab. 3. Wartości ugięć w płaszczyźnie działania siły promieniowej.
Tab. 3. Values of deflections in the surface of acting the radial force.

l [mm]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
δ_y [μm]	0	2,7	5,9	8,9	11,6	13,2	14,3	15,3	15,6	15,5



Rys. 5. Rozkład ugięć: δ_y – wartość ugięcia w płaszczyźnie działania siły promieniowej

Fig. 5. Distribution of deflections: δ_y - the value of the deflection in the surface of acting the radial force

Na podstawie tak sporządzonej charakterystyki możemy określić wymiary elementu po obróbce. Pozwala to na edycję technologii obróbki przed wprowadzeniem elementu do produkcji i poprawę jego dokładności wymiarowej.

4. Wnioski

Modelowanie ugięć przedmiotu obrabianego w trakcie obróbki w aspekcie optymalizacji technologii obróbki elementów podatnych jest jednym z priorytetowych zadań. Uzyskane w wyniku przeprowadzonych analiz wyniki modelowania z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych dają optymistyczne przesłanki co do możliwości zbudowania użytecznego modelu mechanicznego, pozwalającego na wiarygodną predykcje błędów geometrycznych obrabianych części. Z punktu widzenia powstających odkształceń sprężystych opracowany model procesu skrawania pozwala na przewidywanie stanu geometrycznego przedmiotu na etapie opracowywania technologii obróbki. Przeprowadzone analizy i uzyskane wyniki ukazują nowe możliwości optymalizacji procesu obróbki przez technologa. Ukazane podejście jest możliwe do realizacji dzięki powszechnemu stosowaniu obrabiarek sterowanych numerycznie CNC. Umożliwia to technologowi wybór sposobu otrzymania końcowej geometrii wyrobu. W połączeniu z optymalnym doborem parametrów technologicznych obróbki pozwoli to na minimalizację braków i poprawę jakości wykonywanych elementów.

5. Literatura

[1] Józwik J., Lipski J.: *Prognozowanie odkształceń przedmiotu obrabianego podczas skrawania z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych*. Materiały II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji. Augustów, 4-7 czerwca 2003.

[2] Madej R., Misztal P., Józwik J.: *Ocena błedów kształtu i wymiaru wałka obrabianego na automacie tokarskim CNC*. Inżynierowie nowej ery wobec problemów technologii i materiałów. Monografia pod redakcją Gardyński

L. Lublin 2004.
[3] Grama L., Breeanu L.C.: *Analitical and F.E.M. in the processing's precision at longitudinal turning*. Development of metal cutting. The 3rd International Scientific Conference DMC 2000. Kosice 3-4.07.2004. Slovakia.
[4] Józwik J., Flisiak J., Lipski J.: *Numeryczna ocena odkształceń sprężystych przedmiotów cienkościennych kształtowanych w procesie skrawania toczeniem*. Z.N.P Rzeszów, Z.N.P Żytomierz Ukraina; 2004.
[5] Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2000.
[6] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. WNT Warszawa 1998.
[7] I-DEAS Master Series STUDENT GUIDE 2000.

Mgr inż. Jarosław FLISIAK
Dr inż. Jerzy JÓZWIK
Mgr inż. Maciej WŁODARCZYK
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail j.flisiak@pollub.pl

Jerzy LIPSKI
Paweł LONKWIC

WPŁYW PROCESU ZUŻYCIA PARY KINEMATYCZNEJ KOŁO – LINA NA ZJAWISKO ZAKLESZCZANIA LINY NOŚNEJ DŹWIGU ELEKTRYCZNEGO

THE EFFECT OF WEAR PROCESS OF „WHEEL - ROPE" KINEMATIC COUPLE ON SUSPENSION ROPE JAMING

W artykule przedstawiono rezultaty teoretycznych rozważań nad wpływem procesu zużycia pary kinematycznej koło – lina na zjawisko zakleszczenia liny nośnej w rowkach linowych. Rozważania teoretyczne wydają się być niezbędne w celu wykonania badań nad wspomnianym zjawiskiem. Zakleszczenie liny w rowku linowym jest zjawiskiem niebezpiecznym z punktu bezpieczeństwa podróżujących oraz eksploatacji urządzenia. W związku z powyższym wydaje się być słusznym podjęcie prób zdiagnozowania wspomnianego zjawiska.

***Słowa kluczowe**: dźwig elektryczny, zakleszczanie liny, zużycie rowków linowych*

The paper deals with results of theoretical consideration of influence of wear process of kinematical pair of sheave – rope on jam effect of rope in the lifting groove. Theoretical considerations seem to be indispensable for future tests of this effect. Rope jamming in the lifting groove is a danger event from the lift users and lift exploitation point of view. Taking into consideration the above said it seems to be motivated do diagnose such effect by test.

***Keyword**: Elevator, rope jam, wear lifting rope*

1. Wstęp

Zasada działania wszystkich dźwigów ciernych jest taka sama i jest oparta na zjawisku cierności pomiędzy kołem ciernym i linami nośnymi. Proces zużywania się współpracujących elementów przebiega w różny sposób w zależności od konfiguracji urządzenia, zrównoważania układu, typu rowka linowego oraz sposobu wykonania rowka (rowek utwardzony lub nieutwardzony).

Próby diagnozowania procesu zużycia rowków linowych były przeprowadzane przez wiele firm dźwigowych tj.: Thyssen, Otis, Schindler. Monitorowanie stanu technicznego urządzeń dźwigowych sprowadza się do połączenia sterownika dźwigu poprzez sieć internetową do ekip, które nadzorują pracę urządzenia znajdującego się w budynku. Jednakże informacje przesyłane do jednostek sprawujących nadzór nad stanem technicznym są ubogie w informacje. Nie informują o stanie technicznym poszczególnych podzespołów, ale o wystąpieniu awarii w określonym miejscu i o określonym stanie.

Dzięki rozwijającej się technice komputerowej istnieją sposoby diagnozowania współpracujących podzespołów co stwarza możliwości do opracowania systemów monitorujących.

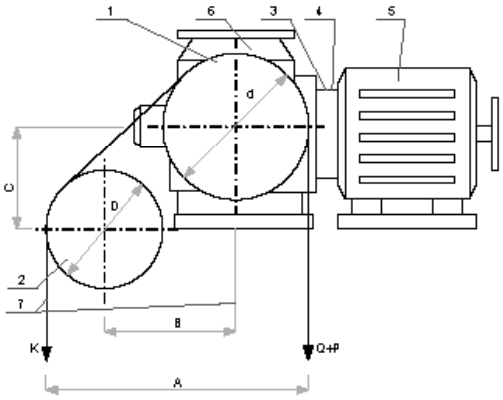
Artykuł przedstawia nowatorski sposób diagnozowania procesu zużycia rowków linowych, który będzie się odbywał poprzez zapisanie emitowanego dźwięku przy wychodzeniu liny z rowka, a następnie porównanie go z pasmem wzorcowym. Dzięki temu, po zainstalowaniu w sterowaniu dźwigu specjalnego urządzenia pozwalającego na diagnozę porównawczą istnieje, możliwość opracowania całego systemu sprawującego nadzór na współpracującym kołem i linami.

2. Analiza teoretyczna

2.1. Wiadomości teoretyczne

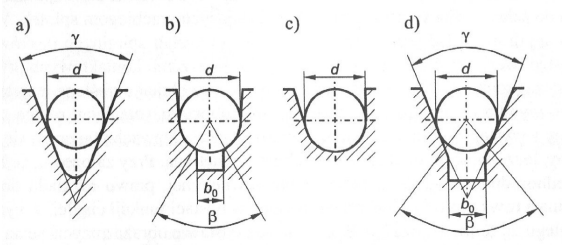
Prawidłowa konfiguracja urządzenia dźwigowego pozwala na długą i bezawaryjną pracę. Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat napędu dźwigu elektrycznego w konfiguracji z pojedynczym opasaniem i przełożeniem 1:1. Tego typu konfiguracja stanowi około 70 % na rynku. W celu uzyskania długiej współpracy pary ciernej koło – lina, należy uwzględnić m.i.n. typ rowka linowego.

W dźwigach ciernych stosowane są cztery typy rowków linowych, przedstawionych na rysunku 2 [2].



Rys. 1. Schemat zespołu napędowego windy [5]: 1 – koło cierne, 2- koło zdawcze, 3 – sprzęgło, 4 – hamulec, 5 – silnik elektryczny, 6 – reduktor, 7 – lina nośna, K – masa przeciwwagi, P+Q – suma mas pustej kabiny wraz z ramą i udźwigu nominalnego

Fig. 1. Traction elevator drive diagram [5]: 1 – sheave, 2- diverted pulley, 3 – coupling, 4 – brake, 5 – electrical engine, 6 – reduction gear, 7 – lifting rope, K – counterweight mass, P+Q – total mass of an empty car with a frame and a nominal capacity

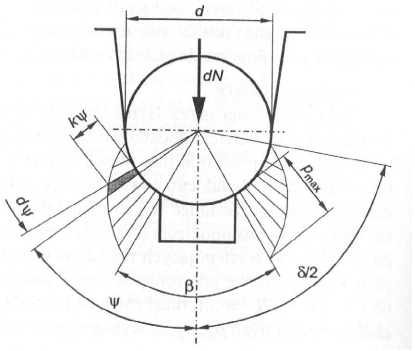


Rys. 2. Profile rowków linowych stosowanych w kołach ciernych: a) rowek klinowy, b) rowek półokrągły podcięty, c) rowek półokrągły, d) rowek klinowy podcięty [2,4]

Fig. 2. Rope grooves profiles used in sheaves: a) keyseat, b) cut U-groove, c) U-groove, d) cut keyseat [2,4]

Zakleszczanie liny w rowkach najczęściej jest spotykane przy współpracy liny z rowkami podciętymi. Zjawisko to występuje w przypadku nadmiernego zużycia rowków bez względu na przyczynę zużycia. Na rysunku 3 przedstawiony jest rozkład nacisków w rowku podciętym. Jak można zauważyć, największe naciski występują przy przejściu zarysu rowka w podcięcie. W tym miejscu, w czasie nadmiernego zużycia, następuje zakleszczanie liny wywołane nierównomiernym obciążeniem rowków. Przyczynami występowania wspomnianego zjawiska mogą być również:

- Niejednorodność przekroju poprzecznego liny wynikająca z długiego czasu współpracy co powoduje rozciąganie się liny,
- Niejednorodność przekroju poprzecznego liny wynikająca z większego przekroju poprzecznego rowków linowych na kole zdawczym, co powoduje zmianę przekroju poprzecznego liny,
- Zużycie się rowków linowych w kole ciernym.



Rys. 3. Rozkład nacisków w rowku półokrągłym podciętym [2,4]

Fig. 3. Stress distribution in the cut U-groove [2,4]

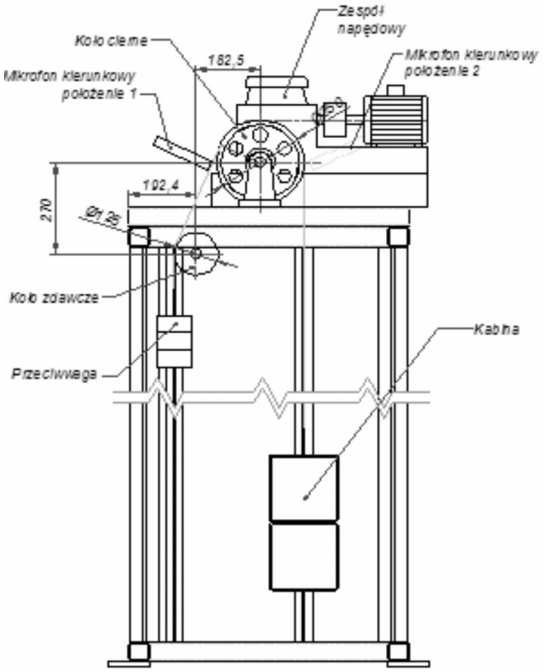
2.2. Podstawowe założenia do budowy stanowiska badawczego

Podstawą do opracowania projektu stanowiska badawczego jest dźwig cierny, osobowy o udźwigu 500 kg. Model, przedstawiony na rysunku 4, będzie zawierał główne podzespoły dźwigu ciernego tj.: zespół napędy, masę imitująca kabinę i przeciwwagę, prowadnice oraz system sterowania pozwalający na ciągły ruch kabiny w górę oraz w dół. W celu odzwierciedlenia warunków rzeczywistych oraz warunków współpracy liny z kołem ciernym wszystkie masy oraz wymiary będą wykonane w odpowiedniej skali. W celu wykonania pomiarów, w miejscu wyjścia liny z rowka linowego będą umiejscowione mikrofony kierunkowe pozwalające na zapis emisji dźwięku. Mikrofony będą podłączone poprzez kartę A/C do komputera, rysunek 5.

Fale dźwiękowe, jakie mogą się propagować w gazach, cieczach i ciałach stałych to fale podłużne i poprzeczne. Analiza zjawiska falowego sprowadza się do równania 1 [1]:

$$u(t) = A\sin(\omega t + \varphi) \qquad (1)$$

Gdzie: A – amplituda ruchu drgającego [m], t – czas przebiegu zjawiska [s], ω – częstość kątowa [rad/s], φ – przesunięcie fazowe [rad]



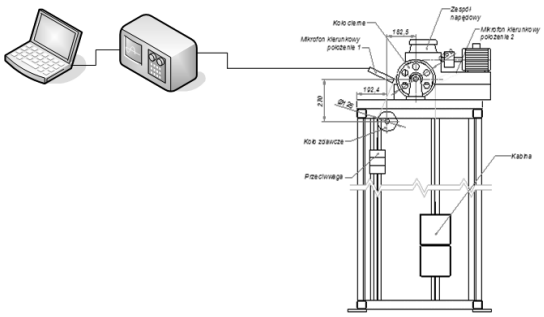
Rys. 4. Rozmieszczenie urządzeń

Fig. 4. Testing equipment arrangement

Jeżeli zaniedbamy w dalszych rozważaniach dyssypację energii w ośrodku, wówczas propagująca się fala może być falą przestrzennie harmoniczną (2) [3]:

$$u(x,t) = u\cos 2\pi\,(ft - \frac{x}{\lambda}) \qquad (2)$$

Gdzie: f – częstotliwość rozchodzenia się fal [Hz], x – droga rozchodzenia się fali [m], λ – okres rozchodzenia się fali [s^{-1}].



