

**Czasopismo Naukowo-Techniczne  
Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszcy**

Scientific-Technical Journal of  
Mechanical Engineering Faculty of UT&LS Bydgoszcz



# **POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ**

DEVELOPMENTS  
IN MECHANICAL  
ENGINEERING

**6(3)**

**2015**

Wydawnictwa Uczelniane  
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
w Bydgoszcy



**ZESPÓŁ REDAKCYJNY**  
**EDITORIAL BOARD**

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

**Redaktorzy Działowi – Branch editors:**

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

**MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA**  
**INTERNATIONAL PROGRAMME COMMITTEE**

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

Maria ČZARNOGURSKÁ (SK)	Edmund DULCET (PL – UTP)
Jurek DUSZCZYK (NL)	Friedrich FRANEK (A)
Andrzej GOŁĄBCZAK (PL – PL)	Henryk HOLKA (PL – UTP)
Lidia ILIEVA-MITUTSOVA (BG)	Marian JANCZAREK (PL – PL)
Tomasz KICZKOWIAK (PL – PKo.)	Tomasz LIPIŃSKI (PL – UWM)
Ivan OBORSKI (Uk)	Dariusz OZIMINA (PL – PŚw.)
Manfred PAHL (D)	Kazimierz PESZYŃSKI (PL – UTP)
Jindřich PETRUŠKA (CZ)	Raj B.K.N. RAO (GB)
<u>Yurij SHALAPKO (Uk)</u>	Vasily S. SHEVCHENKO (BL)
Marian SZCZEREK (PL – ITE PIB)	Zdeněk TRÁVNÍČEK (CZ)

Opracowanie redakcyjne i techniczne – mgr Michał Górecki, mgr inż. Tomasz Szałajda

Projekt okładki – mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
Bydgoszcz 2015

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

ISSN 2300-3383

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
Redaktor Naczelny: prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski  
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426  
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl    <http://www.wu.utp.edu.pl>  
Wyd. I. Nakład 80 egz. Ark. aut. 4,5. Ark. druk. 5,25.  
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

SPIS TREŚCI  
CONTENTS

Angela Andrzejewska, Tomasz Topoliński Polimery biodegradowalne do zastosowań biomedycznych ..... 5 Biodegradable polymers for biomedical applications	5
Maciej Kotyk, Sebastian Józwiak, Paweł Maćkowiak Projekt programu ekspertowego do krótkookresowych przebiegów diagnostycznych pojazdów silnikowych ..... 13 Draft of expert program for short-term diagnosis of engine vehicles	13
Paweł Maćkowiak, Bogdan Ligaj Analiza rozwiązań konstrukcyjnych egzoskieletów palców ręki ..... 23 Design solution of hand fingers exoskeleton	23
Katarzyna Matuszczak, Józef Flizikowski Zagadnienia ogólne dotyczące obciążenia środowiska w cyklu życia elektrowni wiatrowej ..... 35 General issues in the environmental load in life cycle of power wind	35
Stanisław Mroziński, Radosław Skocki Wpływ temperatury na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej ..... 43 Temperature influence on the fatigue life calculation results	43
Robert Polasik, Kamil Zimnicki Projekt i analiza wytrzymałościowa stojaka motocyklowego w środowisku autodesk inventor ..... 57 Design and strength analysis of motorcycle rack, using autodesk inventor software	57
Piotr Szewczykowski Design thinking – metodyka rozwiązywania problemów ..... 67 Design thinking – methodology for solving problems	67

Tomasz Żuk, Krzysztof Królikowski	
Demontaż chłodziw pojazdów samochodowych z wykorzystaniem nowatorskiego urządzenia do ich recyklingu .....	75
Disassembly of vehicle coolers with the use of an innovative cooler recycling device	
Lista recenzentów prac opublikowanych w numerach 5(3) 2015 oraz 6(3)2015 .....	81
Reviewers list publication published in issues 5(3) 2015 and 6(3) 2015	

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 5-12

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Angela ANDRZEJEWSKA, Tomasz TOPOLIŃSKI

**POLIMERY BIODEGRADOWALNE DO ZASTOSOWAŃ  
BIOMEDYCZNYCH**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono możliwości zastosowania materiałów polimerowych jako medycznych materiałów konstrukcyjnych. Dokonano charakterystyki syntetycznych polimerów biodegradowalnych najczęściej stosowanych w produkcji implantów krótko- i długoterminowych oraz mechanizmu ich degradacji. Przedstawiono również przykłady zastosowań charakteryzowanych materiałów i określono możliwe kierunki rozwoju zastosowań tych materiałów.

**Słowa kluczowe:** polimery, degradacja hydrolityczna, materiały biomedyczne

## 1. WPROWADZENIE

Rozwój medycyny związany jest z nieustannym poszukiwaniem nowych rozwiązań w zakresie poprawy zdrowia i jakości życia pacjentów. W poszukiwaniu nowych materiałów dąży się do uzyskiwania materiałów biomedycznych o jeszcze lepszej biogodności i tolerancji układu immunologicznego. Dużym zainteresowaniem ze strony badaczy, o czym świadczy liczba dostępnych publikacji naukowych i wynalazków, cieszą się materiały, które poprzez swoje specyficzne właściwości są w stanie w pełni zintegrować się z tkankami ustroju lub zostać z niego samoczynnie usunięte, gdy zostanie spełniona ich funkcja.

Wszystkie te materiały nazywane są biomateriałami, czyli substancjami syntetycznymi bądź naturalnymi, mającymi kontakt z tkankami organizmu. Wykorzystuje się je między innymi w celu zastąpienia całości lub części pojedynczych tkanek i organów. Wśród biomateriałów zastosowanie znajdują takie tworzywa, jak metale, ceramika, polimery, materiały węglowe i kompozytowe [12, 16]. Jednakże to tworzywa polimerowe oraz kompozyty z ich udziałem charakteryzują się największą biotolerancją w środowisku tkanek i płynów ustrojowych, a tylko niektóre z nich wykazują pożądaną zdolność do degradacji, w miarę upływu czasu od ich implantacji w ustroju.

Obok biotolerancji, materiały do zastosowań wewnątrzustrojowych powinny charakteryzować się odpowiednimi właściwościami mechanicznymi i technologicznymi. Znajomość wszystkich wyżej wymienionych wymagań staje się

---

mgr inż. Angela ANDRZEJEWSKA, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,  
e-mail: Angela.Andrzejewska@utp.edu.pl

prof. dr hab. inż. Tomasz TOPOLIŃSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,  
e-mail: Tomasz.Topolinski@utp.edu.pl

podstawą do rozważań związanych z możliwościami doboru materiałów polimerowych do produkcji różnego rodzaju krótko- i długotrwałych implantów.

## 2. POLIMERY

Mianem materiałów polimerowych określa się substancje naturalne lub syntetyczne, których cechami charakterystycznymi są lekkość, odporność na korozję, a także w znaczącej części przypadków – brak zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego. Ich specyficzne właściwości i budowa, w odróżnieniu od metali i ceramiki, pozwoliły na wyodrębnienie ich jako samodzielnej grupy materiałów konstrukcyjnych [12, 15].

Ze względu na budowę chemiczną, polimery klasyfikuje się jako związki wielkocząsteczkowe, zbudowane z makrocząsteczek organicznych lub nieorganicznych, które łączą się w formę łańcucha polimerowego za pomocą oddziaływań kowalencyjnych, koordynacyjnych, wodorowych i jonowych. Od charakteru wiązania merów zależą właściwości mechaniczne, fizykochemiczne, przetwórcze i użytkowe polimerów [26]. Wybrane polimery mają zdolność do degradacji, w wyniku czego można wyodrębnić je jako osobną podgrupę polimerów, zwaną polimerami biodegradowalnymi.

### 2.1. Otrzymywanie polimerów biodegradowalnych

Znane są różne rodzaje polimerów biodegradowalnych. Podział ten uwarunkowany jest sposobem ich otrzymywania. W związku z powyższym wyróżnia się grupę polimerów pochodzenia naturalnego oraz grupę polimerów pochodzenia syntetycznego. Polimery pochodzenia naturalnego dzielą się na trzy klasy: polisacharydy, białka i poliestry. Wśród polisacharydów najbardziej znanymi substancjami są: kwas hialuronowy, chityna i chitozan, celuloza; natomiast wśród białek kolagen i elastyna. Do biodegradowalnych polimerów syntetycznych stosowanych w medycynie należą: poli(kwas glikolowy), poli( $\beta$ -hydromaślan), poli(kwas mlekowy), poli(kwas asparaginowy) [2, 26].

Naturalne polimery biodegradowalne otrzymuje się z występujących w przyrodzie organizmów, np. kwas hialuronowy jest naturalnie syntezowany przez klasę integralnych białek błonowych (HAS1, HAS2, HAS3); chityna i chitozan są składnikami budulcowymi organizmów morskich bezkręgowców, owadów, a także występują w ścianach komórkowych niektórych grzybów; celulozę pozyskuje się w wyniku naturalnej syntezy fotochemicznej oraz z drewna i bawełny, natomiast kolagen i elastyna pozyskiwane są z tkanek łącznych ścięgien, gdzie naturalnie są syntezowane w fibroblastach [1, 17, 21, 23, 25, 28, 35].

Polimery syntetyczne otrzymuje się w wyniku kontrolowanych reakcji chemicznych, takich jak polikondensacja, polimeryzacja jonowa z otwarciem pierścieni cyklicznych, kataliza czy fermentacja bakteryjna. Odpowiednio za pomocą przedstawionych reakcji otrzymuje się poli(kwas mlekowy), poli(kwas glikolowy), poli( $\beta$ -hydromaślan), poli(kwas asparaginowy) [26].

## 2.2. Właściwości mechaniczne polimerów biodegradowalnych

Niezależnie od rodzaju materiału polimerowego (degradowalny bądź nie-degradowalny) obserwuje się, że jego właściwości mechaniczne zależą od masy cząsteczkowej. Średni wzrost masy cząsteczkowej powoduje wzrost lepkości oraz zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, ale również przyczynia się do zmniejszenia zdolności polimeru do krystalizacji, jeśli ma on zdolność do tworzenia fazy krystalicznej. Zauważono również, że oprócz masy cząsteczkowej polimeru istotny wpływ na jego odkształcalność oraz odporność chemiczną i termiczną ma także średnia długość makrocząsteczki [14].

Istotną różnicą właściwości mechanicznych polimerów i innych materiałów konstrukcyjnych jest wartość modułu sprężystości wzdłużnej, wynosząca dla wielu polimerów  $E = 0,00n \times 10^5$  MPa (dla stali wynosi  $2,09 \times 10^5$  MPa). Wzrost wartości modułu sprężystości wzdłużnej polimeru, jak również granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, twardości, gęstości oraz odporności termicznej związany jest ze zwiększeniem udziału fazy krystalicznej w polimerze. Zwiększenie udziału fazy krystalicznej, w przypadku tworzyw polimerowych zdolnych do krystalizacji, wpływa również na zmniejszenie: udarności, wytrzymałości zmęczeniowej, rozszerzalności cieplnej, zdolności do odkształcenia oraz higroskopijności polimerów [8, 14].

W przypadku stosowania polimerów zarówno degradowalnych, jak i nie-degradowalnych w konstruowaniu i produkcji wyrobów medycznych, należy zwracać uwagę na temperaturę zeszklenia materiału. Wzrost temperatury powoduje zmniejszenie modułu sztywności wyrobów polimerowych narażonych na pracę w środowisku stałocięplnego organizmu żywego. Dlatego też w aplikacjach medycznych należy wybierać materiały, których temperatura zeszklenia ( $T_g$ ) jest wyższa od temperatury ludzkiego ciała. Za najważniejszy aspekt wpływający na zmianę wytrzymałości mechanicznej materiałów polimerowych uważa się ich zdolność do degradacji pod wpływem równoczesnego oddziaływania czynników mechanicznych oraz chemicznych – płynów fizjologicznych [12, 15].

## 2.3. Mechanizm degradacji polimerów

Niszczenie łańcuchów polimerowych, prowadzące do zmniejszenia masy cząsteczkowej polimerów, może odbywać się w wyniku trzech różnych procesów, zależnych od rodzaju czynnika niszczącego, a także rodzaju otrzymywanego produktu rozpadu łańcucha. Procesami tymi są depolimeryzacja, destrukcja i degradacja. W wyniku depolimeryzacji, która jest reakcją przeciwną do polimeryzacji, polimer ulega rozkładowi do postaci monomeru. Destrukcja natomiast jest procesem zachodzącym pod wpływem działania czynników fizycznych i chemicznych, prowadzących do powstania związków małowcząsteczkowych innych niż monomer. Ostatnim zjawiskiem, które szerzej opisano poniżej, jest degradacja, polegająca na rozkładzie polimerów do dużych fragmentów o mniejszych niż wyjściowy polimer masach cząsteczkowych, jak również po-

lega na procesach inicjujących sieciowanie czy też tworzeniu się struktur rozgałęzionych [11, 27].

Degradacja polimerów może zachodzić w wyniku działania czynników biologicznych, chemicznych, fizycznych lub środowiskowych. Ze względu na badania przydatności materiałów polimerowych do zastosowań medycznych, oprócz czynników fizycznych, takich jak degradacja mechaniczna, zachodząca pod wpływem działania naprężeń, należy zwrócić uwagę na oddziaływanie środowiska, w którym dany biomateriał znajduje zastosowanie. Za jeden z najsilniej oddziałujących czynników degradujących polimerowe materiały biodegradowalne należy uznać czynniki chemiczne. Czynnikiem tym jest środowisko płynów ustrojowych, które w głównej mierze złożone jest z wody. Umieszczenie alifatycznych poliestrów w środowisku wodnym, prowadzi do absorpcji wody, która penetrując materiał zmienia gradient stężeń wody pomiędzy powierzchnią a częścią wewnętrzną materiału, w wyniku czego oddziaływanie cząsteczek wody i polimeru prowadzi do jego erozji na powierzchni lub w całej objętości [27, 32].

### **3. CHARAKTERYSTYKA NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH SYNTEZYCZNYCH POLIMERÓW BIODEGRADOWALNYCH**

Materiałami polimerowymi znajdującymi zastosowanie w aplikacjach medycznych są poli(kwas mlekowy) – PLA, poli(kwas glikolowy) – PGA, poli-ε-kaprolakton – PCL, poli(β-hydromaślan) – PHB.

#### **3.1. Poli(kwas mlekowy)**

Poli(kwas mlekowy), zwany również polilaktydem (PLA), jest alifatycznym poliestrem termoplastycznym, występującym w dwóch odmianach izometrycznych: lewoskrętnej (L) oraz prawoskrętnej (D). Syntetyczny kwas mlekowy jest odmianą racemiczną, charakteryzującą się równymi ilościami izomerów lewo- i prawoskrętnych [10, 26].

Polilaktyd występuje w postaci krystalicznej (nieprzezroczysty) lub amorficznej (przezroczysty), jego masa cząsteczkowa wynosi  $M = 1 - 3 \cdot 10^5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Ulega zeszkleniu w temperaturze  $T_g = 55^\circ\text{C}$  i topnieniu w temperaturze  $T_m \sim 180^\circ\text{C}$ , dlatego może być stosowany w rozwiązaniach biomedycznych. Nadaje się do przetwórstwa w atmosferze beztlenowej w temperaturze  $T = 185-190^\circ\text{C}$ . Średni moduł sprężystości wzdłużnej PLA wynosi 1,5-2,7 GPa. W wyniku procesu degradacji hydrolitycznej lub biologicznej trwającego 12-18 miesięcy, ulega rozpadowi do dwutlenku węgla i wody [10, 26].

#### **3.2. Poli(kwas glikolowy)**

Poli(kwas glikolowy), poliglikolid (PGA), jest również semikrystalicznym poliestrem termoplastycznym, w którym faza krystaliczna stanowi 45-55%. Charakteryzuje się niższą temperaturą zeszklenia ( $T_g = 35-45^\circ\text{C}$ ) oraz wyższą temperaturą topnienia ( $T_m = 225-230^\circ\text{C}$ ) niż polilaktyd. Moduł sprężystości



wzdłużnej PGA, wynoszący 5-7 GPa, jest ok. 2-krotnie wyższy niż PLA. Jednakże badania wykazują, że czas degradacji hydrolytycznej, prowadzącej do powstania kwasu glikolowego, jest szybszy niż w przypadku polilaktydu degradującego do wody i dwutlenku węgla i wynosi 3-4 miesiące [13, 26].

### 3.3. Poli- $\epsilon$ -kaprolakton

Poli- $\epsilon$ -kaprolakton (PCL) należy do grupy alifatycznych poliestrów termoplastycznych, o strukturze charakteryzującej się 45% udziałem fazy krystalicznej. W stosunku do innych polimerów biodegradowalnych, znajdujących zastosowanie w aplikacjach medycznych, cechuje się niskimi temperaturami zeszklenia ( $T_g = -60^\circ\text{C}$ ) i topnienia ( $T_m = 59-64^\circ\text{C}$ ). Jego średni moduł sprężystości wzdłużnej jest ok. 2-krotnie niższy niż PLA i wynosi 0,4-0,6 GPa, przy czym czas potrzebny do jego pełnej degradacji przewyższa okres 24 miesiące [34].

### 3.4. Poli( $\beta$ -hydromaślan)

Poli( $\beta$ -hydromaślan) (PHB) podobnie jak PGA jest semikrystalicznym poliestrem termoplastycznym, w którym procentowy udział fazy krystalicznej może wynosić 40-80%. Temperatura zeszklenia, wynosząca  $T_g = 0-5^\circ\text{C}$ , nie przekracza temperatury organizmu ludzkiego, jednakże mimo tego znajduje on zastosowanie w aplikacjach medycznych. Temperatura topnienia PHB ( $T_m = 180^\circ\text{C}$ ) jest zbliżona wartością do temperatury topnienia PLA. PHB cechuje się najniższym modułem sprężystości wzdłużnej w stosunku do innych polimerów biodegradowalnych, który wynosi ok. 0,04 GPa. Badania wykazują, że materiał ulega znacznie wolniejszej degradacji niż PLA [26].

## 4. ZASTOSOWANIE SYNTETYCZNYCH POLIMERÓW BIODEGRADOWALNYCH W MEDYCYNIE

Upowszechnianie materiałów biodegradowalnych w różnego rodzaju aplikacjach medycznych wiąże się z dążeniem do utrzymywania prawidłowości funkcjonowania żywego organizmu. Każda, nawet najmniejsza ingerencja ciała obcych, wprowadzonych w celach leczniczych do organizmu człowieka, wiąże się z reakcją układu immunologicznego. Z tego powodu dąży się do ograniczenia stosowania trwałych materiałów metalowych przez szersze wykorzystanie, zdolnych do degradacji po określonym czasie, tworzyw polimerowych. Wynika to z faktu, iż w niektórych przypadkach nie ma możliwości usuwania zbędnego implantu po okresie rekonwalescencji lub konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych zabiegów usuwających zbędne implanty, co dodatkowo obciąża organizm pacjenta bądź powoduje jego dyskomfort. Na podstawie dostępnych wyników badań oraz ofert producentów można wywnioskować, że do tej pory biodegradowalne materiały polimerowe znalazły szerokie zastosowanie w produkcji nici chirurgicznych [7, 32, 33], stentów lub graftów naczyniowych [3, 5, 20], płytek do zespożeń w obrębie twarzoczaszki [6, 24, 30, 31]. Pojawiają się również wzmianki o możliwości zastosowanie materiałów biodegradowalnych w osteosyntezie [4, 9, 18, 19, 29].

W tabeli 1 zestawiono przykładowe zastosowania biomedycznych polimerów biodegradowalnych.

Tabela 1. Zastosowania polimerów biodegradowalnych w aplikacjach medycznych  
Table 1. Application of biodegradable polymers as medical devices

Aplikacja medyczna	Czysty polimer	Kopolimery lub konformacje czystych polimerów
Nici chirurgiczne	poliglikolid polilaktyd polikaprolakton	poliglikolid-ko-poli-L-laktyd
		polilaktyd-ko-polikaprolakton
		poliglikolid-ko-polikaprolakton
Stenty i grafty naczyniowe	polilaktyd poliglikolid polikaprolakton polihydromaślan polihydroksywalerian poliakrylonitryl	poli-D,L-laktyd-ko-poliglikolid
		poli-L-laktyd
		poli-L-laktyd-ko-poliglikolid
		polihydroksymaślan-ko- polihydroksywalerian
Płytki do zespo- leń twarzoczaszki	polilaktyd węglan trimetylenu	poli-D,L-laktyd
		poli-L-laktyd-ko-poli-D,L-laktyd
		poli-L-laktyd-ko-węglan trimetylenu
Osteosynteza	poliglikolid polilaktyd polieteroeteroketon	poli-L-laktyd

## 5. PERSPEKTYWY ROZWOJU STOSOWALNOŚCI POLIMERÓW BIODEGRADOWALNYCH

Używane w długoterminowym leczeniu złamań kości implanty metalowe, mimo iż charakteryzują się wysoką wytrzymałością, są przyczyną wielu powikłań pooperacyjnych, stanowiących główne ograniczenie ich stosowania. Powikłaniami wynikającymi ze stosowania stabilizatorów metalowych są nieprawidłowe warunki osteosyntezy, prowadzące do zjawiska destabilizacji zespolenia. Wśród przyczyn destabilizacji wtórnej znaczenie ma stosowanie zbyt sztywnego układu implant-kość, a tym samym utrata ukrwienia odłamów kostnych. Dlatego też zauważa się konieczność tworzenia implantów biodegradowalnych od odpowiedniej sztywności, a zarazem wysokiej wytrzymałości. Implanty te pozwoliłyby na zmniejszenie ryzyka pojawienia się powikłań pooperacyjnych, bezpośrednio związanych ze stosowaniem zbyt sztywnych zespo-  
leń kości. Zastosowanie implantów biodegradowalnych, zwłaszcza do zespo-  
leń kości, niwelowałoby również konieczność przeprowadzania reoperacji w celu usunięcia zbędnego zespolenia, po prawidłowo zakończonym zabiegu rekonwalescencji złamanej kości.

### LITERATURA

- [1] ANDRZEJEWSKA A., MAZURKIEWICZ A.: Implanty do rekonstrukcji opony twardej – przegląd istniejących rozwiązań. Aktualne Problemy Biomechaniki 8, 2014, 7-12.

- [2] ARAVAMUDHAN A., RAMOS D.M., NADA A.A., KUMBAR S.G.: Chapter 4 – Natural Polymers: Polysaccharides and Their Derivatives for Biomedical Applications. Natural and Synthetic Biomedical Polymers, Elsevier, 2014.
- [3] BARTKOWIAK-JOWSA M., BĘDZIŃSKI R., CHŁOPEK J., FILIPIAK J., SZARANIEC B.: Comparative analysis of the deformation characteristics of biodegradable polymers considered as a material for vascular stents. *Polimery* 56, 2011, 224-231.
- [4] BÖSTMAN O., PIHLAJAMÄKI H.: Clinical biocompatibility of biodegradable orthopaedic implants for internal fixation: a review. *Biomaterials* 21, 2000, 2615-2621.
- [5] BRUCHMUELLER L., KRYNAUW H., BEZUIDENHOUT D., FRANZ T.: Processing and characterisation of polymeric biomaterials for tissue engineering and regeneration. Technical report CRU-BM-2010-01, University of Cape Town, 2010.
- [6] BUIJS G.J., HOUWEN E.B., STEGENGA B., VERKERE G.J., BOS R.R.M.: Mechanical Strength and Stiffness of the Biodegradable Sonic Weld Rx Osteofixation System. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 67, 2009, 782-787.
- [7] DENG M., ZHOU J., CHEN G., BURKLEY D., XU Y., JAMIOLKOWSKI D., BARBOLT T.: Effect of load and temperature on in vitro degradation of poly(glycolide-co-L-lactide) multifilament braids. *Biomaterials* 26, 2005, 4327-4336.
- [8] DUSUNCELI N., COLAK O.U.: Modelling effects of degree of crystallinity on mechanical behavior of semicrystalline polymers. *International Journal of Plasticity* 24, 2008, 1224-1242.
- [9] FAN Y., XIU K., DUAN H., ZHANG M.: Biomechanical and histological evaluation of the application of biodegradable poly-L-lactic cushion to the plate internal fixation for bone fracture healing. *Clinical Biomechanics* 23, 2008, S7-S16.
- [10] FELTON G.P. (red.): *Biodegradable Polymers: processing, degradation and applications*. Nova Science Publishers Inc., Nowy Jork, 2011.
- [11] GRABOWSKA B.: Biodegradacja tworzyw polimerowych. *Archives of Foundry Engineering* 10(2), 2010, 57-60.
- [12] JURCZYK M., JAKUBOWICZ J.: *Bionanomateriały*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2008.
- [13] KING M.W., GUPTA B.S., GUIDOIN R.: *Biotextiles as Medical Implants*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [14] KWIATKOWSKI D.: Teoretyczno-doświadczalna analiza wpływu warunków wtryskiwania i napełniaczy na odporność na pęknięcie wybranych kompozytów polimerowych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2012.
- [15] LEDA H.: *Materiały inżynierskie w zastosowaniach biomedycznych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012.
- [16] MARCINIAK J.: *Inżynieria biomateriałów. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2009.
- [17] MAZUREK P., KULIŃSKI S., GOSK J.: Możliwości wykorzystania chityny i chitozanu w leczeniu ran. *Polimery w Medycynie* 43(4), 2013, 297-302.
- [18] MEHBOOB H., CHANG S.H.: Application of composites to orthopedic prostheses for effective bone healing: A review; *Composite Structures* 118, 2014, 328-341.
- [19] MEHBOOB H., CHANG S.H.: Optimal design of a functionally graded biodegradable composite bone plate by using the Taguchi method and finite element analysis. *Composite Structures* 119, 2015, 166-173.
- [20] MILEWSKI K., TAJSTRA M.: Stenty bioresorbowalne – aktualny stan wiedzy. *Folia Cardiologica Excerpta* 7, 2012, 213-219.
- [21] NECAS J., BARTOSIKOVA L., BRAUNER P., KOLAR J.: Hyaluronic acid (hyaluronan): a review. *Veterinari Medicina* 53(8), 2008, 397-411.
- [22] OLCZYK P., KOMOSIŃSKA-VASSEV K., WINSZ-SZCZOTKA K., KUŹNIK-ROCHA K., OLCZYK K.: Hialuronian – struktura, metabolizm, funkcje i rola w procesach gojenia ran. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej* 62, 2008, 651-659.
- [23] PAWLAK A.: Implanty z celulozy bakteryjnej [online], dostęp w: <http://dolinabiotechnologiczna.pl/nawosci/implanty-z-celulozy-bakteryjnej/?print=pdf>.