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 5. Scheme of testing station

2.3. Metoda badań

Badania będą przeprowadzane z wykorzystaniem karty pomiarowej typu DAQ 700, mikrofonu kierunkowego oraz oprogramowania LabView oraz Matlab wer. 7.0.1. Emisja dźwięku w czasie wychodzenia liny z rowka posiada pewną częstotliwość. Badania będą obejmowały pomiary dla rowków podciętych: klinowego oraz półokrągłego. W celu uzyskania wzorcowej częstotliwości emitowanego dźwięku pomiary będą przeprowadzone dla nowej, współpracującej pary koło – lina. W celu próby zdiagnozowania zjawiska, następne pomiary będą wykonane przy zastosowaniu kół ciernych z naciętymi rowkami. Rowki będą nacięte w sposób imitujący pewien stopień zużycia, co będzie wymuszało zakleszczanie liny w rowku. Pomiary będą przeprowadzone kolejno dla dwóch rowków o różnym stopniu zużycia. Następnie porównanie otrzymanych charakterystyk z charakterystyką wzorcową pozwoli na otrzymanie szukanych wyników. Kolejnym etapem będzie zapis emitowanego dźwięku w postaci plików dźwiękowych, a następnie przy pomocy programu Matlab za pomocą poleceń FFT analiza widm częstotliwości otrzymanych dźwięków [6].

Poszerzone możliwości Matlab'a w zakresie przetwarzania sygnałów są dostępne w bibliotece Signal Procesing Toolbox, która umożliwia projektowanie, symulację i szybkie prototypowanie układów cyfrowego przetwarzania sygnałów [6]. Dzięki otrzymanym wynikom będzie możliwość powiązania stopnia zużycia rowków linowych z częstotliwością emitowanego dźwięku.

3. Wnioski

Systemy sprawujące nadzór nad stanem technicznym urządzeń stają się coraz bardziej powszechnym zjawiskiem w dziedzinach wytwarzania oraz zarządzania.

Systemy monitorujące posiadają aspekty ekonomiczne oraz eksploatacyjne. Do aspektów ekonomicznych można zaliczyć:

- zwiększenie niezawodności, bezpieczeństwa oraz gotowości urządzenia dźwigowego,
- obniżenie kosztów utrzymania całego systemu transportowego,
- poprawy systemów logistycznych związanych z zapewnieniem podzespołów zamiennych w minimalnych ilościach,
- zredukowanie awarii, przestojów oraz strat spowodowanych powyższymi czynnikami.

Do aspektów eksploatacyjnych zaliczają się:

- możliwość diagnozowania stanu technicznego urządzenia w czasie rzeczywistym,
- wcześniejsze ustalenie wystąpienia uszkodzenia,

- możliwość ustalenia wartości granicznych, dla których urządzenie jest w stanie bezawaryjnie pracować,
- zapobieganie powstawaniu skutków uszkodzeń.

Otrzymane wyniki pozwolą na opracowanie metody monitorowania stanu technicznego pary ciernej dźwigu, co pozwoli na zapobieganie powstawania uszkodzeń układu oraz w przypadku wystąpienia sygnałów świadczących o występowaniu zjawiska zakleszczania liny w rowku, możliwość wcześniejszej regeneracji koła oraz sprawdzenie stanu technicznego cięgien nośnych.

4. Literatura

[1] Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*. Instytut Mechaniki Stosowanej, P.P., Poznań 1988.
[2] Kwaśniewski J.: *Dźwigi osobowe i towarowe*. Budowa i eksploatacja. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo - Dydaktyczne, Kraków 2004.
[3] Kwiek M.: *Akustyka i laboratorium. Część 1 Postawy akustyki teoretycznej*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Poznań 1968.
[4] Lipski J., Lonkwic P.: *The analysis of rope groove influence In a factor coupe rope – sheave on pressure and a friction factor*. Lift Report 3/2005.
[5] Lonkwic P.: *Analysis of elevator configuration influence on the operation and safety conditions of lifting ropes.* Lift Report 6/2004.
[6] Mrozek Z., Mrozek B.: *Matlab 5.X Symulink 2.X, poradnik użytkownika*. Wydawnictwo PLJ, Warszawa 1998.

****
Badania będą wykonywane dzięki środkom uzyskanym w ramach projektu „Intensyfikacja działań innowacyjnych regionu poprzez system stypendiów doktorskich (działanie 2.6) nr Z/2.06/II/2.6/5/04
****

Dr hab. inż. Jerzy LIPSKI, prof PL
Politechnika Lubelska
Katedra Organizacji Przedsiębiorstw
Mgr inż. Paweł LONKWIC
Lift Service S.A. Lublin
e-mail to: j.lipski@pollub.pl
e-mail to: plonkwic@lift.pl

Maciej ZWIERZCHOWSKI

PROCESY ZUŻYWANIA ELEMENTÓW UKŁADÓW ROZRZĄDU SILNIKÓW ZS

WEARS PROCESS OF DIESEL ENGINES TIMING GEAR SYSTEMS

W pracy przedstawiono zagadnienia teorii zużycia ruchomych elementów układów rozrządu silników ZS. W pracy przedstawiono poza tym analizę zjawisk zachodzących w styku ślizgowym i matematyczny opis zachodzących procesów.

***Słowa kluczowe**: powłoki nakładane cieplnie, zużycie, silniki ZS*

This article presents problems of wear resistance of diesel engine elements. In the present work, phenomena occuring in sliding contact was reviewed and presents mathematical description of this process.

***Keywords**: thermal spray coatings, wear, diesel engine*

1. Wprowadzenie

Pod wpływem sił tarcia warstwa wierzchnia materiałów elementów ruchomych, które stykają się ze sobą stopniowo ulega zużyciu. Zależnie od warunków zewnętrznych tarcia (obciążenia i jego rodzaju, prędkości obciążenia, temperatury, czynników zewnętrznych otaczającego środowiska) mogą wystąpić różne rodzaje zużywania, na przykład [1]: adhezyjne, utleniające, zmęczeniowe, ścierne, hydro – lub gazościerne, korozyjno – mechaniczne, erozyjne oraz kawitacyjne. Należy nadmienić, że w świetle najnowszych badań nad procesami zużywania wszystkie one ogólnie można określić jako procesy zmęczenia tarciowego, w których występuje niejednakowa, niszcząca liczba cykli naprężeń[1].

Maszyny i urządzenia są obiektami technicznymi, stanowiącymi złożoną strukturę w celu realizacji określonych funkcji użytkowych. W czasie realizacji tych funkcji ma miejsce starzenie się poszczególnych części w efekcie nieodwracalnych procesów fizycznych i chemicznych, stanowiących oddziaływanie mikro- i makrootoczenia. Procesy te powodują zużycie części maszyn, które w zależności od parametrów obciążenia może mieć formę procesów mechanicznych, chemicznych, cieplnych jak i elektrycznych[8].

Procesy zużycia prowadzą do zmiany struktury i wymiarów elementów stanowiących złożoną strukturę maszyn. Zmiany te prowadzą do powstania drgań, sił dynamicznych, obnizki sprawności mechanicznej, wzrostu temperatury itp. , co po pewnym okresie eksploatacji powoduje uzyskanie tam zużycia granicznego poszczególnych części maszyn. W następstwie maszyna lub urządzenie osiąga stan graniczny, tzn. przestaje spełniać warunki określone zbiorem cech charakteryzujących jej przydatność funkcjonalną. Stan graniczny może być również osiągnięty wskutek skokowych wymuszeń losowych [1-11].

Coraz częściej w przypadku zużytych części stosuje się zabiegi regeneracji. Zastosowanie napawania regeneracyjnego umożliwia odtworzenie i kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej współpracujących elementów.

2. Stochastyczne modele zużycia

Najczęściej stosowanymi matematycznymi modelami zużycia są elementarne procesy stochastyczne z czasem ciągłym i nieprzeliczalnym zbiorem stanów

$$Z=\{Z(t): 0\leq t<\infty\}$$

gdzie $Z\{t\}$ jest zmienną losową opisującą zużycie w chwili t, których realizacje aproksymuje się z dostateczną dokładnością krzywą Lorenca. Krzywa Lorenca stanowi uniwersalny model prędkości zużycia w czasie, który charakteryzuje się trzema etapami intensywności zużywania[8]:

- etap docierania – intensywność zużycia jest malejąca,
- etap ustalonego zużywania – nie ma zmian intensywności zużywania,
- etap przyspieszonego zużywania – systematyczny wzrost intensywności zużywania.

Zasadność stosowania krzywej Lorenca w badaniach przebiegu zużycia potwierdzają wyniki licznych badań doświadczalnych[1].

Jako analityczny opis krzywej Lorenca możemy przyjąć[1]:

$$Z(t)=\begin{cases} g_d(t), & 0\le t<t_d, \\ c+v(t-t_d), & t_d\le t<t_p, \\ g_p(t), & t\ge t_p, \end{cases} \qquad (1)$$

gdzie: t_d oznacza chwilę zakończenia etapu docierania, t_p oznacza chwilę zakończenia etapu ustalonego zużywania, $c = g_g(t_d)$ oznacza wartość zużycia po zakończeniu etapu docierania, v oznacza intensywność ustabilizowanego zużywania

Aby rozważany model matematyczny dobrze opisywał przebieg zużycia ważny jest dobór funkcji g_d i g_p. Typowe badania eksperymentalne zakładają dyskretyzację czasu. Zatem wybór funkcji g_d i g_p ma charakter przybliżony co daje wiele możliwości opisów zużycia. W literaturze możemy spotkać następujące modyfikacje krzywej Lorenca[1]:

• *Model degresywny*

Model ten zakłada malejący charakter intensywności zużywania podczas eksploatacji obiektu. Stanowi on więc przypadek krzywej Lorenca o nieograniczonej fazie docierania. Równanie degresywnych zmian zużycia otrzymujemy kładąc w (1) $t_d=t_p=\infty$. Zatem zużycie w modelu degresywnym wyraża się zależnością:

$$Z(t) = g_d(t),\ t\ge 0 \qquad (2)$$

gdzie: g_d jest rosnącą funkcją wypukłą.

Jako funkcję g_d możemy przyjąć modyfikacje funkcji logarytmicznych o podstawach większych od 1 lub modyfikacje funkcji potęgowych o wykładnikach ułamkowych.

• *Model liniowy*

Intensywność zużywania obiektu w czasie jego eksploatacji ma wartość stałą. Zatem wykresem przebiegu jest linia prosta, a jego przebieg opisuje zależność dla $t_d = 0$ i $t_p = \infty$, zatem,

$$Z(t) = u + Vt,\ t\ge 0 \qquad (3)$$

Często używany do opisu przebiegu zużycia model liniowy ze względu na swoja prostotę i możliwość zastosowania w przypadkach, w których niemożliwa jest częsta rejestracja zmian zużycia.

• *Model progresywny*

Zakłada progresywny zakłada rosnący charakter intensywności zużycia podczas eksploatacji obiektu. W przypadku tym zakłada się że etap docierania jest pomijalnie krótki. Równanie progresywnych zmian zużycia otrzymamy z (1) przyjmując $t_d = t_p = 0$. Przyjmuje ono postać:

$$Z(t) = g_p(t),\ t\ge 0 \qquad (4)$$

gdzie: g_p jest rosnącą funkcja wklęsłą.

Jako funkcje g_g można przyjąć modyfikacje funkcji wykładniczych o podstawach większych od 1 lub modyfikacje funkcji potęgowych o wykładnikach naturalnych.

• *Model degresywno – progresywny*

Model ten opisuje sytuację kiedy zużycie zachodzi w dwóch etapach:

a) etap docierania eksploatacyjnego,
b) etap przyspieszonego zużywania

i jest złożeniem modeli degresywnego i progresywnego.

Matematyczny opis tego modelu możemy otrzymać korzystając ze wzoru (1) i dokonując podstawienia $t_d = t_p$ w następującej postaci:

$$Z(t)=\begin{cases} g_d(t), & 0\le t<t_d \\ g_p(t) & t\ge t_d \end{cases} \qquad (5)$$

• *Model degresywno – liniowy*

Model ten przedstawia przebieg zużycia w następujących etapach:

a) etap docierania
b) etap ustabilizowanego zużywania.

Podstawiając $t_p = \infty$ do (1)otrzymamy opis matematyczny tego modelu w postaci:

$$Z(t)=\begin{cases} g_d(t), & 0\le t<t_d \\ c+v(t-t_d), & t\ge t_d \end{cases} \qquad (6)$$

• *Model progresywno – liniowy*

Założeniem tego modelu jest że zużycie przebiega w następujących etapach:

a) etap ustabilizowanego zużycia,
b) etap intensywnego zużycia.

Opis matematyczny otrzymamy z (1) wstawiając $t_d = 0$ w następującej postaci:

$$Z(t)=\begin{cases} c+v(t-t_d), & 0\le t<t_p \\ g_p(t), & t\ge t_p \end{cases} \qquad (7)$$

Model ten jest złożeniem modelu progresywnego i liniowego.

Do opisu przebiegu zużycia elementów układu rozrządu (dźwigienki zaworowe) możemy wykorzystać pewną aproksymację modelu degresywno – liniowego, którą otrzymamy poprzez odpowiedni dobór funkcji g_d oraz wielkości c i v. Aproksymacja rozważanego modelu nie może być związana ani z przebiegiem funkcji g_d, ani z czasem trwania etapu docierania eksploatacyjnego t_d. Wynika to z faktu, że w modelu degresywno – liniowym występuje nieskończenie wiele parametrów. Jednakże model ten jest jednoznacznie zdefiniowany przez chwilę

zakończenia etapu docierania t_d, intensywność zmian zużywania ustabilizowanego v i wartość funkcji g_d w przedziale $[0,t_d]$.

W przypadku współpracy omawianych elementów układów rozrządów silników ZS możemy mieć do czynienia z sytuacją gdy po dość długim i ustabilizowanym okresie współpracy elementów, gdy intensywność zużycia była stała, następuje okres zużywania przyspieszonego. Sytuację taką możemy przedstawić przy pomocy modelu progresywno – liniowego który w dużym stopniu przedstawia taki charakter przebiegu procesów zużycia. Model ten jest jednoznacznie zdefiniowany przez chwilę zakończenia etapu ustabilizowanego zużycia i początku etapu zużycia przyspieszonego $[t_p]$.

Istnieje wiele parametrów mających wpływ na przebieg procesów zużycia dźwigienek górnozaworowych układów rozrządu: geometria całych elementów, geometria ich powierzchni, temperatura pracy, właściwości środków smarnych, właściwości stosowanych materiałów do cieplnego wytworzenia ww, itp.

3. Procesy zużycia

Obserwując przebieg procesu docierania współpracujących ze sobą elementów maszyn i urządzeń możemy zaobserwować przyspieszone zużycie w początkowej fazie współpracy elementów, lecz z czasem intensywność zużycia maleje aż po zakończeniu etapu docierania stabilizuje się i możemy przyjąć, że ma wartość stałą.

W przypadku zwiększonego zużycia współpracujących ze sobą elementów jak np. elementy górnozaworowych układów rozrządu silników ZS, w układzie takim pojawiają się siły wypadkowe mające charakter udarowy powodując wzrost intensywności zużycia i najczęściej zmianę charakteru zużycia powodując w skrajnych przypadkach awarię całego silnika.

Warunki obciążenia i geometria styku współpracujących ze sobą elementów decydują o formie zniszczenia kontaktowego. Do typowych przypadków zniszczenia tego rodzaju należą [8]: odkształcenie plastyczne, zużycie adhezyjne, zużycie ścierne, zmęczenie powierzchniowe (pitting), zużycie ścierne warstewki tlenków i zużycie warstewki reakcyjnej.

Do analizy zużycia kontaktowego układów niejednorodnych można przyjąć założenia Archarda , że współczynnik zużycia k jako prawdopodobieństwo oderwania się cząstki nierówności od powierzchni definiowany jest w następujący sposób[8]:

$$k \cong A_o/A \cong \sigma_z/H \qquad (8)$$

gdzie: A_o – rzeczywista powierzchnia kontaktu, A – powierzchnia nierówności, σ_z – naprężenie normalne w styku, H – twardość zużywanego materiału.

Zużycie może następować poprzez odrywanie się cząstek fazy twardej, osnowy lub występować na ich granicy. Zatem o zużyciu decyduje twardość poszczególnych faz oraz ogólna twardość napoiny. Również kruchość tych faz może mieć znaczenie przy ocenie odporność napoiny na zużycie kontaktowe.

Zużycie kontaktowe napoin o strukturze niejednorodnej ww może prowadzić do następujących zjawisk[8]:

- wzrostu naprężeń normalnych i stycznych w miejscu styku, które powodują odkształcenia sprężyste i plastyczne,
- ścierania i powstawania produktów tego ścierania
- powstawania mikropęknięć powierzchniowych oraz
- ścierania i mikropękania powierzchniowego.

W większości przypadków wielkość zużycia kontaktowego napoin jest odwrotnie proporcjonalna do ich ogólnej twardości. Ta prawidłowość jest ogólnie przyjmowana zgodnie z pracami Archarda. W przypadku materiałów niejednorodnych prawidłowość to jest ważna tylko do pewnej granicznej zawartości fazy twardej[8].

W warunkach eksploatacji występują zazwyczaj jednocześnie różne mechanizmy zużywania i stosowanie ścisłych klasyfikacji mechanizmów zużycia jest bardzo utrudnione[11]. Z. Gahr przedstawiając zagadnienia zużycia przyjął jako punkt wyjścia charakter ruchu względnego ciał uczestniczących w procesie zużycia i wyróżnił: zużycie zdominowane przez mechanizm ścierny, zużycie ślizgowe, zużycie przy ruchu toczno – ślizgowym i zużycie erozyjne[3,11].

4. Podsumowanie

Dokładna analiza zjawisk zachodzących podczas zużycia, jak również matematyczny i geometryczny opis zużytych powierzchni pozwoli w większym stopniu zrozumieć i poznać zjawiska zachodzące podczas procesów ich zużywania. Matematyczny opis procesów zużycia nigdy nie będzie na tyle dokładny aby przedstawić przy jego pomocy wszystkie zjawiska zachodzące podczas procesów zużycia jednak w dużym stopniu pomaga poznać i zrozumieć zjawiska zachodzące w omawianych procesach. Jednakże oprócz badań teoretycznych muszą przeprowadzane być badania eksperymentalne laboratoryjne i eksploatacyjne, w celu weryfikacji opisanych teorii.

5. Literatura

[1] Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P.: *Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarciowo.* Lublin 2000 IZT.
[2] Nowak B.: *Regeneracja typowych elementów pojazdów samochodowych,* WKŁ, Warszawa, 1985.
[3] Pilarczyk J.: *Spawanie i napawanie elektryczne metali.* Wydawnictwo Śląsk, Katowice 2000.
[4] Shohat U., Krasny E., Stotter A.: *Report 011-147*. Israel Institute of Metals, Technions, Haifa, Israel 1977.
[5] Sławiński Z.: *Badanie miejscowych parametrów wymiany ciepła w cylindrze szybkoobrotowego silnika wysokoprężnego z doładowaniem*. Praca doktorska 1979.
[6] Smith R.W., Fast R.D.: *Future of thermal spray technology.* Welding Journal, Vol. 73, No. 7, 1994, p.43-50.
[7] Weroński A., Hejwowski T.: *Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie.* PL WU 2000.
[8] Adamiec P., Dziubiński J.: *Pękanie i trwałość napawanych części maszyn.* Gliwice 1995 WPŚ.
[9] Weroński A., Zwierzchowski M.: *Powłoki podwyższające odporność na zużycie wybranych elementów silników.* Przegląd Spawalnictwa 5/2003 Agenda Wydawnicza SIMP W-wa 2003.
[10] Zwierzchowski M.: *Wpływ struktury i właściwości materiałów elementów układów rozrządu silników ZS na przebieg zużycia*. III Sympozjum doktoranckie. Materiały konferencyjne. Politechnika Lubelska 2004. str.1-5.
[11] Hejwowski T.: *Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych*. WPL 2003 Lublin.

****
Wydanie publikacji dofinansowane przez Ministra Nauki i Informatyzacji w ramach Projektu Badawczego nr 4 T12D 033 28
****

Mgr inż. Maciej ZWIERZCHOWSKI
Katedra Inżynierii Materiałowej
Politechnika Lubelska
Ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin
tel. 81 538-12-11
email: m.zwierzchowski@pollub.pl

Andrzej AMBROZIAK
Zbigniew KORALEWICZ
Marcin KORZENIOWSKI
Paweł KUSTROŃ

METODY KONTROLI JAKOŚCI ZGRZEIN PUNKTOWYCH W CZASIE RZECZYWISTYM

ON-LINE QUALITY CONTROL METHODS DURING SPOT RESISTANCE WELDING PROCESS

W obecnych czasach oprócz stosowania tradycyjnych metod kontroli jakości po procesie zgrzewania takich jak badania niszczące (zrywanie, wyłuskiwanie, zgłady metalograficzne) oraz badania nieniszczące (badania ultradźwiękowe, badania rentgenowskie) istnieje silna potrzeba kontroli jakości wykonywanych zgrzein punktowych już w trakcie ich powstawania, w trakcie tworzenia ciekłego jądra zgrzeiny i równocześnie korekcja niezgodności i zakłóceń w procesie zgrzewania oporowego punktowego.
W artykule przedstawiono najbardziej znane metody kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym. Szerzej omówiono trzy metody: kontrolę jakości połączeń zgrzewanych w oparciu o sieci neuronowe, system kontroli jakości na bazie fuzzy logic oraz ultradźwiękową kontrolę jakości zgrzein w czasie rzeczywistym.

***Słowa kluczowe**: zgrzewanie rezystancyjne punktowe, kontrola jakości zgrzein w czasie rzeczywistym*

This article contains some information about the main methods of quality control in spot resistance welding process. There's a lot of factor witch can influence on connection quality. We focused on three main methods, which are used during on-line process control. We present system based on neural-nets, PQS^{weld}, system based on fuzzy logic and Ultrasonic Control System. Two of three mentioned methods investigate and measure the electrical parameters of resistance welding (voltage, welding current, dynamic resistance). The third one, measure the amplitude level of ultrasonic wave.

***Keywords**: resistance welding quality, spot resistance welding*

1. Wstęp

Zgrzewanie oporowe punktowe jest stosunkowo prostą i tanią metoda łączenia części stalowych. W dobie szybkiego rozwoju techniki, gdzie czas i koszty odgrywają ważną rolę, w ostatnich latach zwrócono uwagę na jakość połączeń wykonywanych ta metodą. Konsument wymaga od producenta nie tylko gotowego wyrobu, ale również zapewnienia i dokumentacji o jakości jego wykonania i niezawodności użytkowania. Przez ostatnie dziesięciolecia wykonywano szereg badań połączeń zgrzewanych jednak były to badania jakości wykonywane na gotowych produktach oparte na metodach statystycznych bez możliwości poprawy istniejącego już wyrobu. Stwierdzono, że ilość złomu pobadaniowego można zredukować o ponad 97% stosując badania nieniszczące do kontroli jakości połączeń zgrzewanych po procesie zgrzewania. Koszty te można zmniejszyć jeszcze bardziej stosując kontrolę i regulacje procesu zgrzewania już w trakcie jego trwania.

Ze względu na wielką liczbę połączeń odpowiedzialnych wykonywanych techniką zgrzewania oporowego punktowego (np. w przemyśle samochodowym) istnieje silna potrzeba kontroli jakości wykonywanych zgrzein punktowych już w trakcie ich powstawania, w trakcie tworzenia ciekłego jądra zgrzeiny i równocześnie korekcja niezgodności i zakłóceń w procesie zgrzewania oporowego punktowego. Obecnie stosowanych jest kilka metod kontroli jakości zgrzein w trakcie procesu zgrzewania. Najczęściej stosowane to: pomiar rezystancji dynamicznej, pomiar emisji akustycznej i pomiar promieniowania cieplnego.

Do najczęściej spotykanych niezgodności połączeń zgrzewanych należą: przyklejenie, zbyt małe wymiany jądra zgrzeiny oraz ekspulsje (wypryski).

Najbardziej nowatorskimi metodami, dającymi nadzieję na eliminację ww. niezgodności są metody kontroli jakości w czasie rzeczywistym tj.

- system kontroli jakości połączeń zgrzewanych działający w oparciu o sieci neuronowe [1],
- PQS^{weld} – system kontroli działający na bazie fuzzy logic [2],
- systemy ultradźwiękowej kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym [3 - 5].

Wymienione metody umożliwiają wykrycie niezgodności już w fazie ich powstawania. W przyszłości metody te oprócz identyfikacji niezgodności powstałych w trakcie procesu zgrzewania umożliwiały będą sterowanie parametrami procesu zgrzewania (prądem i czasem zgrzewania, siłą docisku elektrod), tak aby każda wytworzona zgrzeina spełniała stawiane jej wymogi [6].

2. System kontroli jakości działający w oparciu o sieci neuronowe

System działający w oparciu o sieci neuronowe opracowano m.in. w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. Sieci neuronowe, po etapie uczenia, potrafią wygenerować właściwą odpowiedź na sygnały, które nie brały udziału w procesie uczenia.

System na nich oparty działa na zasadzie pomiaru i analizy przebiegu rezystancji dynamicznej procesu zgrzewania.

Do wyznaczenia rezystancji dynamicznej wymagany jest pomiar dwóch wielkości elektrycznych tj. prądu zgrzewania i napięcia między elektrodami zgrzewarki, mierzonymi w trakcie procesu. Umożliwia to uzyskanie odpowiedzi o jakości wykonanego połączenia na podstawie przebiegu zmian rezystancji dynamicznej bezpośrednio po zakończeniu procesu zgrzewania bez konieczności przeprowadzania w tym czasie badań wytrzymałościowych lub metalograficznych. Badania te są przeprowadzane wcześniej, a wyniki badań są przypisywane do odpowiadającej im pary pomiaru parametrów elektrycznych procesu, czyli prądu i napięcia [1].

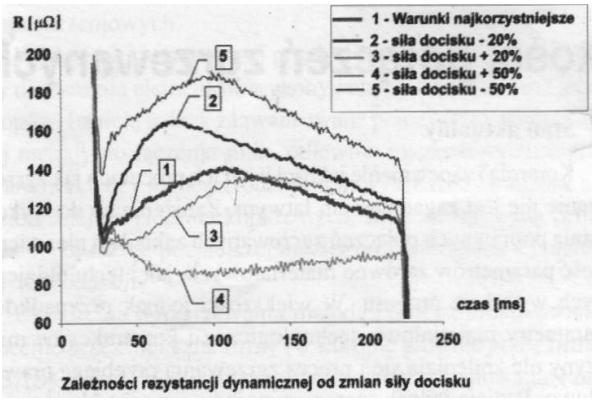
Jak wykazano, istnieje ścisły związek pomiędzy zmianą parametrów technologicznych procesu zgrzewania (siła docisku, powierzchnia czynna elektrod, bocznikowanie prądu, prąd zgrzewania) a parametrami elektrycznymi. Na rys.1. przedstawiono zmiany rezystancji dynamicznej od czynników zewnętrznych (siła docisku, powierzchnia robocza elektrod).

W wyniku zmian parametrów elektrycznych i technologicznych procesu można doświadczalnie wyznaczyć odpowiadające im zmiany parametrów mechanicznych. Podstawowym kryterium jest w tym przypadku siła zrywająca złącze zgrzewane.