- [24] PERTTI T., POHJONEN T., HAPPONEN H., KAIKKONEN A.: Bioabsorbable, deformable fixation plate. US 6692497 B1, Stany Zjednoczone Ameryki, 2004.
- [25] PIĄTKOWSKI M.: Chemiczna modyfikacja chitozanu w polu promieniowania mikrofalowego. *Czasopismo Techniczne Ch z. 1-Ch*, 2008, 101-113.
- [26] RABEK J.F.: *Polimery: Otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [27] ROJEK M.: Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej. *Open Access Library* 2, 2011, 11-31.
- [28] STRUSZCZYK M.H.: Chitin and Chitosan – Part II. Applications of Chitosan. *POLIMERY* 47(6), 2002, 396-403.
- [29] TAN L., YU X., WAN P., YANG K.: Biodegradable Materials for Bone Repairs: A Review. *Journal of Mechanical Science and Technology* 29, 2013, 503-513.
- [30] VÄÄNÄNEN P.: Testing of Biodegradable Bone Fixation Implants: In Vitro and Clinical Experiments with Plate-Screw Constructs, Doctoral dissertation, University of Kuopio, 2009.
- [31] VÄÄNÄNEN P., NURMI J.T., LAPPALAINEN R., JANK S.: Fixation properties of a biodegradable “free-form” osteosynthesis plate with screws with cut-off screw heads: Biomechanical evaluation over 26 weeks, *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology* 107, 2009, 462-468.
- [32] VIEIRA A.C., VIEIRA J.C., GUEDES R.M., MARQUES A.T.: Degradation and Viscoelastic properties of PLA-PCL, PGA-PCL, PDO and PGA fibres. *Materials Science Forum* 636-37(1), 2010, 825-832.
- [33] VIEIRA A.C., VIEIRA J.C., GUEDES R.M., MARQUES A.T., TITA V.: Visco-Elastic Properties of Suture Fibres Made of PLA-PCL. *Materials Science Forum* 730-732, 2013, 56-61.
- [34] WOODRUFF M.A., HUTMACHER D.W.: The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century, *Progress in Polymer Science* 35(10), 2010, 1217-1256.
- [35] WYBÓR W., ZABORSKI M.: Budowa i właściwości kolagenu oraz żelatyny. *POLIMERY* 45(1), 2000, 10-21.

## **BIODEGRADABLE POLYMERS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS**

**Summary:** In this paper was described possibility of use polymeric materials, as construction materials in medical applications. Also, they characterized most commonly used biodegradable polymers for short and long term implants, and mechanism of their hydrolytic degradation. Furthermore, was identified examples of characterized materials application and possible ways of development application biodegradable materials in medical sciences.

**Key words:** polymers, hydrolytic degradation, medical materials

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 13-22

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Maciej KOTYK, Sebastian JÓŹWIAK, Paweł MAĆKOWIAK

**PROJEKT PROGRAMU EKSPERTOWEGO  
DO KRÓTKOOKRESOWYCH PRZEGLĄDÓW  
DIAGNOSTYCZNYCH POJAZDÓW SILNIKOWYCH**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono propozycję kolejnego narzędzia dla diagnostów w postaci programu ekspertowego pomagającego zachować chronologię wykonywanych działań, jak również podpowiadającego określone rozwiązania w przypadku stwierdzenia niesprawności elementów diagnozowanego układu. Oprogramowanie jest podatne na dalsze modyfikacje wykonywane przez użytkownika zgodnie z jego zapotrzebowaniem wynikającym z środowiska pracy.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, układ hamulcowy, oprogramowanie, inżynieria mechaniczna

## 1. WSTĘP

Pojazdy samochodowe odgrywają ważną rolę w życiu codziennym. W głównej mierze są wykorzystywane do transportu towarów i ludzi. Ich niezaprzeczną zaletą jest możliwość relatywnie szybkiego dotarcia do celu nawet w trudnych warunkach. Wadą natomiast jest zawodność i skłonność do uszkodzeń. Ze względu na to pojazd samochodowy należy poddawać kontroli diagnostycznej i spełniać warunki użytkowania zalecane przez producenta tak, aby jego uszkodzenia nie występowały w sposób niekontrolowany lub katastrofalny. Podstawą do posiadania wiedzy określającej jednoznacznie zdolność pojazdu do wykonywania powierzonych zadań jest informacja dotycząca tak zwanego stanu technicznego. Wieloaspektowość procesu diagnostycznego, nadmierna liczba informacji dostarczanych za pomocą czytników kodów uszkodzeń lub w sposób organoleptyczny, może powodować wyciągnięcie nieprawdziwych wniosków, czyli niepoprawną diagnozę. Dzieje się tak najczęściej, gdy weryfikacja stanu technicznego jest wykonywana przez osoby z niepełnym stanem wiedzy ogólnej lub ograniczonymi informacjami dotyczącymi konkretnego, czasami nietypowego rozwiązania znajdującego się w obszarze zainteresowań diagnosty.

Konstruktorzy pojazdów samochodowych opracowują coraz doskonalsze systemy wyposażone w elektroniczne układy tworzące sprzężenie zwrotne, co

---

mgr inż. Maciej KOTYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: Maciej.Kotyk@utp.edu.pl

inż. Sebastian JÓŹWIAK, OSM Czarnków

mgr inż. Paweł MAĆKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

może w pewnym ograniczonym stopniu naśladować zdolność człowieka do kojarzenia ze sobą pewnych zjawisk. Pomimo iż maszyny przełamały barierę ograniczeń fizycznych człowieka, takich jak siła, szybkość wykonywania elementów, jak również precyzja, to żadne z nich nie jest w stanie rozwiązywać zaawansowanych problemów, które wymagają rozwikłania poprzez proces myślenia człowieka. Maszyna wyposażona w dobrze opracowany system komputerowy tego typu może być uznawana za eksperta w pewnym bardzo wąskim zakresie, jednak jest to jedynie proces odtwórczy nieniosący za sobą znamion kreatywności [4].

Prezentowany algorytm został zaprojektowany na potrzeby własne i na podstawie własnych doświadczeń. Przy czym należy mieć na uwadze, że programu tego nie należy traktować jako pełnowymiarowego programu ekspertowego w porównaniu z komercyjnymi odpowiednikami. Stanowi on jednak propozycję programu, którego adaptacja i modyfikacja wykonana na potrzeby indywidualnych użytkowników może wyeliminować potrzebę zatrudniania diagnostów, a praca z użyciem opisywanego oprogramowania nie umożliwi pominięcia najistotniejszych elementów, składających się na obsługę pojazdów samochodowych.

Celem projektowanego programu jest ograniczenie udziału wykwalifikowanego diagnosty podczas przeglądów krótkookresowych, a także eliminacja błędów wynikających z tak zwanego czynnika ludzkiego.

## **2. BUDOWA I RODZAJE ELEMENTARNYCH SYSTEMÓW EKSPERTOWYCH**

Systemem ekspertowym można nazywać specjalistyczne oprogramowanie komputerowe, które realizuje określone zadania z odpowiednią precyzją i dokładnością. Powinien również na podstawie wprowadzonych lub zebranych za pomocą czujników danych i sygnałów podejmować decyzję, a także wyciągać wnioski sformułowane na podstawie wcześniej opracowanej i wprowadzonej bazy wiedzy [3].

Projektowanie i wdrażanie opisywanych systemów ma na celu redukcję kosztów związanych z procesem diagnozowania, a także przyspieszenie i usprawnienie dokonywania ostatecznej weryfikacji zdolności zadaniowej pojazdów. Proces ten jest możliwy poprzez wykorzystywanie baz wiedzy wprowadzonych do programu. Ponadto systemy ekspertowe pozwalają na jednoznaczne określenie wartości granicznych, dzięki którym możliwe jest określenie, czy dany element lub układ może być dalej eksploatowany.

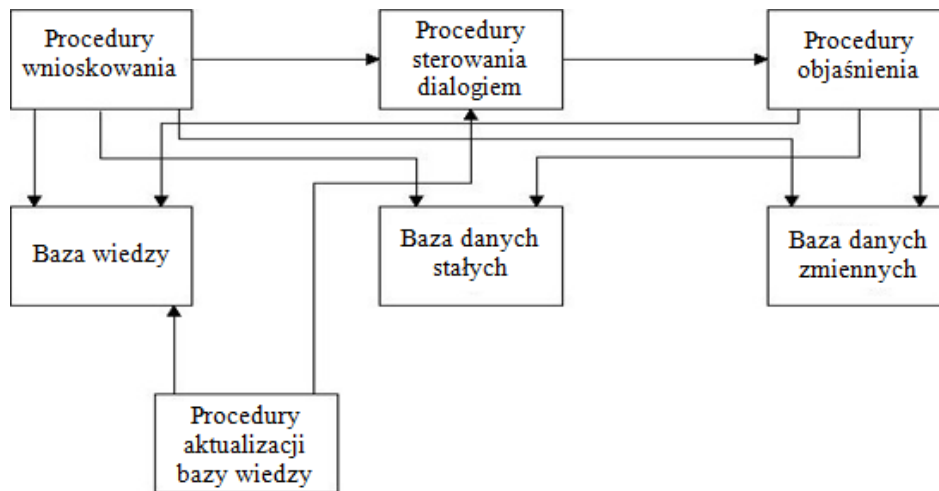
Ze względu na automatyzację pewnych procesów i możliwość opracowania sprzężenia zwrotnego w szeroko pojętych automatach wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje systemów ekspertowych [2]:

- systemy ekspertowe doradcze (*advisory*),
- systemy ekspertowe podejmujące decyzje bez udziału ludzi (*dictatorial*),
- systemy ekspertowe krytykujące (*critcizing*).

Programowanie systemów ekspertowych jest zagadnieniem związanym z tak zwaną inżynierią wiedzy, której zadaniem jest segregacja, przetwarzanie a przede wszystkim pozyskiwanie informacji dotyczących rozpatrywanego zagadnienia, a także rozwój zaplecza, tj. narzędzi i ich ergonomiczności w środowisku pracy, jak również ich optymalizacja [1].

Wybrane elementy systemu ekspertowego przedstawiono w sposób schematyczny na rysunku 1. Jego najważniejszymi elementami są [1]:

- źródło reguł (baza wiedzy zebrana na podstawie doświadczeń ekspertów),
- informacje o obiekcie (wartości krytyczne parametrów pracy),
- procedury wnioskowania (algorytmizacja),
- system objaśnień (komunikaty dla diagnosty),
- procedury sterowania dialogiem (interfejs, komunikacja z użytkownikiem),
- możliwość rozszerzenia programu o kolejne elementy bazy lub modyfikacje już istniejącej poza środowiskiem programistycznym.



Rys. 1. Podstawowe elementy budowy systemu ekspertowego [2]

Fig. 1. The essential elements of concept an expert system [2]

### 3. CELE STOSOWANIA SYSTEMÓW EKSPERTOWYCH

Systemy ekspertowe są opracowywane i programowane w celu wydawania możliwie dokładnej ekspertyzy. Jest to ich zasadnicze zadanie, dlatego też kryterium zdatności danego programu ekspertowego dotyczy szybkości dokonania diagnozy oraz jej zgodności ze stanem faktycznym. Weryfikacja takiego programu odbywa się za pomocą porównania szybkości pracy programu oraz sa-

mej diagnozy wówczas, gdy to samo zagadnienie podejmuje osoba uznawana za eksperta w danej dziedzinie. Mimo iż sposób weryfikacji wydaje się nieskomplikowany i biorąc pod uwagę, że oprogramowanie pracuje na zasadzie układu szeregowego w pętli sprzężenia zwrotnego, to odpowiedź można uzyskać po kilku sekundach, jak również po wielu godzinach, natomiast ekspert po charakterze pracy urzędnika podejmuje decyzję bez dłuższego namysłu. Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem bazy wiedzy wydłuża się czas analizy poszczególnych zagadnień ze względu na złożony charakter budowy systemu [1, 2]. Pozostaje jeszcze zagadnienie trafności podejmowanej decyzji, jednak rozpatrywać można to jedynie w indywidualnym podejściu dla pojedynczego przypadku.

Kolejnym celem, dla którego stosuje się systemy ekspertowe, jest ich wielozadaniowość. Jest to ich zasadnicza różnica pomiędzy prostymi systemami diagnostycznymi. System ekspertowy traktuje postawione zadanie nie tylko w obrębie jednego układu, ale wszystkich układów kompleksowo, ponieważ one wzajemnie na siebie wpływają. Przykładem może być układ hamulcowy i pneumatyczny. Jeżeli ciśnienie sprężonego powietrza atmosferycznego jest niedostateczne, to siła hamowania na kołach bezsprzecznie będzie niewystarczająca do uzyskania odpowiedniej skuteczności. System ekspertowy powinien kojarzyć ze sobą te dwa wzajemnie przenikające się elementy i zdiagnozować niesprawny układ pneumatyczny.

Niezaprzeczalnie budowa, opracowywanie i programowanie jest procesem długotrwałym i kosztownym, dlatego w przypadku wąskiej dziedziny i małej powtarzalności procesu, tj. niewielkiej liczby przewidywanych obiektów poddanych analizie, zastosowanie systemu jest nieopłacalne. Celem jednolitego rozgraniczenia programów ekspertowych i określenia ich ewentualnej przydatności wprowadzono kryterium wielkościowe, tj. podziału na małe, średnie i duże [4].

#### **4. BAZA WIEDZY, NA PODSTAWIE KTÓREJ NAPISANO PROGRAM**

Budowa programu ekspertowego jest bardzo obszerna, dlatego zdecydowano ograniczyć się do jego zastosowania jedynie dla układu hamulcowego pojazdu silnikowego. Programowanie przeprowadzono za pomocą narzędzia DevC++ w wersji 4.9.9.2. Opisywany program jest środowiskiem wykorzystującym język programowania C/C++. Zaletami proponowanego rozwiązania są bardzo przyjazne, w pewnych elementach nawet intuicyjne narzędzia, z których korzystanie nie wiąże się z większymi kosztami. Edytor programu DevC++, w który wpisuje się wcześniej opracowany kod, pracuje w systemie okienkowym i funkcjonuje z użyciem podświetlenia składni, debugera, linkera i testera kodu powszechnie nazywanego kompilatorem.

Najważniejszym elementem programu ekspertowego jest baza wiedzy, na podstawie której opracowano poszczególne linijki programu, a przede wszystkim jego odpowiedzi na wymuszenia formułowane przez użytkownika. Jest to element kluczowy ze względu na to, że na podstawie wprowadzonych definicji



program będzie formułował hipotezy. Poza tym baza wiedzy określa w pewien sposób etapy podejmowania diagnozy, a co się z tym wiąże – kolejność wykonywania działań diagnostycznych. W sposób bezpośredni pomaga określeniu poprawnej diagnozy.

Opisywana propozycja programu ekspertowego dotyczy diagnozowania pojazdów samochodowych, więc ma formę zapytań i odpowiedzi na podstawie binarnych łączników TAK lub NIE. W przypadku wystąpienia negacji program wyświetla komunikaty pomagające usunąć uszkodzenie.

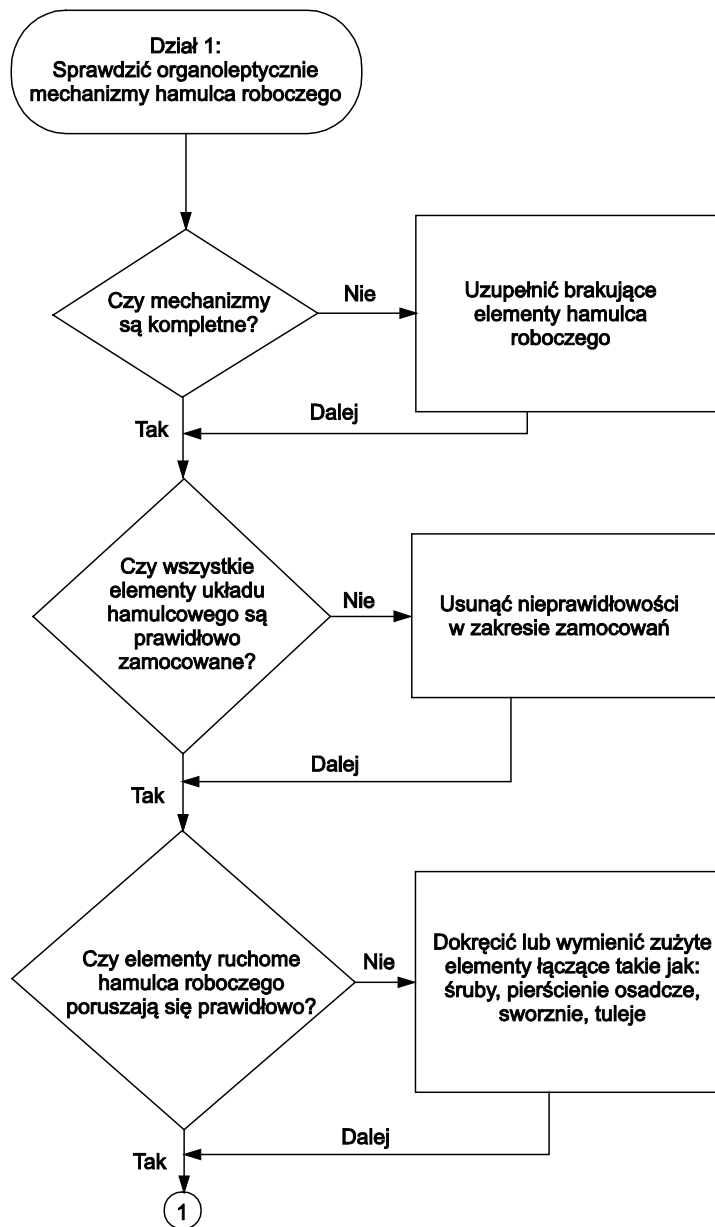
Opisywany program podzielono za pomocą schematów blokowych, ułożonych i powiązanych ze sobą, na podstawie algorytmów na 5 niezależnych części. Każda z nich dotyczy jednego z wyróżnionych układów w pojeździe samochodowym. Ze względu na obszerność materiałową i informacyjną wszystkich wyróżnionych obszarów postanowiono przedstawić funkcjonowanie programu wyłącznie na podstawie układu hamulcowego. Niemniej jednak program w pewnym zakresie pomaga dokonać diagnozy następujących układów:

- hamulcowego,
- jezdnego,
- kierowniczego,
- napędowego,
- zawieszenia.

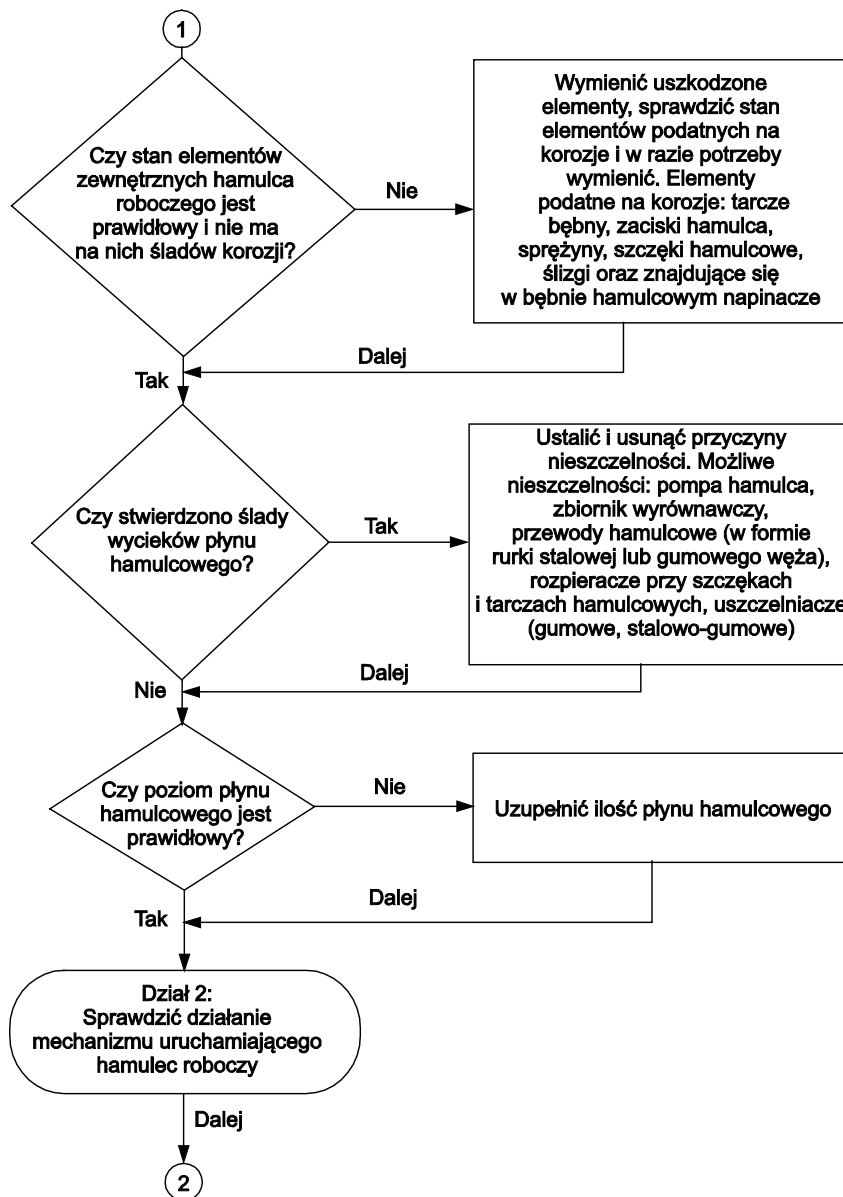
Gdy użytkownik uzyska pozytywną odpowiedź na wszystkie postawione przez program pytania, otrzyma informację o zdatności diagnozowanego układu.

Opisywany układ hamulcowy został rozpatrzony wyłącznie pod względem mechanicznym, tj. bez wspomagających układów funkcjonujących przy udziale sygnałów elektrycznych, takich jak system ABS czy ASR. Układ hamulcowy w myśl przepisów o ruchu drogowym ma przynajmniej dwa niezależnie działające od siebie układy. Mogą one mieć wspólne elementy robocze, jednak mechanizm ich uruchamiania musi być inny. To zdarzenie zostało uwzględnione podczas projektowania programu ekspertowego. Baza wiedzy przedstawiona w artykule składa się z odpowiedzi i sugestii naprawy bloku zbudowanego z 18 pytań i odpowiedzi, podzielonych na 4 główne działy.

W celu zilustrowania schematu działania oprogramowania pierwszy z nich w formie blokowej został przedstawiony na rysunku 2 oraz 3.



Rys. 2. Pierwsza część bloku 1 do diagnozowania układu hamulcowego  
Fig. 2. The first part of unit 1 for the diagnosis of the braking system

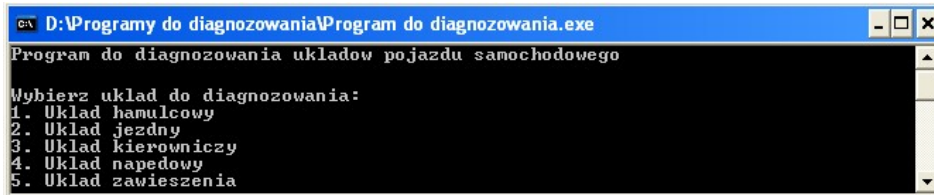


Rys. 3. Druga część bloku 1 do diagnozowania układu hamulcowego  
 Fig. 3. The second part of unit 1 for the diagnosis of the braking system

## 5. DZIAŁANIE PROGRAMU EKSPERTOWEGO ZBUDOWANEGO NA PODSTAWIE ZAPROPONOWANEJ BAZY WIEDZY

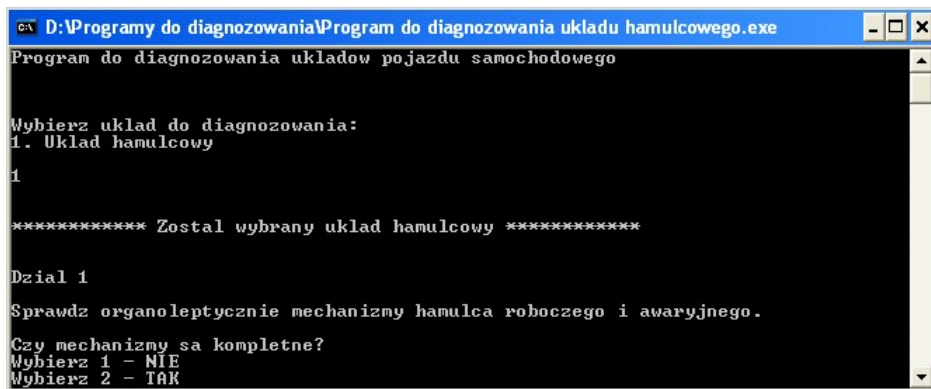
Zgodnie z wcześniejszymi założeniami program został podzielony na 5 niezależnych podprogramów, mających zastosowanie przy diagnozowaniu jednego z wyróżnionych układów (rys. 4). Wybór poszczególnych elementów

menu programu odbywa się za pomocą wyboru z klawiatury odpowiedniego klawisza numerycznego i zatwierdzenie wyboru klawiszem „Enter”. Po dokonaniu konkretnego wyboru poprzez zatwierdzenie lub zaprzeczenie na odpowiednie pytanie, aplikacja sięga do bazy wiedzy, jakie czynności powinna dalej wykonywać.



Rys. 4. Numeracja układów  
Fig. 4. The numbering system

Po wybraniu jednego z układów program realizuje pracę w pierwszym dziale podprogramu 1 (rys. 5). Praca przy użyciu pozostałych podprogramów odbywa się tak samo jak na opisanym przykładzie.



Rys. 5. Realizacja podprogramu 1  
Fig. 5. Implementation of the subprogram 1

Po zidentyfikowaniu problemu, program rozpoczyna stawianie pytań użytkownikowi (diagnoście), dotyczących zdefiniowanych w bazie wiedzy czynności. W przypadku gdy użytkownik odpowie twierdząco, program przejdzie dalej, natomiast gdy użytkownik odpowie przecząco, program wyświetli gałąź niejawną, tzn. szereg wiadomości podpowiadających diagnoście, jakie czynności powinien wykonać w celu usunięcia uszkodzenia w taki sposób, aby możliwe było realizowanie kolejnych etapów programu.