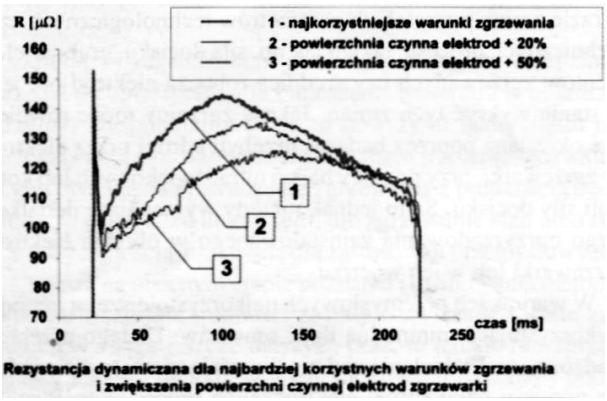
Aby zapewnić niezawodne działanie systemu decyzyjnego opartego na sieciach neuronowych konieczne jest tzw. uczenie sieci tj. wprowadzenie danych zebranych na podstawie badań w postaci dwóch serii: serii uczącej i serii testowej. W procesie uczenia bierze udział seria ucząca, natomiast seria testowa służy do określenia stopnia wytrenowania sieci i umożliwia przerwanie procesu uczenia w najbardziej odpowiednim momencie.

Omawiany system kontroli jakości zgrzein punktowych działający w oparciu o sieci neuronowe polega na porównaniu przebiegów rezystancji dynamicznej, rejestrowanych w trakcie procesu z przebiegami zarejestrowanymi wcześniej a tworzącymi bazę danych.

a)

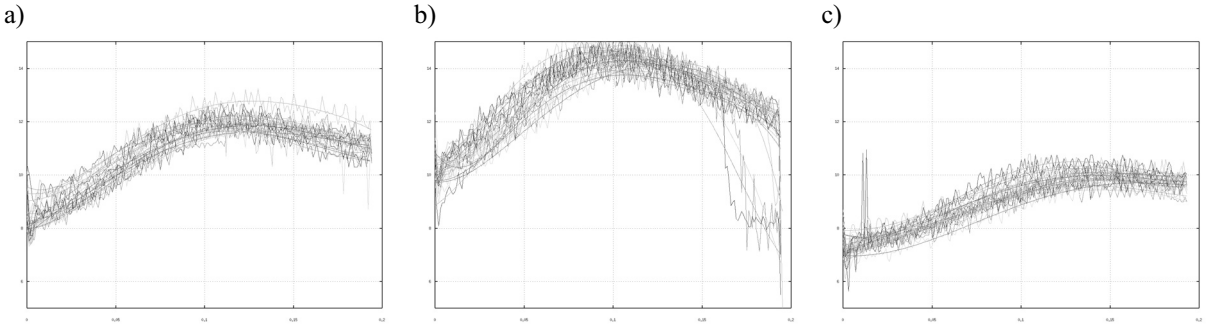


b)



Rys.1. Przebiegi rezystancji dynamicznej, a) dla różnych sił docisku elektrod, b) dla różnej powierzchni roboczej elektrod [1]

Fig.1. Shape of curve of dynamic resistance, a) different welding force, b) different area of welding electrodes [1]



Rys.2. Rezystancja dynamiczna dla różnych warunków zgrzewania : a) optymalny prąd zgrzewania, b) prąd zgrzewania +10%, c) prąd zgrzewania –10% [1]

Fig.2. Dynamic resistance for different conditions of welding process: a) optimum welding current, b) welding current inc. 10%, c) welding current dec. 10% [1]

Przykładowe rzeczywiste przebiegi rezystancji dynamicznych przeprowadzonych w różnych warunkach zgrzewania przedstawiono na rys.2.

Wykonano szereg połączeń zgrzewanych, dla których zarejestrowano przebiegi parametrów elektrycznych procesu oraz określona została klasa jakości poprzez badania wytrzymałościowe. Przedstawiona powyżej kontrola procesu zgrzewania rezystancyjnego bazuje jedynie na pomiarze parametrów elektrycznych, przy czym możliwa jest kontrola dodatkowych wielkości, których wprowadzenie do systemu poprawi zapewne dokładność odpowiedzi systemu. Jednakże istnienie zależności charakteru przebiegów parametrów elektrycznych (szczególnie wyliczonej rezystancji dynamicznej) od zmiany parametrów technologicznych i materiałowych w procesie zgrzewania rezystancyjnego jest wystarczające do określenia jakości wykonywanych połączeń. Istnienie przedstawionej zależności jest warunkiem koniecznym dla zastosowania tej metody kontroli.

Metoda ta, poprzez pomiar jedynie parametrów elektrycznych procesu tj. prądu i napięcia, daje możliwość oceny jakości połączeń zgrzewanych w warunkach przemysłowych z uwagi na wyraźną zależność jakości zgrzeiny od zmian tych parametrów oraz stosunkowo prosty pomiar tych parametrów na stanowisku roboczym (zgrzewalniczym).

3. System kontroli jakości oparty na fuzzy logic (logika rozmyta)

Teoria zbiorów rozmytych znalazła zastosowanie w procesie zgrzewania rezystancyjnego. Logika rozmyta (ang. fuzzy logic) zastosowana została przez firmę Harms&Wende w systemie kontroli jakości, jakim jest PQS^{weld}. Przez zastosowanie analizy na bazie logiki rozmytej powstał sposób kontroli jakości łączący dwie właściwości: łatwe zbieranie sygnału prosto z procesu zgrzewania (poprzez pomiar prądu i napięcia) oraz uzyskanie konkretnych informacji o jakości [2].

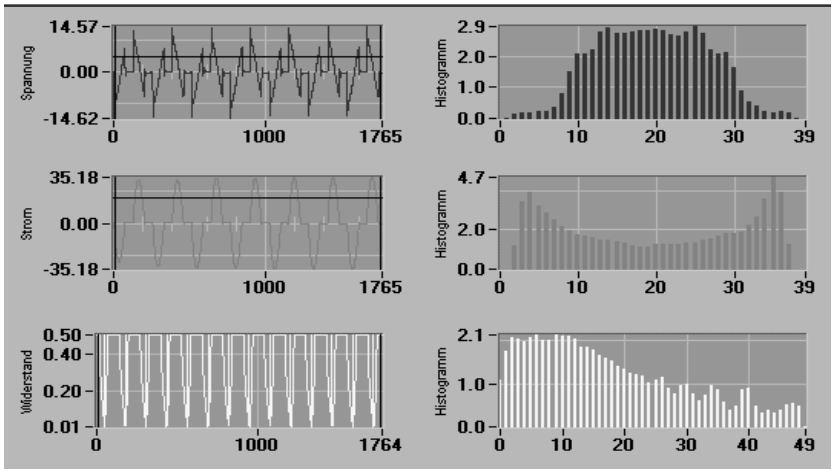
System PQS^{weld} (niem. Prozess Qualitat Steuerung) firmy Harms&Wende oparty jest na pomiarach z dużą dokładnością (do 50 000 pomiarów na sekundę) napięcia i natężenia prądu oraz wynikającej z nich rezystancji dynamicznej. Pomiar prądu następuje poprzez pętle pomiarową lub przekładnik prądowy. Pomiar napięcia natomiast odczytywany jest z możliwie bliskiego punktu zgrzewania, lecz poza elementami ruchomymi takimi jak np. elektrody. Własny integrator pomiarowy sprawia, iż możliwy jest pomiar prądu pętlą pomiarową dla prądu zmiennego i stałego 50Hz, jak również dla zgrzewarek inwertorowych 1000Hz [2].

Gdy zakończony zostaje każdy cykl zgrzewania oraz towarzyszący temu zbiór pomiarów, każdy przebieg sygnału poddawany jest odpowiedniej obróbce celem uzyskania histogramu (rys.3.). Dzięki tej operacji, dane zostają zagęszczone bez utraty istotnych informacji.

Histogram pozwala na uwypuklenie różnic w przebiegach sygnałów kolejnych zgrzein, których porównanie jest podstawą klasyfikacji jakości.

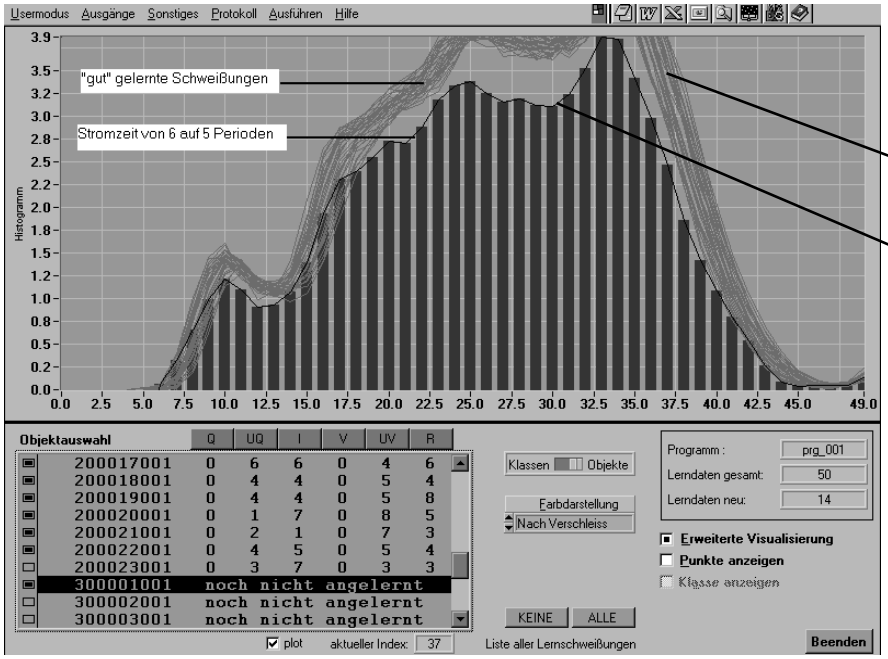
W pierwszej fazie uruchamiania system PQS^{weld} musi zostać „nauczony". Odbywa się to poprzez normalne badanie niszczące próbek, a następnie uzyskana w ten sposób ocena zgrzein, w odpowiednim szablonie programu, wprowadzana jest do bazy danych systemu. Tutaj następuje automatyczne ustalenie tolerancji wszystkich próbek i poprzez wykorzystanie funkcji fuzzy powstaje rodzaj wstępnego opisu jakości zgrzein [2].

Przykład różnic histogramu dla próbki wzorcowej i dla próbki z wydłużonym czasem zgrzewania przedstawiono na rys.4.



Rys.3. Tworzenie histogramu z przebiegów prądu, napięcia i oporności [2]

Fig.3. Making the bar charts of current, voltage and resistance [2]



Przebieg wzorcowy – poprawny

Histogram z aktualnego przebiegu zgrzewania

Rys.4. Różnica w histogramie z powodu zmiany czasu zgrzewania [2]

Fig.4. Difference in bar chart in case of changing welding time [2]

4. Ultradźwiękowa metoda kontrola jakości zgrzein

Ultradźwiękowe metody kontroli jakości połączeń zgrzewanych znane są od dawna, od ponad stu lat, jednak wykorzystanie ich do kontroli jakości i sterowania w czasie rzeczywistym są rozwijane od kilku lat. Parametrami fal ultradźwiękowych wykorzystywanych do oceny jakości powstającej zgrzeiny są głównie tłumienie i prędkość fal ultradźwiękowych. Przedstawione systemy opierają się na pomiarze transmisji fal ultradźwiękowych.

Obecnie istnieje kilka rozwiązań technologicznych opracowanych przez różne koncerny, jednak zasady działania pozostają podobne. Na czołach obsadzeń elektrod (dolnej i górnej) umieszczono przetworniki ultradźwiękowe, które wytwarzają okresowo powtarzający się i szybko gasnący impuls ultradźwiękowy.

Impuls dociera do czoła elektrody poprzez ciecz chłodzącą, która stanowi ośrodek pośredniczący dla fal ultraźwiękowych. Do oceny jakości połączeń zgrzewanych stosowane są dwie podstawowe metody badań ultradźwiękowych metoda echa i metoda

przepuszczania [7]. Zasada badań przedstawiona została na rys.6.

Przetworniki ultradźwiękowe mogą być również umieszczone wewnątrz elektrody możliwie jak najbliżej powierzchni roboczej elektrody tzw. kapy, która jest elementem wymiennym (rys.7.)

Na podstawie krzywej transmisji fal ultradźwiękowych (rys.8) można określić średnice jądra zgrzeiny, wartość siły niszczącej (próba zrywania) oraz klasę jakości wykonanej zgrzeiny (na podstawie [6]). Ponadto system posiada możliwość korekcji parametrów zgrzewania w czasie rzeczywistym co sprawia, że jakość wykonywanego połączenia będzie zawsze zadowalająca.

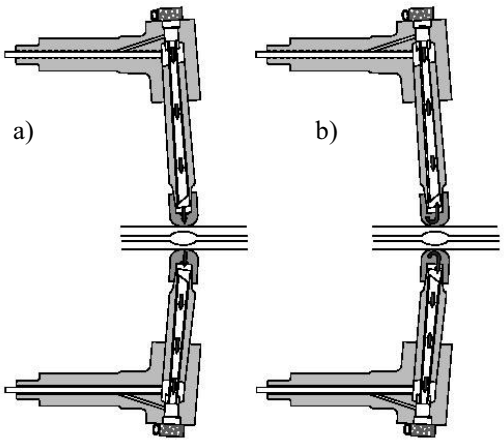
Na podstawie badań własnych [5], [8] stwierdzono, że ultradźwiękowa kontrola połączeń w czasie rzeczywistym jest metodą czułą na czynniki zewnętrzne takie jak stan powierzchni roboczej elektrod oraz ich temperaturę. W przypadku przetworników ultradźwiękowych umieszczonych wewnątrz elektrod należy zadbać o odpowiednie ich chłodzenie, gdyż wysoka temperatura (powyżej 80°C) może spowodować niejednoznaczność wyników pomiarów a w skrajnym przypadku doprowadzić do uszkodzenia głowic ultradźwiękowych.

5. Podsumowanie

Przedstawiony system kontroli procesu PQS[weld] został wprowadzony i jest wytwarzany przez niemiecką firmę Harms&Wende, specjalizującą się w dziedzinie kontroli jakości zgrzein. Jest to bardzo czuły system, rozpoznający dokładnie odchylenia parametrów i porównujące je z nauczonymi wzorcami jakości. Zgrzeiny posiadające duży zakres bezpieczeństwa w parametrach zgrzewania wykazują dobre wyniki jakości w próbach niszczących, funkcja fuzzy logic rozpoznaje dokładnie odchylenia zapobiegając lub in-

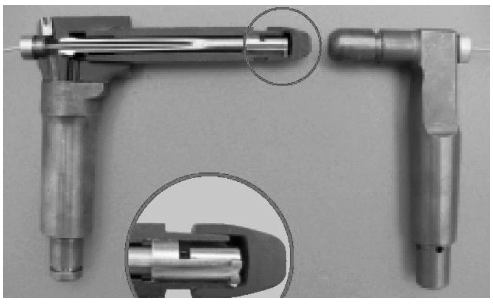
Rys. 5. Przetwornik ultradźwiękowy umieszczony na zewnątrz elektrody [3]

Fig. 5. Electrode with ultrasonic external sensor



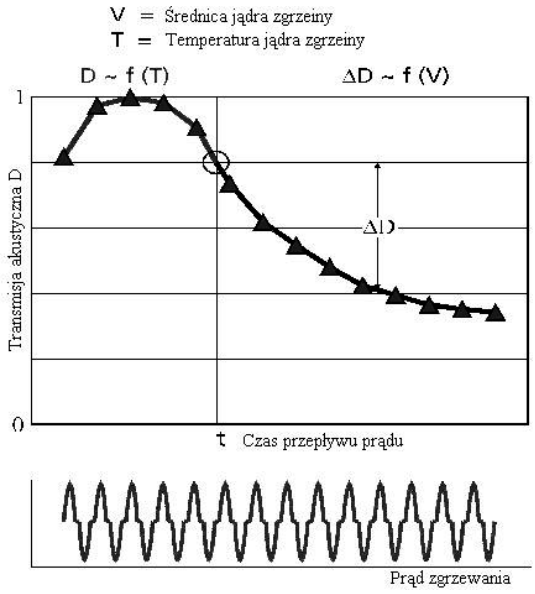
Rys. 6. Zasada badan zgrzein punkrowych metodą echa i metodą przepuszczania [3]

Fig. 6. Ultrasonic measurments methods of spot welds. Transmittions method a), pulse (echo) method b) [3]



Rys.7. Przetworniki ultradźwiękowe umieszczone wewnątrz elekrod [3]

Fig.7. Ultrasonic sensors integrated into elektrode [3]



Rys. 8. Krzywa transmisji fal ultradźwiękowych [4]

Fig. 8. Curve of ultasonic transmition in real time [4]

formując o ewentualnie niepożądanych zjawiskach. Zmiany i wahania w warunkach zgrzewania takie jak materiał, stan elektrod itp. zależnie od zebranych danych nauczenia systemu mogą być prawidłowo rozpoznawane [9].

System kontroli jakości oparty na sieciach neuronowych, podobnie jak PQS^{weld} bazuje jedynie na pomiarze parametrów elektrycznych procesu (natężenia prądu i napięcia), ale w odróżnieniu do nich inteligentną funkcją systemu jest sieć neuronowa, a nie fuzzy logic [9].

W przypadku systemów kontroli jakości opartych na pomiarze parametrów fal ultradźwiękowych, stwierdzono, że omawiana metoda pozwala na uzyskanie jednoznacznej informacji o stanie powstającego jądra zgrzeiny. Uzyskane w ten sposób dane mogą być użyte, nie tylko w celu oceny jakości powstającej zgrzeiny, ale również sterowania przebiegiem całego procesu.

6. Literatura

[1] Kozaczyński J., Mikno Z., Stodolny P., System do kontroli jakości połączeń zgrzewanych w oparciuo sieci neuronowe, Przegląd Spawalnictwa Nr 5-7/2004.

[2] Straube A., Torzewski A., Winzen B.: PQS^{weld} – System kontroli dla zgrzewania punktowego i garbowego na bazie fuzzy logic. Podstawy, możliwości i zastosowania praktyczne. Kontrola i sterowani w procesie zgrzewania rezystancyjnego. Jakość, rozwój, konkurencyjność i przyszłość. Seminarium Inst. Spaw. Gliwice – marzec 2004.

[3] VOGT Werkstoffprüfsysteme - Inline ultrasonic testing system for process control during resistance spot welding.

[4] Bosh Rexroth – Automatic ultrasonic tests – non destructive during the welding process.

[5] Ambroziak A., Koralewicz Z., Korzeniowski M., Kustroń P., Ocena jakości połączeń zgrzewanych z wykorzystaniem ultradźwiękowej metody kontroli w trakcie procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego.- Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt 73.

[6] Polska Norma PN-74 M-69020, Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych.

[7] Talarczyk E., Podstawy techniki ultradźwięków, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1990.

[8] Ambroziak A., Krynicki L., Koralewicz Z., Określenie przydatności badań ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych punktowo, Przegląd Spawalnictwa Nr 7-8/2000.

[9] Bienias A. – Praca dyplomowa, Wrocław 2004.

Dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK prof. ndzw. PWr.
Dr inż. Zbigniew KORALEWICZ
Mgr inż. Marcin KORZENIOWSKI
Mgr inż. Paweł KUSTROŃ

Politechnika Wrocławska
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji
ul. Łukasiewicza 3/5, Wrocław
e-mail: andrzej.ambroziak@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 21 48
e-mail: zbigniew.koralewicz@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 27 38
e-mail: marcin.korzeniowski@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 42 55
e-mail: pawel.kustron@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 42 55

Mariusz WALCZAK
Barbara SUROWSKA
Jarosław BIENIAŚ

PRÓBA PODWYŻSZENIA TRWAŁOŚCI POŁĄCZENIA UKŁADU METAL-CERAMIKA DO ZASTOSOWAŃ W PROTETYCE STOMATOLOGICZNEJ

DURABILITY TEST OF RICE THE METAL-CERAMICS CONNECTION TO APPLICATION IN DENTAL PROSTHETICS

Przeprowadzono badania przyczepności dwóch kombinacji połączeń: Ti/SiO_2/Triceram i Ti/Triceram metodą trzypunktowego zginania (wg PN-EN ISO 9693). Powłoki SiO_2 nanoszone były na tytanowe podłoże metodą zol-żel. Otrzymane wyniki badań wykazały większą przyczepność połączenia Ti/SiO_2/Triceram niż porównywany układ połączenia Ti/Triceram bez warstwy przejściowej SiO_2. Ponadto stwierdzono: (1) jednorodność warstw SiO_2 (2) porcelana dentystyczna stosowana na warstwach SiO_2 wykazuje dobrą przyczepność do podłoża tytanowego oraz (3) warstwy pośrednie mogą dostarczyć trwałego połączenia pomiędzy metalem a porcelaną.

***Słowa kluczowe**: metoda zol-żel, tytan, porcelana dentystyczna, trzypunktowe zginanie*

The bond strength by three-point bending (according to PN-EN ISO 9693) of two combination: Ti/SiO_2/Triceram and Ti/Triceram were evaluated. Coatings of SiO_2 on base titanium were deposited using sol-gel method. Results showed that the bond strength of Ti/SiO_2/Triceram in control group was significantly higher than the Ti/Triceram without intermediate layers SiO_2. The analysis revealed: (1) a compact, homogenous SiO_2 coating, and (2) that dental porcelain on SiO_2 coatings shows good adhesion to base titanium and (3) that intermediate coatings may provide a durable joint between metal and porcelain.

***Keywords**: sol-gel method, titanium, dental ceramic, three-point bending*

1. Wprowadzenie

Tytan ze względu na korzystne właściwości takie jak: odporność na korozję, niski ciężar właściwy, dobre właściwości mechaniczne i wysoką biozgodność jest materiałem powszechnie stosowanym w stomatologii [1,2]. Z tytanu w protetyce stomatologicznej w szerokim zakresie wykonywane są aparaty protetyczne trwale licowane niskotopliwą porcelaną dentystyczną [2]. 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 podłożem tytanowym zachodzi w temperaturach poniżej 800 °C, dzięki formowaniu się warstwy tlenków. Jest to odpowiedni zakres temperatury, który zapobiega tworzeniu się stosunkowo grubych warstw tlenku tytanu, a tym samym optymalny dla wystąpienia trwałego połączenia metal-ceramika [3,4]. Na etapie przygotowania powierzchni stosuje się tradycyjne piaskowanie [5], co nie zapewnia trwałego połączenia metalu z porcelaną. Obserwuje się przypadki odpryśnięcia ceramiki od powierzchni struktury metalowej (rys. 1). Pod tym względem badania kliniczne wykazują 16 % niepowodzeń po trzyletnim użytkowaniu [6,7].

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 [10]. Obecnie poszukuje się rozwiązań podwyższających trwałość układu metal-ceramika. Z danych literaturowy [2,5,11] wynika, że wytwarzanie warstw pośrednich zol-żel na tytanowych biomateria-

łach może prowadzić do zwiększenia przyczepności porcelany do podłoża.

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

2. Metodyka badań

Do badań jako materiał podłoża wykorzystano czysty technicznie tytan ASTM – grade II. Próbki miały postać prostopadłościennych płytek o wymiarach 25×3×0,5 mm zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 9693 [12].

Na tytanowe próbki nanoszono metodą zol-żel powłoki SiO_2. Zol krzemionkowy otrzymano przez hydrolizę czteroetoksysilanu $Si(OC_2H_5)_4$ (TEOS) z dodatkiem HCl jako katalizatora. TEOS rozcieńczano alkoholem etylowym a następnie dodawano wodę w proporcji H_2O:TEOS = 4:1. Końcowe stężenie krzemionki wynosiło 3÷5 % wagowych. Próbki tytanu pokrywano techniką wynurzeniową ze stałą prędkością wynoszącą 3,3 mm/s, a grubość powłoki regulowano przez zastosowanie wielokrotnego wynurzania. Po nałożeniu filmu próbki suszono i wygrzewano w temperaturze ok. 600 °C w atmosferze argonu. Zastosowana obróbka cieplna usuwa wodę i zagęszcza powłokę, zwiększając trwałość wiązania pomiędzy powłoką a podłożem.

Centralnie na tytanowe blaszki nałożono niskotopliwą porcelanę dentystyczną Triceram (firmy Dentaurum Co) o wymiarach 8×3×1 mm (zgodnie z PN-EN ISO 9693)

Trzypunktowemu zginaniu poddano próbki z warstwą przejściową zol-żel oraz próbki z bez warstwy pośredniej, ale z zastosowaniem piaskowania powierzchni przed procesem wypalania ceramiki. Posuw wynosił 1.5 mm/min przy obciążeniu 0,6 N. Siła zrywająca była rejestrowana jako maksimum siły w „krzywej wyporności siły". Następnie w oparciu o moduł sprężystości wzdłużnej E dla tytanu i stopu tytanu odczytywano z krzywych $k=f(d_M)$ (gdzie d_M grubość płytki tytanowej) wartość k i obliczano przyczepność porcelany zgodnie z normą PN-EN ISO 9693. Testy przyczepności wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100.

Do badań mikrostruktury powłok zol-żel oraz do analizy próbek po testach wytrzymałościowych wykorzystano mikroskop skaningowy LEO 1430VP z EDX – Roententec.

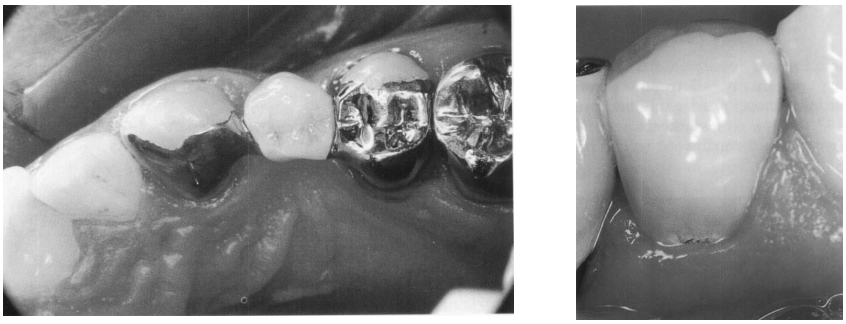
3. Rezultaty i dyskusja

Mikrostrukturę powłoki SiO_2 naniesionej techniką zol-żel na podłoże tytanowe przedstawiono na rys. 2. Powłoki te są zwarte, dobrze przylegają do podłoża i są jednorodne chemicznie [2,5,11]. Występujące mikropęknięcia w powłoce SiO_2 są wynikiem obróbki cieplnej. Jednak pęknięcia te nie są głębokie i nie wpływają znacząco na obniżenie właściwości chemicznych i fizycznych powłoki, a w połączeniu z ich chropowatością (wynoszącą 0,63÷0,82 μm) mogą powodować lepsze „zakotwiczenie" się porcelany podczas procesu wypalania i uzyskanie stanu powierzchni podobnego jak po procesie piaskowania [11]. Grubość warstw zol-żel wynosiła ok. 3 μm.

Według Miella i in. [13] makronaprężenia formują się w wyniku kurczenia powłoki podczas wygrzewania i wówczas mogą się one rozrastać i łączyć ze sobą tworząc większe obszary [11].