Z różnych względów użytkownik może nie chcieć wykonywać czynności diagnostycznych tak, jak narzuca to program. Z uwagi na to postanowiono umożliwić pominięcie realizacji poszczególnych linijek. Podobnie jest w przy-

padku wyświetlania porady naprawczej. Przykładowe odpowiedzi programu na wymuszenia użytkownika przedstawiono na rysunku 6.

```
ex D:\Programy do diagnozowania\Program do diagnozowania układu hamulcowego.exe
Wybierz 2 - TAK
1

Czy poziom płynu hamulcowego jest prawidłowy?
Wybierz 1 - NIE
Wybierz 2 - TAK
1
Uzupełnić ilość płynu hamulcowego.

Dział 2
Sprawdzić działanie mechanizmu uruchamiającego hamulec roboczy.

Czy wartość skoku jałowego pedału hamulca jest prawidłowa?
Wybierz 1 - NIE
Wybierz 2 - TAK
1
Wyregulować skok jałowy hamulca poprzez regulację luzu na sworzniach i cięgnach
lub wymienić zużyte elementy mechanizmu uruchamiającego pompe hamulcowa.
```

Rys. 6. Przykładowe odpowiedzi programu  
Fig. 6. Example response program

W przypadku gdy cały proces diagnozowania zostanie zrealizowany i wszystkie odpowiedzi stawiane przez program będą twierdzące, to program powiadomi użytkownika o zdadności układu. Opisany przypadek przedstawiono na rysunku 7.

```
ex D:\Programy do diagnozowania\Program do diagnozowania układu hamulcowego.exe
Czy podczas hamowania występują nienormalne efekty wibroakustyczne?
Wybierz 1 - NIE
Wybierz 2 - TAK
2
Wykonac regulacje. Wymienic zwichrowane tarcze hamulcowe, okladziny. Wyrównac fałdowosc
powierzchni oporowej (tarcza hamulcowa beben).

***** Układ zdadny *****
Aby zakonczyc prace z programem wybierz 1
-
```

Rys. 7. Informacja o zdadności układu  
Fig. 7. Information about suitability of the system

## 6. WNIOSKI

1. Konstruowanie bazy wiedzy wymaga dużego nakładu finansowego, czasowego oraz współpracy z osobami uznanymi za ekspertów w danej dziedzinie wiedzy.

2. Program ekspertowy w znaczny sposób ułatwia i ujednolica wykonywanie zabiegów diagnostycznych.
3. DevC++ jest prostym w obsłudze narzędziem do programowania w języku C++, który można wykorzystać nie tylko w dziedzinie nauk technicznych.
4. Pożądaną cechą wszelkiego rodzaju narzędziowych programów komputerowych jest możliwość uruchamiania ich na architekturze wielu systemów operacyjnych.
5. Wykorzystywanie programów ekspertowych pozwala na ograniczenie, lub nawet wyeliminowanie błędów spowodowanych przez tak zwany czynnik ludzki.

#### LITERATURA

- [1] MULAWKA J.J.: Systemy ekspertowe. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
- [2] NIEDERLIŃSKI A.: Regułowe systemy ekspertowe. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2000.
- [3] STEFENOWICZ B.: Systemy eksperckie przewodnik. Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej i Zarządzania, Warszawa, 2001.
- [4] ŚWIĄTNICKI W., ŚWIĄTNICKI Z.: Bronie inteligentne. Wydawnictwo Bellona, Warszawa, 1992.

#### **DRAFT OF EXPERT PROGRAM FOR SHORT-TERM DIAGNOSIS OF ENGINE VEHICLES**

**Summary:** The process of diagnosing vehicles is complicated, expensive and requires a time consuming. The person performing the diagnostic process has to be high qualified and skilled to use the tools to establish some values beyond which excludes, temporarily or permanently, vehicle from traffic. The article concerns the proposals of additional diagnostic method with use of the expert program. Its purpose is to help maintain a certain chronology of performed operations and give a proposal of solution.

**Key words:** diagnostics, braking systems, software, mechanical engineering

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 23-34

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Paweł MAĆKOWIAK, Bogdan LIGAJ

**ANALIZA ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH  
EGZOSZKIELTÓW PALCÓW RĘKI**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono istniejący stan wiedzy dotyczący egzoszkiele-  
letów palców ręki. Na podstawie analizy istniejących rozwiązań konstrukcyjnych  
scharakteryzowano egzoszkielety ręki. Celem pracy jest prezentacja własnej kon-  
cepcji urządzenia, będącej modyfikacją egzoszkieletu Shieldsa. Mimo dużego po-  
pytu na egzoszkielety ręki, obecne rozwiązania nie spełniają oczekiwań pacjentów  
i lekarzy. Ze względu na wiele stopni swobody, jakie ma ludzka ręka, konieczny  
jest kompromis pomiędzy uproszczeniem urządzenia a umożliwieniem wykonania  
chwytów podstawowych.

**Słowa kluczowe:** egzoszkielec, ręka, palce

## 1. WSTĘP

Wpływ niepełnosprawności pacjentów nie ogranicza się tylko do kosztów  
leczenia. Utrata dobrego samopoczucia psychicznego, aktywności i produktyw-  
ności nie dotyczy tylko pojedynczego człowieka, ale całego społeczeństwa [6].

W przypadku udarów mózgu największe efekty usprawniania leczniczego  
uzyskuje się w pierwszych miesiącach leczenia. Leczenie niedowładów polega  
na wykonywaniu przez terapeutę ruchów kończyn pacjenta, mających na celu  
zreorganizowanie systemu nerwowego, czyli przejęcie przez aktywne neurony  
funkcji, jakie pełniły neurony uszkodzone. Ćwiczenia takie wymagają obecno-  
ści wykwalifikowanej osoby oraz dużo czasu w trakcie każdego dnia. Koniecz-  
ność długotrwałych ćwiczeń oraz niedobór personelu powodują zapotrzebowa-  
nie na rozwój robotów i innych urządzeń technicznych zastępujących funkcje  
terapeutów. Jednym z takich rozwiązań jest egzoszkielec [6].

Zakres ruchów i czynności, jakie powinien wykonywać egzoszkielec, nie  
jest do końca znany, gdyż powinien być biomechanicznie kompatybilny z in-  
dywidualnymi (naturalnymi) osiami stawów niezależnie dla każdego stawu,  
a prędkość kątowa obrotu w stawie powinna wynosić według zaleceń  $1000^{\circ}/s$ .  
Jest to naturalna prędkość pracy stawów palca. Moment obrotowy w poszcze-  
gólnych stawach wynosi 4 Nm w stawie śródrečno-paliczkowym, 1,5 Nm  
w międzypaliczkowym bliższym oraz 0,5 Nm w międzypaliczkowym dalszym.  
Masa egzoszkieletu i jego wymiary powinny być zminimalizowane. Istniejące

---

mgr inż. Paweł MAĆKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii  
Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl  
dr hab. inż. Bogdan LIGAJ, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii  
Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: Bogdan.Ligaj@utp.edu.pl

rozwiązania często nie zapewniają wystarczającego zakresu i prędkości ruchu oraz niezależności ruchów w każdym ze stawów ręki [4].

Zainteresowanie rozwojem egzoszkieleatów dłoni wykazuje przemysł kosmiczny i zbrojeniowy. Wspomaganie astronautów podczas prac w przestrzeni kosmicznej przez egzoszkieleat jest wynikiem utrudnień, jakie sprawia noszony sprzęt. Ogranicza on: zakres ruchów, siłę rąk, komfort, zręczność i zwiększa zmęczenie astronauty. Celem prac w tym obszarze jest opracowanie egzoszkieleatu ręki, który mógłby być połączony z rękawicą astronauty i resztą jego kombinizonu. Ręka powinna zapewnić zwiększoną siłę, zręczność i pewny chwyt [5].

Optymalnym rozwiązaniem byłyby urządzenie pozwalające na osobne sterowanie palcami, ale dopuszcza się połączenie niektórych palców celem zmniejszenia masy, prostoty konstrukcji oraz montażu. Rozwiązania powinny naśladować fizjologiczne ruchy ręki. Podejmowane są próby budowy egzoszkieleatów z wykorzystaniem materiałów odkształcających się pod wpływem ciepła lub napięcia (sztuczne mięśnie) [5].

Celem pracy jest analiza koncepcji istniejących rozwiązań i konstrukcja nowych egzoszkieleatów. Zakres pracy obejmuje analizę urządzeń: Shieldsa, Wege, CAFE, RMII, Handexos, Li Jitinga. Drugim celem jest prezentacja własnej koncepcji urządzenia, będącej modyfikacją egzoszkieleatu Shieldsa.

## **2. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH**

### **Urządzenie Shieldsa [7]**

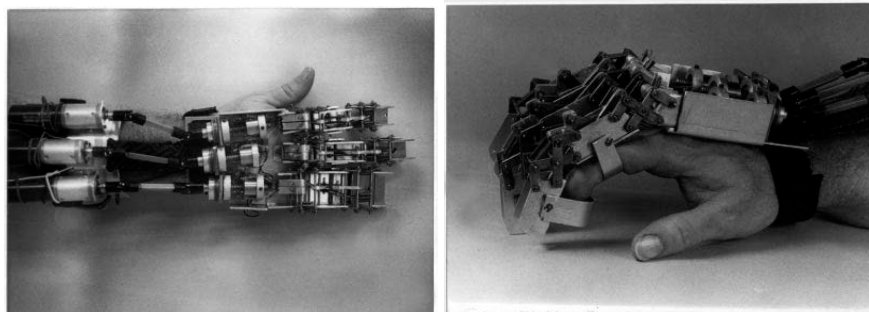
Prototyp zbudowany przez Shieldsa jest konstrukcją trójpalcową. Gwarantuje on niezależne ruchy palca wskazującego, środkowego oraz jeden połączony ruch palca serdecznego i małego (rys. 1). Każdy z palców egzoszkieleatu odwzorowuje ruchy w stawach śródrečno-paliczkowych i bliższych stawach paliczkowych. Ruchy te są z sobą sprzężone.

W celu zmniejszenia liczby potrzebnych napędów ograniczono funkcję urządzenia tylko do czynnego zgięcia palców.

Pojedynczy człon urządzenia zginający staw złożony jest z mechanizmu składającego się z 4 dźwigni. Każdy mechanizm stawowy jest tak projektowany, aby oś jego obrotu pokrywała się z osiami obrotu stawów palców, na których ma być noszony. W związku z tym dla każdego palca należy niezależnie dobierać długości belek i kąty początkowe pomiędzy nimi. Wymiary ręki nie są takie same u wszystkich ludzi, co sprawia, że istnieje konieczność projektowania każdego urządzenia indywidualnie.

Napęd urządzenia stanowią 3 silniki umieszczone na przedramieniu. Transmisja na nadgarstek odbywa się za pomocą wałów Cardana, dzięki mechanizmowi śrubowemu następuje pociąganie linki stalowej połączonej z jedną z dźwigni. Moment zapewniający zgięcie palców w stawach śródrečno-paliczkowych wynosi 3,8 Nm. Czas od całkowitego otwarcia ręki do całkowitego jej zamknięcia wynosi 2 sekundy.





Rys. 1. Egzoszkielet Shieldsa [7]  
Fig. 1. Shield's egzoskeleton [7]

### Urządzenie Wege [8]

Inne rozwiązanie stanowi egzoszkielet palca opracowany przez Andreeasa Wege. Konstrukcja zapewnia oddzielną realizację ruchów w każdym z trzech stawów palca, zginanie, prostowanie oraz odwodzenie i przywodzenie w stawie śródrečno-paliczkowym. Poruszanie palcem jest zapewnione poprzez dźwignie połączone z ręką za pomocą zaopatrzenia ortopedycznego (ortezy) (rys. 2). Na końcu każdej dźwigni znajduje się koło, na którym owinięte są stalowe linki. Drugi koniec każdej linki owinięty jest na kole umieszczonym na wale motoreduktora.



Rys. 2. Egzoszkielet Wege [8] oraz egzoszkielet CAFE [4]  
Fig. 2. Wege's egzoskeleton [8] and CAFE egzoskeleton [4]

Do wad urządzenia zaliczyć można znaczną jego wysokość oraz duże gabaryty układu napędowego.

### Urządzenie Instytutu Rehabilitacji w Chicago [4]

Kolejne rozwiązanie stanowi prototyp urządzenia CAFE opracowany przez Instytut Rehabilitacji w Chicago. Jest on egzoszkieletem palca wskazującego.

Moment przykładany do poszczególnych stawów wynosi połowę średniej wartości naturalnie występujących momentów u zdrowej osoby. Zakres ruchów w kolejnych stawach wynosi:  $-15-75^\circ$ ,  $0-90^\circ$ ,  $0-90^\circ$ . Prototyp mocowany jest

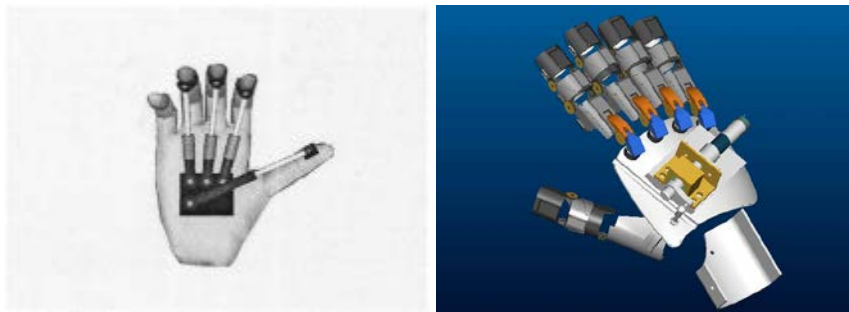
na promieniowej stronie palca wskazującego (rys. 2). Koła ślizgowe prowadzą linkę napędzającą ponad stawami do docelowych punktów umocowania.

Dzięki zastosowaniu wymiennych łączników poszczególnych części egzozszkieletu możliwe jest dopasowanie go do szerokiego zakresu populacji. Części egzozszkieletu wykonano z aluminium i ze stali. Masę części bezpośrednio poruszającej palcem zredukowano do 138 g. Szerokość urządzenia wzdłuż palca wynosiła 8 mm.

Każdy staw ma osobny napęd w postaci pary serwomechanizmów prądu stałego. Silnik zamontowano na płycie umieszczonej na przedramieniu. Napęd jest przekazywany za pomocą linek. Całość napędu jednego palca stanowi sześć silników i sześć linek. Przekładnie redukujące zamocowane są bezpośrednio nad stawem.

### Rękawiczka RMII [2]

Rękawiczka RMII to egzozszkielet przykładający siłę do końcówki palca i wykorzystujący bezkontaktowy czujnik do określenia pozycji końcówki palca względem dłoni. Ruch wykonywany jest poprzez lekkie siłowniki pneumatyczne przyłączone do końcówki: kciuka, palca wskazującego, środkowego i serdecznego (rys. 3). Siła przykładana do każdego z palców może wynieść nawet do 16 N przy ciśnieniu 100 PSI (0,689 MPa) oddziałującym na tłoki siłowników. Egzozszkielet umieszczony jest po stronie dłoniowej, co utrudnia czynności chwytne ręki.



Rys. 3. Rękawiczka REMII [2] oraz egzozszkielet Handexos [1]  
Fig. 3. REMII glove [2] and Handexos exoskeleton [1]

### Urządzenie Handexos [1]

Handexos składa się z pięciu niezależnych modułów odpowiadających ludzkim palcom (rys. 3). Każdy moduł składa się z trzech członów, po jednym dla każdego paliczka. Człony mają strukturę skorupy, która jest dopasowana do grzbietowej części palców użytkownika. Urządzenie mocowane jest do ręki za pomocą tkaniny Velcro, nazywanej potocznie „rzepem”.

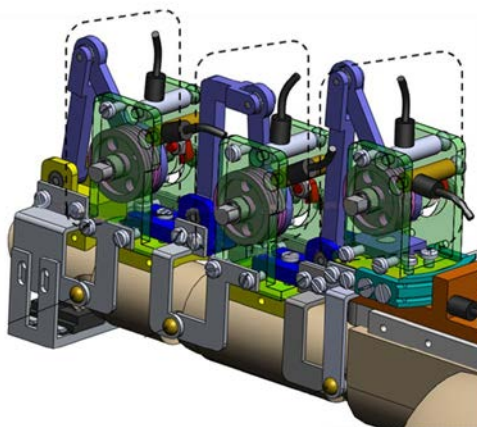
W konstrukcji napędu wprowadzono koncepcję aktywnego wyprostu i pasywnego zgięcia modułów palców.

Transmisja energii odbywa się za pomocą stalowych linek umieszczonych w osłonie.

Zespół prostujący palec składa się z pojedynczego silnika prostującego wszystkie stawy, natomiast zespół zginający palec – z trzech linek, jednej na każdy segment palca. Każda z linek jest owinięta wokół trzech kół zginających umieszczonych po przeciwnej stronie palca względem kół prostujących. Linki zginające są połączone z trzema ściśniętymi sprężynami doprowadzającymi do zgięcia palca wówczas, gdy nie występuje zamierzone działanie wykonane przez użytkownika. Wstępne napięcie sprężyn można regulować za pomocą trzech śrub.

### Urządzenie Li Jiting [3]

Egzoszkieleł zaprojektowany przez Li Jiting jest urządzeniem montowanym za pomocą tkaniny Velcro na grzbietową część palca wskazującego. Urządzenie składa się z trzech modułów (rys. 4), umożliwiających wykonanie 4 ruchów. Ruchy te odpowiadają zginaniu, prostowaniu, przywodzeniu i odwodzeniu.



Rys. 4. Egzoszkieleł Li Jiting [3]  
Fig. 4. Li Jiting's exoskeleton [3]

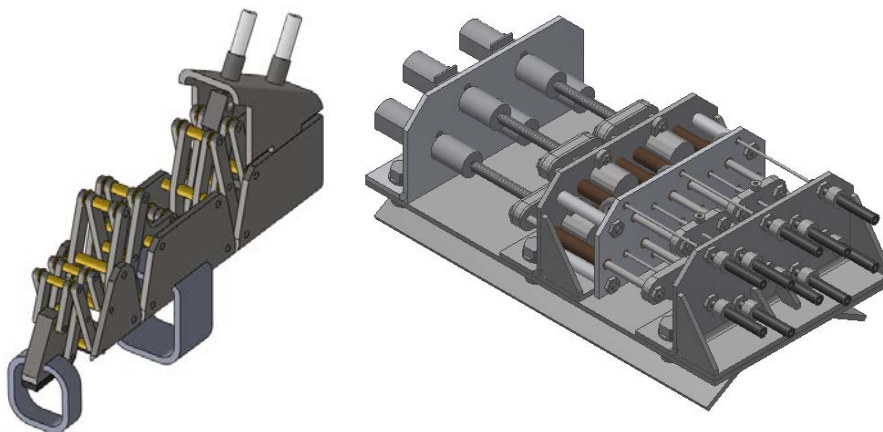
Przy projektowaniu członów urządzenia uwzględnia się długości paliczków i konieczność pozostawienia wolnych przestrzeni dla uniknięcia kolizji poszczególnych modułów. Przywodzenie i odwodzenie w stawie śródrečno-paliczkowym realizowane jest poprzez bezpośredni obrót koła odwodzącego, do którego przymocowano moduł zginający. Egzoszkieleł wykonano głównie z aluminium, z zastosowaniem łożysk kulkowych. Masa całości wynosi 160 gram i według autorów jest akceptowalna dla ręki człowieka.

Dostosowanie egzoszkieletu do użytkowników o różnych długościach paliczków jest możliwe poprzez przemieszczanie dwóch śrub pomiędzy różnymi gniazdami.

Transmisja napędu odbywa się za pomocą cięgna. Układ napędzający zlokalizowany jest z dala od ręki pacjenta celem ograniczenia obciążenia. Składa się on z 4 motoreduktorów zamontowanych w panelu, zapewniających siłę i ruch czterem połączeniom.

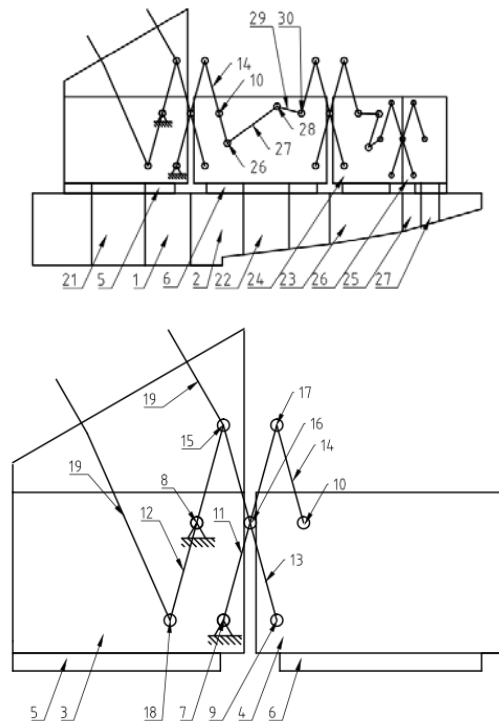
### 3. NOWE ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE

Koncepcję własnego rozwiązania (rys. 5) oparto na urządzeniu Shieldsa, do którego dodano dodatkowy człon umożliwiający zgięcie w stawie międzypaliczkowym dalszym. W stosunku do pierwowzoru zapewniono możliwość czynnego wyprostowania. Dzięki niezabudowaniu części dłoniowej palca możliwe jest korzystanie przez użytkownika ze zmysłu dotyku.



Rys. 5. Model bryłowy: a) egzoskieletu palca, b) części napędowej  
Fig. 5. Solid model: a) of finger exoskeleton, b) of driving part

Urządzenie przytwierdzone jest do paliczków (element 1 i 2) za pomocą elementów 3 i 4 zakładanych na palec w postaci ceownika (rys. 6). Elementy 3 i 4 pokryte są od strony przylegającej do palca warstwą pianki neoprenowej 6 i 5. W elemencie 3 i 4 występują przelotowe otwory pod sworznie 7, 8, 9, 10. Odpowiednio na każdym sworzniu osadzono belkę jak na schemacie. Na sworzniu 7 osadzono belkę 11, na 8 – 12, na 9 – 13, na 10 – 14. Belkę 12 i 13 łączy obrotowo sworznie 15. Takie samo połączenie występuje pomiędzy belką 11 a 13, które łączy sworznie 16 oraz 11 i 14 łączoną elementem 17.

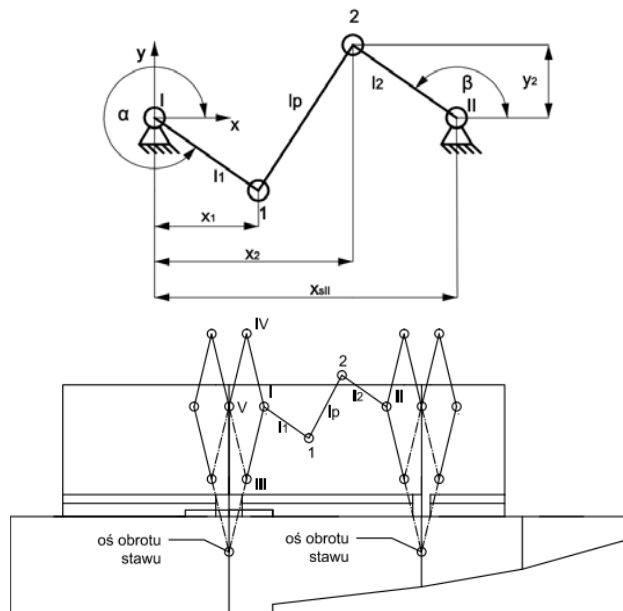


Rys. 6. Schemat budowy rozwiązania własnego urządzenia  
Fig. 6. Diagram of the solution of own device

Odpowiednio na każdym sworzniu osadzono belkę jak na schemacie. Na sworzniu 7 osadzono belkę 11, na 8 – 12, na 9 – 13, na 10 – 14. Belkę 12 i 13 łączy obrotowo sworzeń 15. Takie samo połączenie występuje pomiędzy belką 11 i 13, które łączy sworzeń 16 oraz pomiędzy belką 11 a 14, które łączy sworzeń 17. W belce 12 zamontowany jest dodatkowy sworzeń 18 do połączenia z linką stalową 19. Do sworznia 15 przymocowana jest linka stalowa 20. Pociągnięcie przez układ napędowy linki 19 wywołuje ruch obrotowy elementów 4 względem elementu 3. Środek obrotu tego ruchu przypada w osi zginanego stawu palca. Przy pociągnięciu linki 20 następuje ruch obrotowy elementów 4 względem elementu 3 w odwrotnym kierunku i wyprost stawu. Elementy 3 i 4 są mocowane na palcach za pomocą pasek 21 i 22. Na paliczku środkowym 23 mocowany jest element 24, zaś na paliczku dalszym 25 za pomocą paska 27 element 26. Ruch opisanego członu jest przenoszony na pozostałe za pomocą dźwigni 28, która jest połączona za pomocą sworznia 29 z dźwignią 14 obracającą się na sworzniu 10. Z drugiej strony dźwigni 28 jest połączona sworzniem 30 z dźwignią 31 obracającą się względem osi sworznia 32. Dźwignia 31 obracając się wprowadza w ruch element 24, powodując zgięcie kolejnego stawu. Ruch jest transmitowany również na połączenie elementów 23 i 25.

Masę urządzenia ograniczono do 180 g na jeden palec. W stosunku do istniejących rozwiązań jest to wartość porównywalna.

Opracowano sposób doboru długości popychaczy i kątów dźwigni mechanizmu transmisji ruchu pomiędzy członami urządzenia. W mechanizmie transmisji napędu pomiędzy członami urządzenia występuje dźwignia napędzająca  $l_1$  oraz dźwignia napędzana  $l_2$  (rys. 7). Dźwignie połączone są przegubami 1 oraz 2 z popychaczem. Dźwignie obracają się na sworzniach w przeciwnych kierunkach. Dźwignia  $l_1$  na sworzniu I, dźwignia  $l_2$  na sworzniu II. Celem obliczeń jest znalezienie zależności pomiędzy kątem  $\alpha$  dźwigni  $l_1$  a kątem  $\beta$  dźwigni  $l_2$ , oraz określenie zależności pomiędzy zmianą kąta  $\alpha$  a wywołaną przez nią zmianą kąta  $\beta$ .



Rys. 7. Schematy sposobu działania mechanizmu  
Fig. 7. Diagram showing the mechanism action

Przyjmuje się za początek układu współrzędnych oś sworznia I. Współrzędne osi sworznia II wynoszą  $x_{sII}$  oraz  $y_{sII}$ . Wyznaczenie położenia sworzni wykonano w sposób wykreślny (rys. 7). W celu uzyskania pokrycia osi obrotu stawu palca z osią obrotu urządzenia konieczne jest postępowanie zgodnie z algorytmem:

- wyznaczenie osi obrotu stawu,
- umiejscowienie sworznia III maksymalnie blisko powierzchni palca oraz płaszczyzny poprzecznej przecinającej staw,
- wykreślenie prostej przechodzącej przez oś obrotu stawu i punkt III,
- wyznaczenie położenia sworznia I poprzez odłożenie na powyższej prostej odcinka równego odległości pomiędzy osią obrotu stawu i punktem III,

- sworzeń znajdujący się w punkcie V znajduje się na wysokości punktu I, w odległości równej odcinkowi pomiędzy punktem III a I,
- punkt IV wyznacza się poprzez równoległe przemieszczenie odcinka pomiędzy punktem III i V do punktu I,
- położenie pozostałych sworzni nad danym stawem wyznacza się poprzez lustrzane odbicie względem osi łączącej punkt osi obrotu stawu i punkt V,
- wyznaczenie położenia sworzni nad pozostałymi stawami wykonuje się w analogiczny sposób.
- Długości dźwigni dobiera się możliwe największe, niekolidujące z pozostałymi elementami urządzenia. Kąty początkowe  $\alpha$  i  $\beta$  dobiera się tak, aby uzyskać maksymalną wartość momentu. Dźwignia napędzająca wykonuje ruch obrotowy w zakresie  $90^\circ$ . Dźwignia napędzana powinna wykonywać ruch obrotowy w tym samym zakresie. Maksymalny moment przy zastosowaniu równych długości dźwigni  $l_1$  oraz  $l_2$  uzyskuje się w momencie, gdy popychacz tworzy kąt prosty zarówno z dźwignią  $l_1$  oraz dźwignią  $l_2$ . Optymalnym rozwiązaniem jest uzyskanie takiej sytuacji w połowie pełnego zakresu, tj. przy obrocie dźwigni  $l_1$  o kąt  $45$  stopni.

W obliczeniach przyjęto oznaczenie współrzędnych kartezjańskie punktu 1  $(x_1, y_1)$  oraz 2  $(x_2, y_2)$ .

Utworzono następujący układ równań:

$$\begin{cases} (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = l_p^2 \\ x_2 = x_{sII} + l_2 \cos \beta \\ y_2 = y_{sII} + l_2 \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

W równaniach niewiadomymi są  $x_2, y_2, \beta$ . Oznaczenia dokonano zgodnie z rysunkiem 3.

Rozwiązaniem powyższego układu równań są poniższe wzory. Wartość  $\beta_1$  oraz  $\beta_2$  są rozwiązaniami równania kwadratowego:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{mn - \sqrt{n^2 - m^2 + 1}}{n^2 + 1} \pm 2k\pi \quad (2)$$

$$\beta_2 = \arcsin \frac{mn + \sqrt{n^2 - m^2 + 1}}{n^2 + 1} \pm 2k\pi \quad (3)$$

gdzie:

$$m = \frac{l_p - (x_{sII} - l_1 \cos \alpha_n)^2 - s^2 - l_2^2}{2l_2 \cdot (x_{sII} - l_1 \cos \alpha_n)} \quad (4)$$

$$n = \frac{y_{sII} - l_1 \sin \alpha_n}{x_{sII} - l_1 \cos \alpha_n} \quad (5)$$

W celu rozwiązania równań przyjęto jako dane początkowe współrzędne osi sworznia II wynoszące  $x_{sII}$  oraz  $y_{sII}$ , długość dźwigni  $l_1$  oraz  $l_2$ , kąty początkowe  $\alpha_p$  i  $\beta_p$ . Wyznaczono długość popychacza  $l_p = 18,44$  mm.

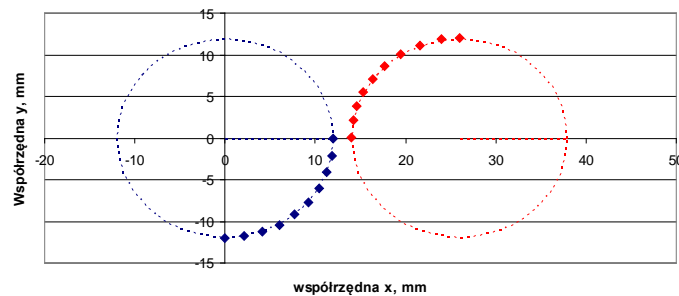
Tabela 1. Zestawienie wartości kątów i współrzędnych początkowych końców dźwigni przyjętych do obliczeń

Table 1. A list of value angles and initial coordinates ends of the lever admitted to calculation

Dźwignia I			Dźwignia II		
$x_{sI} =$	0	mm	$x_{sII} =$	26	mm
$y_{sI} =$	0	mm	$y_{sII} =$	0	mm
$l_1 =$	12	mm	$l_2 =$	12	mm
$\alpha_p =$	270	°	$\beta_p =$	180	°

Wyznaczono współrzędne punktów końców dźwigni napędzanej i napędzającej i wykonano wykres (rys. 8) w celu zobrazowania wyników. Odległości między punktami końca dźwigni powinny być rozlokowane w równych odległościach od siebie. Jeśli punkty rozłożone są w sposób nierównomierny na okręgu określanym przez dźwignię, świadczy to o zmiennej prędkości tej dźwigni. Ruch dźwigni napędzającej ze stałą prędkością kątową będzie wówczas powodował zmienną prędkość kątową dźwigni napędzanej. Im punkty są bliżej siebie, tym mniejsza prędkość kątowna dźwigni w wyznaczanym przez nie zakresie. Im punkty są dalej od siebie tym większa prędkość kątowna dźwigni w wyznaczanym przez nie zakresie. Poprzez zmianę wartości początkowych wartości kątów  $\alpha_p$  i  $\beta_p$  można ograniczyć zakres ruchu, jak i sterować prędkością ruchu w początkowych i końcowych fazach zgięcia palca.

Wykonanie pełnego zakresu ruchu dźwigni czynnej trwa 3,4 s. Okres ten podzielono na dziewięć równomiernych części, pod koniec których sworznię łączący dźwignię napędzającą i popychacz znajdował się w punktach oznaczonych na wykresie (rys. 9).



Rys. 8. Wykres rozmieszczenia końców dźwigni napędzanej i napędzającej w odstępach czasu wynoszących w przybliżeniu 0,38 s

Fig. 8. A graph showing the distribution end of the lever: driving and driven, at intervals of about 0,38 sec

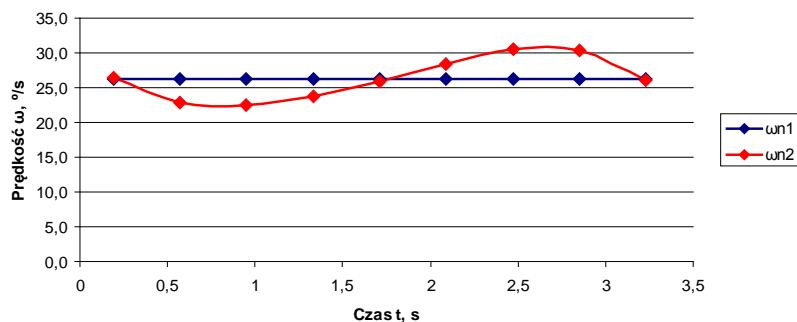
Wyznaczone położenia dźwigni napędzającej z rozdzielczością co  $10^\circ$ , czyli oddalone w czasie o 0,38 s, determinują położenia dźwigni napędzanej. Na tej



podstawie można wyznaczyć prędkość kątową średnią, jaką osiągała dźwignia napędzana w poszczególnych okresach czasu:

$$\bar{\omega}_{n2} = \frac{\beta_n - \beta_{n-1}}{\Delta t} \quad (6)$$

Wyniki przedstawiono również na wykresie (rys. 9).



Rys. 9. Wykres prędkości dźwigni napędzającej i napędzanej  
 Fig. 9. A graph showing the angular velocity of the lever: driving and driven

#### 4. PODSUMOWANIE

Dokonując przeglądu literatury dotyczącej inżynierii biomedycznej i konstrukcji urządzeń umożliwiających rehabilitację i powrót do normalnego funkcjonowania osób z dysfunkcjami czynności chwytnej ręki, można wnioskować o dużym popycie na urządzenie spełniające wymagania pacjentów, lekarzy i terapeutów.

Analizując istniejące rozwiązania konstrukcyjne urządzeń wspomagających czynności chwytne ręki, można stwierdzić, że nie spełniają one stawianych im wymagań. Żadne z urządzeń nie jest powszechnie wytwarzane i stosowane przez pacjentów z dysfunkcjami kończyny górnej. Wynika to z faktu, iż proponowane rozwiązania charakteryzują się skomplikowaną budową, dużym kosztem wykonania lub są zbyt duże pod względem gabarytów i masy, utrudniając użytkowanie podczas codziennie wykonywanych czynności.

Zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne oraz opracowany algorytm działania pozwala na dostosowanie wymiarów geometrycznych urządzenia do wymiarów ręki danego człowieka.

Umieszczenie osi obrotu mechanizmu poza jego geometrią i wykorzystanie grzbietowej powierzchni ręki jako umiejscowienie całości nie ogranicza możliwości chwytnej ręki w efekcie tego urządzenie umożliwia pełne zgięcie we wszystkich stawach o kąt 90°, co wyróżnia je na tle istniejących rozwiązań konstrukcyjnych, których zakres sięga 60-90° w zależności od rozpatrywanego stawu.

Dzięki sprzężeniu ze sobą ruchów w kilku stawach oraz zamkniętemu obiegowi cięgna zmniejszono liczbę silników i mechanizmów napędowych niezbędnych do wykonania ruchu. Ograniczyło to masę części napędowej urządze-

nia do 1 kg, która jest akceptowalna dla przedramienia jako miejsca jej lokalizacji. Zdecydowano się na zastosowanie w napędzie mechanizmu śrubowego, którego sprawność jest mniejsza od 50%. Wadą tego rozwiązania jest większe zużycie energii podczas otwierania lub zamykania chwytu na przedmiocie, zależą natomiast możliwość całkowitego odcięcia zasilania od układu podczas trzymania przedmiotu lub bezruchu ręki. Większą część cyklu czynności chwytanych stanowi utrzymanie członów palca w określonej pozycji, co przemawia za ekonomicznością zastosowania tego rozwiązania.

Połączenie pięciu egzozszkieletów palców stanowić będzie pełny egzozszkielet ręki. Do napędu przewidziano pięć osobnych mechanizmów śrubowych. Palec wskazujący, środkowy i kciuk mieć będą osobny napęd. Jest to warunek konieczny dla wykonania większości możliwych chwytów ręki. Palec serdeczny i mały mogą poruszać się w sposób sprzężony ze sobą. Ze względu na to mogą współdzielić jeden napęd. Ostatni mechanizm śrubowy przewidziano dla ruchu przeciwstawiania kciuka.

Praca może posłużyć jako początek do dalszego rozwoju rozwiązań konstrukcyjnych egzozszkieletów palców ręki i wiedzy z nimi związanej.

## LITERATURA

- [1] CHIRI A., et al.: Mechatronic design and characterization of the index finger module of a hand exoskeleton for post stroke rehabilitation. [w:] *Mechatronics on Database Eng.* 17(5), 2011, 884-894.
- [2] JACK D., et al.: Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation. [w:] *Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, IEEE Database Eng.* 9(4), 2011, 308-317.
- [3] JITING L., et al.: Development of a hand exoskeleton system for index finger rehabilitation. [w:] *Chinese journal of mechanical engineering* 24(5), 2011, 1-12.
- [4] JONES C., et al.: Design and development of the cable actuated finger exoskeleton for hand rehabilitation following stroke. [w:] *Transactions on mechatronics, USA*, 2012, 1-10.
- [5] PALEARI M., et al.: Hexec: A hand exoskeleton designed to be embedded in the astronaut's eva glove. [w:] *Center of Space Human Robotics, Italy*, 2012.
- [6] SARAĞOĞLU I, et al.: Exoskeleton-based exercisers for the disabilities of the upper arm and hand. [w:] *Rehabilitation robotics, Austria*, 2007, 499-522.
- [7] SHIELDS B, et al.: An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during extravehicular activities. [w:] *System and humans, USA*, 1997, 668-673.
- [8] WEGE A., et al.: Mechanical design and Motion Control of a hand exoskeleton for rehabilitation. [w:] *Mechatronics and automation, Germany*, 2005, 155-159.

## DESIGN SOLUTION OF HAND FINGERS EXOSKELETON

**Summary:** This article presents present knowledge of a hand exoskeleton. This paper describes characterization of hand exoskeletons based on an analysis of existing design solutions. The aim is to present own concept device, which is a modification of Shields exoskeleton. Despite the high demand for exoskeletons hand, current solutions do not meet the expectations of patients and physicians. The human hand has many degrees of freedom. Therefore, the need is to simplify the design of the device and provide the ability to perform basic hand grips at the same time.

**Key words:** exoskeleton, hand, fingers

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 35-42

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Katarzyna MATUSZCZAK, Józef FLIZIKOWSKI

**ZAGADNIENIA OGÓLNE DOTYCZĄCE  
OBCIĄŻENIA ŚRODOWISKA W CYKLU ŻYCIA  
ELEKTROWNI WIATROWEJ**

**Streszczenie:** Rozwój energetyki konwencjonalnej prowadzi do zmniejszenia, a w konsekwencji zaniku zasobów nieodnawialnych (węgiel kamienny, ropa naftowa itd.). Niezbędna jest produkcja sztucznych, tanich, ekologicznych i odnawialnych dóbr energetycznych. Potencjał taki ma energia wiatru, która jest ogromnym stale odnawiającym się zasobem. Celem pracy była analiza i ocena użytecznych i szkodliwych obciążeń systemu oraz środowiska, generowanych w cyklu życia elektrowni wiatrowej. Przedstawiono powiązania pomiędzy oddziaływaniem obiektu na środowisko a rodzajem destrukcyjności, jakie wywołuje. Omówiono metodę LCA, która powiązana ze wskaźnikami użyteczności może być przydatna w ocenie i projektowaniu obciążeń środowiska w cyklu życia elektrowni wiatrowej.

**Słowa kluczowe:** elektrownia wiatrowa, cykl życia, obciążenia środowiska, odnawialne źródła energii, destrukcyjność

## 1. WSTĘP

Rozwój energetyki konwencjonalnej na świecie doprowadził do zmniejszenia zasobów nieodnawialnych. Ciągły rozwój gospodarczy i rosnące zużycie surowców energetycznych przyczyniają się do postępującego procesu degradacji ekosystemu i krajobrazu naturalnego [5]. Konieczny jest postęp technologii wykorzystujących alternatywne źródła energii. Jednym z nich jest energia wiatru. Elektrownie wiatrowe produkują „czyste” potencjały energii, nie emitując niebezpiecznych zanieczyszczeń do atmosfery. Obciążenia, jakie elektrownia ta może wywołać dla operatorów, obiektu obrabianego (wiatru), w środowisku naturalnym i sztucznym mogą mieć miejsce w różnych fazach cyklu życia. Należy wziąć pod uwagę następstwa destrukcyjnego oddziaływania obciążeń całych elektrowni wiatrowych, ich zespołów, podzespołów roboczych, elementów, materiałów i tworzyw, z których składają się mechanizmy nie tylko w trakcie eksploatacji, ale także w czasie wytwarzania oraz zagospodarowania użytkowego.

---

mgr inż. Katarzyna MATUSZCZAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,  
Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, ul. Bernardyńska 6, 85-029 Bydgoszcz,  
e-mail: matuszczakkatarzyna@gmail.com

prof. dr hab. inż. Józef FLIZIKOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,  
e-mail: Jozef.Flizikowski@utp.edu.pl

Nie istnieje technologia energetyki, która byłaby w pełni przyjazna środowisku przyrodniczemu [7]. Po zakończeniu cyklu życia elektrowni wiatrowej powstaje wiele odpadów zarówno z materiałów metalowych (aluminium, miedź, żeliwo itp.), jak i niemetalowych (tworzywa sztuczne wypełnione włóknem szklanym, beton) [3]. Opracowanie inżynierii zintegrowanej użyteczności elektrowni wiatrowych, ich projektowania, wytwarzania, eksploatacji i wybór odpowiedniego sposobu zagospodarowania poużytkowego jej potencjałów energomaterialnych może zminimalizować ryzyko szkodliwego oddziaływania na operatorów, funkcjonalność systemu, ekologiczność i sozologiczność, a szczególnie na emisję substancji do środowiska przyrodniczego, jego zanieczyszczenia czy zużywanie elementów roboczych konstrukcji elektrowni. Dodatkowo może wpłynąć pozytywnie na ochronę zdrowia człowieka.

Celem pracy jest analiza i ocena możliwych obciążeń operatorów, systemu i środowiska powstałych w cyklu życia elektrowni wiatrowej.

Dla osiągnięcia celu postanowiono rozwiązać problem, skierowany na uporządkowany opis szeroko rozumianych warunków technicznych (operatorów, przetwarzania, środowiska naturalnego i sztucznego), niezbędnych do wystąpienia postulowanych stanów użyteczności energetyki wiatrowej (wysokiej, wyższej, najwyższej: ergonomiczności, funkcjonalności, ekologiczności, sozologiczności). Omówiono relację pomiędzy stanem technicznym obiektu a środowiskiem.

## 2. WPLYW ELEKTROWNI WIATROWEJ NA ŚRODOWISKO

Energia wiatru to ogromne, stale odnawiające się zasoby. Rozwój energetyki wiatrowej przyczynia się do eliminacji zużycia konwencjonalnych zasobów energetycznych (węgiel kamienny, ropy naftowej, gazu ziemnego itd.), które wciąż ulegają zmniejszeniu w związku z ich intensywną eksploracją (rozwojem przemysłowym). Na aktualnym etapie wdrożeń, badań i rozwoju, szczególnie oddziaływań elektrowni wiatrowej na środowisko, panuje wiele negatywnych opinii na temat możliwości intensywnego postępu energetyki wiatrowej. Zdanie prezentowane przez wielu badaczy dotyczy głównie wytwarzanych infradźwięków, drgań, hałasu słyszalnego. Zgodnie z opinią panującą w mediach i wśród badaczy, zjawiska obciążeń fizycznych emitowanych do środowiska wpływają destrukcyjnie na faunę, florę, a także zdrowie ludzi [1].

W celu określenia wpływu elektrowni wiatrowej na środowisko wykonuje się analizy metodą LCA (*Life Cycle Assessment*). Podczas badania cyklu życia obiektu uwzględnia się etapy: projektowania, produkcji, użytkowania, zagospodarowania poużytkowego. Na każdym z wymienionych etapów mogą wystąpić szkodliwe oddziaływania na środowisko. Negatywny wpływ elektrowni wiatrowej może odzwierciedlić się w różnych komponentach środowiska przyrodniczego. Zmiany klimatu, wytwarzanie związków promieniotwórczych, postępujący proces zakwaszenia/eutrofizacji to przykłady możliwych szkodliwych oddziaływań/następstw. Metoda LCA stanowi cenne narzędzie, dzięki któremu

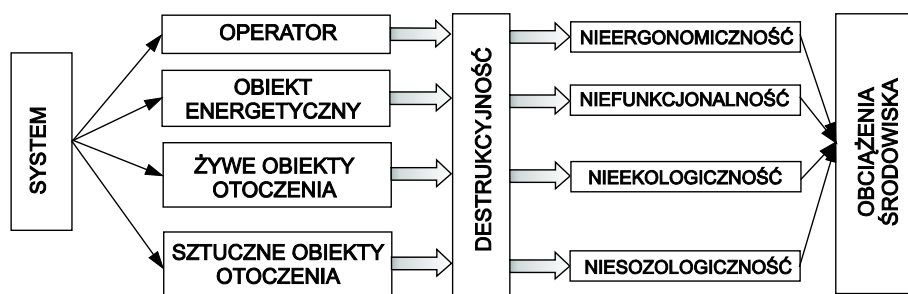
można określić oddziaływanie danego obiektu na środowisko na podstawie realnych danych, a nie tylko hipotez badawczych. Daje to możliwość obiektywnej analizy, oceny, a przede wszystkim wspomaganie projektowania technik efektywnego eliminowania negatywnego wpływu maszyny lub procesu wobec środowiska [2]. Niestety procedury analizy LCA, skierowane na środowisko naturalne, nie uwzględniają szerokiego spektrum obiektów związanych z elektrowniami wiatrowymi, np. operatorów, obiektów obrabianych, urządzeń technicznych, ich wzajemnych relacji.

### 3. OBCIĄŻENIA GENEROWANE PRZEZ ELEKTROWNIE WIATROWE

Obciążenia generowane przez wytwarzaną, eksploatowaną i likwidowaną elektrownię wiatrową są to wszelkie zjawiska przyczyniające się do zubożenia zasobów biotycznych i abiotycznych, zanieczyszczenia środowiska, a także degradacji ekosystemu, krajobrazu, człowieka, zużywania się elementów maszynowych i potencjałów związanych z użytkowaniem elektrowni. Ich wynikiem są destrukcyjne następstwa oddziaływania systemów technicznych, którymi w omawianym przypadku są elektrownie wiatrowe (rys. 1). System poprzez oddziaływanie na człowieka, rośliny, zwierzęta, surowce naturalne i wytworzone, ujawnia destrukcyjny dla otoczenia charakter jego elementów, a przede wszystkim relacji. Destrukcyjność opisywana jest czterema wymiernymi następstwami:

- dla operatorów – nieergonomicznością,
- dla układów technologicznych przetwarzania wiatru – niefunkcjonalnością,
- dla obiektów żywych – nieekologicznością,
- dla obiektów wytworzonych, sztucznych – niesozologicznością.

Na każdym etapie cyklu życia elektrowni wiatrowej może mieć miejsce negatywne oddziaływanie na operatorów, obiekt przetwarzany, środowisko naturalne i sztuczne (rys. 1).



Rys. 1. Elementy i relacje obrazujące wpływ systemu technicznego na obciążenia operatora, układu technicznego i środowiska w cyklu życia elektrowni wiatrowej [6]

Fig. 1. The elements and relationships to illustrate the impact of the technical system on a man, technical system and environment load in the life cycle of a wind power plant [6]

Nieergonomiczność określa wielkość negatywnego oddziaływania zespołu roboczego na operatora. Może nim być zarówno operator, jak i mieszkaniec pobliskiego otoczenia obiektu. Jako miarę pozytywnych oddziaływań energetyki wiatrowej na operatorów zaproponowano ergonomiczność stanowiska pracy, działania, wytworu, odniesioną do:

- właścicieli źródła, gruntu, pozyskania, inwestorów,
- wytwórców,
- sprzedawców,
- sieci przesyłowych,
- operatorów sieci przesyłowej,
- spółek dystrybucyjnych,
- operatorów sieci dystrybucyjnej,
- kupujących na rzecz odbiorców,
- oferentów energii,
- użytkowników, odbiorników, odbiorców.

Niefunkcjonalność kształtowana jest jako skutek niedokładności realizacji funkcji, jako nieefektywność danego obiektu. Funkcjonalność, będąca wielkością dopełniającą, określana jest w trzech aspektach: energetycznym, ekonomicznym i ekologicznym (wzory od (1) do (3)).

efektywność energetyczna:

$$e_e = \frac{\text{korzyści energetyczne}}{\text{koszty energetyczne}} \quad (1)$$

efektywność ekonomiczna:

$$e_{eko} = \frac{\text{korzyści ekonomiczne}}{\text{koszty ekonomiczne}} \quad (2)$$

efektywność ekologiczna:

$$e_{EKO} = \frac{\text{korzyści ekologiczne}}{\text{koszty ekologiczne}} \quad (3)$$

Na funkcjonalność elektrowni wiatrowej ma wpływ z jednej strony doskonała, optymalna konstrukcja środków technicznych, maszyn, urządzeń i instalacji energetyki wiatrowej (EW), na co składa się:

- fenomenalna konstrukcja procesowa,
- wysokosprawna konstrukcja sterownicza,
- samoorganizująca konstrukcja informacyjna,
- niezawodna konstrukcja logistyczna,

które umożliwią drastyczną poprawę, w ramach reinżynierii. Z drugiej – użyteczność sposobów przetwarzania:

- pokrycie przewidywanego, zmiennego w czasie zapotrzebowania, przy minimum kosztów eksploatacji,

- kompensacja czynnych i biernych strat przesyłu w systemie, przy pokryciu przewidywanego zapotrzebowania,
- spełnienie różnorodnych ograniczeń eksploatacyjnych (ograniczenia termiczne lub stabilności w liniach, poziomy napięcie w węzłach itp.),
- zapewnienie elastyczności wytwarzania w czasie rzeczywistym dla zbilansowania odchyleń (jeśli takie wystąpią) od wartości przewidywanego zapotrzebowania,
- zapewnienie rezerwowania w przypadku awaryjnego odłączenia dowolnego elementu w systemie energetycznym (cel n-1).

Nieekologiczność określana jest jako negatywne oddziaływanie zespołu roboczego na żywe elementy środowiska przyrodniczego, w szczególności na glebę, rośliny, zwierzęta, zbiorniki wodne. Najważniejsze aspekty, stanowiące problematykę oddziaływania elektrowni wiatrowej na środowisko naturalne dotyczą:

- degradacji siedlisk ptactwa oraz pozostałej fauny wolnożyjącej,
- emisji infradźwięków, drgań, hałasu, które mogą negatywnie wpływać na organizmy żywe i zdrowie człowieka,
- zakłócania harmonijnej atrakcyjności krajobrazu [1].

Niesozologiczność opisuje negatywne oddziaływanie na sztuczne (wytworzone) obiekty otoczenia, czyli elementy materiały, tworzywa konstrukcyjne zespołów roboczych. Użyteczne wykorzystanie sztucznych, wytworzonych przez ludzi, odnawialnych źródeł energii (np. energii wiatru) jest niezbędne w dobie ciągłego wzrostu zużycia zasobów konwencjonalnych, które wciąż ulegają redukcji. Światowa Rada Energetyki (*World Energy Council*) zauważa konieczność rozwoju sztucznych, tanich i ekologicznych zasobów energii. Dzięki temu oprócz wytworzonych rezerw energetycznych dochodzi do zmniejszenia emisji szkodliwych związków zanieczyszczających atmosferę. Elektrownie wiatrowe produkują „czystą” energię. Mogą również negatywnie oddziaływać na środowisko. Największe obciążenia środowiska mogą mieć miejsce w czasie ich produkcji, transportu oraz zagospodarowania użytkowego elementów elektrowni.

Duże znaczenie w generowaniu obciążeń środowiska ma sposób zagospodarowania użytkowego elementów, materiałów, tworzyw i czynników (smarnych, hydrauliki siłowej) po zakończeniu cyklu życia elektrowni wiatrowej. Elementy obiektu skonstruowane są z różnych materiałów. Mogą one być źródłem powstawania związków powodujących znaczące zmiany w środowisku, począwszy od jego zakwaszenia po zmiany klimatyczne. W celu zminimalizowania obciążeń środowiska w znaczeniu ekologiczności należy wybrać odpowiedni sposób zagospodarowania użytkowego konstrukcji elektrowni wiatrowej. Recykling w przeciwieństwie do gromadzenia odpadów na składowisku, może znacznie zwiększyć użyteczność i ograniczyć ilość substancji emitowanych do środowiska [3].

#### 4. POSTULOWANA UŻYTECZNOŚĆ ELEKTROWNI WIATROWYCH

Użyteczność produktu, procesu energetyki wiatrowej jest symbolem pojęcia, które oznacza jedną ze zbiorczych charakterystyk (jakości mocy i energii, bezpieczeństwa użytkowników, procesu przetwarzania), wyrażającą – za pomocą charakterystyk energetycznych, ekonomicznych, ekologicznych – skuteczność transformacji potencjałów działania. Użyteczność traktowana jest jako cecha: systemowa, mierzalna, stosowana przy porównywaniu systemów danej klasy, wyrażająca różne aspekty działania w różnych przedziałach czasu, wyrażana różnie w zależności od klasy systemów ich przeznaczenia i warunków [8].