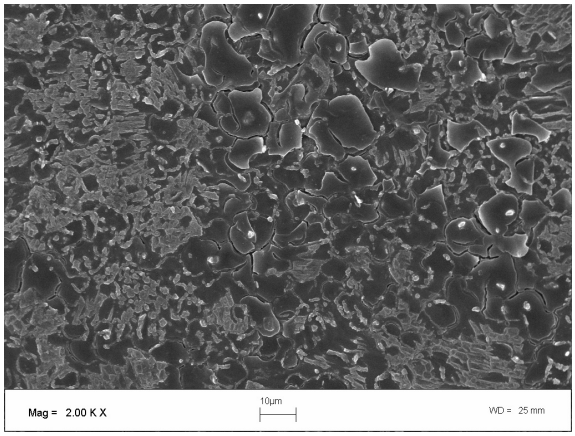
Wyniki badań przyczepności porcelany dentystycznej przedstawiono w tabeli 1. Według normy PN-EN ISO 9693 porcelana dentystyczna napalana na metalowe podłoże, podczas zginania trzypunktowego powinna wytrzymać minimum 25 MPa. Z analizy otrzymanych wyników, porcelana napalana na podłoże

a) b)



Rys. 1. Uszkodzenia porcelany dentystycznej: a) odłamanie licówki po roku użytkowania [8], b) odprysk ceramiki w okolicy przyszyjkowej korony w kształcie muszli po trzyletnim użytkowaniu [9]

Fig. 1. The defect of dental porcelain: a) breaking away after year the faces brick of use [8], b) chip of ceramics crown after three-year –old use[9]



Rys. 2. Mikrostruktura powłoki SiO_2 – zdjęcia SEM
Fig. 2. SEM microphotographs of SiO_2 coating

tytanowe z zastosowaniem tradycyjnego piaskowania nie osiąga wartości 25 MPa lub oscyluje w pobliżu tej wartości. Zastosowanie powłoki przejściowej zol-żel powoduje wzrost przyczepności porcelany (wartość średnia 27,98 MPa) o 21,4 % w stosunku do podłoża, przy którym zastosowano piaskowanie przed procesem wypalania. Taki układ połączenia tytan-ceramika wytrzymuje wówczas naprężenia zginające znacznie większe niż wymaganą wartość 25 MPa.

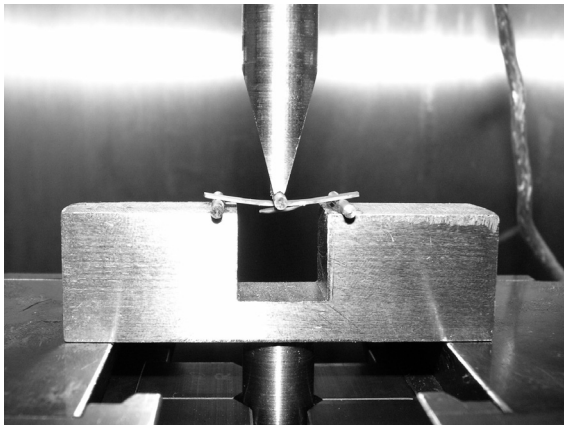
Prace badawcze prowadzone przez autorów [2,5,11] wskazują na to, że warstwy pośrednie zol-żel mogą dostarczyć trwałego połączenia między tytanem a porcelaną, co potwierdza uzyskanie przez nas pozytywnych wyników podczas próby trzypunktowego zginania układu metal-ceramika.

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 powłoką SiO_2, można było zauważyć jeszcze „trzymanie się" porcelany do materiału podłoża nawet po znacznym przekroczeniu maksymalnej siły gnącej (rys. 3). Z analizy próbek po testach przyczepności, można zauważyć, że pęknięcie występowało na granicy powłoka SiO_2 – porcelana, co może świadczy o dobrym przyleganiu warstwy zol-żel do tytanowego podłoża (rys. 4). Według badań Michalika i in. [14] warstwy nanoszone metodą zol-żel na powierzchnię tytanu są powłokami o charakterze dyfuzyjnym, co tłumaczyłoby ich dobrą przyczepność do tytanowego podłoża.

Na podstawie danych literaturowych [15-18] (tabela 2) można stwierdzić, że autorzy badań przyczepności układu tytan-ceramika uzyskali zbliżone wyniki wytrzymałości połączenia tych materiałów. Jednak ich wyniki obarczone są znacznym rozrzutem wartości wytrzymałości na co wskazuje wielkość odchylenia standardowego. Pewne różnice w wynikach mogą wynikać z zastosowania porcelany różnych producentów i dlatego uzasadnionym wydaje się porównywanie wyników przyczepności porcelany tego samego producenta. Yilmaz i in. [18], uzyskali znacz-

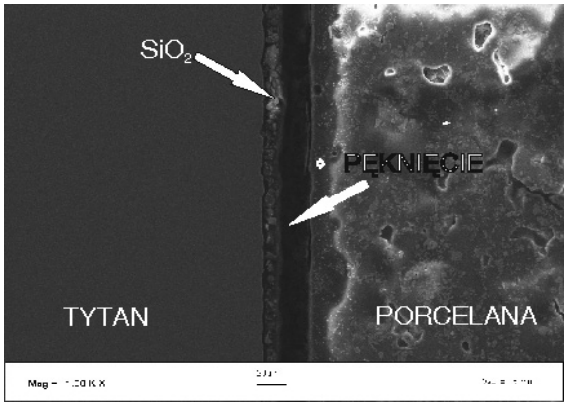
Tab. 1. Wyniki badań przyczepności między tytanem a porcelaną
Tab. 1. Result of bond strength between titanium and porcelain

Nr próbki	Ti/Triceram + piaskowanie		Ti/SiO_2/Triceram	
	Siła przy której następuje pękanie porcelany [N]	Wytrzymałość połączenia [MPa]	Siła przy której następuje pękanie porcelany[N]	Wytrzymałość połączenia [MPa]
1	4,55	23,21	5,42	27,64
2	4,99	25,45	5,53	28,20
3	4,79	24,43	6,02	30,70
4	4,41	22,49	5,56	28,36
5	4,38	22,34	5,81	29,63
6	3,99	20,35	4,79	25,04
Wartość średni	4,52	23,04	5,52	27,98
Odchylenie standardowe	0,35	1,78	0,42	1,60



Rys. 3. Widok zginanej próbki Ti/SiO_2/Triceram

Fig. 3. Image of flexural sample Ti/SiO_2/Triceram



Rys. 4. Mikrostruktura SEM Ti/SiO_2/Triceram po trzypunktowym zginaniu

Fig. 4. Microstructure Ti/SiO_2/Triceram after three-point test

Tab. 2. Literaturowy przegląd badań trzypunktowego zginania układu tytan-ceramika
Tab. 2. Literature overview of three-point bending strength between titanium and ceramics

Literatura	Kombinacja układu tytan-ceramika	Wytrzymałość połączenia [MPa]	Odchylenie standardowe
Garbelini in. [15]	Ti/Vita Titankeramik	30,8	6,2
	Ti/Triceram	26,6	3,1
	Ti/Duceratin	22,7	4,1
Tróia Jr. i in.[16]	Ti/Vita Titankeramik	24,9	2,6
Atsü i in. [17]	Ti/Vita Titankeramik	17,1-20,3	2,1-2,9
	Ti/Ti Bond	16,6-21,6	2,6-5,0
	Ti/Noritake Ti22	24,9-31,8	2,3-5,2
Yilmaz i in. [18]	Ti/Vita Titankeramik	37,1	2,8
Badania własne	Ti/Triceram	23,0	1,7
	Ti/SiO_2/Triceram	27,9	1,6

nie wyższą wytrzymałość połączenia (37,1 MPa), ale ich sposób umocowania próbek podczas testów budzi wiele kontrowersji co do trzypunktowego styku, co miało decydujący wpływ na uzyskaną wartość pomiaru. Jednak analizując powyższe wyniki można z całą pewnością stwierdzić, że warstwy zol-żel zwiększają przyczepność porcelany do tytanowego podłoża.

4. Wnioski

Powłoki SiO_2 nanoszone techniką zol-żel mogą dostarczyć trwałego połączenia między tytanem a porcelaną. Ponadto wpływają na zwiększenie przyczepność dentystycznej porcelany do tytanowego podłoża o ponad 20 %, w stosunku do obecnie wykorzystywanej w laboratoriach protetycznych techniki piaskowania powierzchni tytanu przed procesem napalania. Metoda zol-żel pozwala uzyskiwać stosukowo cienkie i jednorodne powłoki, które mogą być przydatne w protetyce stomatologicznej.

5. Literatura

[1] Lautenschlager E.P, Monaghan P.: *Titanium and titanium alloys as dental materials, International Dental Journal*, 43, 1993, 245-253.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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, 73, 1995, pp.17-25.
[5] 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.
[6] 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.
[7] Walter M., Böning K., Reppel P., Clinical Performance of machined titanium restorations, Journal of Dentistry, 22, 1994, p.346.
[8] Peters S.: *Eliminowanie niepowodzeń*, w: Kerschbaum T.: *Protetyka adhezyjna, Mosty, Zaczepy, Szyny, Licówki*, tłumaczenie Płonka B., Urban&Partner Wrocław 1999.
[9] Wichman M.: *Korony*, w: Koecka B. i in.: *Protetyka stomatologiczna. Korony i mosty*, tłumaczenie Maślanka T., Wydawnictwo Medyczne Urban&Partner Wrocław 2000.
[10] Craig R.G., Powers J.M., Wataha J.C., pod redakcją Limanowskiej-Shaw H.: *Materiały stomatologiczne*, Wydawnictwo Medyczne Urban & Partner, Wrocław 2000.
[11] 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.
[12] PN-EN ISO 9693:1999 Metal-ceramic dental restorative systems, 2nd ed. Switzerland, International Organization for Standardization, 1999.
[13] Mirella E., Cosentino F., Licciulli A., Massaro C.: *Preparation and characterization of titania/hydroxyapatite composite coatings obtained by sol-gel process*, Biomaterials, 22, 2001, pp. 1425-1431.
[14] Michalik R., Łaskawiec J., Klisch M.: *Powłoki ochronne wytwarzane metodą zol-żel na implantach*, Inżynieria Materiałowa, Nr 5, 2002, s.372-375.
[15] Garbelini W.J., Henriques G.E.P., Tróia Jr. M., Mesquita M.F, Dezan C.C.: *Evaluation of low-fusing ceramics systems combined with titanium grades II and V by bending test and scanning electron microscopy*, Journal of Applied Oral Science, 11, 2003, 354-360.
[16] Tróia Jr. M.G., Henriques G.E.P., Nobilo M.A.A., Mesquita M.F.: *The effect of thermal cycling on the bond strength of low-fusing porcelain to commercially pure titanium and titanium-aluminum-vanadium alloy*, Dental Materials 19, 2003, 790-796.
[17] Atsü S., Berksun S.: *Bond strength of three porcelains to two forms of titanium using two firing atmospheres*, The Journal of Prosthetic Dentistry, 84, 2000, 567-574.
[18] Yilmaz H., Dinçer C.: *Comparison of the bond compatibility of titanium and an NiCr alloy to dental porcelain*, Journal of Dentistry, 27, 1999,215-222.

****

Praca wykonana: w ramach projektu badawczego nr 4T08A04523 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2002/2005 oraz w ramach projektu nr Z/2.06/II/2.6/05/04 – Intensyfikacja Działań Innowacyjnych Regionu poprzez System Stypendiów Doktorskich.
Najserdeczniejsze wyrazy podziękowania dla całego zespołu badawczego AGH pod kierownictwem dr Anny Stoch za nałożenie powłok zol-żel, dla dr Haliny Matraszek z UJ za wypalenie porcelany dentystycznej oraz dla prof. Kazimierza Szabelskiego i zespołu technicznego Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej za udostępnienie maszyny wytrzymałościowej Zwick Z100 i pomoc okazaną przy realizacji badań.

****

Mgr inż. Mariusz WALCZAK
Dr hab. Barbara SUROWSKA prof. PL
Dr inż. Jarosław BIENIAŚ
Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
tel. +48 (81) 5381211, fax +48 (81) 5381214
e-mail: m.walczak@pollub.pl, b.surowska@pollub.pl, j.bienias@pollub.pl

Maciej WŁODARCZYK
Jarosław FLISIAK

ANALIZA WPŁYWU CHARAKTERYSTYKI MATERIAŁU KLEJU NA ROZKŁAD NAPRĘŻENIA W POŁĄCZENIU KLEJOWYM

ANALYSIS OF INFLUENCE OF GLUE CHARACTERISTICS ON STRESS DISTRIBUTION IN ADHESIVE JOINT

W pracy podjęto próbę porównania wpływu charakterystyki kleju na rozkład naprężenia w połączeniu klejowym metali. Analizę numeryczną prowadzono dla dwóch modeli kleju: liniowego i nieliniowego z uwzględnieniem różnych wariantów podziału warstwy spoiny, tj. na 2, 3 i 4 warstwy. Zaprezentowano rozkłady naprężeń wzdłuż długości oraz szerokości spoiny klejowej. Jako narzędzie numeryczne wykorzystano system Abaqus. Porównano różne sposoby modelowania i obliczeń połączeń klejowych oraz ich wpływ na wielkość modelu obliczeniowego. Otrzymane wyniki przedstawią jak ważne jest przyjęcie właściwego modelu kleju na rozkłady naprężenia, zwłaszcza w obszarach ich silnych koncentracji determinujących wytrzymałość całego połączenia.

***Słowa kluczowe**: połączenie klejowe, rozkład naprężeń, nieliniowy model kleju*

The aim of this work is to compare the influence of glue characteristics on stress distribution in an adhesive joint. The numeric analysis was made for two different types of glue models: linear and non-linear with taking into account different alternative designs of division of an adhesive joint's layer i.e.,2,3,4 layers. The stress distribution was presented along the length as well as the width of a glue joint. The Abaqus system was used as a numeric tool. Different ways of modeling and calculations were compared for the adhesive joints and their influence on the size of the computational model. The received results show how important it is to choose a proper model of glue. The suitable choice influences the stress distribution, especially in places of high stress concentrations determining the strength of the whole connection areas.

***Keywords**: adhesive joints, stress distributions, non-linear glue model*

1. Wprowadzenie

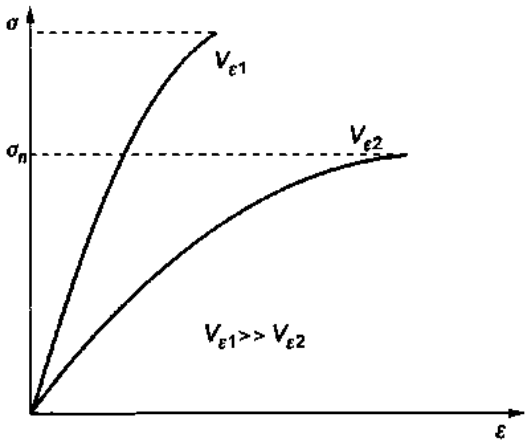
Metoda Elementów Skończonych (MES) jest najszerzej stosowanym narzędziem obliczeniowym wspomagającym prace inżynierskie. Obecnie wykorzystuje się ją do badania wszelkich procesów fizycznych związanych z mechaniką konstrukcji a zwłaszcza z mechaniką pękania. W pracy wykorzystano jej zalety do analizy połączeń klejowych. Ze względu na budowę takich połączeń bardzo trudne jest określenie metodami bezpośrednimi stanu naprężeń, jaki panuje w tego typu połączeniach.