Z wymienionych powodów istnieje wiele definicji użyteczności odnoszących się do różnych obiektów. Ze względu jednak na zakres energetyki wiatrowej ograniczono się do wymienienia i zwrócenia uwagi na niektóre rodzaje. Wychodząc z opisowej definicji użyteczności działania, jej kontekstu produkcyjnego i procesowego (energetycznego, ekologicznego i ekonomicznego), formalną jej postać ( $U(t)$ ) można podać jako iloczyn efektywności ( $E(t)$ ) i bepośrednio poniesionych nakładów ( $N(t)$ ) w danym przedziale czasu  $(0, t)$ .

$$U(t) = E(t) \cdot N(t) \quad (4)$$

Wielkości  $U(t)$  i  $N(t)$  oznaczają wartości użytków oraz nakładów do chwili  $t$  od początku działania ( $t_\sigma = 0$ ). Funkcja  $N(t)$  w przedziale  $(0, t)$  jest niemalejącą funkcją czasu, tak że w każdym z elementarnych przedziałów ( $\Delta t$  lub  $dt$ ) elementarna wartość nakładów jest nie mniejsza od zera:

$$n(t) = \frac{dN(t)}{dt} \geq 0 \quad (5)$$

zaś wartość funkcji  $N(t)$  w zależności od tego, czy funkcja  $n(t)$  jest ciągłą, lub dyskretną, wyznacza się z zależności:

$$\begin{aligned} N(\tau) &= \int_0^\tau n(t) dt \\ N(\tau) &= \sum_i n_i \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

Funkcja  $U(t)$  w rozpatrywanym przedziale czasu może przybierać wartości dodatnie, jak i ujemne.

$$u(t) = \frac{dU(t)}{dt} \quad (7)$$

Na podstawie wartości funkcji elementarnych  $u(t)$  w zależności od tego, czy są to funkcje ciągłe lub dyskretny, można wyznaczać zależności:



$$U(\tau) = \int_0^{\tau} u(t) dt$$

$$U(\tau) = \sum_i n_i \cdot \Delta t_i$$
(8)

Termin nakłady rozumieć należy jako część zasobów, nośników energii wody, operatorów, maszyn, środowiska naturalnego i sztucznego, zużytego w działaniu systemu energetycznego. Nakład może być wyrażony różnymi składnikami w różnych jednostkach.

Użyteczność działania w przestrzeni energetycznej, ekologicznej, ekonomicznej należy rozumieć jako tę część korzyści (skutku, produktu) działania, która ma przydatność użytkową i której uzyskanie było celem działania. W przypadku  $E(t) = \text{const}$ , efektywność spełnia warunek współczynnika kierunkowego prostej ( $E = m = tg\alpha$ ), obrazującej zależność rosnących użytków jako wynik zwielokrotnienia o  $m$  nakładów. Załóżmy, że przedział czasu  $\Delta t$ , w którym rozpatrujemy działanie, jest nieskończenie mały, czyli że  $\Delta t$  dąży do zera. Graniczną wartość ilorazu zmiany użytków  $\Delta U$  przez przyrost nakładów  $\Delta N$  w przedziale czasu  $\Delta t$ , gdy  $\Delta t$  dąży do zera, nazywa się miarami efektywności systemu energetyki wiatrowej [8]:

$$E(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{U(t + \Delta t) - U(t)}{N(t + \Delta t) - N(t)}$$
(9)

## 5. PODSUMOWANIE

Na każdym etapie cyklu życia elektrowni wiatrowej generowane są obciążenia środowiska. Mogą one negatywnie oddziaływać na operatorów, obiekt eksploatowany, a także środowisko (naturalne oraz sztuczne). Destrukcyjność elektrowni wiatrowej określana jest w czterech obszarach nieergonomiczności, niefunkcjonalności, nieekologiczności oraz niesozologiczności. Cykl życia elektrowni wiatrowej związany jest z jej wytworzeniem, eksploatacją, a także zagospodarowaniem poużytkowym materiałów konstrukcyjnych oraz towarzyszącym im czynników (materiały eksploatacyjne, np. środki smarowe). Ostatni wymieniony etap w cyklu życia omawianego obiektu ma ogromne znaczenie w generowaniu obciążeń środowiska. Recykling elementów, w odniesieniu do składowania powstałych odpadów, może znacząco ograniczyć emisję szkodliwych substancji do środowiska naturalnego. Stosowanie metody LCA w ocenie generowanych obciążeń, wzbogaconej badaniami, teorią użyteczności działania, w cyklu życia obiektu może być przydatne w określeniu negatywnego oddziaływania i wspomaganie projektowania użyteczności zespołu roboczego elektrowni wiatrowej. Szczególne znaczenie takiej metodyki może dotyczyć obiektów szerzej powiązanych z elektrownią wiatrową (operatorów, obiektów

technicznych itd.), a dotychczas niepoddawanych ocenie. W związku z tym wykorzystanie metody LCA, powiązanej z szacowaniem użyteczności, w ocenie cyklu życia elektrowni wiatrowej ma charakter innowacyjny i oryginalny.

## LITERATURA

- [1] BARANOWSKI A, BOROWSKI S., i in.: Farmy wiatrowe. Zagrożenie dla człowieka i środowiska. Wyd. Uczeln. UTP, Bydgoszcz, 2014.
- [2] DURAIRAJ S.K.: Evaluation of Life Cycle Cost Analysis methodology. Corp. Environ. Strategy, 9, 30- DOI:10.1016/S1066-7938(01)00141-5, 2002.
- [3] FLIZIKOWSKI J.: Systemy wytwarzania uwzględniające nowe źródła energii i obniżenie emisji zagrożeń. Sprawozdanie z badań BS/17/2013, UTP, Bydgoszcz, 2014.
- [4] KOWALSKI Z., KULCZYCKA J.: Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA). Wyd. PWN, Warszawa, 2007.
- [5] NOWAK W.: Zastosowanie odnawialnych źródeł energii. Wyd. Politechnika Szczecińska, 2008.
- [6] PIASECKA I.: Badanie i ocena cyklu życia zespołów elektrowni wiatrowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2014.
- [7] PIASECKA I.: Modele cyklu życia w ocenie destrukcyjności wirtualnej elektrowni wiatrowej. Cz. I. Podstawy teoretyczne. Inż. Ap. Chem., 53(2), 2014, 103-104.
- [8] POWIERZA L.: Zarys inżynierii systemów bioagrotechnicznych. Część I. Podstawy. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom-Płock, 1997.
- [9] [www.wec-pksre.pl](http://www.wec-pksre.pl).

## GENERAL ISSUES IN THE ENVIRONMENTAL LOAD IN LIFE CYCLE OF POWER WIND

**Summary:** The development of conventional energy leads to a reduction, and consequently loss of non-renewable resources (coal, oil, etc.). It is necessary to manufacture artificial, cheap, clean and renewable energy goods. This potential has a wind, which is constantly renewing itself a huge resource. The aim of the study was to investigate, analyze and evaluate useful and harmful burden on the system and the environment, generated in the lifecycle of a wind power plant. It shows the relationship between the property's impact on the environment, and it produces a kind of destructiveness. Outlines a method for LCA, which related to the indicators of utility, may be useful in the evaluation and design the environmental load in the life cycle of a wind power plant.

**Key words:** wind power, life cycle, environmental load, renewable energy sources, destructiveness

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 43-55

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Stanisław MROZIŃSKI, Radosław SKOCKI

**WPLYW TEMPERATURY NA WYNIKI OBLICZEŃ  
TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki niskocyklowych prób zmęczeniowych próbek ze stali P91 w warunkach obciążeń stałoamplitudowych oraz programowanych. Próby przeprowadzono w dwóch temperaturach:  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  i  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ . Na podstawie badań stwierdzono, że temperatura istotnie wpływa na trwałość zmęczeniową. Poza temperaturą na trwałość zmęczeniową w warunkach obciążeń programowanych wpływ ma również sekwencja stopni w programie obciążenia. W pracy przeprowadzono doświadczalną weryfikację liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera. Stwierdzono, że na skuteczność hipotezy sumowania uszkodzeń wpływ ma zarówno temperatura badań, jak również sekwencja stopni w programie obciążenia.

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość zmęczeniowa, zmęczenie niskocyklowe, właściwości cykliczne stali

## 1. WPROWADZENIE

Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych związane są z zagadnieniem sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. W metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej zaproponowanej przez L. Tuckera [17] podczas obliczeń wykorzystuje się dane materiałowe określone podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych. Określa się je z tzw. okresu stabilizacji właściwości cyklicznych [1]. Na podstawie analizy wyników niskocyklowych badań zmęczeniowych można stwierdzić, że w przypadku wielu materiałów metalowych stabilizacja właściwości nie występuje lub występuje bardzo krótko [5, 6, 10, 11]. W takich przypadkach przyjmuje się uproszczenie polegające na tym, że dane materiałowe określa się z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej ( $n/N = 0,5$ ) [1]. Brak stabilizacji właściwości cyklicznych metali komplikuje istotnie opracowywanie wyników badań metali i stopów w temperaturach podwyższonych. W temperaturze podwyższonej wielkość zmian właściwości cyklicznych jest zdecydowanie większa niż w temperaturze otoczenia [2, 3, 15]. Ze względu na to, że podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej wykorzystywane są te same modele obliczeniowe wątpliwości muszą budzić

---

dr hab. inż. Stanisław MROZIŃSKI, prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,  
e-mail: Stanislaw.Mrozinski@utp.edu.pl

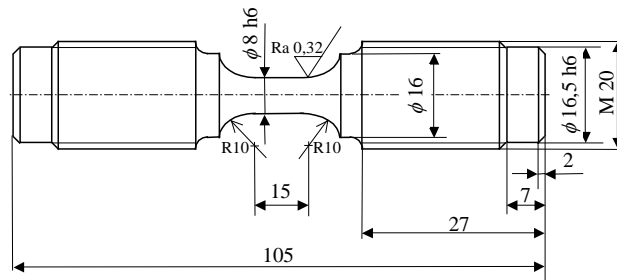
Radosław SKOCKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz,  
e-mail: Radoslaw.Skocki@utp.edu.pl

zatem wyniki obliczeń uzyskane przy założeniu istnienia okresu stabilizacji właściwości cyklicznych [9].

Celem badań była ilościowa ocena wpływu temperatury na skuteczność obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.

## 2. OPIS BADAŃ

Próbki do badań wykonano ze stali P91 zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w [1]. Kształt próbki do badań pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki wykorzystywanej podczas badań  
Fig. 1. Shape and dimensions of specimen used in tests

Niskocyklowe próby zmęczeniowe przeprowadzono w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego. Badania w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych prowadzono przy kontrolowanej wartości odkształcenia całkowitego ( $\varepsilon_{ac} = \text{const}$ ). Badania polegały na poddawaniu próbek obciążeniu zmiennemu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Podczas badań mierzono odkształcenia próbki z wykorzystaniem ekstensometru o bazie 12,5 mm i zakresie pomiarowym  $\pm 15\%$ . Próby zmęczeniowe przeprowadzono na pięciu poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego w zakresie od  $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$  do  $\varepsilon_{ac} = 0,60\%$  oraz dwóch temperaturach:  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ . Podczas prób rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej oraz odkształcenia próbki dla wybranych cykli obciążenia. Najważniejsze parametry obciążeń stałoaamplitudowych izotermicznych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry obciążeń stałoaamplitudowych izotermicznych  
Table 1. Isothermal loads parameters

Schemat programu	$\varepsilon_{ac}$ %	$T$ , °C	R
	0,25 0,30 0,35 0,50 0,60	20 600	$\varepsilon_{min}/\varepsilon_{max} = -1$

Badania programowane realizowano podobnie jak obciążenia stałoaamplitudowe w warunkach kontrolowanego odkształcenia ( $\varepsilon_{ac} = \text{const}$ ) w dwóch temperaturach ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ ). Podczas badań stosowano obciążenia

dwustopniowe. Poziomy odkształcenia przyjęte na poszczególne stopnie obciążeń programowanych odpowiadały poziomom stosowanym podczas badań stałoamplitudowych. Zmiany poziomów odkształcenia w programie dokonywano według dwóch sekwencji:

- a) odkształcenia małe-odkształcenia duże – sekwencja oznaczana jako Lo-Hi,
- b) odkształcenia duże-odkształcenie małe – sekwencja oznaczana jako Hi-Lo.

Poziomy odkształcenia w programie obciążenia dwustopniowego przyjęto po analizie wyników badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych. Przyjęte poziomy to:  $\varepsilon_{ac(1)} = 0,30\%$  oraz  $\varepsilon_{ac(2)} = 0,60\%$ . Zmiany poziomu odkształcenia z  $\varepsilon_{ac(1)}$  na  $\varepsilon_{ac(2)}$  lub odwrotnie z  $\varepsilon_{ac(2)}$  na  $\varepsilon_{ac(1)}$  dokonywano przy różnych stopniach uszkodzenia  $D$  próbki na pierwszym stopniu programu obciążenia. Stopień uszkodzenia  $D$  definiowano przy wykorzystaniu trwałości względnej opisanej zależnością:

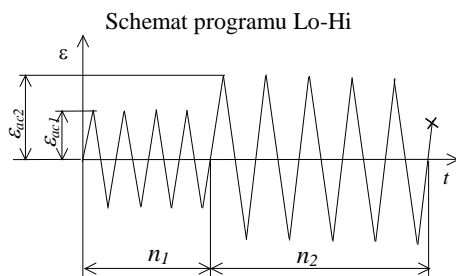
$$D = n_i/N_i \quad (1)$$

gdzie:

- $n_i$  – bieżąca liczba cykli obciążenia stałoamplitudowego na poziomie  $\varepsilon_{aci}$  i temperaturze  $T_i$ , przy której dokonywano zmiany odkształcenia z  $\varepsilon_{ac(1)}$  na  $\varepsilon_{ac(2)}$  lub z  $\varepsilon_{ac(2)}$  na  $\varepsilon_{ac(1)}$ ,
- $N_i$  – liczba cykli obciążenia stałoamplitudowego na pierwszym stopniu programu obciążenia  $\varepsilon_{aci}$  i temperaturze próbki  $T_i$  do chwili pęknięcia próbki.

Na rysunku 2 przedstawiono schematy programu obciążenia Lo-Hi i Hi-Lo oraz podano ich parametry.

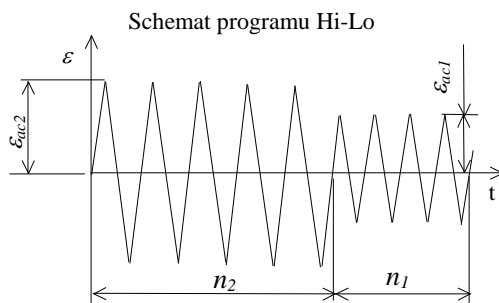
a)



Parametry

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ac(1)} &= 0,30\%, \varepsilon_{ac(2)} = 0,60\% \\ T_1 &= 20^\circ\text{C}, N_1 = 20361 \text{ (z badań)} \\ T_2 &= 600^\circ\text{C}, N_1 = 3241 \text{ (z badań)} \\ n_1 &= 0,25N_1 \\ n_1 &= 0,50N_1 \\ n_1 &= 0,75N_1 \end{aligned}$$

b)



Parametry

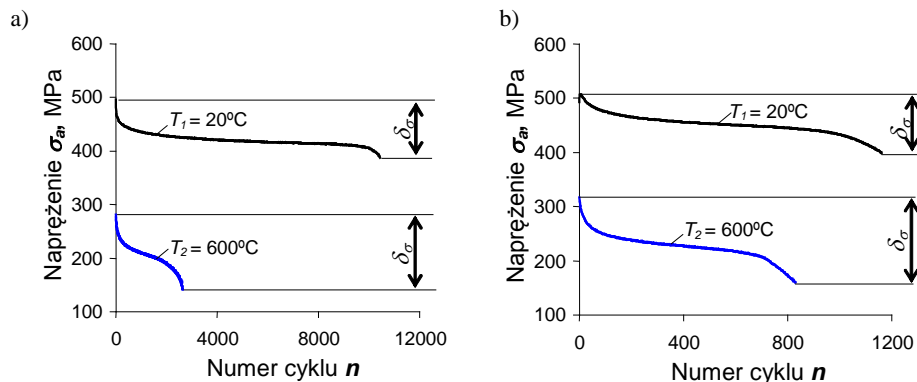
$$\begin{aligned} \varepsilon_{ac(1)} &= 0,30\%, \varepsilon_{ac(2)} = 0,60\% \\ T_1 &= 20^\circ\text{C}, N_2 = 1296 \text{ (z badań)} \\ T_2 &= 600^\circ\text{C}, N_2 = 597 \text{ (z badań)} \\ n_2 &= 0,25N_2 \\ n_2 &= 0,50N_2 \\ n_2 &= 0,75N_2 \end{aligned}$$

Rys. 2. Obciążenie dwustopniowe: a) Lo-Hi, b) Hi-Lo  
Fig. 2. Two stage loading: a) Lo-Hi, b) Hi-Lo

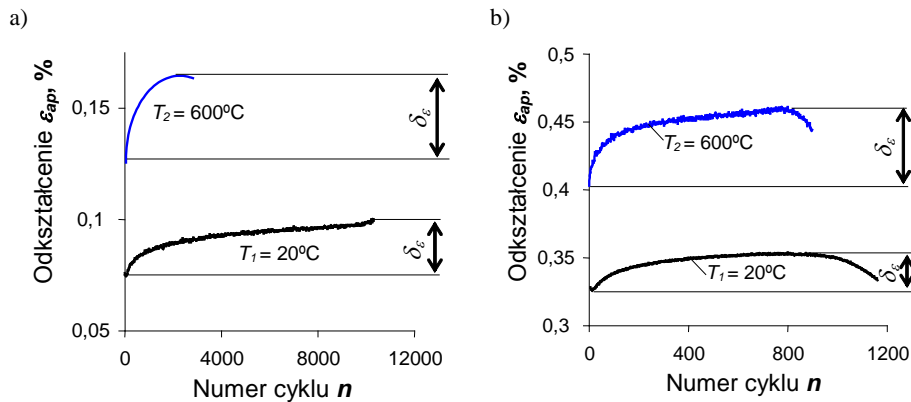
### 3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

#### 3.1. Badania stałoamplitudowe

Podczas badań na wszystkich poziomach odkształcenia w temperaturze otoczenia ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ), jak również w temperaturze podwyższonej ( $T_2 = 600^\circ\text{C}$ ) obserwowano cykliczne osłabienie stali P91. W celu scharakteryzowania obserwowanego osłabienia na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykładowe wykresy zmian naprężenia  $\sigma_a$  oraz odkształcenia plastycznego  $\varepsilon_{ap}$  w funkcji liczby cykli obciążenia dla dwóch poziomów odkształcenia całkowitego  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$  i  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ .



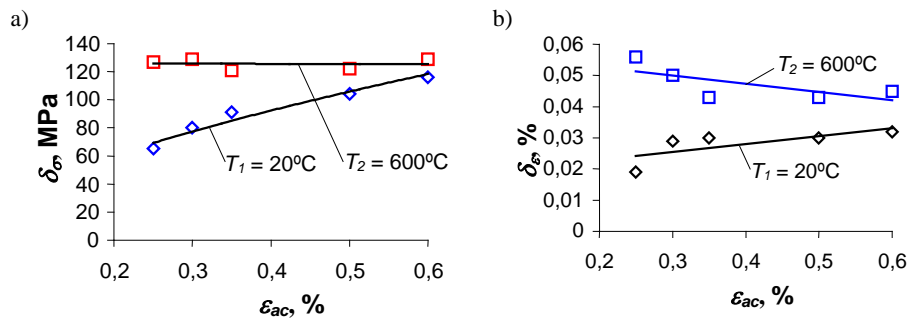
Rys. 3. Zmiany amplitudy naprężenia  $\sigma_a = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$   
 Fig. 3. Course of stress  $\sigma_a = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$



Rys. 4. Zmiany amplitudy odkształcenia plast.  $\varepsilon_{ap} = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$   
 Fig. 4. Course  $\varepsilon_{ap} = f(n)$ : a)  $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ , b)  $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$

Wpływ temperatury na wielkość zmian właściwości cyklicznych jest widoczny zarówno przy wykorzystaniu opisu naprężeniowego ( $\sigma_a$ ), jak i odkształceniowego ( $\varepsilon_{ap}$ ). Na rysunkach 3 i 4 zaznaczono zakres zmian naprężenia

$\delta_\sigma$  oraz odkształcenia plastycznego  $\delta_\varepsilon$ , jaki obserwowano w całej próbie. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na tych samych poziomach odkształcenia w temperaturze 600°C zmiany parametrów pętli są większe niż w temperaturze 20°C. Dla zilustrowania wpływu temperatury na wielkość zmian parametrów pętli na rysunku 5 zestawiono wartości parametrów  $\delta_\sigma$  oraz  $\delta_\varepsilon$  w zależności od odkształcenia  $\varepsilon_{ac}$  i temperatury.



Rys. 5. Zmiany parametrów pętli: a)  $\delta_\sigma$  b)  $\delta_\varepsilon$

Rys. 5. Change of hysteresis loop parameters: a)  $\delta_\sigma$  b)  $\delta_\varepsilon$

Zmiany analizowanych parametrów zależą zarówno od temperatury, jak również poziomu odkształcenia. W temperaturze  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  najmniejsze zmiany  $\delta_\varepsilon$  oraz  $\delta_\sigma$  występują na najniższych poziomach i ulegają zwiększeniu wraz ze wzrostem odkształcenia. W temperaturze  $T_2 = 600^\circ\text{C}$  wartość parametru  $\delta_\varepsilon$  ulega obniżeniu wraz ze wzrostem odkształcenia, natomiast parametr  $\delta_\sigma$  nie zależy od odkształcenia. Szczegółową analizę wpływu temperatury na wielkość zmian parametrów pętli histerezy omówiono między innymi w pracach [12-14].

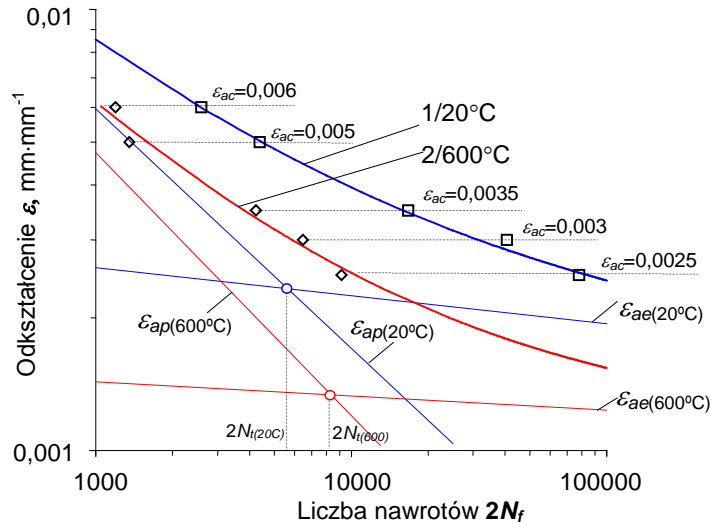
Wyniki trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń stałoamplitudowych opracowano w formie wykresów. Wykresy zmęczeniowe aproksymowano równaniem w postaci [4, 7]:

$$\frac{\Delta\varepsilon_c}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

gdzie:

- $b$  – wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- $c$  – wykładnik cyklicznego odkształcenia,
- $\sigma_f'$  – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- $\varepsilon_f'$  – współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego,
- $E$  – moduł Younga.

Na rysunku 6 pokazano wykresy zmęczeniowe uzyskane podczas badań w temperaturach 20 oraz 600°C. Współczynniki oraz wykładniki równania 2 zestawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Wykresy porównawcze trwałości zmęczeniowej stali P91  
 Fig. 6. Comparative diagrams of fatigue life of P91 steel

Tabela 2. Dane materiałowe stali P91  
 Table 2. Material data of P91 steel

Wykres/temp	<i>b</i>	<i>c</i>	$\sigma_f', MPa$	$\epsilon_f'$	$2N_f$	<i>E, MPa</i>
1/20°C	-0,0633	-0,5426	825,5	0,2525	5639	205339
2/600°C	-0,0319	-0,5964	260,1	0,2918	8350	145870

Analiza położenia wykresów (rys. 6) pozwala stwierdzić, że temperatura wpływa na trwałość zmęczeniową. Jej wpływ zależy od poziomu amplitudy odkształcenia. Wpływ temperatury na trwałość jest najmniejszy w obszarze największych odkształceń i wzrasta w miarę ich obniżania. W celu ilościowego określenia wielkości obniżenia trwałości w temperaturze podwyższonej wprowadzono współczynnik  $\delta N$  obliczany z zależności:

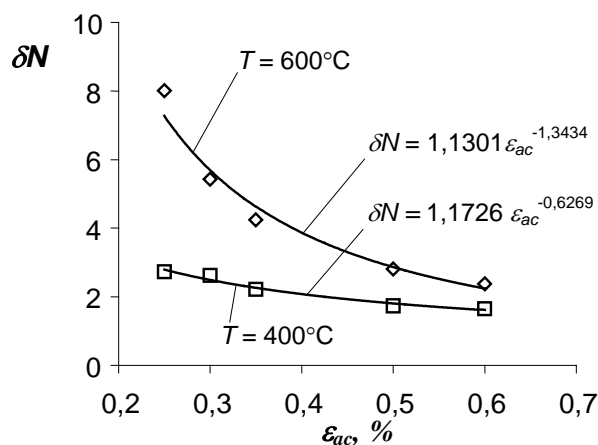
$$\delta N = \frac{2N_{f(20^\circ C)}}{2N_{f(600^\circ C)}} \quad (3)$$

gdzie:

- $2N_{f(20^\circ C)}$  – liczba nawrotów obciążenia do pęknięcia próbki w temperaturze 20°C na i-tym poziomie odkształcenia,
- $2N_{f(600^\circ C)}$  – liczba nawrotów obciążenia do pęknięcia próbki w temperaturze 600°C na i-tym poziomie odkształcenia.

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy zmian  $\delta N$  w zależności od poziomu odkształcenia w temperaturach podwyższonych ( $T = 600^\circ C$  oraz  $T = 400^\circ C$ ).



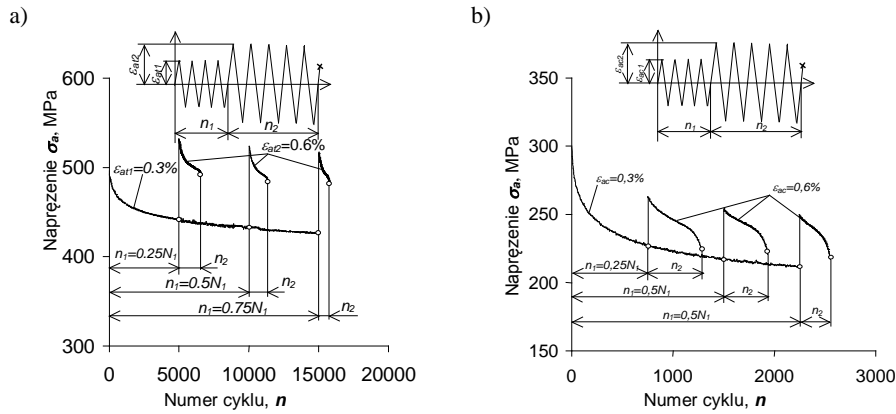


Rys. 7. Wpływ temperatury na obniżenie trwałości zmęczeniowej  
 Fig. 7. Temperature influence on the fatigue life decreasing

Uzyskane wartości  $\delta N$  w funkcji odkształcenia  $\varepsilon_{ac}$  opisano funkcją potęgową i naniesiono na rysunku. Uzyskane wyniki badań potwierdzają wyniki obserwowane na rysunku 6. Na poziomie odkształcenia  $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$  trwałość zmęczeniowa w temperaturze  $T = 600^\circ\text{C}$  jest prawie 8-krotnie mniejsza od trwałości na tym poziomie w temperaturze  $T = 20^\circ\text{C}$ . W przypadku poziomu największego ( $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ ) trwałość w temperaturze  $T = 600^\circ\text{C}$  jest około 3-krotnie mniejsza od trwałości uzyskanej w temperaturze otoczenia ( $20^\circ\text{C}$ ). W miarę obniżania temperatury wpływ poziomu odkształcenia na trwałość ulega wyraźnemu obniżeniu. Dla przykładu na najmniejszym poziomie odkształcenia trwałość w temperaturze  $T = 400^\circ\text{C}$  jest już tylko około 3-krotnie, a na największym około 2-krotnie mniejsza od trwałości uzyskanych w temperaturze otoczenia.

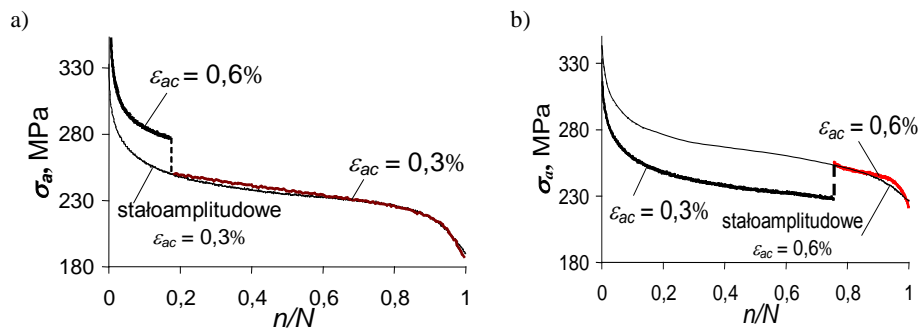
### 3.2. Obciążenia programowane

Wyniki badań w warunkach obciążeń programowanych analizowano w kontekście wpływu temperatury na zmiany podstawowych parametrów pętli histerezy przed i po zmianie stopnia programu. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wykresy zmian naprężenia  $\sigma_a$  dla sekwencji programu obciążenia Lo-Hi w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i  $600^\circ\text{C}$ .



Rys. 8. Zmiana naprężenia  $\sigma_a$  dla obciążenia programowanego Lo-Hi: a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$   
 Fig. 8. Change of stress  $\sigma_a$  for programmed loading Lo-Hi: a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Na podstawie wykresów można stwierdzić, że podobnie jak podczas badań stałoamplitudowych w warunkach obciążeń programowanych występują zmiany parametrów pętli histerezy oraz brak okresu stabilizacji. Do momentu zmiany poziomu odkształcenia przebieg zmian właściwości cyklicznych jest taki, jak podczas obciążenia stałoamplitudowego. Po zmianie poziomu odkształcenia stal ulega dalszemu osłabieniu. Wielkość osłabienia zależy od liczby cykli obciążenia zrealizowanych na pierwszym stopniu programu. Dotyczy to zarówno temperatury  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , jak również  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ . Jak należało oczekiwać, wraz ze wzrostem liczby cykli  $n_1$  na pierwszym stopniu obniżeniu ulega liczba cykli zrealizowanych na drugim stopniu. W pracy dokonano analizy porównawczej parametrów pętli histerezy uzyskanej podczas obciążeń stałoamplitudowych i programowanych. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe wykresy naprężenia  $\sigma_a$  w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i programowanych w  $T_2 = 600^\circ\text{C}$  w funkcji trwałości względnej  $n/N$ .



Rys. 9. Amplituda naprężenia  $\sigma_a = n/N$  w temperaturze  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ : a) Hi-Lo, b) Lo-Hi  
 Fig. 9. Stress amplitude  $\sigma_a = n/N$  at temperature of  $T_2 = 600^\circ\text{C}$ : a) Hi-Lo, b) Lo-Hi

Na podstawie wykresów można stwierdzić, że po zmianie poziomu odkształcenia wartości parametrów pętli histerezy są zbliżone do parametrów pętli, jakie obserwowano na tym samym poziomie odkształcenia podczas obciążeń stałoaamplitudowych. Powyższe stwierdzenie dotyczy temperatury otoczenia oraz temperatury podwyższonej. Świadczy to jednocześnie o tym, że większe zmiany właściwości cyklicznych w temperaturze podwyższonej dotyczą również obciążenia programowanego.

#### 4. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Podczas badań obserwowano wpływ sekwencji programu obciążenia oraz temperatury na trwałość zmęczeniową. Wpływ programu zależy od trwałości względnej  $n_i/N_i$ , przy której dokonywano zmian odkształcenia. Dla  $n_i/N_i = 0,25$  wyższą trwałość w obydwu temperaturach uzyskano podczas realizacji programu Hi-Lo. Dla pozostałych sekwencji programów ( $n_i/N_i = 0,5$ ,  $n_i/N_i = 0,75$ ) trwałość wyższą uzyskano podczas realizacji programu Lo-Hi (tab. 3).

Tabela 3. Wyniki badań oraz obliczeń trwałości w warunkach obciążeń programowanych  
Table 3. Results of fatigue tests and calculations in terms of programmed loadings

Pro-gram	Pró-bka	$T_1 = 20^\circ\text{C}$						$T_2 = 600^\circ\text{C}$					
		$n_i = 0,25 N_i$		$n_i = 0,5 N_i$		$n_i = 0,75 N_i$		$n_i = 0,25 N_i$		$n_i = 0,5 N_i$		$n_i = 0,75 N_i$	
		eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.	eks.	obl.
L <sub>o</sub> -H <sub>i</sub>	1	7354		12584		14654		1358		1758		2254	
	2	6587	6069	10874	10716	15654	15362	1124	1146	2054	1760	3101	2374
	3	5046		10641		18292		1239		2161		2400	
	śr.	<b>6329</b>		<b>11366</b>		<b>16200</b>		<b>1240</b>		<b>1991</b>		<b>2585</b>	
H <sub>i</sub> -L <sub>o</sub>	1	11254		9724		7254		1645		1354		1058	
	2	14359	16180	9854	12238	7174	8296	1542	2371	1395	1806	1050	1240
	3	14587		9872		7222		1661		1309		1095	
	śr.	<b>13400</b>		<b>9817</b>		<b>7217</b>		<b>1616</b>		<b>1353</b>		<b>1068</b>	

Uzyskane podczas badań eksperymentalnych wyniki trwałości dla różnych sekwencji programu obciążenia wykorzystano podczas doświadczalnej weryfikacji liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera (PM) [8, 16]. W trakcie obliczeń korzystano z charakterystyk zmęczeniowych przedstawionych na rysunku 6. Obliczenia trwałości prowadzono dla programów obciążenia pokazanych na rysunku 2. Zgodnie z hipotezą PM pęknięcie próbki w warunkach obciążenia programowanego powinno nastąpić w przypadku, gdy zostanie spełniony warunek:

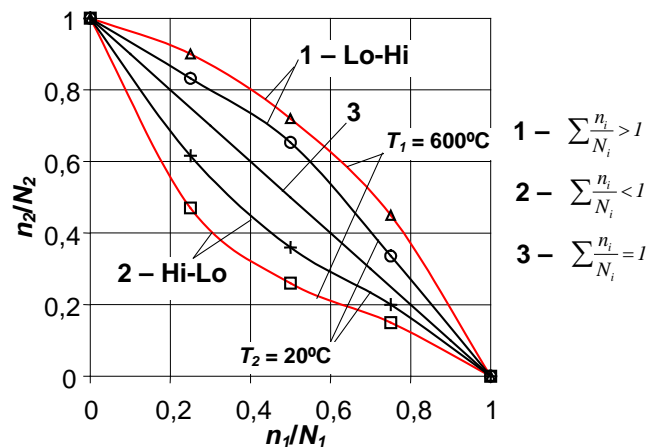
$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1,0 \quad (4)$$

gdzie:

- $n_1, n_2$  – liczby cykli na pierwszym oraz drugim stopniu programu obciążenia,
- $N_1, N_2$  – liczby cykli do pęknięcia próbki podczas obciążenia stałoaamplitudowego na poziomach  $\varepsilon_{ac1}$  i  $\varepsilon_{ac2}$ .

Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek w warunkach obciążeń dwustopniowych oraz stałej temperatury zestawiono na rysunku 10.

Położenie wyników obliczeń na przekątnej 3 wykresu odpowiada sumie uszkodzeń  $\sum n_i/N_i = 1,0$  i oznacza, że wyniki obliczeń są równe wynikom badań. Oznacza to jednocześnie brak wpływu sekwencji programu obciążenia na trwałość. Uzyskanie dla obydwu sekwencji programów obciążenia sumy uszkodzeń  $\sum n_i/N_i \neq 1,0$  świadczy o wpływie historii obciążenia na wyniki obliczeń trwałości. Na podstawie analizy uzyskanych wyników trwałości (rys. 9) stwierdzono, że dla wszystkich sekwencji Lo-Hi trwałość zmęczeniowa uzyskana podczas obliczeń jest mniejsza od trwałości uzyskanej z badań ( $N_{obl} < N_{eks}$ ). Natomiast dla wszystkich sekwencji programów Hi-Lo trwałość z obliczeń jest większa od trwałości uzyskanej z badań ( $N_{obl} > N_{eks}$ ).

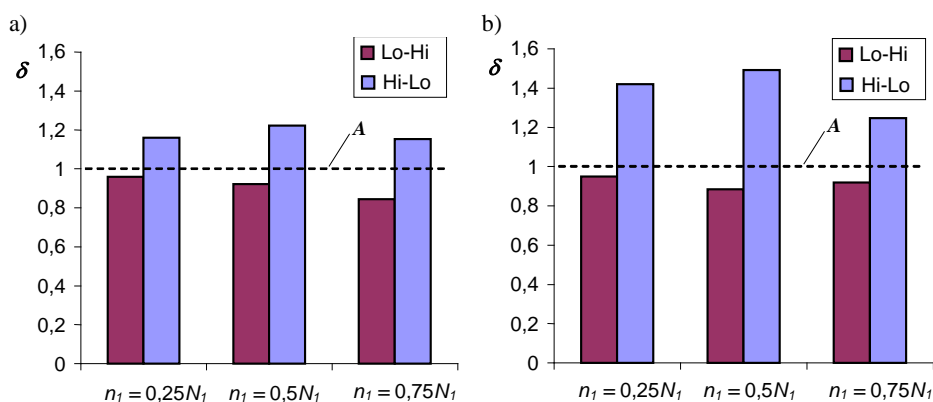


Rys. 10. Wyniki weryfikacji liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń  
Fig. 10. Results of verification of PM cumulative damage hypothesis

W celu porównania wyników trwałości z obliczeń ( $N_{obl}$ ) i badań ( $N_{eks}$ ) wprowadzono współczynnik  $\delta$  definiowany jako:

$$\delta = \frac{N_{obl}}{N_{eks}} \quad (5)$$

Wyniki obliczeń współczynnika  $\delta$  przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Wartości współczynnika  $\delta$  dla różnych programów: a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$   
 Fig. 11. Coefficient  $\delta$  values for different programs:  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Wartości współczynnika  $\delta$  równe jedności (linia A) oznaczają, że suma uszkodzeń obliczona z zależności (4) jest również równa jedności i odpowiada pełnej zgodności wyników obliczeń i badań.

Uzyskanie dla obydwu sekwencji programów obciążenia Lo-Hi i Hi-Lo wartości współczynnika  $\delta \neq 1$  świadczy o wpływie historii obciążenia na wyniki obliczeń trwałości. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono również, że wpływ historii obciążenia na wyniki obliczeń ulega zwiększeniu w temperaturze  $600^\circ\text{C}$ .

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania zmęczeniowe potwierdziły wyraźny wpływ temperatury podwyższonej na trwałość zmęczeniową, jak również przebieg zmian właściwości cyklicznych stali P91.

Na trwałość zmęczeniową oraz wielkość zmian właściwości cyklicznych oprócz temperatury wpływ ma również poziom odkształcenia.

Istnieje podobieństwo ilościowe oraz jakościowe w przebiegu zmian właściwości cyklicznych stali P91 na tych samych poziomach odkształcenia w warunkach obciążenia stałoaamplitudowego i programowanego.

W temperaturze podwyższonej na tych samych poziomach odkształcenia zmiany właściwości cyklicznych są większe od zmian obserwowanych w temperaturze otoczenia.

Sekwencja stopni w programie obciążenia ma wpływ na trwałość zmęczeniową. Wpływ sekwencji stopni w programie obciążenia zależy od liczby cykli zrealizowanych na pierwszym stopniu.

Temperatura podwyższona powoduje obniżenie skuteczności metod obliczeń trwałości zmęczeniowej. Jedną z przyczyn większego zróżnicowania wyników trwałości z badań i obliczeń mogą być większe zmiany właściwości cyklicznych obserwowane w temperaturze podwyższonej.

## LITERATURA

- [1] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain -Controlled Fatigue.
- [2] CHEN D.L., WEISS B., STICKLER R.: Cyclic plasticity of recrystallized Mo at low temperatures Materials Science & Engineering A234-236, 1997, 766-769.
- [3] CHEN L.J., EANG Z.G., YAO G., TIAN J.F.: The influence of temperature on low cycle fatigue behavior of nickel base superalloy GH4049 International Journal of Fatigue 21, 1999, 791-797.
- [4] COFFIN L.F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Trans. ASME 76, 1954, 931-950.
- [5] GOSS Cz., KŁYSZ S., TELEGA J.: Wpływ sekwencji obciążeń na kształt pętli histerezy w zakresie małej liczby cykli obciążenia. XX Symposium Zmęczenie i Mechanika Pękania, Pieczyska k. Bydgoszczy, 2004, 97-103.
- [6] KUNZ L., LUKAS P., WEISS B., MELISOVA D.: Effect of loading history on cyclic stress-strain response. Materials Science & Engineering A314, 2001, 1-6.
- [7] Manson S.S., Halford G.R.: Re-Examination of Cumulative Fatigue Damage Analysis – an Engineering Perspective. Engineering Fracture Mechanics, 25(5/6), 1986, 539-571.
- [8] MINER M.A.: Cumulative Damage in Fatigue, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Journal of Applied Mechanics 67, 1945, 159-164.
- [9] MROZIŃSKI S.: O zmienności danych materiałowych do obliczeń trwałości zmęczeniowej. II Symposium Mechanika i Zniszczenie Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 2003, 259-262.
- [10] MROZIŃSKI S.: Analiza porównawcza dwóch metod wyznaczania własności cyklicznych metali. Przegląd Mechaniczny 4, 2004, 30-36.
- [11] MROZIŃSKI S.: Wpływ sekwencji programu obciążenia na przebieg procesu stabilizacji stali 45. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 54, 2004, 197-207.
- [12] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: Wpływ temperatury badań na parametry pętli histerezy. XXIV Symposium Zmęczenia i Mechaniki Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska 2012, 105-106.
- [13] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: Softening of Martensitic Cast Steel, Journal of Polish CIMAC 5(3), 2011, 173-180.
- [14] MROZIŃSKI S., SKOCKI R.: The influence of temperature on the course of fatigue damage cumulation of P91 steel. Seventh International Conference on Low Cycle Fatigue LCF7, 57-62.
- [15] NAGESHA A., VALSAN M., KANNAN R., BHANU SANKARA RAO K., MANNAN K.: Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr–1Mo ferritic steel. International Journal of Fatigue 24, 2002, 1285-1293.
- [16] PALMGREN A.: Die Lebensdauer von Kugellagem, Verfahrenstechnik VDI-Z, Berlin 68, 1924, 339-341.
- [17] TUCKER L.E.: A Procedure for Designing Against Fatigue Failure of Notched Parts. Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper No 720265, New York, 1972.

Publikacja finansowana z NCBR w ramach Programu "INNOTECH" – ścieżka programowa IN-TECH (umowa nr INNOTECH-K3/IN3/32/227826/NCBR/14).

## TEMPERATURE INFLUENCE ON THE FATIGUE LIFE CALCULATION RESULTS

**Summary:** Authors presents results of static, constant amplitude and programmed tests of P91 steel for the two levels of temperature ( $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 600^{\circ}\text{C}$ ). It was stated that, during constant amplitude tests, temperature significantly influences the fatigue life and depends on the level of strain amplitude. Obtained results of the fatigue life in terms of programmed loadings were compared to the results of calculations. During calculation of the fatigue life there was used the Palmgren-Miner fatigue damage accumulation hypothesis. Basing on the comparison of the results of the fatigue life tests and calculations there were stated that the hypothesis effectiveness at elevated temperatures is lower than at the room temperature. The above was explained by larger changes of the cyclic properties at elevated temperatures.

**Key words:** fatigue life, low cycle fatigue life, cyclic properties of steel





**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 57-66

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Robert POLASIK, Kamil ZIMNICKI

**PROJEKT I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA  
STOJAKA MOTOCYKLOWEGO W ŚRODOWISKU  
AUTODESK INVENTOR**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono projekt i analizę wytrzymałościową stojaka motocyklowego. Projekt oraz analizę przeprowadzono w programie Inventor 2014 firmy Autodesk.

**Słowa kluczowe:** Metoda Elementów Skończonych, CAx, analizy wytrzymałościowe, stojak motocyklowy

## **1. WPROWADZENIE**

Metoda Elementów Skończonych (ang. FEA – *Finite Element Analysis*) jest obecnie jedną z podstawowych metod prowadzenia komputerowo wspomaganých obliczeń inżynierskich (ang. CAE – *Computer Aided Engineering*). Metoda elementów skończonych umożliwia przyspieszenie prac projektowych, a także w przypadku produkcji jednostkowej lub małoseryjnej w wielu przypadkach eliminuje potrzebę wykonania prototypu.

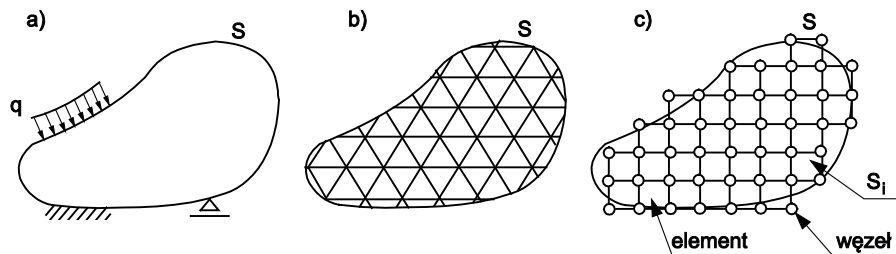
W ramach prac Koła Naukowego Narzędziowicz UTP, prowadzonych w Laboratorium Inżynierii Produkcji, postanowiono utworzyć model 3D stojaka motocyklowego, a także przeprowadzić jego analizę wytrzymałościową.

## **2. IDEA METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH**

Metoda Elementów Skończonych (MES) jest jedną z metod dyskretyzacji układów geometrycznych ciągłych, tj. podziału kontinuum na skończoną liczbę podobszarów. Wobec powyższego, założenie metody zakłada modelowanie nawet bardzo złożonych obiektów (części, i zespołów) poprzez ich reprezentację za pomocą możliwie prostych geometrycznie elementów składowych, nawet z uwzględnieniem nieciągłości i wielofazowości materiałowych. Główne założenie MES to podział modelu geometrycznego ciągłego (rys. 1) na elementy skończone, łączące się w tzw. węzłach, czego efektem jest utworzenie modelu geometrycznego dyskretnego. Efektem dyskretyzacji jest transformacja układu o nieskończonej liczbie stopni swobody (zdolności do zmiany wartości określonej współrzędnej) do postaci układu o skończonej liczbie stopni swobody [1-3].

---

dr inż. Robert POLASIK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: Robert.Polasik@utp.edu.pl  
inż. Kamil ZIMNICKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,  
Koło Naukowe Narzędziowicz



Rys. 1. Dyskretyzacja modelu ciągłego – transformacja w zbiór (siatkę) elementów skończonych:  
 a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny,  
 c) model dyskretny obliczeniowy [1]

Fig. 1. Continuous model discretization – transformation into a set (mesh) finite elements:  
 a) continuous geometric model, b) discrete, ideal model,  
 c) discrete model calculation [1]

## 2.1. Zalety Metody Elementów Skończonych

Podstawową zaletą MES jest możliwość uzyskania wyników dla skomplikowanych kształtów, dla których niemożliwe jest przeprowadzenie obliczeń analitycznych. Oznacza to, że dane zagadnienie może zostać poddane symulacji w pamięci komputera, bez konieczności budowania prototypu, co znacznie ułatwia proces projektowania [1, 2].

## 2.2. Struktura aplikacji wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych

Współczesne aplikacje inżynierskie CAE, w których stosuje się MES, składają się z trzech wzajemnie współpracujących modułów, którymi są:

- preprocesor (służy m.in. do importu lub przygotowania geometrii, doboru rodzaju elementów skończonych, dyskretyzacji kontinuum, a także przyłożenia warunków brzegowych),
- solver (moduł przeznaczony do budowy oraz rozwiązania układu równań, na podstawie którego uzyskuje się poszukiwane wartości danych wielkości fizycznych),
- postprocesor (moduł służący do prezentacji oraz wspomaganie interpretacji uzyskanych wyników).

Praktycznie, przed dyskretyzacją modelu CAD należy go poddać odpowiedniemu uproszczeniu, podczas którego należy usunąć elementy nieistotne, np. promienie, fazy, otwory, pochylenia itd. [1, 3].

## 2.3. Ograniczenia MES

Podstawowym ograniczeniem MES jest obecnie ograniczona wydajność komputerów oraz niedoskonałość oprogramowania. Należy pamiętać również, że jak każda metoda numerycznej aproksymacji, Metoda Elementów Skończonych wprowadza szereg możliwych błędów rozwiązania. Oto kilka z nich:

- błąd modelowania (zastosowany model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości),

- błąd wartości współczynników (przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych cząstkowych i warunków brzegowych, czyli np. dane materiałowe, dane o interakcji obiektu ze światem zewnętrznym obarczone są błędem),
- błąd odwzorowania obszaru (obszar obliczeniowy nie odpowiada dokładnie rzeczywistemu obszarowi zajmowanemu przez analizowany obiekt),
- błąd dyskretyzacji; zastosowana metoda aproksymacji wprowadza błąd w stosunku do rozwiązania dokładnego problemu wejściowego,
- błąd zaokrągleń (ze względu na zastosowanie ograniczonej dokładności reprezentacji liczb w komputerze, rozwiązanie uzyskane programem komputerowym nie odpowiada rozwiązaniu przybliżonemu, które zostałoby otrzymane przy dokładnej reprezentacji liczb).

### 3. ROZWIĄZANIA TECHNICZNE STOJAKÓW MOTOCYKLOWYCH

Obecnie istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych stojaków motocyklowych. Stosowane technologie produkcji i rozwiązania konstrukcyjne stojaków motocyklowych to: konstrukcje spawane, skęcane lub też konstrukcje składające się z wielu elementów montowanych na wcisk. Na rynku spotyka się konstrukcje dedykowane do konkretnego modelu motocykla lub też konstrukcje uniwersalne przeznaczone do wielu typów motocykli (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Stojak motocyklowy uniwersalny [4]  
Fig. 2. Universal motorcycle stand example [4]



Rys. 3. Stojak motocyklowy dedykowany do motocykla Yamaha YZF R1 [5]  
Fig. 3. Dedicated (for Yamaha YZF R1) motorcycle stand [5]

Aktualnie większość konstrukcji wymaga szeregu operacji w procesie produkcyjnym, co powoduje, że wyprodukowanie produktu wymaga znacznych nakładów finansowych.

#### 4. PRZEBIEG BADAŃ

##### 4.1. Obiekt badań

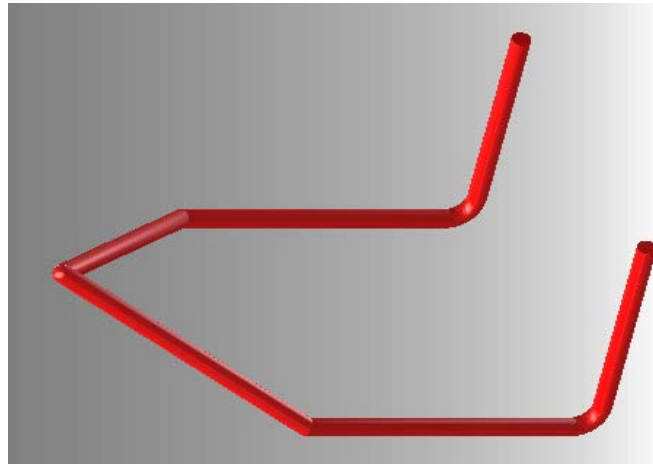
Obiektem użytym do badań było rozwiązanie konstrukcyjne stojaka motocyklowego wykonanego z rury o średnicy 25 mm i grubości ścianki 4 mm ze stali nierdzewnej, wykonanego w ramach działalności studenckiego Koła Naukowego Narzędziowic. Opracowano wstępne założenia konstrukcyjne, a następnie, podczas wizyty na Międzynarodowych Targach Obrabiarek, Narzędzi i Technologii Obróbki – TOOLEX – dzięki uprzejmości dystrybutora urządzeń do gięcia rur, wykonano prototyp podnośnika (rys. 4).



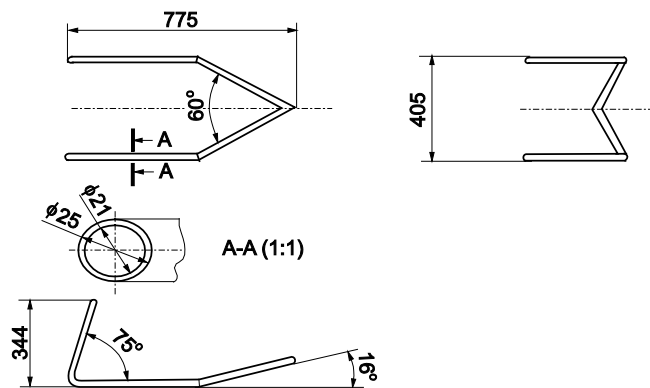
Rys. 4. Stojak motocyklowy – wykonanie własne  
Fig. 4. Original main element of motorcycle stand (rack)

#### 4.2. Wykonanie modelu 3D

Na podstawie obiektu rzeczywistego w programie Autodesk Inventor 2014 stworzono model 3D odwzorowujący jego kształt i wymiary (rys. 5 i 6).