Przy pomocy MES można również prowadzić analizę wpływu ciepła i niejednorodności występujących w spoinie klejowej na trwałość całego połączenia a także wytrzymałości na pełzanie czy też analizę dynamiczną. Warunkiem otrzymania prawidłowych wyników obliczeń jest zbudowanie modelu połączenia możliwie najbardziej zbliżonego swoimi parametrami do rzeczywistego obiektu. Ważne jest również określenie właściwych warunków brzegowych. W świetle przeprowadzonych badań nad budową modelu obliczeniowego MES wydaje się równie ważnym fakt przyjęcia odpowiedniej siatki elementów skończonych, właściwie zagęszczonej w strefach przewidywanych lokalnych spiętrzeń naprężenia.

W referacie przedstawiono fragmenty badań dotyczących zastosowania MES do analizy stanu naprężenia i odkształcenia w połączeniach klejowych. Badania prowadzono dla różnych modeli kleju, a także różnych modeli siatek elementów skończonych. Porównywano wyniki uzyskane dla liniowego i nieliniowego modelu kleju, siatek tetra i heksagonalnych, oraz różnych podziałów warstwy kleju.

2. Właściwości mechaniczne klejów stosowanych do łączenie metali

Tworzywa polimerowe wykazują w różnym stopniu właściwości lepkosprężyste, to znaczy zależność wartości modułu sprężystości i naprężenia niszczącego od prędkości odkształcenia (rys.1) [7].



Rys. 1. Krzywe rozciągania materiału lepkosprężystego dla dwóch różnych prędkości odkształcania: σ- naprężenie, ε- odkształcenie względne, V_ε- prędkość odkształcania [7]

Fig. 1. Curve tension of viscoelasticty material for two different strain speeds: σ – stress, ε – true strain, V – strain speed [7]

Problem uwzględniania lepkosprężystości jest bardziej istotny przy analizie wytrzymałości połączeń wykonywanych za pomocą klejów konstrukcyjnych, które często są tworzywami polimerowymi o strukturze łańcuchowej lub rozgałęzionej. Ocena wytrzymałości połączeń, wykonanych z zastosowaniem klejów wykazujących właściwości elastyczne w podwyższonej temperaturze, wymaga uwzględniania ich lepkosprężystości. Stąd uwzględnienie lepkosprężystych właściwości klejów jest konieczne przy analizie wytrzymałości połączeń klejowych poddanych długotrwałemu obciążeniu. W analizie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych wykonanych z zastosowaniem wysokowytrzymałych klejów konstrukcyjnych najczęściej pomija się ich lepkosprężystość [6,7,9].

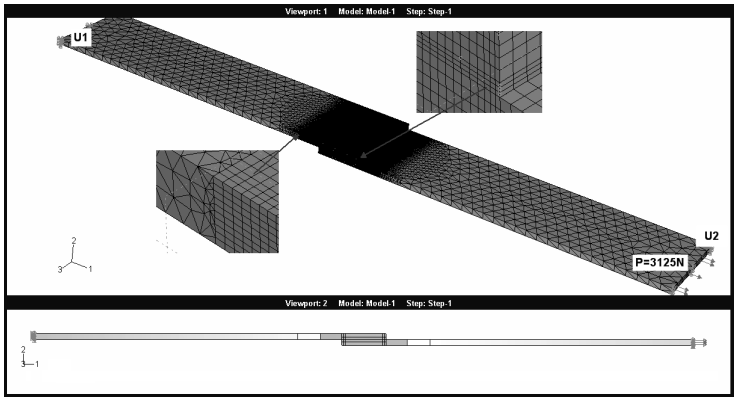
W połączeniach zakładkowych elementów klejonych mogą występować różne stany naprężenia w zależności od sposobu obciążenia połączenia. Na ogół największą wytrzymałość wykazują połączenia klejowe pracujące na czyste ścinanie i czyste odrywanie. W związku z tym połączenia klejowe konstruuje się tak, aby przenosiły w największym stopniu obciążenia ścinające i odrywające, w najmniejszym – oddzierające i zginające.

3. Budowa modelu połączenia klejowego

W prowadzonej analizie wykorzystano wiele modeli obliczeniowych różniących się od siebie parametrami siatki elementów skończonych, różnym podziałem siatek oraz zagęszczeniem w strefach lokalnych spiętrzeń naprężeń. Model obliczeniowy MES połączenia zakładkowego wykorzystanego jako model podstawowy przedstawia rys.2.

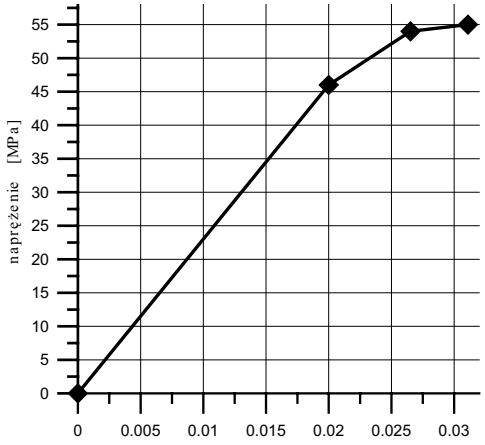
Model został wykonany jako złożenie dwóch płytek o wymiarach: długość płytki 100mm, szerokość 25 [mm], grubość 1,5 [mm], rozdzielonych warstwą kleju o wymiarach długość kleju 12,5 [mm], szerokość kleju 25 [mm], grubość kleju 0,15 [mm].

Jako materiał zakładek założono aluminium o module Yunga E=70 000 [MPa] oraz liczbie Poissona ν=0.34. Do obliczeń przyjęto dwie charakterystyki kleju: liniową i nieliniową. Liniowy materiał kleju - żywicę epoksydową Epidian - zbudowano w oparciu o następujące założenia: moduł Yunga E=2 500 [MPa] oraz liczba Poissona ν=0.34. Nieliniową charakterystykę kleju założono jako charakterystykę multilinearną zbudowaną w oparciu o krzywą uzyskaną na podstawie prób doświadczalnych - rys.3. [8].



Rys. 2. Model podstawowy do obliczeń MES

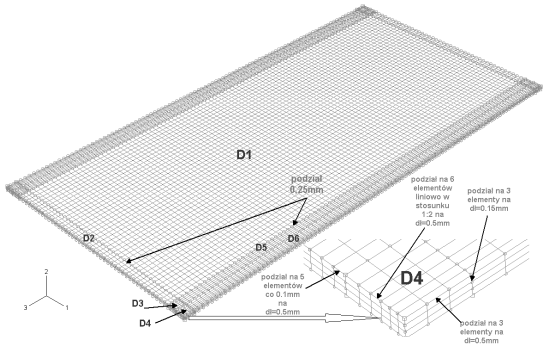
Fig. 2. Basic model to calculation FEM



Rys. 3. Nieliniowa charakterystyka kleju [8]

Fig. 3. Non-linear glue characteristic [8]

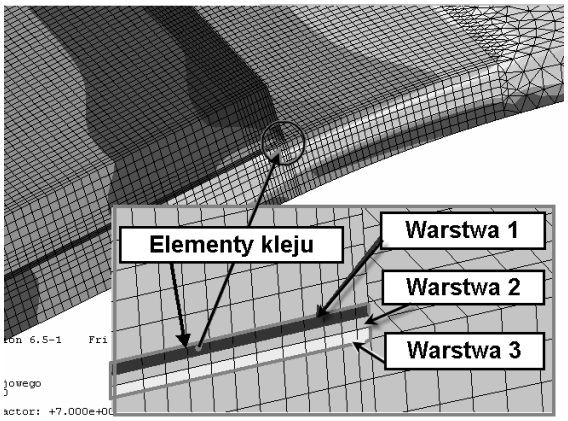
W modelu podstawowym element zakładki został podzielony na kilka stref, charakteryzujących się różna strukturą zastosowanej siatki elementów skończonych. Rozmieszczenie poszczególnych stref podziału warstwy kleju przedstawia rys. nr 4:



Rys. 4. Podział strefy wpływu kleju na partycje

Fig. 4. The division of glue influence zone

Klej został podzielony na warstwy zgodnie z rys.5.



Rys. 5. Podział kleju na 3 warstwy

Fig. 5. The division of glue for 3 layers

Warunki brzegowe oraz obciążenie zewnętrzne zdefiniowane zostały w globalnym układzie współrzędnych modelu opisanym osiami 1, 2, 3 (rys.2.) w sposób następujący:

- krawędź górnej płytki utwierdzono poprzez odebranie możliwości przemieszczenia węzłów we wszystkich kierunkach (1, 2, 3), modelując w ten sposób utwierdzenie modelu (brak rotacyjnych stopni swobody w węzłach elementów bryłowych) (U1na rys.2),
- na swobodnym końcu połączenia klejowego odebrano możliwości przemieszczenia na kierunkach 2 i 3 globalnego układu współrzędnych(U2 na rys.2).

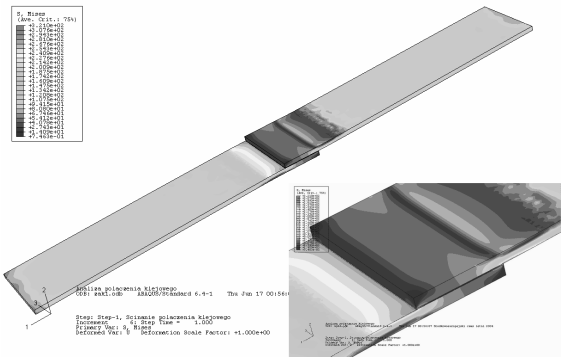
Obciążenie zewnętrzne modelu połączenia zakładkowego stanowi obciążenie stałe, przyłożone do swobodnego końca dolnej zakładki na kierunku „- 1" o wartości 3125 [N].

Zdefiniowane w powyższy sposób warunki brzegowe zastosowano w analizie numerycznej modelu złącza klejowego.

4. Analiza naprężeń w połączeniu klejowym

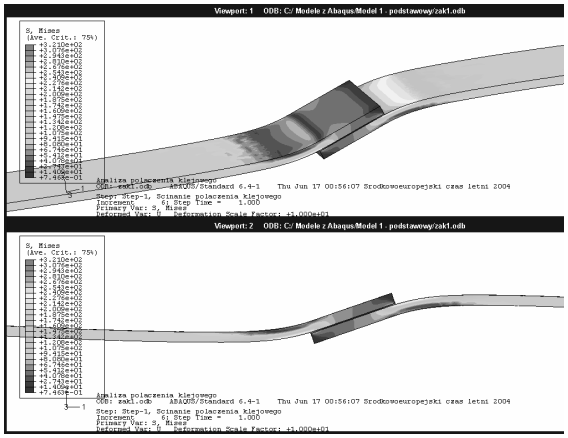
Analiza numeryczna prowadzona jest w kolejnych dyskretnych chwilach „czasu", którym odpowiada określony krok przyrostowy obciążenia, dając w efekcie całkowity poziom obciążenia konstrukcji. W rezultacie obliczeń otrzymujemy przebieg procesu deformacji w kolejnych przyrostowych krokach obciążenia. Jako wyniki zamieszczono wydruki staniu odkształconego połączenia klejowego oraz rozkłady naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera–Misesa) przedstawione w formie kolorowych map konturowych.

Rozkład naprężeń zredukowanych modelu podstawowego w formie map konturowych przedstawia rys.6 i 7:



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy wytrzymałościowej Huber-Misesa w połączeniu klejowym

Fig. 6. The distribution of reduced stress in adhesive joints by hypotheses Huber-Mises



Rys. 7. Postać deformacji połączenia klejowego

Fig. 7. Deformation of adhesive joint

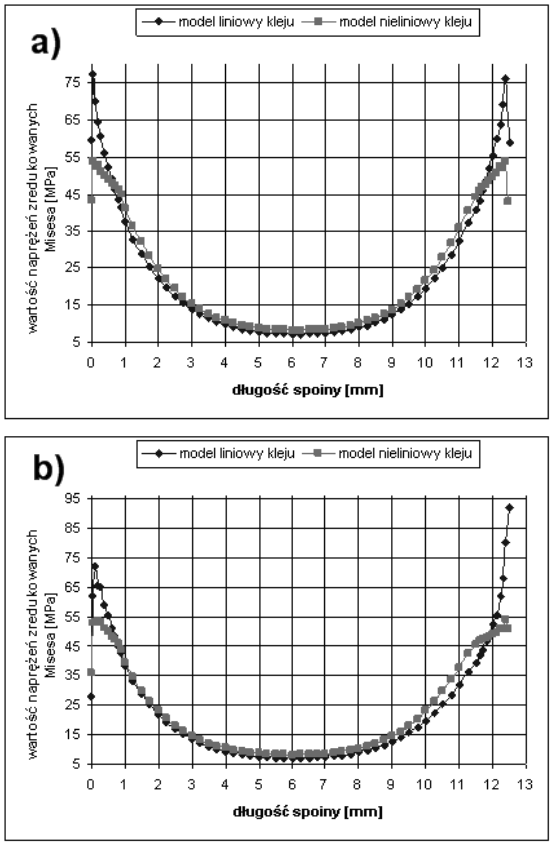
Przedstawione na rys. 6 i 7 rozkłady naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera Misesa wizualizowane są kolorami na powierzchniach elementów, którym odpowiadają konkretne wartości liczbowe określone w [MPa] zamieszczone w legendzie wydruku. Otrzymana postać odkształcenia konstrukcji pozwala stwierdzić, że zakładki połączenia klejowego znajdują się w złożonym stanie obciążenia – zginanie i ścinanie. Wartość naprężeń zredukowanych osiąga w tych strefach 321 [MPa].