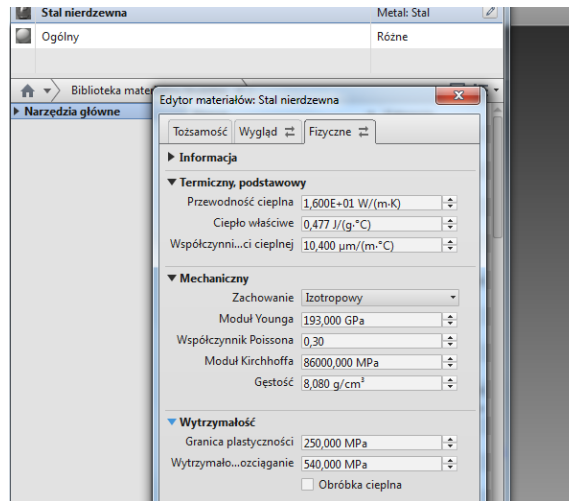


Rys. 5. Model 3D wykonany w programie Autodesk Inventor  
Fig. 5. Autodesk Inventor 3D model of original motorcycle stand



Rys. 6. Wymiary gabarytowe obiektu  
Fig. 6. Object main dimensions and angles

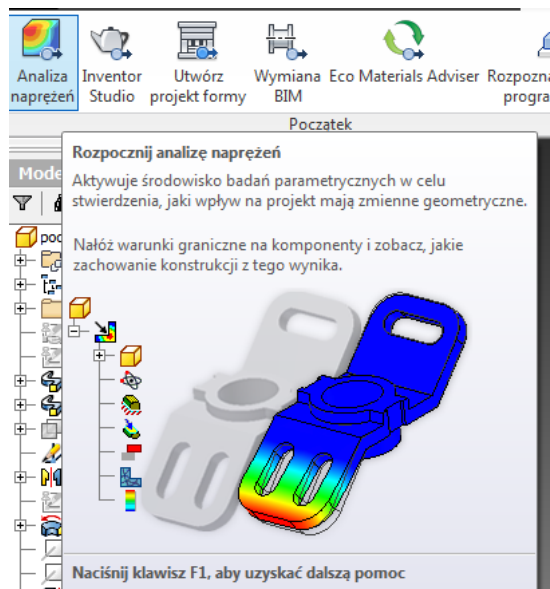
Po wykonaniu modelu 3D zdefiniowano materiał oraz właściwości fizyczne materiału (rys. 7).



Rys. 7. Definiowanie właściwości fizycznych materiału  
Fig. 7. Physical properties definition

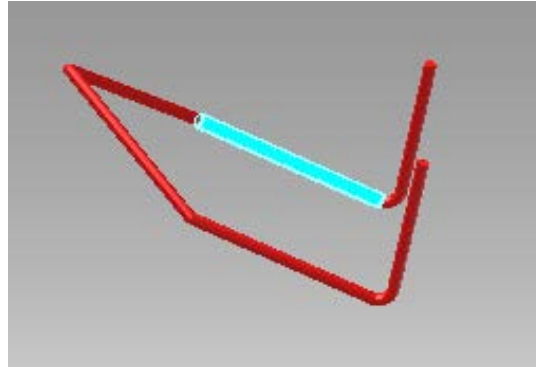
### 4.3. Analiza naprężeń

Model 3D zapisano jako część w formacie \*.ipt programu Inventor. Na następnym etapie plik ten otworzono w nowym zespole i zapisano w formacie Standard.iam, następnie można było przejść do rozpoczęcia analizy naprężeń (rys. 8).

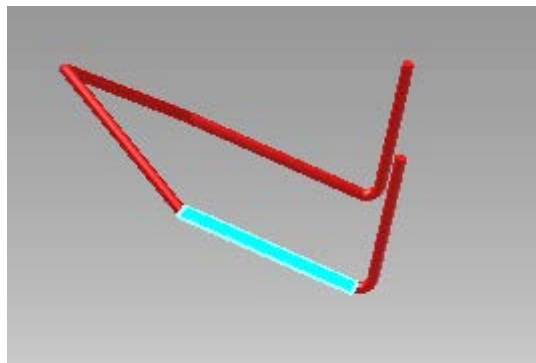


Rys. 8. Interfejs programu Autodesk Inventor 2014 – rozpoczęcia analizy naprężeń  
Fig. 8. Autodesk Inventor 2014 user interface – stress analysis

Analiza naprężeń wymaga unieruchomienia pewnej powierzchni w analizowanym układzie. Na potrzeby przeprowadzenia analizy naprężeń modelu 3D stojaka motocyklowego unieruchomiono elementy stojaka, które w warunkach pracy obiektu pozostają zazwyczaj w spoczynku i są unieruchomione przez podłoże (rys. 9 i 10).

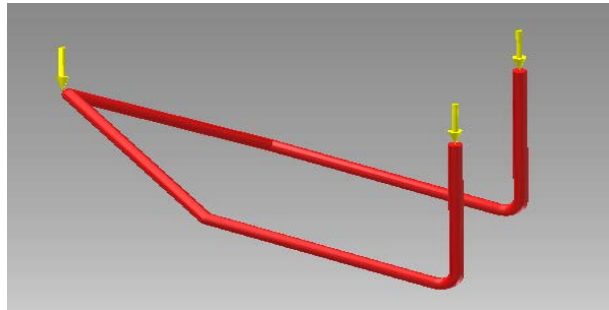


Rys. 9. Podpora nr 1  
Fig. 9. Support no. 1



Rys. 10. Podpora nr 2  
Fig. 10. Support no. 2

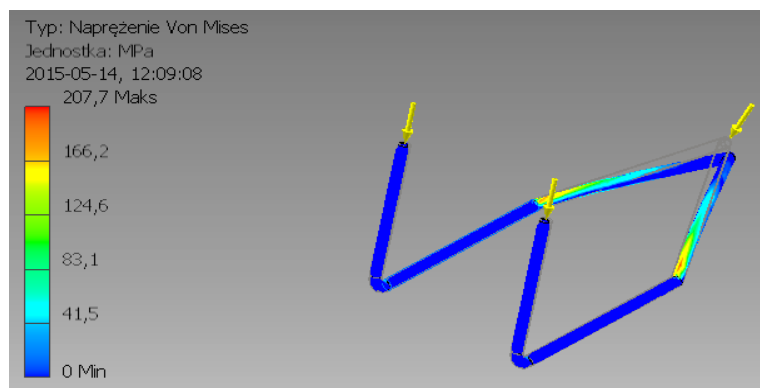
W celu przeprowadzenia analizy naprężeń model obciążono w trzech miejscach siłą o wartości 1000 N (rys. 11). Symulowało to obciążenie podpór stojaka motocyklem o masie równej 200 kg. Przyjęto założenie, że całkowita masa motocykla spoczywa na podporach stojaka, w rzeczywistości sytuacja taka nie powinna mieć miejsca. W chwili, w której motocykl spoczywa na stojaku, maksymalnie połowa jego masy może działać na stojak.



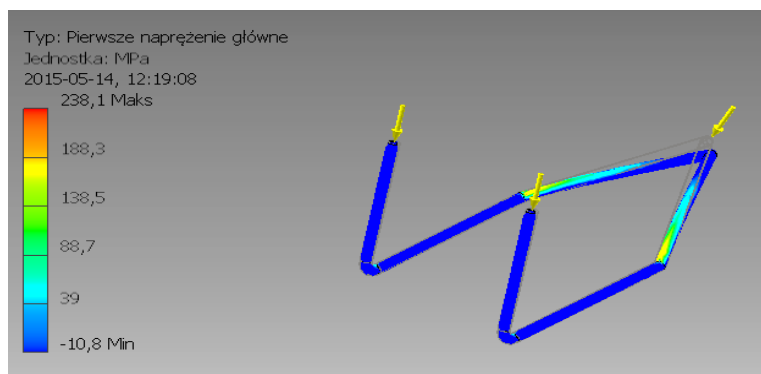
Rys. 11. Sposób obciążenia modelu w analizie  
Fig. 11. The load model in the analysis

#### 4.4. Wyniki analizy naprężeń

Wyniki symulacji naprężeń zaprezentowano w postaci graficznej na rysunkach 12-15.

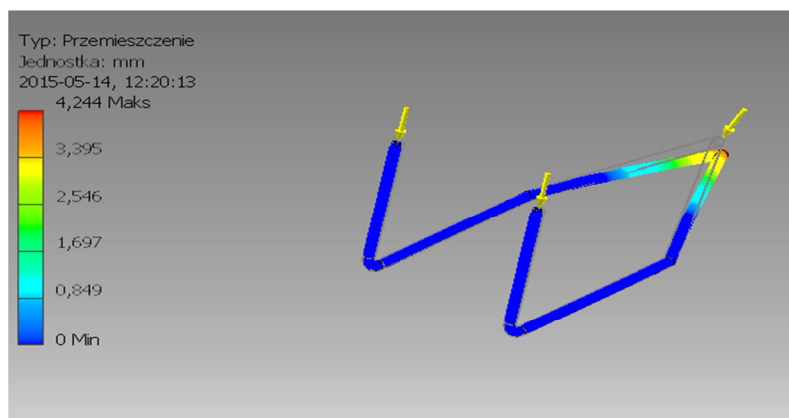


Rys. 12. Naprężenia Von Misesa  
Fig. 12. Von Misses stress analysis

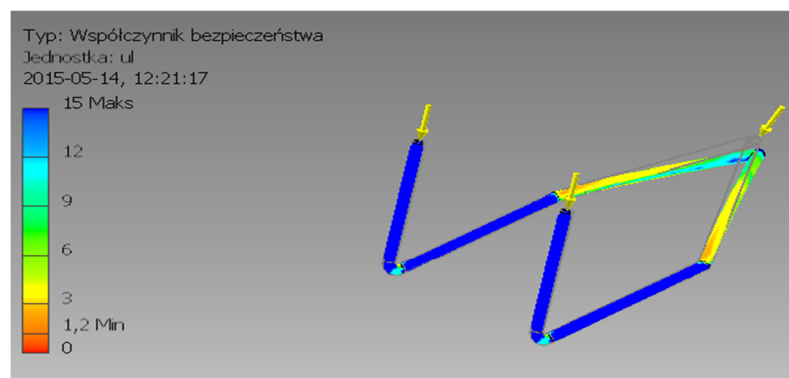


Rys. 13. Pierwsze naprężenie główne  
Fig. 13. Primary main stress





Rys. 14. Przeszczenie  
 Fig. 14. Displacements



Rys. 15. Współczynnik bezpieczeństwa  
 Fig. 15. Safety factor analysis

Na podstawie dokonanej analizy – wyników symulacji – można wnioskować, iż badany obiekt jest w stanie przetranszować zadane obciążenia. Granica plastyczności nie została przekroczone. Współczynnik bezpieczeństwa w przypadku tego rodzaju konstrukcji jest również zadowalający.

Wykonanie analizy naprężeń za pomocą programu Autodesk Inventor zajmuje nieporównywalnie mniej czasu niż wykonanie obliczeń analitycznych, co w przypadku bardziej złożonych konstrukcji ma wpływ na przyspieszenie prac projektowych. Jednak w przypadku bardzo odpowiedzialnych części maszyn lub obiektów bardzo złożonych należy pamiętać o ograniczonym zakresie stosowania MES, a także należałoby przyjąć większy współczynnik bezpieczeństwa.

Dokonano eksperymentalnej weryfikacji poprawności wykonanych analiz. Prototypowy stojak zastosowano do podnoszenia tyłu wyścigowego motocyklu Yamaha RJ15. Nie zaobserwowano niepokojących symptomów, świadczących o złym doborze materiału, jego przekroju i kształtu. Opracowany stojak jest

lżejszy od oferowanych na rynku oraz nie wymaga zabezpieczania go powłokami antykorozyjnymi.

#### **LITERATURA**

- [1] RAKOWSKI G., KACPRZYK Z.: MES w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [2] STASIAK F.: Autodesk Inventor Start!. Expert Books, 2008.
- [3] [www.knse.pl/publikacje/](http://www.knse.pl/publikacje/), Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych (MES) do numerycznych obliczeń inżynierskich.
- [4] [www.moto-akcesoria.pl](http://www.moto-akcesoria.pl).
- [5] [www.yamaha.pl](http://www.yamaha.pl).

### **DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF MOTORCYCLE RACK, USING AUTODESK INVENTOR SOFTWARE**

**Summary:** The article presents the design and analysis of race motorcycle stand. Design and analysis were performed in Autodesk Inventor 2014 and discussed.

**Key words:** Finite Element Analysis, CAx, strenght analysis, motorcycle stand

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 67-74

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Piotr SZEWCZYKOWSKI

**DESIGN THINKING – METODYKA ROZWIĄZYWANIA  
PROBLEMÓW**

**Streszczenie:** Uniwersytety XXI wieku, chcąc konkurować na światowym rynku o studentów, naukowców i granty, muszą wytworzyć odpowiednią kulturę sprzyjającą budowaniu interdyscyplinarnych zespołów, współpracy z przemysłem i znajdowaniu innowacyjnych rozwiązań. Metodyka Design Thinking w połączeniu z odpowiednią przestrzenią kreatywną funkcjonującą na terenie uniwersytetu może stać się początkiem zmian prowadzących do podniesienia wartości uniwersytetu.

**Słowa kluczowe:** Design Thinking, przestrzeń kreatywna, innowacyjność

## **1. WPROWADZENIE**

Sukces zarówno firm, jak i uniwersytetów funkcjonujących w Dolinie Krzemowej i niektórych krajach Europy (np. Skandynawii) polega na bliskiej współpracy biznesu i nauki oraz na budowaniu interdyscyplinarnych zespołów pracujących nad danym zagadnieniem.

Polska przy dużym potencjale społecznym nie wykorzystuje szans na miarę swoich możliwości, co przejawia się między innymi zajęciem 46. pozycji (na 141 państw) w rankingu Global Innovation Index 2015, określającym poziom innowacyjności [1]. Oczywiście występuje współpraca pomiędzy ośrodkami naukowymi a przedsiębiorstwami, podobnie jak pomiędzy naukowcami różnych dyscyplin, jednak nadal nie jest to zjawisko powszechne, a w ogólnej opinii pokutuje przekaz, iż nie potrafimy działać zespołowo i nie wypracowaliśmy odpowiedniego ekosystemu sprzyjającego innowacji [9].

Warunkiem przetrwania uniwersytetów, zwłaszcza w obecnej sytuacji demograficznej, jest nastawienie na współpracę z gospodarką i budowanie firm innowacyjnych na bazie technologii i patentów generowanych przez uczelnie. Nowoczesne uniwersytety to tzw. uniwersytety III generacji [11], których funkcjonowanie nie jest już oparte tylko na badaniach i edukacji, ale które dzięki współpracy z przemysłem rozwiązują konkretne problemy, wdrażają je w życie i dzięki temu uzyskują dodatkowe źródła finansowania. Pozycja uniwersytetu oparta na współpracy z przemysłem i zasoby finansowe pozwalają na konkrowanie z innymi ośrodkami o studentów zagranicznych, naukowców i granty naukowe. Całość sytuacji zwiększa drastycznie różnicę pomiędzy uniwer-

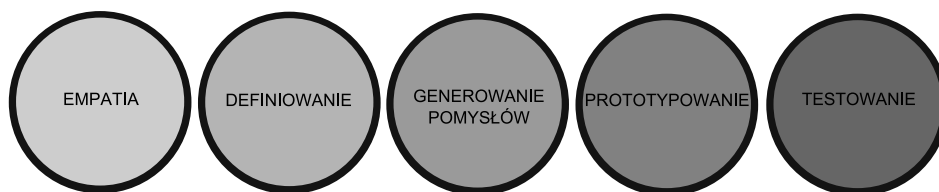
sytetami z czołowych miejsc światowych list rankingowych a uniwersytetami na dalszych pozycjach.

Bez wytworzenia odpowiedniej kultury współpracy, interdyscyplinarności i otwartości na nowe rozwiązania i zmiany organizacyjne uniwersytety na niższych pozycjach list rankingowych mają nikłe szanse na dogonienie czołówki.

Pod koniec lat 70. ubiegłego wieku na Uniwersytecie Stanforda opracowano metodykę znajdowania oryginalnych rozwiązań i tworzenia innowacyjnych produktów, opartą na interdyscyplinarnych zespołach, kontakcie z ostatecznym użytkownikiem i pobudzaniu ludzkiej kreatywności. Metoda okazała się na tyle skuteczna, że stała się podstawą do założenia międzynarodowej firmy IDEO, zajmującej się projektowaniem i doradztwem w zakresie innowacji [6]. Natomiast na terenie kampusu Uniwersytetu Stanforda powstała przestrzeń, osobny budynek, w którym naukowcy i studenci zarówno kierunków ścisłych, jak i humanistycznych pracują wspólnie nad znajdowaniem nie tyle nowych rozwiązań, co nad zupełnie nowym konceptem podejścia do danego problemu. Autorzy owej metodyki nazwali ją Design Thinking.

## 2. ETAPY METODYKI DESIGN THINKING

Metodyka Design Thinking składa się z pięciu podstawowych elementów, które przedstawia rysunek 1:



Rys. 1. Pięć elementów metodyki Design Thinking [5]  
Fig. 1. Five steps in Design Thinking procedure [5]

- **EMPATIA** (ang. *empathize*) – pierwszy krok to element empatii, który polega na obserwowaniu i zrozumieniu ludzkich zachowań, potrzeb, interakcji. Kluczowym aspektem całego Design Thinking jest wyjście od samego początku procesu do ostatecznego użytkownika. Osoby wchodzące w skład zespołu pracującego nad danym zagadnieniem nie rozwiązują go przy biurku. Wychodzą na zewnątrz. Uczestnicy pytają grupy docelowe, czego oczekują od produktu, usługi, procesu. Na tym wstępnym, jednak bardzo ważnym etapie członkowie zespołu zadają pytania, słuchają i zbierają wstępne dane. Na końcu, w wyniku poczynionych obserwacji, zespół powinien zrozumieć, nad czym właściwie ma pracować.
- **DEFINIOWANIE** (ang. *define*) – kolejnym kluczowym elementem jest właściwe zdefiniowanie problemu, który należy rozwiązać i obranie należytego punktu widzenia. Bez zwerbalizowania i określenia zakresu

problemu podejmowane jest ryzyko próby rozwiązania wszystkich problemów świata. Właściwe zdefiniowanie zagadnienia będzie rzutować na całą resztę prac zespołu. Może się również zdarzyć, iż w trakcie kontynuacji procesu okaże się, iż zespół niewłaściwie zdefiniował zagadnienie i będzie musiał wrócić do tego elementu.

- **GENEROWANIE POMYSŁÓW** (ang. *ideate*) – proces generowania maksymalnie dużej liczby pomysłów i rozwiązań w stosunkowo krótkim czasie oparty jest w metodyce Design Thinking na tzw. burzy mózgów (ang. *brainstorming*). Po to, aby przeprowadzić ten proces we właściwy sposób, należy stosować się do kilku podstawowych zasad, które nie zawsze okazują się łatwe do przyjęcia. Przede wszystkim zespół na tym etapie wyzbywa się negacji i ograniczeń w postaci nierealności rozwiązania lub braku pieniędzy. Nawet jeśli poddany przez uczestnika pomysł wydaje się absurdalny, nie jest on odrzucany. Zespół potrzebuje na tym etapie odpowiedniej przestrzeni, inspiracji i tablicy, przy której każdy z uczestników może swobodnie zapisać swój pomysł. Celem tego etapu jest wygenerowanie maksymalnie dużej możliwej liczby pomysłów w stosunkowo krótkim czasie (np. kilkudziesięciu rozwiązań w ciągu 10-15 min). W końcowej fazie zespół wybiera 1-2 rozwiązania i przystępuje do dalszej pracy.
- **PROTOTYPOWANIE** (ang. *prototype*) – etap tworzenia prototypów polega w pierwszej kolejności na stworzeniu prototypu niskiej rozdzielczości przy niskim nakładzie budżetowym. Sam proces tworzenia i wizualizacji rozwiązania powoduje eliminowanie podstawowych błędów konstrukcyjnych i koncepcyjnych na wczesnym etapie szukania najlepszego rozwiązania. Z drugiej strony, w trakcie realizacji prototypu pojawiają się nowe pytania i nowe pomysły, które nadal mogą inspirować zespół. Celem etapu tworzenia prototypu jest rozpoczęcie dyskusji przy prostym, tanim modelu i ewentualne wyeliminowanie pomysłu na wczesnym etapie procesu tworzenia lub jego rozwinięcie do lepszej wersji.
- **TESTOWANIE** (ang. *test*) – doświadczenie przedstawienia zaproponowanego rozwiązania ostatecznemu użytkownikowi jest swego rodzaju elementem zwrotnym całego procesu. Zespół wygenerował rozwiązanie, stworzył prototyp i przedstawia je ostatecznemu użytkownikowi. Ważną zasadą jest unikanie objaśniania prototypu. To ostateczny użytkownik powinien zadawać pytania, wypowiadać swoje zdanie i sprawdzać, na ile produkt, rozwiązanie jest jasne i intuicyjne. O ile prototyp został stworzony według zespołu jako najlepsze rozwiązanie z możliwych, o tyle w fazie testowania zespół powinien znajdować wszelkie możliwe słabe strony tego, co zaproponował, opierając się na odczuciach ostatecznego klienta. Po zebraniu informacji zespół decyduje o dalszych krokach. Czy wystarczy poprawić prototyp? Czy należy szukać nowego rozwiązania? Czy może zespół źle zdefiniował problem i należy zacząć prace od początku?

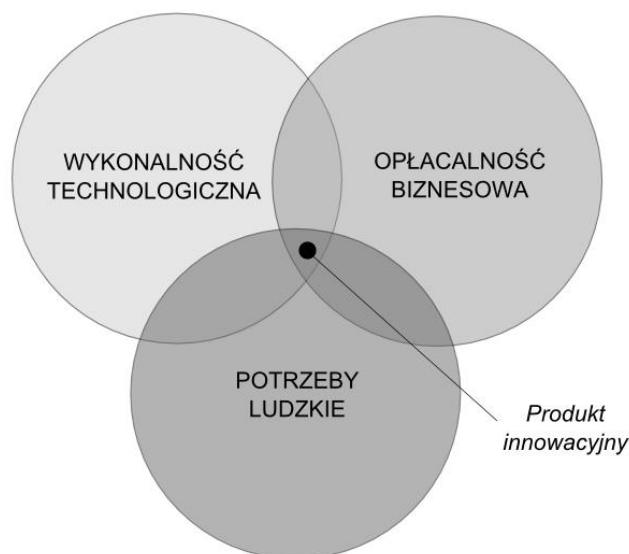
Co nam to daje? Pozwala to na stworzenie możliwości pracy ludzi różnych dyscyplin nad danym rozwiązaniem dla przemysłu, przełamanie oporów w kontaktach z ludźmi i w dalszej perspektywie tworzenie odpowiedniej kultury służącej innowacyjności i kreatywności.

Poszczególne elementy metodyki z pewnością funkcjonują w ramach danej uczelni, jednak dopiero usystematyzowanie procesu, jego cykliczność i zbudowanie tożsamości grupy pracującej nad danym zagadnieniem daje gwarancję sukcesu. Wprowadzenie Design Thinking w strukturę uniwersytetu może stać się początkiem zmiany mentalnościowej, która wpłynie na jego funkcjonowanie jako całości. Można pokusić się nawet o stwierdzenie, iż usystematyzowane wprowadzenie Design Thinking do programu edukacji może mieć wpływ nie tylko na uniwersytet, ale i dany region [10].

Ciekawym zagadnieniem, wymagającym jednak osobnej publikacji, byłoby porównanie Design Thinking z innymi metodami projektowania. Odniesienie do metod zarządzania i realizacji projektów (np. PRINCE2 czy Project Cycle Management PCM) mogłoby stwarzać trudności ze względu na różne płaszczyzny odniesienia w procesie projektowania. Design Thinking jest metodyką zdecydowanie bardziej chaotyczną, intuicyjną, niezbiurokratyzowaną i skupiającą się na ostatecznym kliencie i jego potrzebach. Nie podpowiada natomiast, jak zarządzać samym procesem czy jak spełnić wymagania instytucji finansującej projekt. W osobnym artykule można by odnieść się również do prac prof. Janusza Dietrycha z lat 70. ubiegłego wieku, które dotyczyły projektowania w ujęciu inżynierskim i powstawały w czasie formowania się metodyki Design Thinking [2, 3]. Janusz Dietrych, opisując cechy istotne przy projektowaniu prawidłowo funkcjonującego wytworu technicznego, zwraca uwagę, iż:

- a) wytwór powinien być zaprojektowany tak, aby można go wykonać za pomocą dostępnych środków, technologii,
- b) użycie, powstanie wytworu powinno być opłacalne pod względem ekonomicznym,
- c) wytwór powinien spełniać określony cel techniczny.

Co ciekawe, tak zdiagnozowane wymagania pokrywają się z cechami, jakie powinien wykazywać wytwór innowacyjny według profesora Uniwersytetu Stanforda, Davida Kelley'ego. Produkt taki powinien być jednocześnie wykonywalny technologicznie, opłacalny ekonomicznie i powinien spełniać konkretne potrzeby ludzkie (rys. 2).



Rys. 2. Model tworzenia produktu innowacyjnego w oparciu o Design Thinking wg profesora Uniwersytetu Stanforda, Davida Kelley [7]

Fig. 2. Design Thinking model by David Kelley, Prof. in Mechanical Engineering at Stanford University [7]

DT wyróżnia przede wszystkim czynnik kulturotwórczy. Ani w metodach zarządzania projektami, ani w samym projektowaniu inżynierskim nie ma konieczności budowania zespołów złożonych z ludzi o mocno odmiennych specjalizacjach i punktach widzenia, pobudzania u uczestników samopewności twórczej czy spłaszczania struktury organizacyjnej zespołu. To co ponadto wyróżnia DT, to zwrócenie uwagi na znaczenie przestrzeni i jej aranżacji w procesie twórczym [4].