5. Porównanie modeli z liniową i nieliniową charakterystyką kleju

W przeważającej większości analiz MES połączeń klejowych dominują te, w których dokonuje się uproszczenia ze względu na charakterystyki materiałów występujących w modelu w całym zakresie obciążania, przyjmując je jako idealnie liniowo sprężyste. Założenie to jest prawidłowe, ale tylko do momentu, w którym pod wpływem działającego obciążenia nie zostanie przekroczona pewna granica naprężeń. Od tego momentu charakterystyka materiału kleju zmienia się powodując wzrost odkształcenia materiału przy niewielkim skoku naprężenia. W związku z powyższym w celach porównawczych przeprowadzono analizę rozkładów naprężeń w połączeniu klejowym z uwzględnieniem liniowych i nieliniowych własności materiałowych kleju.

Na rys.8 a i b podano wyniki analiz otrzymanych dla modelu liniowego i nieliniowego kleju w postaci wykresów naprężeń zredukowanych wzdłuż długości spoiny klejowej.

Porównując rozkłady naprężenia możemy stwierdzić, że ich przebieg jest podobny, lecz różni się wartościami w strefach początkowych. Dla materiału liniowego obserwujemy gwałtowny wzrost średnich naprężeń zredukowanych na długości około 0,6 [mm] od krawędzi zakładki blisko o 61%, podczas gdy dla



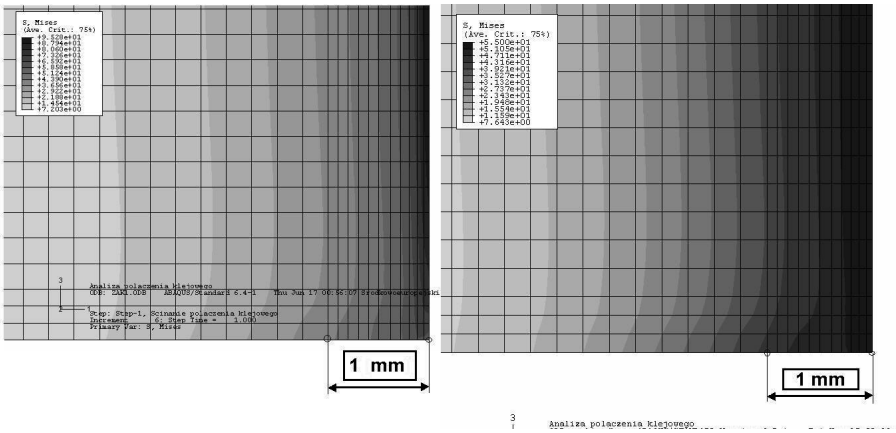
Rys. 8. Wykresy rozkładu: a)średniego naprężenia zredukowanego; b) naprężenia zredukowanego w wierzchniej warstwie kleju przy obciążeniu równym 3125 [N]

Fig. 8. The graphs distribution of: a) medium reduced stress; b) reduced stress in the glue layer by loading 3125 [N]

modelu nieliniowego wzrost ten wynosi tylko 37%. Jeszcze wyraźniej różnice naprężeń obserwowane są w warstwach wierzchnich kleju tuż przy końcach zakładek. W modelu liniowym naprężenia rosną na odcinku 0,6mm od wartości 52 do 92 [MPa] a na tej samej długości dla kleju nieliniowego od wartości 49-54 [MPa]. Taki wzrost naprężeń jest spowodowany różna charakterystyką modelowanego kleju, co przedstawia rys.9[10].

Różnice w rozkładzie naprężenia wzdłuż szerokości zakładki zostały pokazane na rys.10 a) i b). Analizując te rozkłady można stwierdzić, iż największy poziom naprężenie osiąga wartość w skrajnej warstwie, która przylega do zakładki w miejscu jej największego odkształcenia w odległości około 3 [mm] od naroży spoiny klejowej. Obserwujemy inny przebieg rozkładu naprężenia warstwach skrajnych w obu modelach kleju.

W zależności od przyjętego modelu otrzymujemy różne zakresy poziomów naprężenia maksymalnego

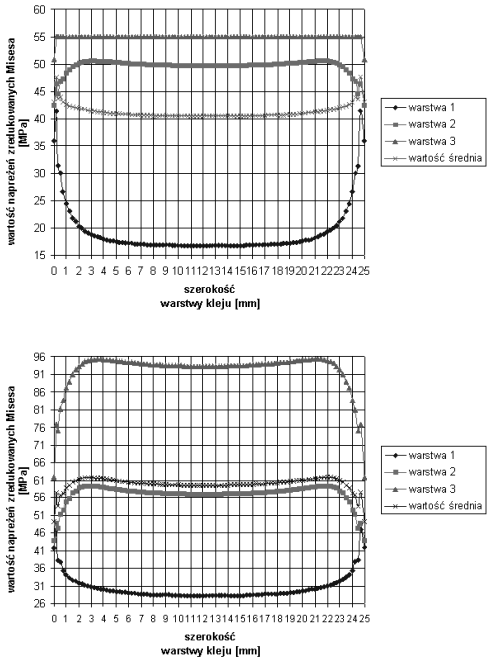


Rys. 9. Warstwice naprężeń zredukowanych w kleju liniowym i nieliniowym

Fig. 9. The conturlines of the reduced stress in non-linear and linear glue

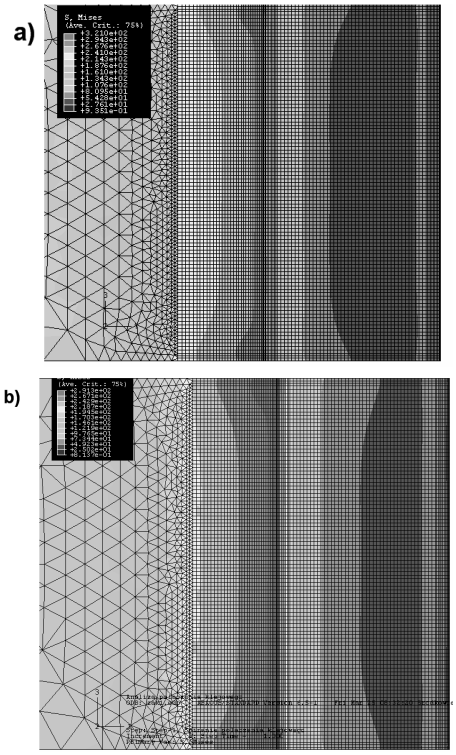
pomiędzy skrajnymi warstwami kleju. Różnice te wynoszą dla modelu nieliniowego około 13 [MPa] a dla liniowego 50 [MPa]. Są to znaczące różnice i mogą mieć one wpływ na ocenę nośności połączenia.

Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynika, że pominięcie nieliniowych właściwości materiałowych kleju powoduje popełnienie błędu w ocenie średnich naprężeń zredukowanych na końcach zakładki rzędu 30% a maksymalnych naprężeń zredukowanych w skrajnych warstwach na końcach spoiny klejowej rzędu 41%. Są to znaczące wartości i maja zasadniczy wpływ na prognozowanie wytrzymałości połączenia klejowego. Porównując naprężenia w materiałach zakładek można stwierdzić, że w obydwu modelach pozostają one na podobnym poziomie gdyż różnica w wartościach maksymalnych naprężeń zredukowanych nie przekracza 10%. Poziomy naprężeń w płytkach przedstawia rys. 11[10].



Rys.10. Wykresy rozkładu naprężenia zredukowanego wzdłuż szerokości zakładki: a) model kleju nieliniowego; b) liniowego

Fig.10. The graphs distribution of reduced stress in the glue layer by the width of glue



Rys. 11. Warstwice naprężeń zredukowanych w płytce: a) liniowym; b) nieliniowym

Fig. 11. The reduced stress layers in the lap: a) non-linear, b) linear

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej, można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Otrzymane w wyniku obliczeń MES rozkłady naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera-Misesa wzdłuż długości zakładki połączenia klejowego posiadają zbliżony charakter do analitycznej oceny stanu naprężeń.
2. Pomijanie wpływu charakterystyki nieliniowej materiału kleju może powodować zawyżanie maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych w na końcach zakładki. Może to być powodem błędów w ocenie nośności takiego połączenia.
3. Widoczny jest wpływ efektu brzegowego w analizie naprężenia. W klasycznych rozważaniach analitycznych na końcach zakładki naprężenia dążą do nieskończoności. Wynika to z przyjętych warunków brzegowych w rozwiązywanych równaniach różniczkowych. MES daje rozwiązania zbliżone do rzeczywistych warunków.

7. Literatura

1. Abaqus: *Getting started with ABAQUS*, Version 6.4, Abaqus Inc. 2003.
2. Abaqus: *ABAQUS/STANDARD User Manual Volume III*, Version 6.1, Abaqus Inc. 2000.
3. Abaqus: *Introduction to ABAQUS/CAE, Version 6.4*, Abaqus Inc 2003.
4. Abaqus: *Introduction to ABAQUS/CAE Workshop, Version 6.4*, Abaqus Inc 2003.
5. Cagle Ch.V.: *Kleje i klejenie*. WNT, Warszawa 1977.
6. Godzimirski J., Kotlarz W.: *Dobór modelu siatki elementów skończonych do obliczeń połączenia klejowego pakietem programów System WAT-KM*. Biul. WAT 494(1993) 10, 121-127.
7. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. WNT, Warszawa 2002.
8. Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Możliwości wykorzystywania MES do obliczania wytrzymałości połączeń klejowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu nr 2/2001, ss. 43–46.
9. Kuczmaszewski J.: *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
10. Kuczmaszewski J., Włodarczyk M.: *Multiscale modelling of damage and fracture processes in composite materials,* IUTAM Symposium, Abstract Books. Kazimierz Dolny, Poland 23-27 May 2005.

Mgr inż. Maciej WŁODARCZYK
Mgr inż. Jarosław FLISIAK
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Tel.:(81) 53-81-236
e-mail: m.wlodarczyk@pollub.pl

AKTUALNOŚCI PNTTE

W dniu 24 marca 2005r. odbyło się Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie PNTTE, na którym przyjęto następujące uchwały:

Uchwała nr 1
Nadzwyczajnego Walnego Zgromadzenia
PNTTE w dniu 24.03.2005

w sprawie przystąpienia PNTTE do Europejskiej Federacji Towarzystw Eksploatacyjnych (EFNMS)

Na podstawie § 4 ust. 1 i 2, § 8 ust. 7 statutu PNTTE, Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie wyraża wolę przystąpienia PNTTE do EFNMS (Europejska Federacja Narodowych Towarzystw Eksploatacyjnych). Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie zobowiązuje Zarząd PNTTE do wykonania niezbędnych czynności związanych z przystąpieniem do EFNMS.

Uchwała nr 2
Nadzwyczajnego Walnego Zgromadzenia
PNTTE w dniu 24.03.2005

w sprawie wydawania kwartalnika „Eksploatacja i Niezawodność"

Na podstawie § 7, § 8 ust. 5 statutu PNTTE, Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie postanawia podtrzymać wydawanie kwartalnika „Eksploatacja i Niezawodność" oraz wspomagać jego działalność i rozwój. Jednocześnie Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie zobowiązuje Zarząd PNTTE do wykonania niezbędnych czynności dotyczących uzupełnienia formalności związanych z istnieniem kwartalnika.

Uchwała nr 3
Nadzwyczajnego Walnego Zgromadzenia
PNTTE w dniu 24.03.2005

w sprawie zobowiązania członków PNTTE do publikacji naukowych w kwartalniku „Eksploatacja i Niezawodność"

Na podstawie § 8 ust. 1 statutu PNTTE, Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie postanawia zobowiązać każdą z komisji PNTTE do zgłoszenia co najmniej raz w roku artykułu naukowego do druku w kwartalniku „Eksploatacja i Niezawodność".

Uchwała nr 4
Nadzwyczajnego Walnego Zgromadzenia
PNTTE w dniu 24.03.2005

w sprawie zobowiązania do prenumeraty kwartalnika „Eksploatacja i Niezawodność" przez członków PNTTE

Na podstawie § 7, § 8 ust. 5 statutu PNTTE, Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie postanawia zobowiązać członków PNTTE do podjęcia skutecznych działań mających na celu zaprenumerowania kwartalnika „Eksploatacja i Niezawodność" przez instytucje, w których członkowie Towarzystwa pracują . Ponadto zobowiązuje się członków do działania na rzecz pozyskania prenumeratorów w innych instytucjach.

Uchwała nr 5
Nadzwyczajnego Walnego Zgromadzenia
PNTTE w dniu 24.03.2005

w sprawie przystąpienia PNTTE do „Środkowoeuropejskiego Porozumienia Towarzystw Eksploatacyjnych" z krajów: Czechy, Słowacja, Węgry, Polska

Na podstawie § 8 ust. 7 statut PNTTE, Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie postanawia o przystąpieniu do „Środkowoeuropejskiego Porozumienia o Współpracy Towarzystw Eksploatacyjnych" z krajów: Słowacji, Czech, Węgier i Polski. Współpraca będzie polegała na organizowaniu cyklicznych konferencji Eksploatacyjnych przez Towarzystwa Eksploatacyjne tych krajów.

Uchwała nr 6
Nadzwyczajnego Walnego Zgromadzenia
PNTTE w dniu 24.03.2005

w sprawie składek członkowskich i wpisowego dla członków zwyczajnych

Na podstawie § 24 ust. 7 statutu PNTTE, Nadzwyczajne Walne Zgromadzenie postanawia podwyższyć roczną składkę członkowską do kwoty 60 zł. Równocześnie Walne Zgromadzenie postanawia ,że część 2/3 składki odprowadzana jest na konto ogólne Towarzystwa, natomiast pozostała część składki pozostaje do dyspozycji komisji. Wpłaty składek członkowskich winny być zrealizowane nie później niż do końca stycznia danego roku. Ponadto ustala się wysokość wpisowego w kwocie 60 zł. Wpisowe pozostaje w dyspozycji komisji.

Uchwała wchodzi w życie od 01.01.2006r.

W dniu 24 maja w Paryżu Polskie Naukowo – Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne zostało pełnoprawnym członkiem Europejskiej Federacji Narodowych Towarzystw Eksploatacyjnych (EFNMS). Reprezentantem PNTTE był dr Krzysztof Olejnik.