### 3. KREATYWNA PRZESTRZEŃ – KULTURA KREATYWNOŚCI

W 2004 roku na Uniwersytecie Stanforda powstał Hasso Plattner Institute of Design, określany mianem D.School. Instytut został założony przez profesora inżynierii mechanicznej Davida Kelley'ego, który z kolei w 1991 roku założył firmę IDEO, realizującą projekty zgodnie z metodyką DT. D.School stanowi przestrzeń, w której artysta może znaleźć wspólny język z inżynierem. Zarówno ludzie o umysłach humanistycznych, jak i ścisłych realizują wspólnie niełatwe projekty, dotyczące trudno definiowalnych problemów, tzw. *wicked problems* [8]. Kulturze współpracy i komunikacji sprzyja odpowiednio dostosowana i zaaranżowana przestrzeń, której fragment przedstawia rysunek 3. Mobilne ściany i meble pozwalają na dostosowywanie dopasowania przestrzeni do potrzeb pracującego zespołu. Wszechobecne białe tablice umożliwiają zapisywanie pomysłów i planowanie kolejnych kroków na każdym etapie procesu. Widoczne na zdjęciu stoliki i krzesła zaprojektowane są w taki sposób, po to aby osoba stojąca nie górowała fizycznie na osobami siedzącymi,

co mogłoby sugerować narzucanie swojej wersji rozwiązań. Tak zbudowana przestrzeń wraz z określonymi zasadami współpracy tworzy odpowiednią kulturę, którą można śmiało określić jako kulturę innowacyjności.



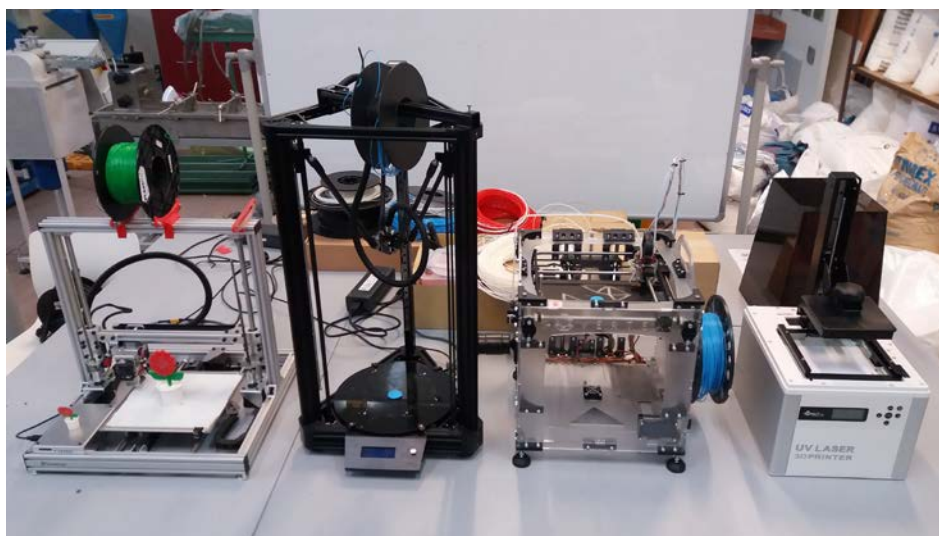
Rys. 3. Wnętrze D.School na Uniwersytecie Stanforda  
Fig. 3. Inside of D.School at Stanford University

Metodyka Design Thinking dzięki swoim zaletom kulturotwórczym ma szansę także i w Polsce na zapoczątkowanie odpowiednich zmian mentalności i budowania odpowiedniej kultury pracy uniwersytetu czy organizacji. Wzorując się na najlepszych uczelniach, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy (UTP) im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy przystąpił w 2013 roku do realizacji projektu z Działania 8.2.1 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki pod nazwą Design Thinking Workspace – Pracownia Szybkiego Prototypowania.

Projekt był realizowany na Wydziale Inżynierii Mechanicznej do końca 2015 roku. W tym czasie zrealizowano 19 projektów na rzecz przedsiębiorstw sektora MŚP (mikro-, małe i średnie przedsiębiorstwa) z województwa kujawsko-pomorskiego. Projekty były realizowane zgodnie z metodyką Design Thinking, w zespołach złożonych ze studentów różnych kierunków studiów



UTP, opiekuna naukowego i metodyka. Współpraca nawiązana w ramach działalności Pracowni zaowocowała między innymi przyznaniem sześciu projektów z programu „Voucher badawczy”, finansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego i realizowanego przez „Pracodawców Pomorza i Kujaw” Związek Pracodawców. Niebagatelną rolę w realizacji projektów odegrali pracownicy Zakładu Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw UTP, dzięki którym zespoły zostały wzmocnione wiedzą i doświadczeniem w zakresie przetwórstwa tworzyw polimerowych, konstrukcji i druku 3D (rys. 4).



Rys. 4. Urządzenia szybkiego prototypowania w Zakładzie Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw UTP, który współpracuje z SHOPA Design Thinking Workspace

Fig. 4. Examples of different 3D printers belonging to Department of Polymer Processing and Recycling cooperating with SHOPA Design Thinking Workspace

W trakcie projektu przeprowadzono szereg szkoleń i warsztatów z metodyki DT, skierowanych do naukowców, przedsiębiorców oraz studentów. Zorganizowano również dwie międzynarodowe konferencje, których liczba uczestników z kraju i zagranicy (łącznie prawie pół tysiąca osób) świadczy o dużym zainteresowaniu tematyką Design Thinking.

Pracownia szybkiego prototypowania – Design Thinking Workspace na Wydziale Inżynierii Mechanicznej UTP była pierwszym tego typu ośrodkiem uczelnianym w kraju, który zrealizował projekty z przedsiębiorstwami w opierając się na metodyce DT. Rozszerzenie kultury współpracy i realizacji projektów zgodnie z Design Thinking na pozostałe wydziały stanowiłoby niebagatelną zmianę w skali Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

## LITERATURA

- [1] Cornell University, INSEAD, and WIPO: The Global Innovation Index 2015: Effective Innovation Policies for Development, Fontainebleau, Ithaca, and Geneva, 2015.
- [2] DIETRYCH J.: Konstrukcja i konstruowanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1968.
- [3] DIETRYCH J.: System i konstrukcja. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.
- [4] DOORLEY S., WITTHOFT S.: Make Space. John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012.
- [5] <http://dschool.stanford.edu/wp-content/uploads/2011/03/BootcampBootleg2010v2SLIM.pdf>, na podstawie ogólnodostępnych materiałów zgodnie z licencją Creative Commons.
- [6] KELLEY T., LITTMAN J.: Sztuka Innowacji. MT Biznes, Warszawa, 2009.
- [7] MARCA P.: Wykład w Stanford Center for Professional Development dla uczestników programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego – TOP 500 Innovators, Stanford, 2011.
- [8] RITTEL H.W.J., WEBBER M.M.: Dilemmas in a General Theory of Planning. Policy Sciences 4, 1973, 155-169.
- [9] SZEWCZYKOWSKI P.: Amerykańska droga budowania ekosystemu innowacyjnego. Seminarium „Transfer wyników badań naukowych do gospodarki”, Wrocławskie Centrum Transferu Technologii Politechniki Wrocławskiej, 2012.
- [10] SZEWCZYKOWSKI P., BOJAR W., SOBOTA D., ZAJDEL M.: Design thinking jako metoda intensyfikacji rozwoju regionalnego. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Marketing i Rynek 10, 2014, 183-189.
- [11] WISSEMA J.G.: Iniwersytet Trzeciej Generacji Uczelnia XXI wieku. Zante, Zębice, 2009.

## DESIGN THINKING – METHODOLOGY FOR SOLVING PROBLEMS

**Summary:** Universities of the XXI century need to create a new culture which supports building interdisciplinary teams, cooperation with the industry and innovative solutions in order to compete for students, scientists and grants on the global market. Design Thinking methodology together with appropriate creative space existing at the university site may be the beginning of change to enhance the value of the university.

**Key words:** Design Thinking, creative space, innovation

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

6(3)/2015, 75-80

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Tomasz ŻUK, Krzysztof KRÓLIKOWSKI

**DEMONTAŻ CHŁODNIC POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH  
Z WYKORZYSTANIEM NOWATORSKIEGO URZĄDZENIA  
DO ICH RECYKLINGU**

**Streszczenie:** Zaprezentowano urządzenie do demontażu chłodnic pochodzących z użytkowych pojazdów na poszczególne jej elementy celem odzysku wartościowych materiałów. Przedstawiono wyniki badań skuteczności demontażu chłodnic nową metodą na siedmiu chłodnicach, a następnie zmierzono czas demontażu takich samych chłodnic z wykorzystaniem tradycyjnych narzędzi.

**Słowa kluczowe:** recykling mechaniczny, recykling chłodnic

## 1. WSTĘP

Odpady tworzyw polimerowych pochodzące z pojazdów samochodowych wycofanych z eksploatacji należą do tzw. tworzyw inżynierskich, odznaczających się dobrymi właściwościami użytkowymi. Tworzywa te są w głównej mierze mieszaniną bazowych odmian polimerów wzbogaconych o środki dodatkowe, takie jak: napełniacze, barwniki, związki zmniejszające palność oraz metale ciężkie. Odzysk tworzyw PA, ABS, PC, PVC, PP-EPDM jest korzystny ekonomicznie ze względu na niższą cenę oraz porównywalne właściwości recyklatów w odniesieniu do oryginalnych tworzyw polimerowych. Zagospodarowanie powstających w wyniku demontażu pojazdów tworzyw odpadowych jest uzasadnione zarówno ze względów ekonomicznych, jak i ekologicznych, gdyż stanowi obowiązek określony przez odpowiednie ustawy. Uchwalona 20 stycznia 2005 r. ustawa o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji reguluje kwestie prawne postępowania z wyeksploatowanymi pojazdami. Zgodnie z jej założeniami od początku 2015 r. osiągnięty w stacjach demontażu pojazdów poziom odzysku i recyklingu ma wynosić odpowiednio 95 i 85%. Zakłady demontażu pojazdów wycofanych z eksploatacji odgrywają kluczową rolę w systemie recyklingu tworzyw polimerowych. W przedsiębiorstwach tych w wyniku procesów demontażu uzyskuje się posegregowane surowce tworzywowe. Stacje, aby spełnić założenia dyrektywy oraz prowadzić działalność potwierdzoną ekonomicznie, powinny dysponować odpowiednimi narzędziami usprawniającymi proces demontażu i recyklingu. Jednym z wielu podzespołów poddawanych re-

---

dr inż. Tomasz ŻUK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: zuk@wp.pl

mgr inż. Krzysztof KRÓLIKOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: mankris4@wp.pl

cyklingowi w stacjach demontażu pojazdów są chłodnice samochodowe. Składają się one z wymiennika ciepła wykonanego najczęściej z aluminium. Wymiennik zbudowany jest w postaci aluminiowych rurek przez które przepływa ciecz chłodząca. Z zewnętrzną powierzchnią rurek połączone są żebra aluminiowe dla stworzenia dużej powierzchni wymiany ciepła. Rurki wraz z żebrami stanowią rdzeń chłodnicy. Na obu końcach rdzenia chłodzącego (wymennika) znajdują się zbiorniki wykonane z tworzywa polimerowego, przymocowane za pomocą metalowych kołnierzy zaciśniętych na zbiornikach doprowadzającym oraz odprowadzającym ciecz roboczą. Najczęściej stosowanym tworzywem polimerowym do produkcji tych zbiorników jest poliamid typu 6.6 (PA 6.6). Kołnierz wraz ze zbiornikiem tworzy bok chłodnicy. Tradycyjne metody demontażu chłodnic samochodowych nie zapewniają pełnego rozdziału materiałów polimerowych od metalowych kołnierzy. W przypadku tych metod, elementy tworzywowe pozostają zanieczyszczone metalowym kołnierzem, a także pozostałościami rurek rdzenia. Dobre właściwości użytkowe recyklatów z PA, a także ich współmieszalność z innymi gatunkami PA (w tym z PA 6, PA6.6 oraz PA6.6/6) powodują znaczne zainteresowanie tego typu materiałami przez wiele gałęzi przemysłu.

Zaprezentowany w dalszej części pracy nowatorski sposób oraz rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia do recyklingu chłodnic rozwiązuje problem czystości oraz wydajności odzysku materiałów pochodzących z chłodnic pojazdów samochodowych, przez umożliwienie demontażu chłodnicy na poszczególne jej elementy (dwa metalowe kołnierze, aluminiowy rdzeń, dwa zbiorniki tworzywowe).

### **1.1. Przemysłowe metody recyklingu chłodnic**

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury i stanu techniki można wyróżnić dwie metody recyklingu chłodnic samochodowych. Znany jest sposób recyklingu chłodnic poprzez odcinanie boków chłodnicy od jej rdzenia. W wyniku tego procesu zbiornik polimerowy połączony z metalowym kołnierzem zostaje oddzielony od aluminiowego rdzenia chłodnicy. Wadą tej metody jest brak możliwości rozdziału polimerowego zbiornika od metalowego kołnierza za pomocą jednej operacji technologicznej. Wymusza to konieczność wykonania dodatkowych operacji rozdzielania tych dwóch elementów. Znany jest również sposób rozdziału chłodnic samochodowych poprzez procesy rozdrabniania (strzępienia). Urządzenie wykorzystywane w tym procesie, zwane potocznie „strzępiarką”, rozdrabnia chłodnicę na mniejsze elementy. Rozdzielenie tworzywa polimerowego od metalu odbywa się poprzez dalszą separację, np.: magnetyczną lub za pomocą prądów wirowych. Recykling chłodnic z separacją rozdrobnionej frakcji uzasadniony jest w przypadku prowadzenia procesu w skali wielkotonażowej.

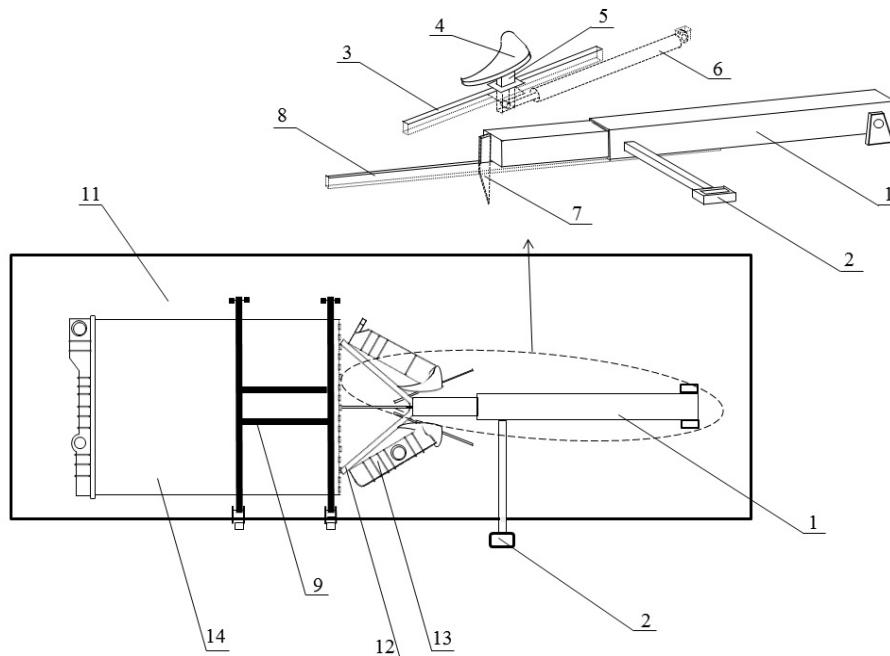
## **2. URZĄDZENIE DO RECYKLINGU CHŁODNIC**

### **2.1. Budowa**

Budowę nowatorskiego urządzenia do recyklingu chłodnic przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Urządzenie składa się z blatu stołu roboczego (11), na krawędzi którego zamontowane jest wahliwie teleskopowe ramię (1) napędzane hydraulicznie, do którego przymocowane jest poprzecznie ostrze (7) w kształcie ściętego płaskownika. Ramię (1) w przekroju poprzecznym ma kształt dwóch zamkniętych kwadratowych profili. Do zewnętrznego profilu ramienia przymocowana jest rękojeść (2). W blacie stołu (11) wykonane są dwa wycięcia wykonane pod kątem 35 stopni w odniesieniu do linii ruchu teleskopowego ramienia. Wycięcia tworzą prowadnice (3) dla zgarniaczy. Dodatkowo w powierzchni stołu wykonane jest wycięcie (8), w którym przemieszcza się ostrze po przebicium rdzenia chłodnicy. Do stołu przymocowane są od spodu dwa gazowe teleskopy (6) umieszczone równolegle z prowadnicami i połączone przegubowo poprzez łączniki (5) z każdym ze zgarniaczy. Specjalnie ukształtowane zgarniacze (4) wykonane są z odpowiednio konstrukcyjnie grubej blachy. Przed teleskopowym ramieniem złączona jest wahliwie z blatem stołu rama (9) dociskowa wykonana na kształt litery H, mająca na swojej powierzchni kolce od strony zetknięcia z rdzeniem chłodnicy. Na ramie dociskowej i blacie stołu w miejscach kotwienia chłodnicy zamontowane są naprzemiennie kolce (do ramy) oraz przeciwkolce (do powierzchni stołu). Rama dociskowa zaopatrzona jest w dwa mechanizmy (10) odpowiadające za dociśnięcie konstrukcji ramy (9) do blatu stołu oraz za jej zablokowanie na czas demontażu.

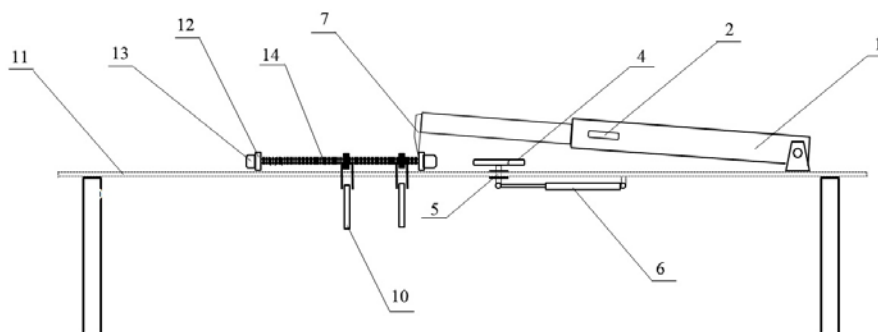
### **2.2. Zasada działania**

Nowa metoda recyklingu chłodnic samochodowych polega na rozłączeniu każdego z boków chłodnicy od aluminiowego rdzenia z jednoczesnym oddzieleniem metalowego kołnierza od tworzywowego zbiornika. W sposobie tym unieruchamia się rdzeń za pomocą specjalnej ramy (9) dociskowej, nieruchomo stabilizującej chłodnicę do blatu stołu (11) roboczego. Następnie przebija się ostrzem aluminiowy rdzeń tuż za metalowym kołnierzem w jego środkowej części. Oddzielenie boku chłodnicy od korpusu następuje w wyniku posuwistego ruchu ramienia, z jednoczesnym przełamaniem zbiornika na dwie części. Dalszy ruch ramienia naprowadza przełamany bok chłodnicy na układ dwóch zgarniaczy (4) rozdzielających elementy zbiornika wykonane z tworzywa polimerowego od metalowego kołnierza (12).



Rys. 1. Urządzenie do recyklingu chłodnic [6]: 1 – ramię teleskopowe, 2 – rękojeść, 3 – prowadnice, 4 – zgarniacze, 5 – łączniki, 6 – teleskopy, 7 – ostrze, 8 – wycięcie, 9 – rama dociskowa, 11 – stół roboczy, 12 – metalowy kołnierz chłodnicy, 13 – element polimerowego zbiornika, 14 – rdzeń chłodnicy

Fig. 1. The coolers recycling device [6]: 1 – telescopic arm, 2 – handle, 3 – rails, 4 – scrapers, 5 – connectors, 6 – telescopes, 7 – edge, 8 – notch, 9 – pressing frame, 11 – work table, 12 – cooler metal collar, 13 – parts of a polymer reservoir, 14 – radiator core



Rys. 2. Urządzenie do recyklingu chłodnic [6]: 1 – ramię teleskopowe, 2 – rękojeść, 4 – zgarniacze, 5 – łączniki, 6 – teleskopy, 7 – ostrze, 10 – mechanizmy, 11 – stół roboczy, 12 – metalowy kołnierz chłodnicy, 13 – element polimerowego zbiornika, 14 – rdzeń chłodnicy

Fig. 2. The coolers recycling device [6]: 1 – telescopic arm, 2 – handle, 4 – scrapers, 5 – connectors, 6 – telescopes, 7 – edge, 10 – mechanisms, 11 – work table, 12 – cooler metal collar, 13 – part of a polymer reservoir, 14 – radiator core

### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Przeprowadzono badania skuteczności funkcjonowania nowatorskiego urządzenia do recyklingu chłodnic samochodowych. Przygotowano po dwie chłodnice (CH1, CH2) z następujących modeli pojazdów samochodowych: (a) Volkswagen Golf II 1,6 diesel, (b) Volkswagen Golf III 1.6 benzyna, (c) Opel Vectra A 1,8 benzyna, (d) Opel Omega B 2,0 benzyna, (e) Opel Astra MK1 1,4 benzyna, (f) Renault Clio Mk1 1.4 benzyna oraz (f) Fiat Punto I 1,1 benzyna. Proces demontażu chłodnic CH1 przeprowadzono z wykorzystaniem nowatorskiego urządzenia do recyklingu chłodnic, natomiast chłodnic CH2 przy użyciu tradycyjnych narzędzi ręcznych. Podczas badań mierzono czas procesu recyklingu. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań procesu recyklingu chłodnic  
Table 1. The results of coolers recycling

Model pojazdu	Czas procesu recyklingu chłodnic CH1, [s]	Czas procesu recyklingu chłodnic CH2, [s]
Volkswagen Golf II 1,6 diesel	168	482
Volkswagen Golf III 1.6 benzyna	142	512
Opel Vectra A 1,8 benzyna	150	392
Opel Omega B 2,0 benzyna	156	474
Opel Astra MK1 1,4 benzyna	160	448
Renault Clio Mk1 1.4 benzyna	164	476
Fiat Punto I 1,1 benzyna	186	514

Z przeprowadzonych badań wynika, że czas procesu recyklingu wybranych chłodnic pojazdów samochodowych, z wykorzystaniem nowatorskiego urządzenia do recyklingu chłodnic, zawierał się w przedziale od 142 do 186 s. Czas recyklingu tych samych chłodnic, za pomocą tradycyjnych narzędzi, mieścił się w przedziale od 392 do 514 s. Porównując otrzymane wyniki można stwierdzić, że czas demontażu za pomocą nowatorskiego urządzenia do recyklingu chłodnic jest około 3-krotnie krótszy w porównaniu z tradycyjnymi metodami ich demontażu. Krótszy czas demontażu za pomocą nowego urządzenia wynika ze zautomatyzowania procesu rozdzielania metalowych boków od rdzenia chłodnicy, braku konieczności ręcznego rozdzielania zbiorników tworzywowych chłodnicy od uszczelek oraz metalowych łączników.

### 4. PODSUMOWANIE

Recykling odpadów tworzywowy polimerowych z użytkowych pojazdów samochodowych jest ekonomicznie uzasadniony w przypadku zastosowania specjalistycznych narzędzi i urządzeń przeznaczonych do tego procesu. Z uwagi na korzystne właściwości użytkowe tworzyw polimerowych pochodzących z chłodnic pojazdów samochodowych opracowano nowe urządzenie do recyklingu chłodnic, umożliwiające oddzielane tworzywowych boków od rdzenia chłodnicy. Przedstawione wyniki badań recyklingu chłodnic nową me-

tożą dowodzą zwiększonej efektywności procesu, przez skrócenie czasu ich demontażu na poszczególne surowce, w porównaniu z metodami tradycyjnymi. Skrócenie czasu demontażu chłodziw samochodowych jest korzystne ze względów ekonomicznych punktu widzenia.

#### LITERATURA

- [1] KOZŁOWSKI M. (red), RYDAROWSKI H. (red.): Recykling odpadów polimerowych z elektroniki i pojazdów. WNT, Warszawa, 2012.
- [2] MIERKISZ-GURANOWSKA A.: Recykling samochodów w Polsce. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, 2007, 23-27, 50-53.
- [3] OSIŃSKI J., ŻACH P.: Wybrane zagadnienia recyklingu samochodów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa, 2009.
- [4] Ustawa z dnia 20 stycznia 2005 r. o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji (Dz.U. z 2013 r. poz. 1162 z późn. zm.).
- [5] Ustawa o zmianie ustawy o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji oraz niektórych innych ustaw. Projekt z 14 marca 2012.
- [6] ŻUK T., KRÓLIKOWSKI K., TOMPOROWSKI A., PISZCZEK K.: Sposób recyklingu chłodziw i urządzenie do recyklingu chłodziw. Zgłoszenie patentowe nr P.405365, Polska, 2013.

#### DISASSEMBLY OF VEHICLE COOLERS WITH THE USE OF AN INNOVATIVE COOLER RECYCLING DEVICE

**Summary:** An innovative method and device for disassembly of used vehicle coolers into particular elements for the purposes to recover valuable materials was presented. Results of tests on effectiveness of disassembly of coolers with the use of the new method with respect to seven coolers were presented and the time of disassembly of the same coolers with the use of traditional tools was measured.

**Key words:** mechanical recycling, coolers recycling



**Lista recenzentów prac opublikowanych w numerach 5(3) 2015 oraz 6(3)2015**  
**Reviewers list publication published in issues 5(3) 2015 and 6(3) 2015**

prof. dr hab. inż. Andrzej Bochat	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Zdzisław Bogdanowicz, prof. WAT	Wojskowa Akademia Techniczna
dr hab. inż. Dariusz Boroński, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
doc. dr inż. Franciszek Bromberek	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Grzegorz Domek	Uniwersytet Kazimierza Wielkiego
dr hab. inż. Halina Egner	Politechnika Krakowska
dr hab. inż. Jarosław Filipiak, prof. PW	Politechnika Wrocławska
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Tomasz Giesko, prof. UTP	Instytut Technologii Eksploatacji
dr hab. inż. Aleksander Karolczuk, prof. PO	Politechnika Opolska
dr hab. inż. Janusz Kozak, prof. PG	Politechnika Gdańska
dr hab. inż. Bogdan Ligaj, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda	Politechnika Opolska
dr hab. inż. Marek Macko	Uniwersytet Kazimierza Wielkiego
dr inż. Małgorzata Michalcewicz- -Kaniowska	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Klaudiusz Migawa, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Łukasz Muślewski, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Adam Niesłony, prof. PO	Politechnika Opolska
dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. PO	Politechnika Opolska
<u>dr hab. inż. Jurij Shalapko, prof. UTP</u>	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
płk. dr hab. inż. Przemysław Simiński, prof. WITPiS	Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej
dr hab. inż. Dariusz Skibicki, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Dariusz Sykutera, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Grzegorz Szala, prof. UTP	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
dr hab. inż. Lucjan Śniezek, prof. WAT	Wojskowa Akademia Techniczna

dr hab. inż. Andrzej Tomporowski,  
prof. UTP

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy

prof. dr hab. inż. Tomasz Topoliński

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy