

# **Wybrane zagadnienia z budowy i eksploatacji maszyn**

Selected issues from machine building and exploitation

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 LUBLIN



# **Wybrane zagadnienia z budowy i eksploatacji maszyn**

Selected issues from machine building and exploitation

redakcja

**Leszek Gardyński**

**Mirosław Szala**



Politechnika Lubelska  
Lublin 2013

## **RECENZENCI**

prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater, Politechnika Lubelska  
dr hab. Tadeusz Hejwowski, prof. Politechniki Lubelskiej  
dr hab. inż. Rafał Longwic, prof. Politechniki Lubelskiej

Wszystkie opublikowane artykuły zostały pozytywnie zrecenzowane

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN 978-83-63569-85-3

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

[www.biblioteka.pollub.pl](http://www.biblioteka.pollub.pl)

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

[www.agencjatom.pl](http://www.agencjatom.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 50 egz.

## SPIS TRESCI

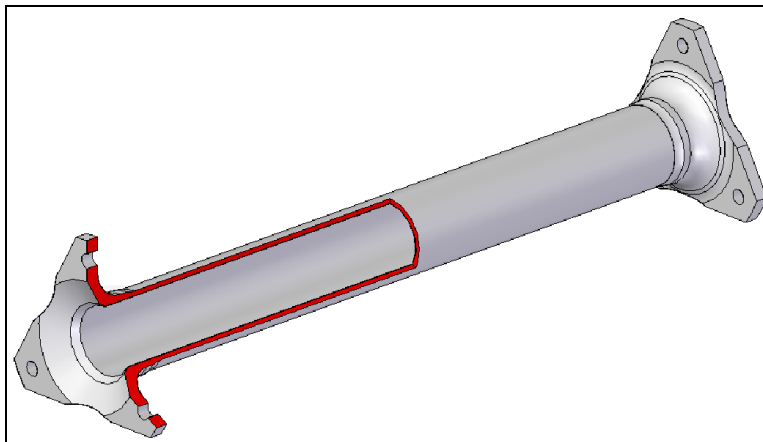
|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Innowacyjne metody plastycznego kształtowania wyrobów drążonych z kołnierzami.....                    | 6   |
| <i>Grzegorz Winiarski, Andrzej Gontarz, Grzegorz Samołyk</i>                                          |     |
| Teoretyczna analiza wyciskania elementów śrubowych .....                                              | 21  |
| <i>Tomasz Bulzak</i>                                                                                  |     |
| Innowacyjne rozwiązania kształtowania odkuwek wsporników wykorzystywanych w przemyśle lotniczym ..... | 34  |
| <i>Anna Dziubińska, Andrzej Gontarz</i>                                                               |     |
| Charakterystyka zabezpieczeń magnetycznych na przykładzie wybranego stopu amorficznego .....          | 49  |
| <i>Kamila Zdrodowska</i>                                                                              |     |
| Badania eksploatacyjne pojazdu jednośladowego z napędem elektrycznym .....                            | 61  |
| <i>Ewa Siemionek</i>                                                                                  |     |
| Uszkodzenia eksploatacyjne elementów pojazdów .....                                                   | 76  |
| <i>Leszek Gardyński, Mirosław Szala</i>                                                               |     |
| Indeks autorów .....                                                                                  | 110 |

## **Innowacyjne metody plastycznego kształtowania wyrobów drążonych z kołnierzami**

### **1. Wstęp**

Wyroby drążone znajdują coraz większe zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Zastosowanie elementów drążonych w budowie maszyn nie tylko pozwala zmniejszyć masę konstrukcji, ale również poprawia dynamikę pracy maszyn (szczególnie pojazdów i statków powietrznych), co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia zużycia energii i paliwa oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Wyroby drążone z kołnierzami znajdują szerokie zastosowanie w produkcji wielu maszyn i urządzeń. Doskonałym przykładem jest wał przeniesienia napędu stosowany w budowie śmigłowców, który przedstawiono na rys. 1. Wał ten posiada dwa skrajne zewnętrzne kołnierze kształtowe, w których dodatkowo wykonane są po trzy otwory służące do połączenia go np. ze sprzęgłem.



Rys. 1. Wał drążony ze skrajnym kołnierzem stosowany w budowie śmigłowców

---

<sup>1</sup> g.winiarski@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej

<sup>2</sup> a.gontarz@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej

<sup>3</sup> g.samolyk@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej

Elementy drążone z kołnierzem stosuje się również w budownictwie, np. do produkcji słupów ulicznych. Przedstawiona na rys. 2 podstawa takiego słupa wykonana jest z dwóch elementów trwale połączonych ze sobą. Rurę, wykonaną ze stopu aluminium, poddaje się obróbce na specjalnie skonstruowanych urządzeniach sterowanych numerycznie – tj. metodą zginięcia przekształca się cylindryczny fragment rury w stożkowy. Następnie, podstawa słupa oraz otrzymany stożek są spawane ze sobą na zrobotyzowanym stanowisku spawalniczym, dzięki czemu zapewniona jest wysoka jakość i estetyka. Taka technologia gwarantuje również powtarzalność żądanych parametrów [9].



Rys. 2. Podstawa słupa ulicznego [9]

Części z kołnierzami wykorzystywane są również w hydraulicznych instalacjach sanitarnych i przemysłowych jako filtry, przyłącza, kolanka kształtki kołnierzowe itp. Przykłady takich części pokazano na kolejnych rys. 3 i rys. 4.



Rys. 3. Filtr do instalacji przemysłowych z przyłączem kołnierzowym [10]



Rys. 4. Trójnik z trzema kołnierzami [11]

Barierą w zastosowaniu wyrobów drążonych na dużą skalę są ograniczenia technologiczne metod ich wytwarzania. Stosowane obecnie technologie nie nadążają za potrzebami konstruktorów, w szczególności jeśli chodzi o przemysł motoryzacyjny, gdzie dominuje produkcja wielkoseryjna i masowa.

Najczęściej stosowana metoda, tj. obróbka skrawaniem z materiału w postaci pręta pełnego, jest materiałochłonna (odnotowuje się nawet ponad 90% straty materiału) i pracochłonna, co przy produkcji masowej jest mało opłacalne.

W przypadku części mniej obciążonych, do ich produkcji stosowane są różne odmiany technik odlewania. Jednak stosunkowo mała wydajność tej technologii oraz niekorzystne własności mechaniczne, np. w porównaniu do wyrobów kutych, wyklucza ją z zastosowania w procesie produkcyjnym na dużą skalę.

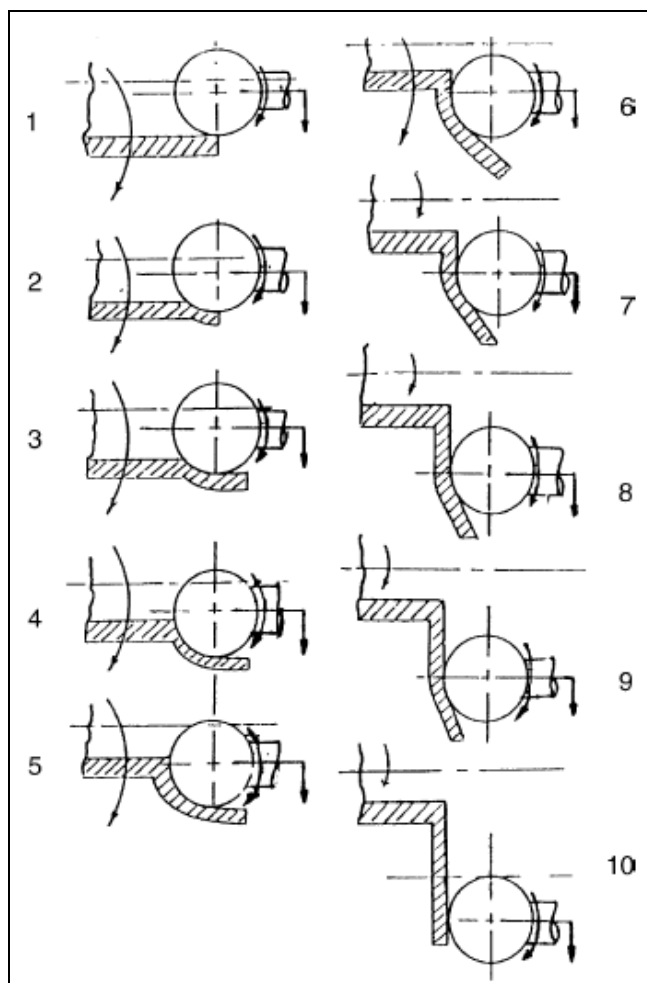
Niedopuszczalne wady wyrobu niestety również powstają przy zastosowaniu innych technologii, stosowanych w produkcji wałów jako części modułowych. Tutaj można wskazać np. spawanie (np. w przypadku wałów i osi z dołączanymi kołnierzami zewnętrznymi) lub inne techniki składania wałów z wielu elementów. Dodatkowym czynnikiem powodującym, że takie rozwiązania technologiczne są nieatrakcyjne dla producentów wielkoseryjnych, jest ich mała wydajność.

## **2. Dotychczasowe metody wytwarzania monolitycznych wyrobów drążonych z kołnierzami**

Dotychczas znanych i stosowanych jest szereg metod wytwarzania zewnętrznych, monolitycznych kołnierzy rur stanowiących jeden kawałek materiału z częścią trzonową. Podstawową, powszechnie stosowaną metodą produkcji zewnętrznych kołnierzy rur jest obróbka skrawaniem. W metodzie tej półfabrykatem jest pręt lub rura, o średnicy zewnętrznej większej lub równej średnicy kołnierza i średnicy wewnętrznej – w przypadku wsadu w postaci rury mniejszej od średnicy wewnętrznej gotowego wyrobu. Półfabrykat poddawany jest obróbce wiórowej i poprzez skrawanie kolejnych warstw materiału jest uzyskiwany kołnierz.

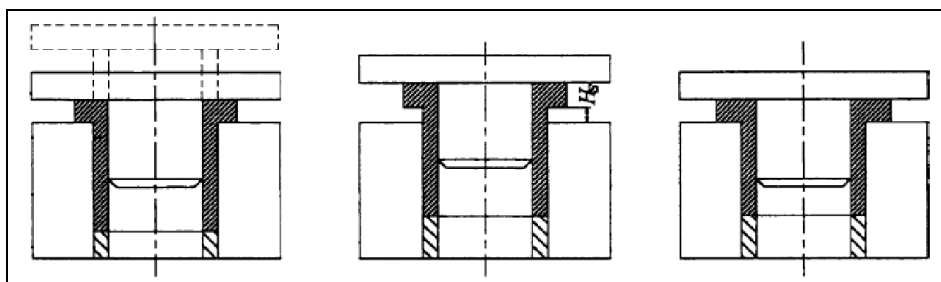
Kolejne metody kształtowania kołnierzy, zaliczane do obróbki plastycznej polegają na wywijaniu kołnierzy z rur cienkościennych metodą dwuetapowego statycznego rozłaczania sztywnymi narzędziami oraz metodą tłoczenia elektrodynamicznego [1]. Wywijanie kołnierzy metodą dwuetapowego rozłaczania polega na kształtowaniu kielicha, przy pomocy narzędzia stożkowego, a następnie rozpychaniu tego kielicha przy pomocy narzędzia płaskiego do momentu dotłoczenia go do płaskiej powierzchni matrycy. Natomiast tłoczenie elektrodynamiczne polega na kształtowaniu ścianki rury bez udziału pośrednich mas. Energia elektryczna jest przekształcana na energię pola magnetycznego, która pod wpływem powstających w induktorze sił Lorentza zostaje zamieniona na energię ruchu i pracę plastycznego odkształcenia rury.

Kolejną metodą kształtowania kołnierza jest wywijanie poprzez wyoblanie [3]. Metoda polega na umieszczeniu narzędzia (o kulistej części roboczej) wewnątrz rury i przemieszczaniu go w kierunku promieniowym na zewnątrz rury, przy jednoczesnym obrocie wsadu (rys. 6).



Rys. 6. Schemat wywijania kołnierza poprzez wyoblanie [3]

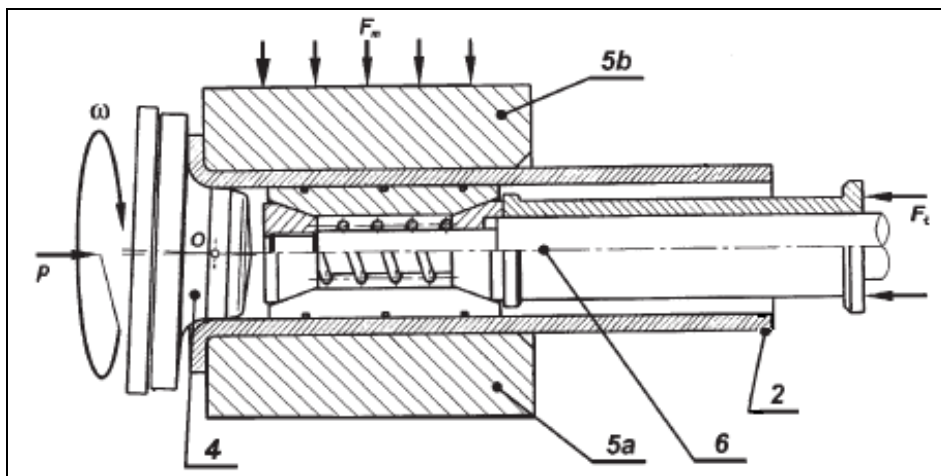
Jeszcze inną, znaną metodą jest wytwarzanie kołnierzy poprzez spęczanie [2]. Wsad umieszczony w specjalnej matrycy jest kształtowany narzędziem posiadającym płaską powierzchnię czołową (która odpowiada za spęczanie) oraz trzpień (zapobiega wyboczeniu rury). Po każdej operacji spęczania, wsad wysuwa się z matrycy i poddaje się kolejnym operacjom prasowania części kołnierzowej, do momentu uzyskania wymaganej średnicy i grubości (rys. 5).



Rys. 5. Schemat wytwarzania kołnierzy metodą spęczania [2]

Kolejną metodą wytwarzania kołnierzy jest wywijanie narzędziem wykonującym ruch złożony – tj. postępowy wzdłuż osi wsadu i obrotowy wokół własnej osi [4]. Wywołanie dodatkowego obrotu narzędzia zmniejsza jego obciążenie, powoduje bardziej równomierny rozkład nacisków jednostkowych na powierzchni styku narzędzie-wsad, oraz polepsza kinematykę płynięcia materiału.

Innym znanym i zarazem innowacyjnym sposobem jest wywijanie kołnierzy metodą prasowania obwiedniowego. Proces ten charakteryzuje się tym, że półfabrykat kształtowany jest stemplem, który wykonuje ruch kulisty (tj. wahający lub obwiedniowy) [5]. W metodzie tej (rys. 6), narzędzie (4) oddziałuje na kształtowany materiał (2) tylko częścią swojej powierzchni, dzięki czemu możliwe jest ukształtowanie kołnierza za pomocą bardzo małej siły.



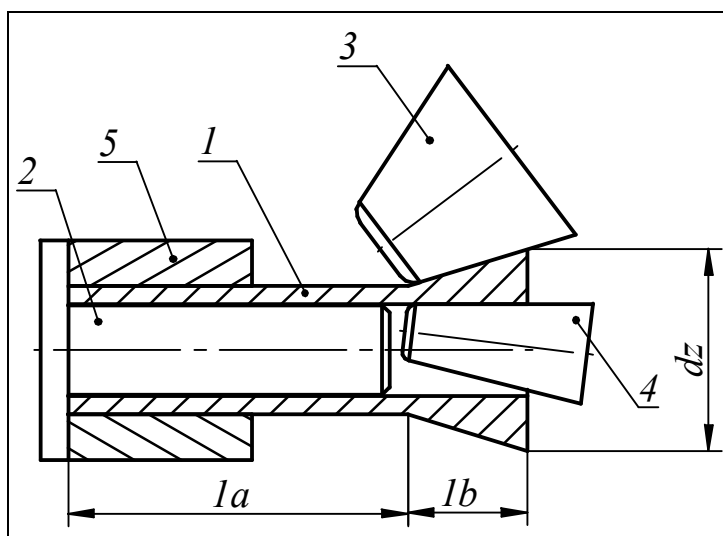
Rys. 6. Sposób i narzędzia do wywijania końca rury z jednoczesnym prasowaniem obwiedniowym: 2 – rura z kołnierzem, 4 – trzpień kształtujący, 5a – matryca stała, 5b – matryca dociskowa, 6 – trzpień rozprężny [5]



### 3. Przegląd autorskich, innowacyjnych metod wytwarzania monolitycznych wyrobów drążonych z kołnierzem

#### 3.1. Wywijanie zewnętrznego kołnierza na końcu rury [6]

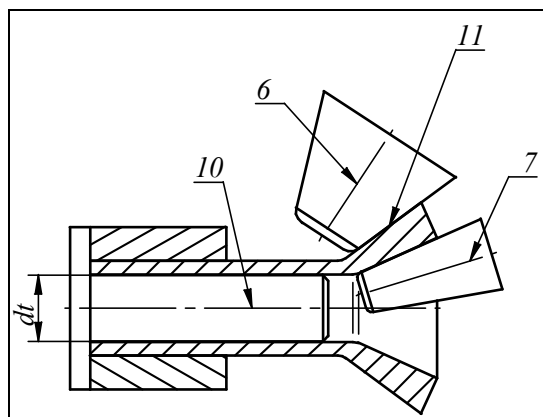
Wywijanie zewnętrznego kołnierza na końcu rury (rys. 7) polega na tym, że półfabrykat (1) posiadający dwie strefy: pierwszą strefę (1a) w kształcie rury oraz drugą strefę (1b) w kształcie stożka ściętego o średnicy zewnętrznej  $dz$  umieszcza się na trzpieniu (2). Po umieszczeniu półfabrykatu na trzpieniu zaciska się pierwszą strefę półfabrykatu matrycą dzieloną (5). Trzpień oraz matryca dzielona mogą obracać się swobodnie wokół osi symetrii półfabrykatu. Następnie w przestrzeni roboczej umieszcza się narzędzie wewnętrzne (4) i narzędzie zewnętrzne (3), tak jak to pokazano na rys. 7. W celu wywinienia kołnierza narzędzie zewnętrzne i wewnętrzne wprawia się w ruch obrotowy o zmiennej prędkości wokół własnych osi symetrii (6) i (7). Dodatkowo narzędzie zewnętrzne i narzędzie wewnętrzne zaczynają się obracać ze stałą prędkością odpowiednio wokół osi (9) i (8) prostopadłych do płaszczyzny rys. 9, przy czym prędkość obrotu narzędzia wewnętrznego jest większa od prędkości obrotu narzędzia zewnętrznego. W celu wywinienia kołnierza prostopadłego do osi półfabrykatu należy zapewnić możliwość przemieszczania narzędzia zewnętrznego wzdłuż własnej osi symetrii, tak aby uniknąć kolizji narzędzia z materiałem, w końcowej fazie wywijania kołnierza.



Rys. 7. Przekrój osiowy narzędzi oraz półfabrykatu w początkowej fazie wywijania kołnierza:

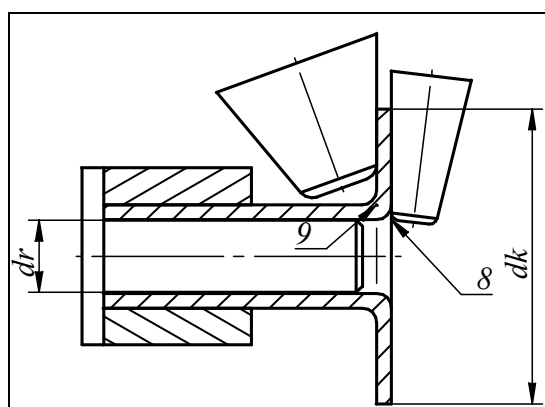
- 1 – półfabrykat, 1a – walcowa część półfabrykatu, 1b – stożkowa część półfabrykatu,
- 2 – trzpień, 3 – narzędzie zewnętrzne, 4 – narzędzie wewnętrzne, 5 – matryca dzielona,
- $dz$  – średnica stożkowej części półfabrykatu [6]

Narzędzia zewnętrzne i wewnętrzne mają kształt stożka ściętego dzięki czemu redukuje się różnicę prędkości obwodowych półfabrykatu i narzędzi. Ponadto wprowadzenie zmiennych prędkości obrotowych narzędzi wokół własnych osi zmniejsza różnicę prędkości obwodowej kołnierza i narzędzi wynikającą z ruchu obrotowego narzędzi wokół osi (8) i (9).



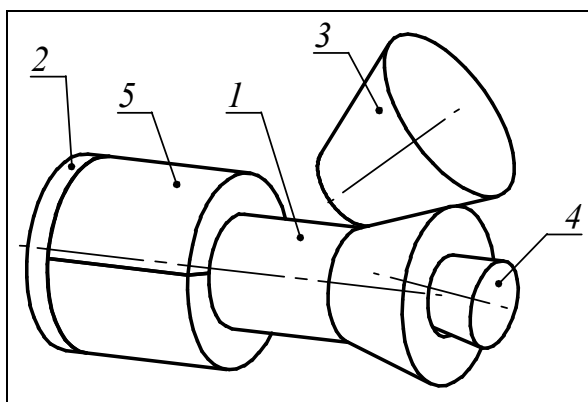
Rys. 8. Przekrój osiowy narzędzi oraz kształtowanego kołnierza w trakcie procesu wywijania kołnierza: 6 – oś symetrii narzędzia zewnętrznego, 7 – oś symetrii narzędzia wewnętrznego, 10 – oś symetrii półfabrykatu, 11 – tworząca stożkowej części półfabrykatu,  $dt$  – średnica trzpienia [6]

Konieczne jest aby narzędzie wewnętrzne obracało się z większą prędkością obrotową wokół osi (8) niż narzędzie zewnętrzne wokół osi (9). Spowoduje to ściskanie materiału kołnierza, które warunkuje prawidłową realizację procesu.



Rys. 9. Przekrój osiowy narzędzi oraz ukształtowanego kołnierza po procesie wywijania kołnierza: 8 – oś obrotu narzędzia wewnętrznego, 9 – oś obrotu narzędzia zewnętrznego  $dr$  – średnica wewnętrzna półfabrykatu,  $dk$  – średnica kołnierza [6]

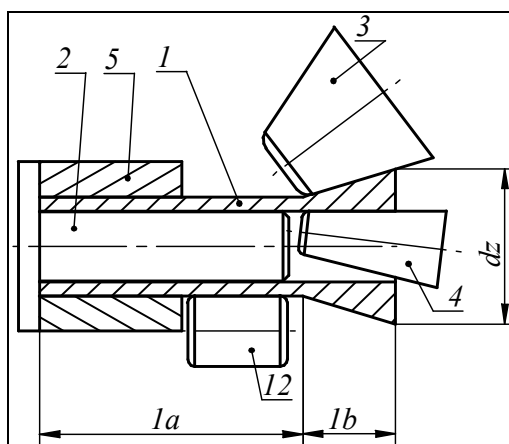
Opracowana metoda pozwala na plastyczne kształtowanie wyrobów z kołnierzami przy zminimalizowaniu naddatków na obróbkę wiórową, co zwiększa wykorzystanie materiału. Ponadto ten sposób umożliwia kształtować duże kołnierze (tj. o dużych średnicach i grubościach). Niewątpliwą zaletą metody jest możliwość uzyskania grubości kołnierza równej grubości ścianki części rurowej wsadu. Dzięki plastycznemu kształtowaniu kołnierza otrzymywany wyrób pozostaje monolitem. Eliminuje się konieczność łączenia elementów, np. poprzez spawanie, zgrzewanie czy lutowanie. Wyrób z wywiniętym plastycznie kołnierzem charakteryzuje się ciągłym układem włókien w materiale, dzięki czemu uzyskuje się polepszone własności wytrzymałościowe produktu.



Rys. 10. Widok w rzucie izometrycznym narzędzi oraz półfabrykatu w początkowej fazie wywijania kołnierza: 1 – półfabrykat, 2 – trzebień, 3 – narzędzie zewnętrzne, 4 – narzędzie wewnętrzne, 5 – matryca dzielona [6]. Wywijanie zewnętrznego kołnierza na końcu rury, z wykorzystaniem rolek prowadzących [7]

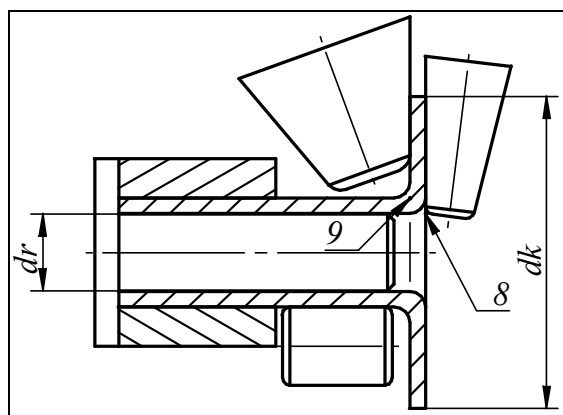
Przebieg procesu wywijania kołnierza z wykorzystaniem rolek prowadzących (rys. 11 – rys. 13), jest zbliżony w realizacji tego procesu według wynalazku opisanego w poprzednim podrozdziale (rys. 7). Dzięki zastosowaniu rolek prowadzących materiał rury znajdujący się tuż przy kołnierzu, nie ulega odkształceniu plastycznemu, poprzez co uzyskuje się niemalże znikomą deformację przekroju poprzecznego rury w pobliżu kołnierza.

Rolki rozmieszczone są w równych odstępach na obwodzie rury, a ich ilość zależy od średnicy wsadu. Im większa jest średnica półfabrykatu tym więcej rolek prowadzących wykorzystuje się do realizacji procesu. Zastosowanie maksymalnej liczby rolek, która uwarunkowana jest średnicą rolki, oraz średnicą wsadu, zapewnia najlepszą jakość wyrobu. Rolki prowadzące mogą obracać się swobodnie, wówczas będą obracać się w wyniku oddziaływania sił tarcia pomiędzy półfabrykatem a rolkami, bądź mogą być napędzane niezależnie, z prędkością obrotową, zapewniającą prędkość obwodową rolki równą prędkości obwodowej wsadu.



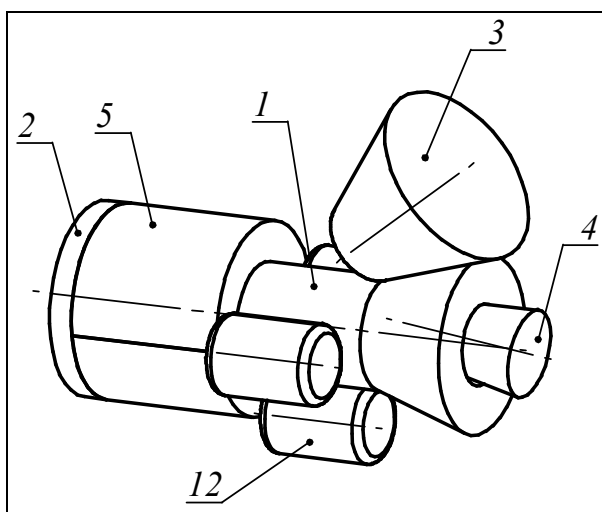
Rys. 11. Przekrój osiowy narzędzi oraz półfabrykatu w początkowej fazie wywijania kołnierza, z wykorzystaniem rolek prowadzących: 1 – półfabrykat, la – walcowa część półfabrykatu, lb – stożkowa część półfabrykatu 2 – trzpień, 3 – narzędzie zewnętrzne, 4 – narzędzie wewnętrzne, 5 – matryca dzielona, 12 – rolki prowadzące, dz – średnica stożkowej części półfabrykatu [7]

Długość rolek prowadzących ograniczona jest odległością powierzchni czołowej matrycy dzielonej od powierzchni czołowej kołnierza, pomniejszonej o wartość promienia zaokrąglenia powstającego w wyniku wywijania kołnierza oraz o wartość luzu między matrycą dzieloną a rolką prowadzącą.



Rys. 12. Przekrój osiowy narzędzi oraz ukształtowanego kołnierza po procesie wywijania kołnierza, z wykorzystaniem rolek prowadzących: 8 – oś obrotu narzędzia wewnętrznego, 9 – oś obrotu narzędzia zewnętrznego dr – średnica wewnętrzna półfabrykatu, dk – średnica kołnierza [7]

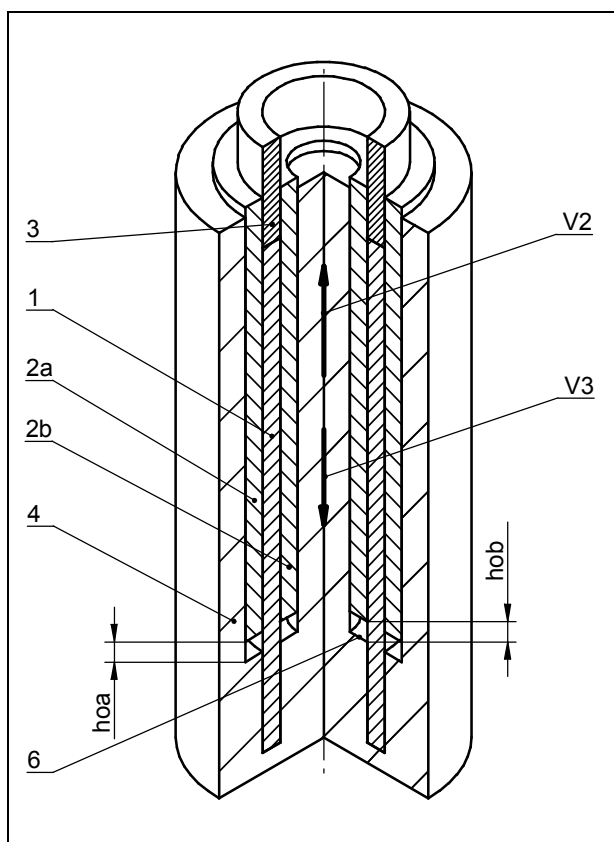
Rolek prowadzące umieszcza się w taki sposób, aby nie doszło do kolizji z matrycą dzieloną i narzędziem zewnętrznym w kształcie stożka ściętego. Z tego względu nie umieszcza się rolek prowadzących na całym obwodzie rury, lecz tylko w miejscach nie należących do przestrzeni roboczej narzędzia zewnętrznego oraz matrycy dzielonej.



Rys. 13. Widok w rzucie izometrycznym narzędzi oraz półfabrykatu w początkowej fazie wywijania kołnierza, z wykorzystaniem rolek prowadzących: 1 – półfabrykat, 2 – trzpień, 3 – narzędzie zewnętrzne, 4 – narzędzie wewnętrzne, 5 – matryca dzielona [7]

### **3.2. Wciskanie zewnętrznego i wewnętrznego kołnierza w środkowej części rury [8]**

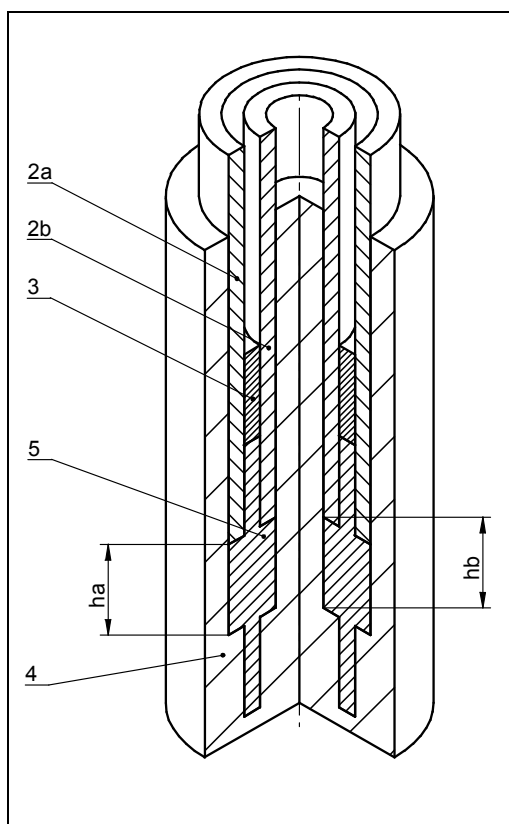
Przedstawiona metoda wyciskania kołnierzy w środkowej części rury umożliwia jednocześnie kształtowanie kołnierza wewnątrz rury i na zewnątrz rury. Półfabrykatem (1) stosowanym w tym sposobie otrzymywania kołnierza jest odcinek rury, który umieszcza się w matrycy (4). W otworze rury umieszcza się wewnętrzną tuleję prowadzącą (2b), której średnica wewnętrzna odpowiada wewnętrznej średnicy kołnierza, natomiast średnica zewnętrzna równa jest średnicy wewnętrznej półfabrykatu. W procesie wykorzystywana jest również druga tuleja prowadząca, tzw. zewnętrzna tuleja prowadząca (2a). Jej średnica zewnętrzna odpowiada zewnętrznej średnicy kołnierza, natomiast średnica wewnętrzna odpowiada zewnętrznej średnicy półfabrykatu. Tuleje ustawia się w odległościach *hoa* oraz *hob* od powierzchni czołowej (6) matrycy. Odległości muszą być dobrane w taki sposób aby nie doszło do wyboczenia rury, lecz do jej spęczenia. W wyniku przyłożenia siły do stempla (3) następuje spęczenie półfabrykatu i wypełnianie komory matrycy materiałem wsadu, co powoduje powstawanie kołnierza. W momencie gdy dojdzie do kontaktu materiału półfabrykatu z powierzchniami czołowymi tulei prowadzących, tuleje zaczynają przemieszczać się w kierunku przeciwnym do ruchu stempla, dzięki czemu możliwe jest kontynuowanie procesu i uzyskanie kołnierza o niemalże dowolnej długości.



Rys. 14. Przekrój w rzucie izometrycznym narzędzi oraz półfabrykatu w początkowej fazie wyciskania kołnierzy: 1 – półfabrykat, 2a – zewnętrzna tuleja prowadząca, 2b – wewnętrzna tuleja prowadząca, 3 – stempel, 4 – matryca, 6 – powierzchnia czołowa matrycy,  $hoa$  – odległość zewnętrznej tulei prowadzącej od powierzchni czołowej matrycy,  $hob$  – odległość wewnętrznej tulei prowadzącej od powierzchni czołowej matrycy,  $V2$  – kierunek ruchu tulei prowadzących,  $V3$  – kierunek ruchu stempla [8]

Opracowana metoda umożliwia wyciskanie kołnierzy zewnętrznych i wewnętrznych o równych bądź różnych długościach, oraz o równych bądź różnych grubościach. Kołnierze równej długości uzyskuje się wówczas gdy odległości  $hoa$  oraz  $hob$  są równe i przesunięcie zewnętrznej tulei prowadzącej jest równe przesunięciu wewnętrznej tulei prowadzącej. Przy zróżnicowanych odległościach  $hoa$  oraz  $hob$ , i różnych przesunięciach tulei prowadzących uzyskuje się kołnierze o różnych długościach.

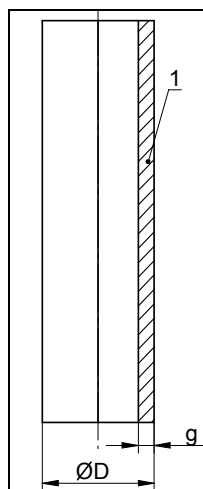
Grubości kołnierzy zależą od grubości ścianek zewnętrznej i wewnętrznej tulei prowadzącej. Grubość wewnętrznego kołnierza jest taka sama jak grubość ścianki wewnętrznej tulei prowadzącej, podobnie grubość zewnętrznego kołnierza jest taka sama jak grubość ścianki zewnętrznej tulei prowadzącej.



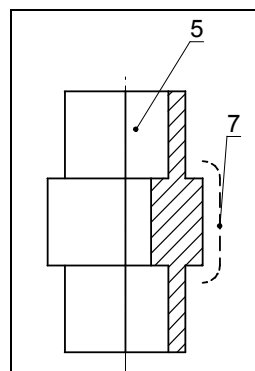
Rys. 15. Przekrój w rzucie izometrycznym narzędzi oraz półfabrykatu w końcowej fazie wyciskania kołnierzy: 2a – zewnętrzna tuleja prowadząca, 2b – wewnętrzna tuleja prowadząca, 3 – stempel, 4 – matryca, 5 – tuleja z kołnierzem wewnętrznym i zewnętrznym,  $h_a$  – wysokość zewnętrznego kołnierza,  $h_b$  – wysokość wewnętrznego kołnierza [8]

Proces wyciskania kołnierzy w środkowej części rury może być realizowany w dwóch wariantach, zależnych od sposobu nadawania ruchu tulejom prowadzącym.

Pierwszy wariant, który znacznie upraszcza budowę przyrządu do wyciskania kołnierzy, polega na tym, że tuleje prowadzące przemieszczają się w kierunku przeciwnym do ruchu stempla w wyniku oddziaływania sił nacisku materiału półfabrykatu na powierzchnie czołowe tulei zewnętrznej i wewnętrznej. Innymi słowy tuleje są wypychane przez wypełniający komorę matrycy, materiał półfabrykatu. Drugi wariant, polega na tym, że ruch tulei prowadzących w kierunku przeciwnym do ruchu stempla jest wymuszony, poprzez zapewniającą to konstrukcję przyrządu. Tuleje prowadzące mogą być napędzane za pomocą siłowników hydraulicznych, elektrycznych, bądź mechanicznie za pomocą układu dźwigni, zsynchronizowanym z ruchem stempla.



Rys. 16. Widok w półprzekroju półfabrykatu:  
1 – półfabrykat,  $g$  – grubość ścianki półfabrykatu,  
 $D$  – średnica półfabrykatu [8]



Rys. 17. Widok w półprzekroju wału  
drążonego ze stopniami: 5 – tuleja  
z kołnierzem wewnętrznym i zewnętrznym,  
7 – kołnierze: zewnętrzny i wewnętrzny [8]

Synchronizacja ruchu stempla i tulei prowadzących ma istotne znaczenie. Tuleje prowadzące nie mogą przemieszczać się zbyt szybko, z uwagi na możliwość wyboczenia rury. Natomiast zbyt wolna prędkość przesuwu tulei prowadzących może doprowadzić do wolniejszego przyrostu objętości komory matrycy w stosunku do objętości materiału półfabrykatu, który ma tę komorę wypełnić. W związku z powyższym może nastąpić uszkodzenie narzędzi spowodowane brakiem możliwości odkształcenia plastycznego półfabrykatu.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione autorskie metody otrzymywania monolitycznych kołnierzy rur stanowią rozwiązania alternatywne do istniejących już sposobów wytwarzania kołnierzy. Wytwarzanie kołnierzy metodą wywijania z rolkami prowadzącymi lub bez wymaga zastosowania odpowiednio ukształtowanej przedkuwki. Przedkuwkę w kształcie stożkowo zakończonej rury kształtować można za pomocą metod obróbki ubytkowej, bądź obróbki plastycznej.

Omówione metody wywijania kołnierzy oraz wyciskania znacząco różnią się zarówno sposobem realizacji procesu jak i kształtem wyrobów możliwych do uzyskania. Poprzez wywijanie można uzyskać kołnierze o zdecydowanie większej średnicy zewnętrznej niż poprzez wyciskanie. Natomiast stosując wyciskanie można uzyskać kołnierze o wiele wyższe niż w procesie wywijania.

Przedstawione w pracy autorskie metody otrzymywania kołnierzy są obecnie na etapie zaawansowanych badań teoretycznych, a w przyszłości również planuje się przeprowadzić stosowne próby doświadczalne.



## **Literatura**

1. Muzykiewicz W., Bednarczyk J., Rękas A., Łukaszka A.: *Wywijanie kołnierzy elementów rurowych sztywnymi narzędziami w warunkach statycznych i metodą tłoczenia elektrodynamicznego*, Rudy i Metale Nieżelazne R47, nr 10-11, 2002, s. 545-550.
2. Hu X.L., Wang Z.R.: *Numerical simulation and experimental study on the multi-step upsetting of a thick and wide flange on the end of pipe*, Journal of Materials Processing Technology 151, 2004, s.321-327.
3. Fouly A. Mohamed, Sausy Zein El-Abden, Mohieled A.R.: *A rotary flange forming process on the late using a ball-shaped tool*. Journal of Materials Processing Technology 170, 2005, s.501-508.
4. Okoń Ł.: *Kształtowanie zewnętrznych kołnierzy rur metodą wywijania przy różnych stanach obciążenia*, rozprawa doktorska, Lublin 2012.
5. Samołyk G. *Sposób i narzędzia do wywijania końca rury z jednoczesnym prasowaniem obwiedniowym*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.394431, 2011.
6. Winiarski G., Gontarz A.: *Sposób i urządzenie do wywijania kołnierza*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.404041, 2013.
7. Winiarski G., Gontarz A.: *Sposób i urządzenie do wywijania kołnierza z rolkami prowadzącymi*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.404040, 2013.
8. Winiarski G., Gontarz A.: *Sposób wyciskania zewnętrznych i wewnętrznych stopni wałów drążonych*. Polskie zgłoszenie patentowe nr P.404612, 2013.
9. [www.rosa.pl](http://www.rosa.pl)
10. [www.honeywell.com.pl](http://www.honeywell.com.pl)
11. [www.stakol.com.pl](http://www.stakol.com.pl)

## **INNOWACYJNE METODY PLASTYCZNEGO KSZTAŁTOWANIA WYROBÓW DRAŻONYCH Z KOŁNIEZAMI**

### **Streszczenie**

Tematyka artykułu związana jest z wytwarzaniem wyrobów drążonych z kołnierzami. Szczegółowo omówiono zagadnienie wytwarzania monolitycznych kołnierzy rur metodami obróbki plastycznej. We wstępie przedstawiono wybrane obszary zastosowań wyrobów drążonych z kołnierzami. Następnie scharakteryzowane zostały dotychczasowe metody wytwarzania monolitycznych kołnierzy rur, a wśród nich: obróbka skrawaniem, metoda dwuetapowego statycznego rozciągania sztywnymi narzędziami, metoda tłoczenia elektrodynamicznego, wywijanie poprzez wyoblanie, wytwarzanie kołnierzy metodą spęczania, wywijanie kołnierzy narzędziem wykonującym ruch postępowy wzdłuż osi wsadu i obrotowy wokół własnej osi oraz wywijanie kołnierzy metodą prasowania obwiedniowego. Przedstawiono również przegląd autorskich metod wytwarzania kołnierzy metodą wywijania oraz wyciskania.

**Słowa kluczowe:** wywijanie, wyciskanie, wyroby drążone, kołnierz

## **INNOVATIVE PLASTIC FORMING METHODS OF HOLLOWED PARTS WITH FLANGES**

### **Abstract**

Topic of the paper refers the producing processes a hollowed part with a flange. The shaping a monolithic flange of pipe with using methods of metal forming is discussed in there exactly. The chosen application fields of hollowed parts with flanges are described in the introduction. Next, in there are characterised at present used the method of shaping a monolithic flange in pipes, particularly: machining, two-stages expanding with using rigid dies, flanging by electrodynamic drawing, flanging by metal spinning, flanging with using die makes a rotary and a progressive motion, flanging by orbital forming. In there is presented and discussed also authors' methods: a new rotary flanging process and a new process of complex extrusion a pipe with a special flange.

**Key words:** flanging, extrusion, hollowed parts, flange

## Teoretyczna analiza wyciskania elementów śrubowych

### 1. Wstęp

Wyciskanie metali ich stopów jest jednym z podstawowych procesów obróbki plastycznej. Metodą tą wytwarzane są różnego rodzaju profile, kształtowniki, rury, tuleje, sworznie oraz inne części maszyn. Wyroby wyciskane charakteryzują się wysokimi właściwościami mechanicznymi, dużą dokładnością wymiarową oraz gładką powierzchnią [5, 8]. Ponadto wyciskanie stosowane jest do wstępnej przeróbki plastycznej materiałów o niskiej plastyczności, których nie można odkształcać na drodze kucia czy też walcowania. Wyciskanie jest również jednym z podstawowych sposobów wytwarzania materiałów bimetalicznych składających się z rdzenia i powłoki o określonych grubościach, jednakże głównym zastosowaniem wyciskania w przemyśle jest produkcja profili ze stopów aluminium o złożonych kształtach (rys. 1).

Procesy wyciskania mogą być prowadzone w warunkach obróbki plastycznej na zimno, ciepło (półgorąco) i gorąco. Ze względu na trudne warunki pracy narzędzi podczas wyciskania większość procesów realizowanych jest w podwyższonych temperaturach. Wyciskaniu na zimno poddawane są zazwyczaj materiały o wysokiej plastyczności, do kształtowania których nie są wymagane duże naciski [5].



Rys. 1. Przykład wyciskanych profili aluminiowych [9]

---

<sup>1</sup> Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, email: [t.bulzak@pollub.pl](mailto:t.bulzak@pollub.pl)  
Uczestnik projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Wyciskanie polega na tym, że materiał zamknięty w komorze pojemnika pod wpływem nacisku stempla przechodzi w stan plastyczny i następnie wypływa przez otwór w matrycy przyjmując jego kształt poprzeczny. Ze względu na kierunek płynięcia materiały w stosunku do kierunku ruchu stempla wyróżniamy następujące sposoby wyciskania [4,6]:

- wyciskanie współbieżne, gdy materiał płynie w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu stempla,
- wyciskanie przeciwbieżne, gdy materiał płynie w kierunku przeciwnym do ruchu stempla,
- wyciskanie poprzeczne, gdy materiał płynie w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu stempla,
- wyciskanie złożone (mieszane), które jest kombinacją wyżej wymienionych sposobów wyciskania.

W procesie wyciskania elementów śrubowych materiał oprócz ruchu prostoliniowego wykonuje dodatkowo ruch obrotowy na skutek spiralnego kształtu oczka w matrycy. W wyniku jednoczesnego występowania w trakcie procesu tych dwóch ruchów otrzymuje się wyroby o kształcie śrubowym. Metodą wyciskania śrubowego mogą być wytwarzane takie wyroby jak: koła zębate o zębach śrubowych, wirniki pomp śrubowych, wiertła kręte, frezy palcowe oraz kształtowniki śrubowe.

Podczas wyciskania w kształtowanym materiale panuje trójosiowy ściskający stan naprężenia. Występowanie takiego stanu naprężenia oraz wstępne nagrzewanie materiału wsadowego powoduje, że w procesie wyciskania możliwe jest kształtowanie praktycznie wszystkich materiałów metalicznych bez wyjątku. Głównym ograniczeniem procesu są przede wszystkim duże naciski przyspieszające zużywanie się narzędzi oraz konieczność stosowania maszyn o dużych siłach nacisku.

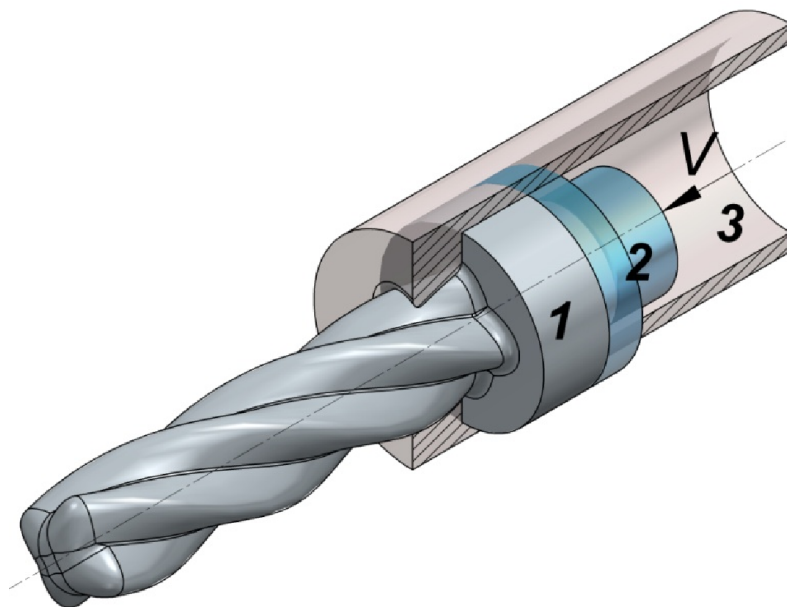
Do niekonwencjonalnych sposobów wyciskania zaliczyć można m.in. metody hydrostatyczne, KoBo, ECAP oraz TE [1–3,7]. W procesie wyciskania hydrostatycznego nacisk na kształtowany materiał wywierany jest za pośrednictwem cieczy. Dzięki temu ogranicza się działanie niekorzystnych sił tarcia na powierzchni kontaktu kształtowanego materiału z narzędziami, zmniejszając tym samym ich zużywania oraz siłę potrzebną do realizacji procesu. W trakcie wyciskania metodą KoBo matryca wykonuje rewersyjny ruch obrotowy, skutkuje to zlokalizowaniem plastycznego płynięcia materiału w pasmach ścinania. Wprowadzenia takich schematów odkształceń plastycznych powoduje znaczne zmniejszenie siły kształtowania oraz rozdrobnienie struktury kształtowanych tym sposobem materiałów do rozmiarów nanometrycznych. W procesie ECAP (z ang. equal channel angular pressing) kształtowany materiał przepychany jest przez kanał kątowy, gdzie doznaje bardzo dużych odkształceń ścinających. Efektem tego jest tak jak w metodzie KoBo uzyskanie materiałów o bardzo dobrych własnościach mechanicznych i silnie rozdrobnionej strukturze.

Metoda TE (z ang. *torsion extrusion*) jest bardzo zbliżona do wyciskania KoBo z tą różnicą, że w procesie TE matryca wykonuje ciągły ruch obrotowy w jednym kierunku.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki teoretycznej analizy procesu wyciskania elementów śrubowych w oparciu o metodę elementów skończonych. Przedstawione wyniki badań dotyczą wpływu kąta pochylenia linii śrubowej oczka matrycy na stan naprężenia i odkształcenia w procesie wyciskania profilu śrubowego.

## **2. Modelowanie numeryczne**

Modelowanie numeryczne rozpatrywanych przypadków wyciskania wykonano przy użyciu metody elementów skończonych wykorzystując do tego celu oprogramowanie DEFORM – 3D. Jeden ze zbudowanych modeli geometrycznych dla analizowanych procesów wyciskania przedstawiono na rys. 2.

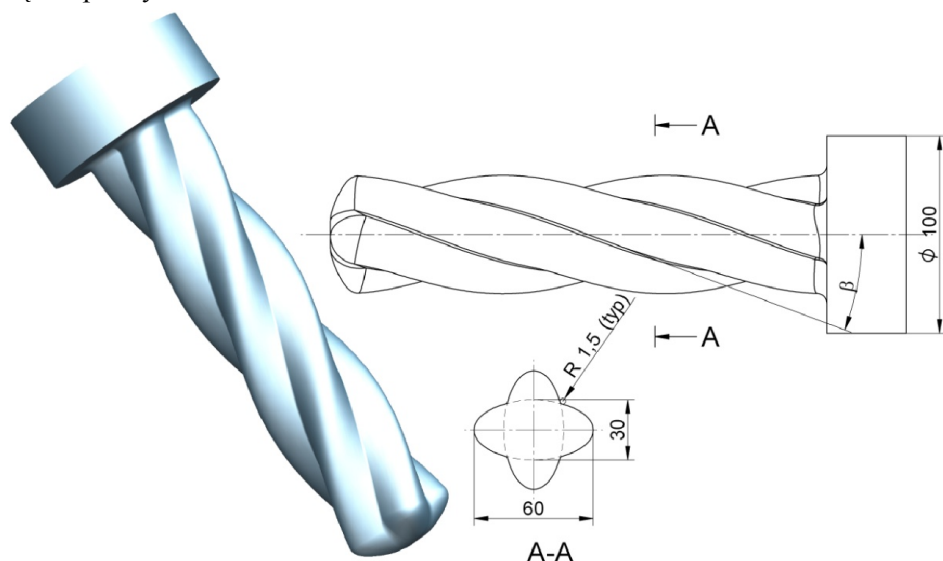


Rys. 2. Model geometryczny wyciskania śrubowego: 1 – kształtowany materiał, 2 – stempel, 3 – matryca z pojemnikiem

Materiał wsadowy o wymiarach początkowych  $\varnothing 95 \times 150$  mm wykonany ze stopu aluminium 2618, którego dane materiałowe zaczerpnięto z biblioteki użytego programu, modelowano czterowęzłowymi elementami tetragonalnymi. Symulacje numeryczne przeprowadzono w warunkach obróbki plastycznej na gorąco z uwzględnieniem wymiany ciepła generowanego, w skutek tarcia oraz odkształceń plastycznych. Do opisu wymiany ciepła przyjęto współczynnik

wymiany ciepła między wsadem, a narzędziami (modelowanymi jako obiekty sztywne) równy  $5 \text{ kW/m}^2\text{K}$  oraz wsadem, a otoczeniem  $0,2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Na potrzeby prowadzonych badań ustalono temperaturę początkową wsadu równą  $450^\circ\text{C}$ , natomiast temperatura narzędzi pozostawała stała w trakcie trwania procesu i wynosi  $20^\circ\text{C}$ . Warunki kontaktu pomiędzy wsadem, a narzędziami opisano modelem tarcia stałego, dla którego przyjęto czynniki tarcia  $m = 0,3$ . Ruch stempla w symulacjach numerycznych realizowany był poprzez nadanie mu stałej prędkości  $V$ , która wynosiła  $4 \text{ mm/s}$ . W przeprowadzonych symulacjach numerycznych wykorzystano matryce płaskie z zaokrąglonymi promieniem  $r = 5 \text{ mm}$  krawędziami spiralnego oczka na wejściu i wyjściu z matrycy.

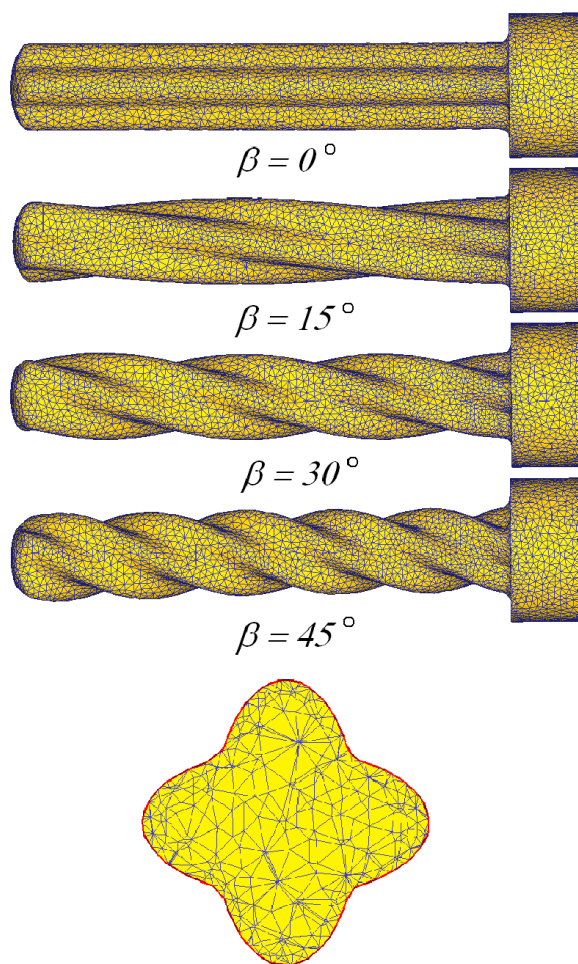
Analizowany kształtownik wraz z podstawowymi wymiarami został przedstawiony na rys. 3. Przeprowadzone badania dotyczyły czterech wariantów wyciskania, w których zmieniano jedynie wartość kąta pochylenia linii śrubowej  $\beta$  ( $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  i  $45^\circ$ ) kształtowanego wyroby. Wszystkie uzyskane w trakcie badań numerycznych wyroby miały niezmienny kształt i wymiary przekroju poprzecznego, w wyniku czego rozpatrywane przypadki wyciskania przebiegały przy jednakowym stopniu przerobu plastycznego  $\lambda = A_p/A_w$ , gdzie:  $\lambda$  – stopień przerobu plastycznego zwany inaczej współczynnikiem wydłużenia,  $A_p$  – pole przekroju poprzecznego komory pojemnika oraz  $A_w$  – pole przekroju poprzecznego wyrobu. W analizowanym przypadku współczynnik  $\lambda$  wynosił w przybliżeniu 3,94. Zarys przekroju poprzecznego wyrobu stanowią dwie identyczne elipsy, których duże i małe osie przecinają się w jednym punkcie pod kątem prostym.



Rys. 3. Kształt i podstawowe wymiary przyjętego do analizy kształtownika

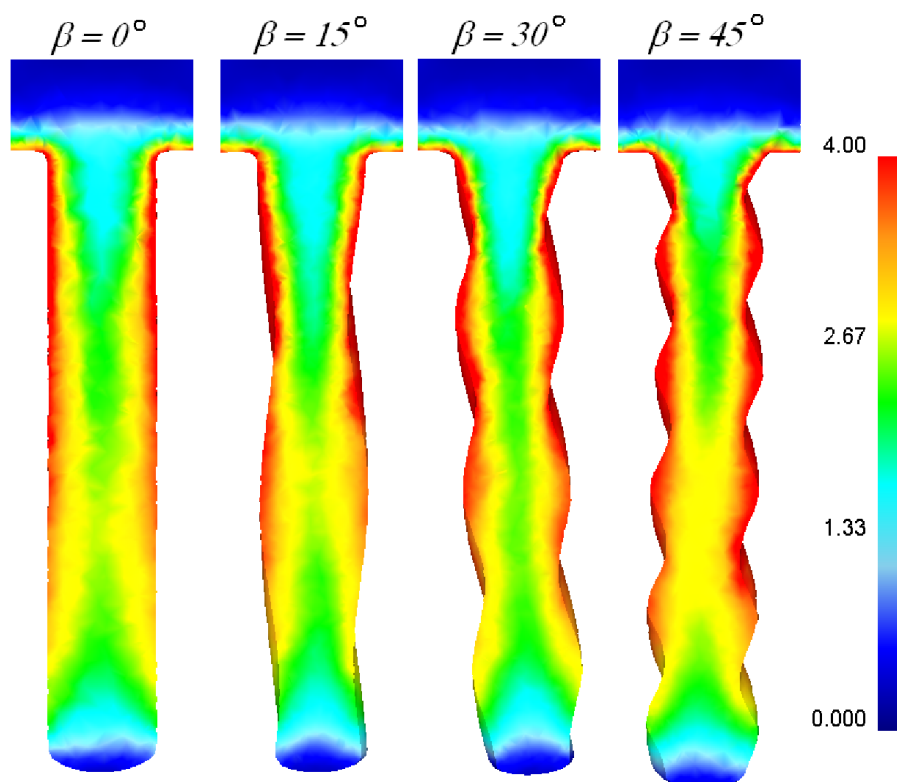
### 3. Wyniki badań numerycznych

Przeprowadzane symulacje numeryczne wyciskania elementów śrubowych pozwoliły wyznaczyć kształt wyrobów, rozkłady intensywności naprężenia, odkształcenia oraz parametry siłowe analizowanych procesów. Na rysunku 4 pokazano uzyskane w trakcie badań numerycznych wyroby śrubowe. Z przedstawionego rysunku uzyskanych wyprasek wynika, że możliwe jest kształtowanie wyrobów śrubowych poprzez wyciskanie w szerokim zakresie kąta pochylenia linii śrubowej  $\beta$  od  $0^\circ$  –  $45^\circ$ . Ponadto kształt i wymiary uzyskanych wyrobów charakteryzują się bardzo dużą zgodnością z zaprojektowanym kształtownikiem przedstawionym na rys. 3.



Rys. 4. Wyznaczony numerycznie kształt wyciskanych wyrobów śrubowych dla różnych kątów pochylenia linii śrubowej  $\beta$

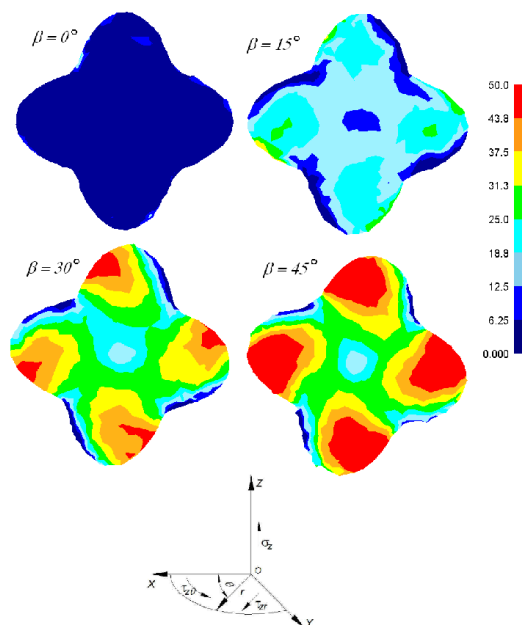
Na kolejnym rys. 5 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład intensywności odkształcenia w uzyskanych kształtownikach. Dla wszystkich rozpatrywanych przypadków rozkład doksztalcen oraz ich wartości przyjmują podobny charakter. Wartości odkształceń dla przedstawionych przypadków charakteryzują się dużą niejednorodnością. Największe wartości odkształceń zlokalizowane są w warstwach przypowierzchniowych uzyskanych kształtowników, natomiast najmniejsze wartości odkształceń odnotowano w rdzeniach. Warstwy przypowierzchniowe materiału doznają większych odkształceń, w skutek silnego oddziaływania sił tarcia w oczku matrycy na kształtowany materiał. Wraz ze wzrostem kąt pochylenia linii śrubowej  $\beta$  można zaobserwować, iż warstwy przypowierzchniowe o maksymalnych odkształceniach wynoszących 4 występują na dłuższym odcinku kształtowanego wyrobu. Podobną sytuację można zaobserwować również w rdzeniu wiertła, gdzie odkształcenia wzrastają wraz ze wzrostem kąta  $\beta$ . Strefa plastyczna tuż przed wejściem materiału do oczka matrycy jest dla wszystkich przypadków bardzo zbliżona.



Rys. 5. Rozkład intensywności odkształcenia wyznaczony numerycznie dla analizowanych przypadków wyciskania

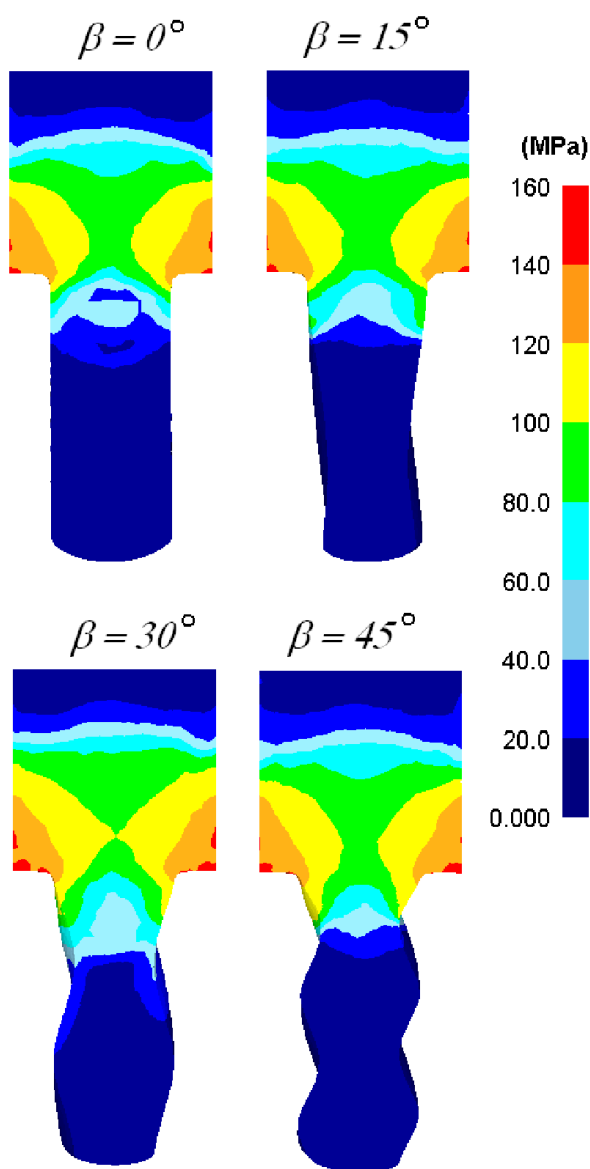


Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych możliwe stało się również wyznaczenie map reprezentujących rozkład naprężenia stycznego w kierunku obwodowym  $\tau_{\theta z}$ . Uzyskane rozkłady tych naprężeń przedstawiono na rys. 6. Z rysunku tego wynika, że istnieje silna korelacja między wartością naprężeń stycznych w kierunku obwodowym, a wartością kąta  $\beta$  wyciskanych kształtowników śrubowych. Oczywiście w przypadku wyciskania kształtownika prostego ( $\beta = 0^\circ$ ) w trakcie trwania procesu nie odnotowano naprężeń stycznych w kierunku obwodowym. W pozostałych przypadkach wraz ze wzrostem kąta pochylenia linii śrubowej wyciskanego kształtownika, dochodzi w kształtowanym materiale do wzrostu naprężeń stycznych w kierunku obwodowym. Powstały w trakcie wyciskania śrubowego stan naprężenia odpowiada schematowi naprężenia, pojawiającego się podczas skręcania. Maksymalne wartości naprężenia lokalizują się w warstwach najdalej oddalonych od środka wyciskanego materiału i sukcesywnie maleją do zera dla warstw zlokalizowanych w rdzeniu. Dla wszystkich przypadków  $\beta > 0$  stan naprężenia jest zbliżony i różni się tylko wartościami naprężenia w poszczególnych strefach przekroju wyciskanego profilu. Największe wartości naprężeń stycznych w kierunku obwodowym lokalizują się na przeciwległych powierzchniach bocznych profilu, które nacierają w trakcie wyciskania na matrycę.



Rys. 6. Rozkład naprężeń stycznych w kierunku obwodowym dla rozpatrywanych przypadków w MPa

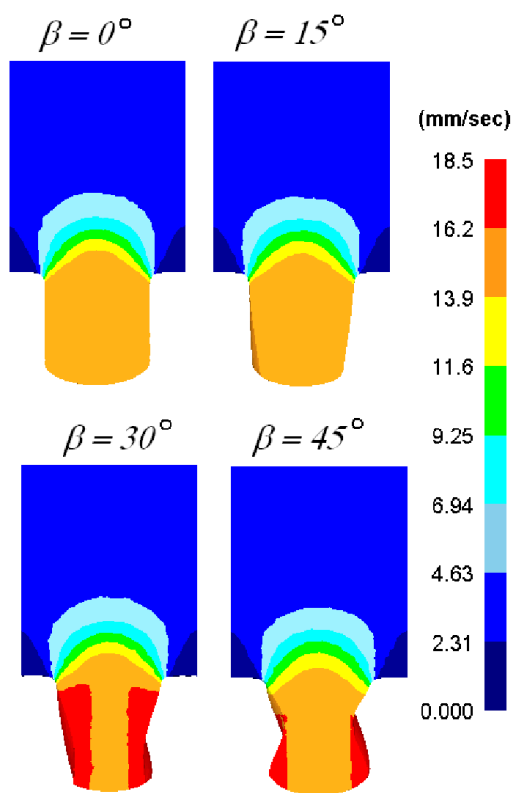
W związku z wyraźnymi różnicami stanu naprężeń stycznych w kierunku obwodowym. Zasadnym wydaje się przeanalizowanie rozkładu naprężeń zredukowanych w kształtowanym materiale. Mapy rozkładu naprężeń zredukowanych odnotowanych dla chwili czasu, w której stempel przebył tą samą drogę dla wszystkich analizowanych przypadków zostały zobrazowane na rys. 7.



Rys. 7. Rozkład naprężeń zredukowanych w chwili przebycia przez stempel drogi  $s = 50$  mm

Naprężenia zredukowane w materiale znajdującym się w komorze pojemnika posiadają podobny rozkład oraz wartości dla wszystkich rozpatrywanych przypadków, jednakże podczas wyciskania kształtownika o kącie pochylenia linii śrubowej  $\beta$  równym  $30^\circ$  można zaobserwować wzrost wartości naprężeń przy wejściu materiału w oczko matrycy. Dla wszystkich przypadków największe naprężenia w kształtowanym materiale odnotowano w narożach matrycy. Świadczyć to może o występowaniu w tym miejscu stref martwych tzn. stref, w których materiał zalega nie poruszając się w kierunku oczka matrycy. Naprężenia zredukowane w strefie oczka matrycy w zewnętrznych warstwach kształtowanego wyrobu zwiększą swoją wartość wraz ze wzrostem kąta  $\beta$ . Najprawdopodobniej jest to spowodowane zwiększającymi się wraz ze wzrostem kąta pochylenia linii śrubowej  $\beta$ , nieprężeniami stycznymi w kierunku obwodowym.

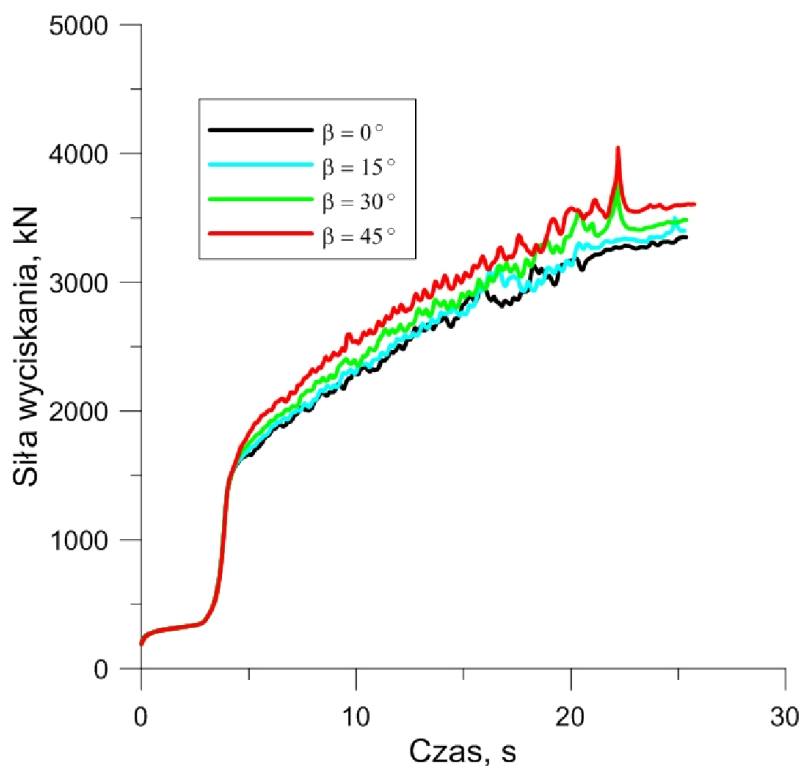
Ze względu duże na prawdopodobieństwo tworzenia się stref martwych wywołane zastosowaniem płaskiej matrycy, analizie poddano również schemat prędkości płynięcia materiału, który został przedstawiony na rys. 8.



Rys. 8. Rozkład prędkości płynięcia materiału wyznaczony numerycznie dla rozpatrywanych przypadków

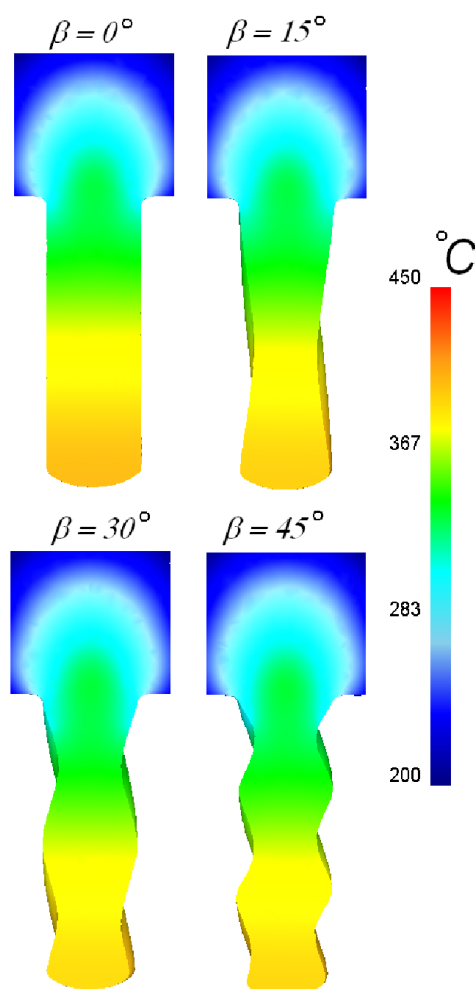
Dla wszystkich analizowanych przypadków można zaobserwować tworzenie się stref martwych w narożach matrycy. Rozkład prędkości płynięcia materiału w strefie plastycznej we wszystkich przypadkach jest zbliżony. Podczas wyciskania profilu o kącie pochylenia linii śrubowej  $\beta = 0^\circ$  oraz  $15^\circ$  prędkość materiału opuszczającego matrycę w całej objętości jest na zbliżonym poziomie. W przypadku profilu śrubowego o kącie pochylenia linii śrubowej  $\beta = 30^\circ$  zewnętrzne warstwy materiału opuszczającego matrycę mają większą prędkość w stosunku do warstw wewnętrznych, co spowodowane jest zwiększeniem prędkości wypływającego profilu w kierunku obwodowym na skutek intensywniejszego skręcania profilu. Dalsze zwiększanie kąta pochylenia linii śrubowej wyciskanego profilu skutkuje zmniejszeniem obszaru profilu, w którym występuje zwiększona prędkość wypływania materiału ( $\beta = 45^\circ$ ).

Jednym z ważniejszych czynników decydujących o możliwości realizacji procesów obróbki plastycznej jest charakterystyka siłowa danego procesu. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg siły wyciskania w funkcji czasu realizacji procesu dla analizowanych przypadków.



Rys. 9. Przebieg siły wyciskania w funkcji czasu dla analizowanych przypadków wyciskania śrubowego

Z przedstawionego wykresu sił (rys. 9) wynika, że kąt  $\beta$  nie ma istotnego wpływu na siłę wyciskania. Dla wszystkich analizowanych przypadków można zaobserwować identyczny przebieg siły w początkowym stadium realizacji procesu. W trakcie właściwego procesu wyciskania zaczynającego się od 5 sekund można zaobserwować niewielki wzrost wartości siły wraz ze wzrostem wartości kąta  $\beta$ . W ustalonej fazie procesu wyciskania można również zaobserwować intensywny wzrost siły wyciskania. Przyczyną takiego stanu rzeczy może zapewne być intensywne chłodzenie się wyciskanego materiału znajdującego się w komorze pojemnika, dlatego też w dalszej części opracowania poddano analizie rozkład temperatury wyciskanego materiału dla ustalonej fazy procesu.



Rys. 10. Rozkład temperatury w końcowej fazie procesu dla analizowanych przypadków wyciskania

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład temperatury w ukształtowanych wyrobach odnotowany dla końcowej fazy procesu. Dla wszystkich rozpatrywanych przypadków rozkład temperatury jest bardzo zbliżony. Najmniejsze wartości temperatury odnotowano dla materiału znajdującego się w komorze pojemnika, co należy tłumaczyć intensywnym chłodzeniem w wyniku dłuższego kontaktu z chłodniejszymi narzędziami. Temperatura warstw początkowych kształtowanych profili w początkowym stadium procesu jest znacznie większa od temperatury piętki pozostającej w komorze pojemnika. Wynika to z faktu, że początkowe warstwy materiału kontaktowały się krócej z chłodniejszymi narzędziami i nie zdążył się wystudzić oraz na skutek ciepła generowanego podczas odkształcenia plastycznego ich temperatura wzrastała. Spadek temperatury w strefie plastycznej, wyciskanego materiału o blisko 150°C przekłada się na wzrost siły wyciskania w ustalonym stadium procesu. Stąd też wynika, że procesy wyciskania śrubowego stopów aluminium powinno realizować się po uprzednim nagrzaniu narzędzi, co zminimalizuje wychładzanie wyciskanego materiału.

#### **4. Podsumowanie**

Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdziły możliwość wyciskania elementów śrubowych o kątach pochylenia linii śrubowej  $\beta$  z zakresu 0 – 45°. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że kąt pochylenia linii śrubowej  $\beta$  ma istotny wpływ na kinematykę płynięcia materiału oraz rozkład naprężeń stycznych w kierunku obwodowym. Uzyskane z obliczeń numerycznych charakterystyki siłowe analizowanych przypadków wskazują na brak zależności pomiędzy kątem  $\beta$ , a wielkością siły potrzebnej do realizacji procesu wyciskania śrubowego. Wyciskanie elementów śrubowych jest jednym z najmniej poznanych sposobów wyciskania, dlatego też wymaga dalszych badań zarówno teoretycznych jak i doświadczalnych.

#### **Literatura**

1. Azushima A. i in.: Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. CIRP Annals – Manufacturing Technology 2008, nr 57, s. 716 – 735.
2. Bochnaik W., Korbel A.: KOBO Type Forming: forging of metals under complex conditions of the process. Journal of Materials Processing Technology, vol. 134, no 1, 2003, pp.120 – 134.
3. Latypow M. I. i in.: Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion. Computational Materials Science 2012, nr 60, s. 194 – 200.
4. Lin H.H., Kudo H. Kawakami K.: Metal Flow Control in Cold Simultaneous Forward/Backward Extrusion. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1988, vol. 37, nr 1, s. 231 – 234.
5. Materniak J.: Obróbka plastyczna: materiały pomocnicze cz.1. – wyciskanie metali na zimno, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.

6. Piwnik J.: Mechanika plastycznego płynięcia w zagadnieniach wyciskania metali, Wyższa Szkoła Ekonomiczna w Białymstoku, Białystok 2010.
7. Shahbaz M. i in.: A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion. Materials Science and Engineering A 2011, nr 530, s. 469 – 472.
8. Śińczak J.: Procesy przeróbki plastycznej, Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, Kraków 2001.
9. [www.multipino.pl](http://www.multipino.pl)

## **TEORETYCZNA ANALIZA WYCISKANIA ELEMENTÓW ŚRUBOWYCH**

### **Streszczenie**

Prezentowano rozważania teoretyczne nad procesem wyciskania elementów śrubowych. Zaprezentowane wyniki badań mają na celu zobrazowanie wpływu kąta pochylenia linii śrubowej  $\beta$  wyciskanego wyrobu śrubowego na przebieg procesu wyciskania. W rezultacie przeprowadzonych badań numerycznych wyznaczono: kształt wyciskanych wyrobów, rozkład intensywności odkształcenia, rozkład naprężeń stycznych i zredukowanych, kinematykę płynięcia materiału, parametry siłowe i termiczne procesu. Przeanalizowano wpływ kąta  $\beta$  pochylenia linii śrubowej wyciskanego wyrobu na przebieg procesu wyciskania.

**Słowa kluczowe:** MES, wyciskanie, elementy śrubowe

## **THEORETICAL ANALYSIS OF SCREW ELEMENTS EXTRUSION PROCESS**

### **Abstract**

In this paper theoretical analysis of screw elements extrusion process is presented. Obtained results of calculations are focused determination of helical line inclination angle  $\beta$  of extruded element influence on extrusion process course. In the effect of conducted research following parameters were determined: shape of extruded parts, strain intensity distribution, tangent and reduced stress distribution, material flow kinematics, thermal and force parameters. The influence of these parameters on extrusion process course was discussed.

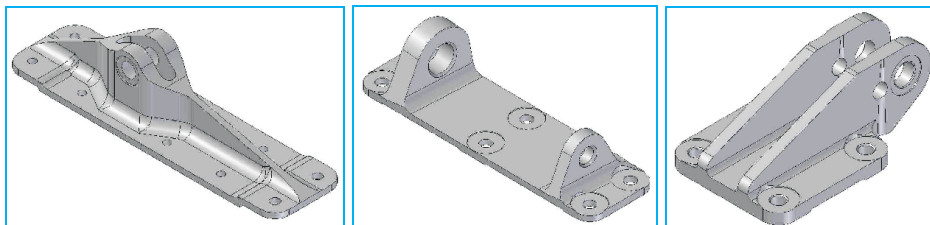
**Keywords:** FEM, extrusion, screw elements

## **Innowacyjne rozwiązania kształtowania odkuwek wsporników wykorzystywanych w przemyśle lotniczym**

### **Wprowadzenie**

Wśród elementów używanych do budowy samolotów wyróżnić można grupę wyrobów w kształcie uzębrowanej płyty. Części te są głównie wykorzystywane na wsporniki, pokrywy, zasłony, klapy. Obecnie tego typu elementy w warunkach przemysłu krajowego produkowane są głównie metodami odlewania i obróbki skrawaniem. Dotychczas używane technologie wytwarzania wsporników są kosztowne i pracochłonne, dlatego też za celowe uznano opracowanie nowych, efektywnych sposobów kształtowania plastycznego tego typu wyrobów, między innymi w trójsuwakowej prasie kuzniczej dla potrzeb krajowego przemysłu lotniczego, które opisano w patentach [1-8]. Wynalazki te mogą być wykorzystane do plastycznego kształtowania wsporników z wysokimi i cienkimi żebrami. Przykładowe części lotnicze, które można wytwarzać w oparciu o nowe sposoby kształtowania uzębrowanych wyrobów płaskich przedstawiono na rys. 1.

Głównym zamierzeniem opracowanych innowacyjnych rozwiązań jest kształtowanie odkuwek wsporników ze stopów metali lekkich stosowanych w lotnictwie.



Rys. 1. Przykładowe wsporniki stosowane w lotnictwie [opracowanie własne]

---

<sup>1</sup> Email: a.dziubinska@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej; Uczestnik projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

<sup>2</sup> Email: a.gontarz@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej



## **1. Przegląd metod wytwarzania wsporników**

Istnieje wiele metod wytwarzania wsporników stosowanych w lotnictwie między innymi: odlewanie, obróbka skrawaniem, spajanie i obróbka plastyczna [9]. Najczęściej stosowaną technologią kształtowania tego typu części jest obróbka skrawaniem. Wytwarzanie wsporników poprzez frezowanie jest pracochłonne oraz charakteryzuje się dużymi stratami materiału. Zastosowanie metody spajania do otrzymania wsporników może charakteryzować się obniżonymi własnościami wyrobu w miejscu łączenia żebra do podstawy, a także czasochłonnością procesu [10]. Części lotnicze typu uźebrowana płyta, wykonane technologią odlewania, odznaczają się znacznie niższymi własnościami mechanicznymi i użytkowymi niż elementy wytwarzane metodami obróbki plastycznej. Procesy kształtowania plastycznego przy wytwarzaniu części konstrukcyjnych zapewniają najkorzystniejsze własności wytrzymałościowe i użytkowe wyrobom typu wsporniki. Do nich należą między innymi metody: wyciskania i kucia matrycowego. Przy wyciskaniu wyrobów typu wspornik występują jednak duże siły kształtowania oraz następuje szybkie zużycie narzędzi. Istotnym ograniczeniem przy wytwarzaniu części lotniczych płaskich z żebrami metodą kucia matrycowego jest możliwość uzyskania jedynie wyrobów z niższymi i grubszyimi żebrami [11].

## **2. Koncepcja kształtowania plastycznego wsporników w trójsuwakowej prasie kuźniczej**

Nowe możliwości wytwarzania wsporników z cienkościennymi i wysokimi żebrami stwarza zastosowanie prototypu trójsuwakowej prasy kuźniczej (TPK), którą zaprojektowano i skonstruowano w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej w Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Prasa ta charakteryzuje się trzema ruchomymi narzędziami i posiada możliwości techniczne znacznie przewyższające typowe maszyny kuźnicze. Na rysunku 2 przedstawiono obecny wygląd TPK, która składa się z części mechanicznej (1), szafy sterowniczej (2) i hydraulicznego układu zasilającego (3).

Schemat postępowania w przypadku wszystkich 8 patentów dotyczących sposobów kształtowania plastycznego wyrobów uźebrowanych typu wspornik w trójsuwakowej prasie kuźniczej jest podobny. Polega on na tym, że półfabrykat w kształcie płaskiej płyty spęcza się za pomocą narzędzi bocznych. W wyniku wzajemnego i przeciwbieżnego, poziomego przemieszczenia się tych narzędzi kształtuje się zebro w środkowej części płyty. Proces trwa do momentu osiągnięcia założonych wymiarów odkuwki. Kształtowanie można zrealizować według dwóch wariantów: półswobodne i w wykroju zamkniętym. Różnica pomiędzy dwoma rozpatrywanymi wariantami polega na zastosowaniu dwóch dodatkowych matryc, które ograniczają płynięcia materiału w kierunku prostopadłym do ruchu bocznych

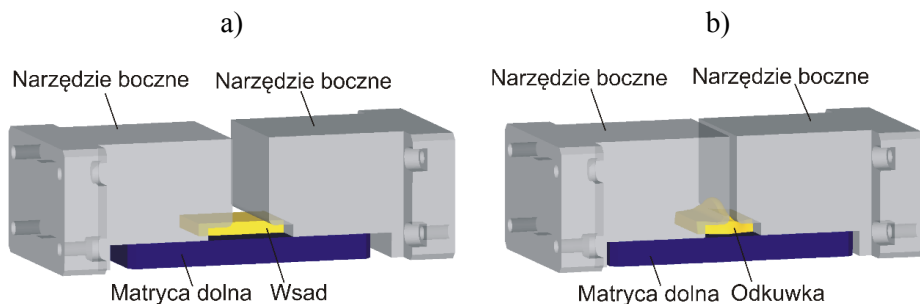
narzędzi. Istnieje możliwość kształtowania również dwóch żeber poprzez użycie stempla górnego, a także zarysu żebra w końcowej fazie procesu przy użyciu górnego narzędzia o określonym kształcie.



Rys. 2. Trójsuwakowa prasa kúźnicza: 1 – część mechaniczna, 2 – szafa sterownicza, 3 – hydrauliczny układ zasilający [opracowanie własne]

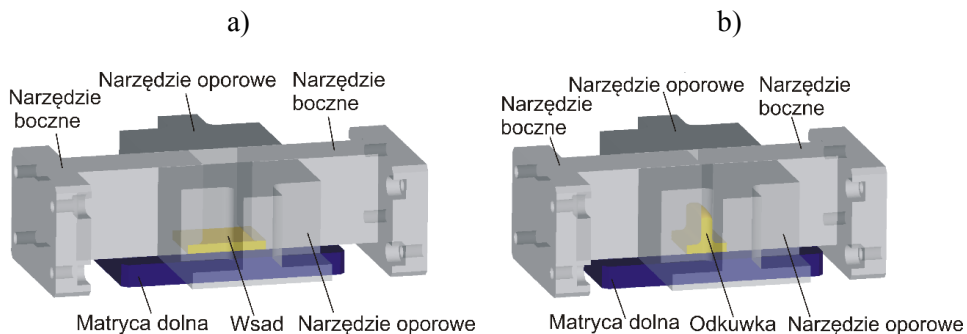
Opis chronionych prawnie wynalazków, dotyczących nowych sposobów kształtowania plastycznego wyrobów płaskich z żebrami (np. wsporników) o różnych kształtach zamieszczono poniżej. Przedstawiono skróty opisu wynalazków ujawniających ich istotę oraz rysunki niezbędne do ich zrozumienia. Innowacyjne rozwiązania kształtowania odkuwek wsporników uzyskały ochronę patentową w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej zgodnie z tytułami podanymi poniżej:

a) *Sposób kształtowania plastycznego półswobodnego wyrobów płaskich z jednym żebrzem*. Patent na wynalazek o numerze PL 214530 udzielono w dniu 28.01.2013 r. Rozwiązanie technologiczne, którego dotyczy patent pozwala na plastyczne kształtowanie w wykroju półswobodnym odkuwek wsporników z jednym żebrzem z wykorzystaniem trójsuwakowej prasy kúźniczej. W czasie realizacji procesu półfabrykat w kształcie płaskiej płyty spęczany jest na dolnej matrycy za pomocą bocznych narzędzi kształtujących. Skutkuje to intensywnym płynięciem materiału w środkowej części półfabrykatu w kierunku prostopadłym do powierzchni płyty i w rezultacie ukształtowanie żebra. Narzędzia boczne w trakcie trwania procesu przemieszczają się ruchem posuwistym ze stałą prędkością, aż do uzyskania zaplanowanej grubości i wysokości żebra. Kształtowanie żebra o założonych wymiarach wyrobu gotowego przebiega w przestrzeni ograniczonej czołowymi powierzchniami narzędzi bocznych [1]. Schemat kształtowania półswobodnego wyrobów płaskich z jednym żebrzem przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat kształtowania półswobodnego wyrobu płaskiego z jednym żebrem:  
a) początek procesu, b) koniec procesu [opracowanie własne]

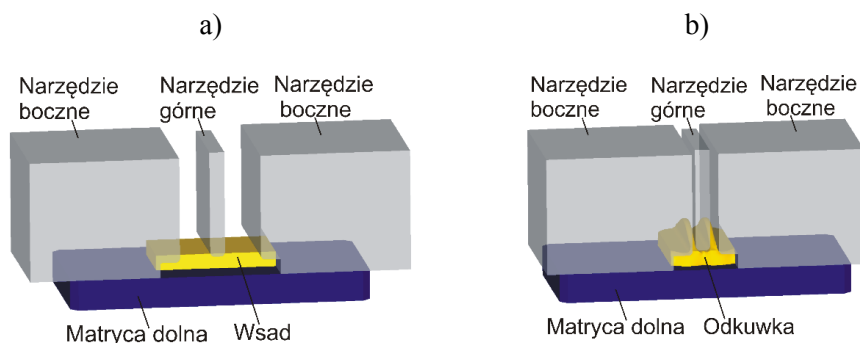
b) *Sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z jednym żebrem.* Patent na wynalazek o numerze PL 214513 udzielono w dniu 28.01.2013 r. Kolejna metoda, na którą uzyskano ochronę prawną dotyczy kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym odłuków wsporników z jednym żebrem również z wykorzystaniem trójsuwakowej prasy kuźniczej. W początkowym etapie procesu półfabrykat w kształcie płyty umieszcza się w wykroju zamkniętym pomiędzy matrycą a narzędziami kształtującymi. Następnie wsad spęcza się przy użyciu bocznych narzędzi kształtujących, które zbliżają się do siebie ruchem postępowym ze stałą prędkością. Przemieszczające się narzędzia boczne wyciskają środkową część płyty do górnej przestrzeni wykroju, kształtując żebro o założonych wymiarach wyrobu gotowego [2]. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z jednym żebrem przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym wyrobu płaskiego z jednym żebrem:  
a) początek procesu, b) koniec procesu [opracowanie własne]

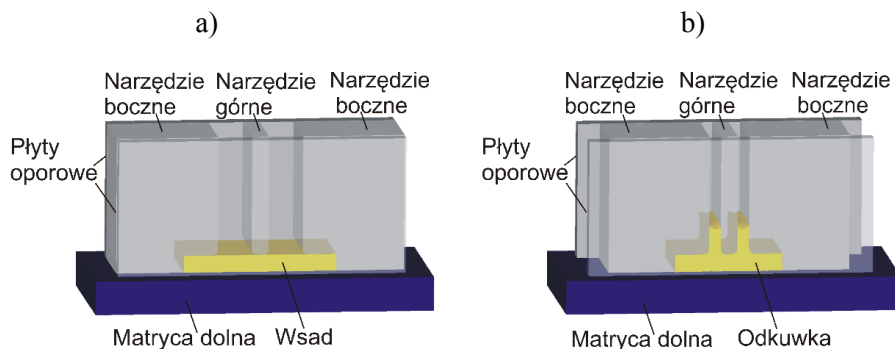
c) *Sposób kształtowania plastycznego półswobodnego wyrobów płaskich z dwoma żebremi.* Patent na wynalazek o numerze PL 214519 udzielono w dniu 28.01.2013 r. Kolejna innowacyjna metoda dotyczy kształtowania

plastycznego, półswobodnego odkuwek wsporników z dwoma żebrami w trójsuwakowej prasie kuźniczej. W czasie procesu półfabrykat w kształcie płyty umieszczany jest na matrycy dolnej. Następnie górne narzędzie zaciska środkową część płyty. Po czym półfabrykat poddawany jest spęczaniu przez boczne narzędzia, które zbliżają się do siebie w płaszczyźnie poziomej. W ten sposób kształtowane są dwa żebra w otwartych przestrzeniach, ograniczonych powierzchniami narzędzi bocznych oraz narzędziem górnym [3]. Schemat kształtowania półswobodnego wyrobów płaskich z dwoma żebrami przedstawiono na rys. 5.



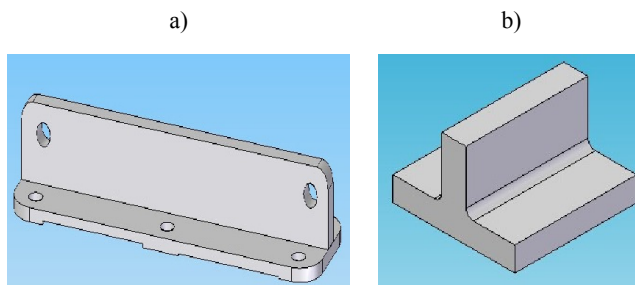
Rys. 5. Schemat kształtowania półswobodnego wyrobu płaskiego z dwoma żebrami:  
a) początek procesu, b) koniec procesu [opracowanie własne]

d) *Sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z dwoma żebrami.* Patent na wynalazek o numerze PL 214520 udzielono w dniu 28.01.2013 r. Inną metodą wytwarzania wyrobów płaskich z dwoma żebrami, na którą uzyskano krajowy patent jest sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym odkuwek wsporników z dwoma żebrami w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Podczas realizacji procesu półfabrykat w kształcie płyty umieszczany jest w wykroju zamkniętym pomiędzy matrycą a bocznymi narzędziami kształtującymi. Następnie środkowa część płyty (półfabrykatu) zaciskana jest górnym narzędziem. Po czym w wyniku ruchu bocznych narzędzi kształtujących następuje spęczanie półfabrykatu. Boczne narzędzia kształtujące przemieszczają się do siebie w płaszczyźnie poziomej i wyciskają dwa żebra o założonych wymiarach wyrobu w pionową część przestrzeni wykroju zamkniętego, pomiędzy narzędziem górnym, a narzędziami bocznymi [4]. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z dwoma żebrami przedstawiono na rys. 6.

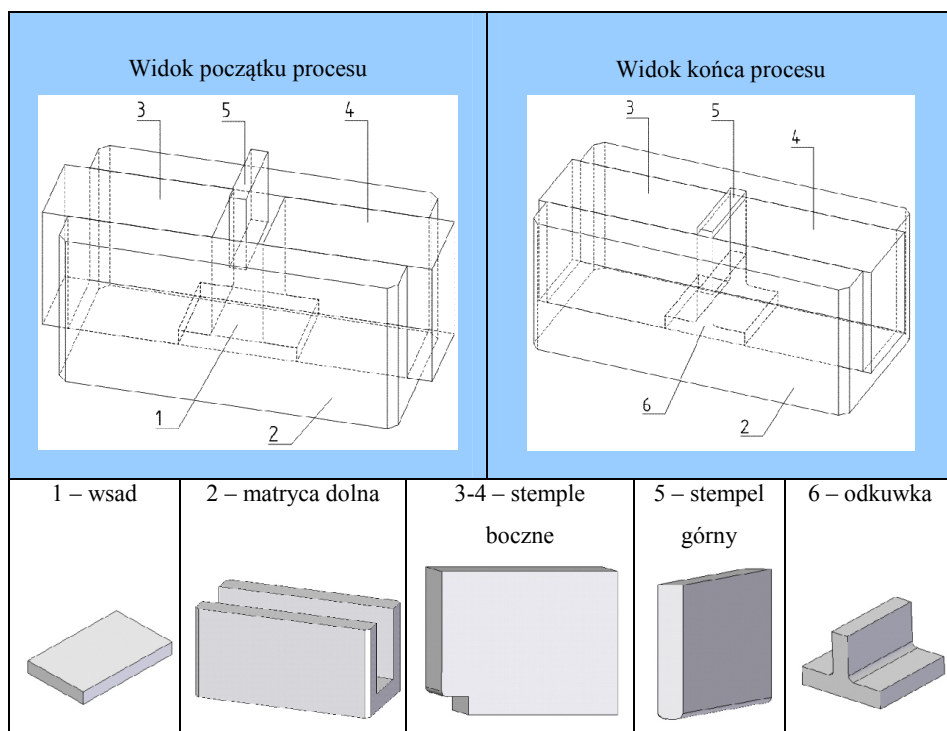


Rys. 6. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym wyrobu płaskiego z dwoma żebrami:  
 a) początek procesu, b) koniec procesu [opracowanie własne]

e) *Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrzem o zarysie prostokątnym.* Patent na wynalazek o numerze P.395392 udzielono w dniu 26.06.2013 r. Innym rozwiązaniem technologicznym jest metoda kształtowania plastycznego odkuwek wsporników z jednym żebrzem o zarysie prostokątnym, z wykorzystaniem trójsuwakowej prasy kuźniczej. Opracowany sposób kształtowania polega na tym, że materiał wsadowy w kształcie płyty w początkowym etapie procesu układany jest poziomo w wykroju zamkniętym na dolnej matrycy pomiędzy bocznymi stemplami kształtującymi. Następnie wsad ściskany jest stemplami bocznymi, co powoduje zwiększenie jego przekroju poprzecznego kosztem zmniejszenia jego długości. Dalszy ruch stempli bocznych powoduje wyciskanie materiału w środkowej części płyty, który tworzy zgrubienie w postaci żebra. Zarys prostokątny żebra otrzymuje się przez nacisk wywierany górną matrycą przesuwającą się w dół w kierunku matrycy dolnej do momentu osiągnięcia założonego kształtu żebra [5]. Schemat kucia odkuwki płaskiej z jednym żebrzem o zarysie prostokątnym oraz przykładowe wsporniki o podobnym kształcie stosowane w przemyśle lotniczym przedstawiono na rys. 8 i 7.

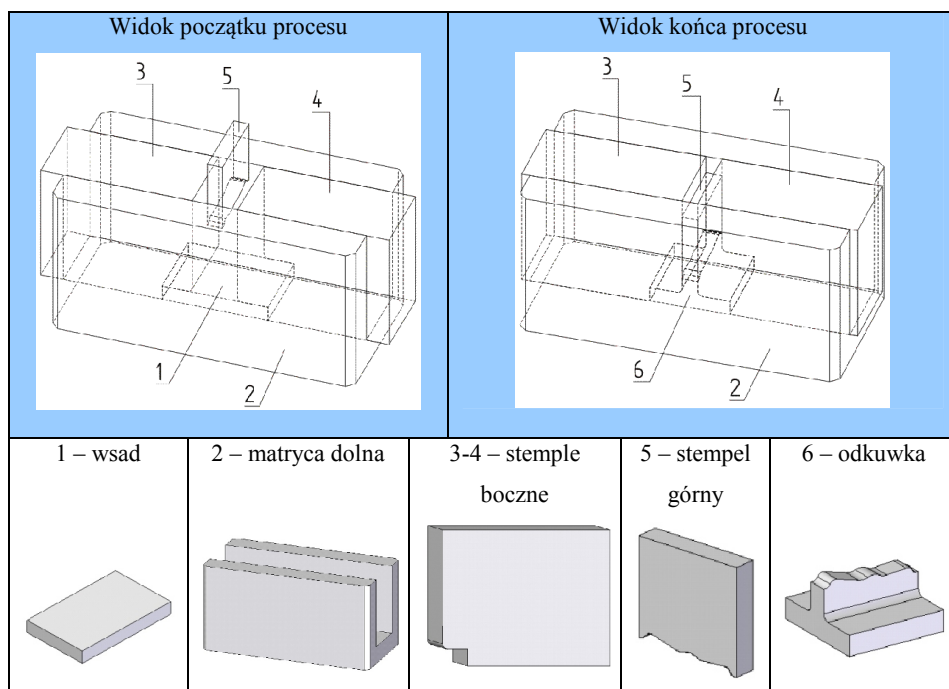


Rys. 7. Wspornik z jednym żebrzem o zarysie prostokątnym stosowany w lotnictwie (a) oraz zaprojektowana odkuwka wspornika (b) [opracowanie własne]



Rys. 8. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie prostokątnym [opracowanie własne]

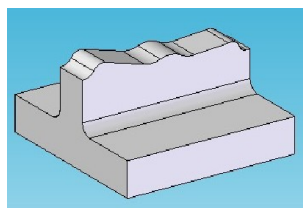
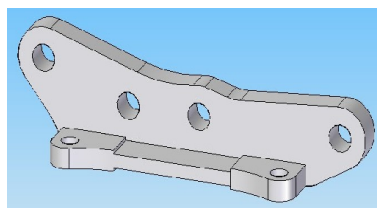
f) *Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrem o zarysie falistym.* Patent na wynalazek o numerze P.395406 udzielono w dniu 25.06.2013 r. Uzyskany patent dotyczy zastosowania trójsuwakowej prasy kuźniczej do kształtowania plastycznego odkuwek wsporników z jednym żebrem o zarysie falistym. Opracowany sposób kształtowania charakteryzuje się tym, że materiał wsadowy w kształcie płyty umieszczany jest w wykroju zamkniętym na dolnej matrycy, pomiędzy bocznymi stemplami kształtującymi. Po czym dwa narzędzia boczne, przemieszczające się w kierunku osi wykroju ściskają wsad, przez co część materiału płynie plastycznie do górnej przestrzeni wykroju, tworząc w środkowej części płyty zgrubienie w postaci żebra. Następnie w wyniku ruchu górnej matrycy w kierunku półfabrykatu kształtuje się zarys falisty żebra [6]. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie falistym oraz przykładowe wsporniki o podobnym kształcie stosowane w przemyśle lotniczym przedstawiono na rys. 9 i 10.



Rys. 9. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie falistym [opracowanie własne]

a)

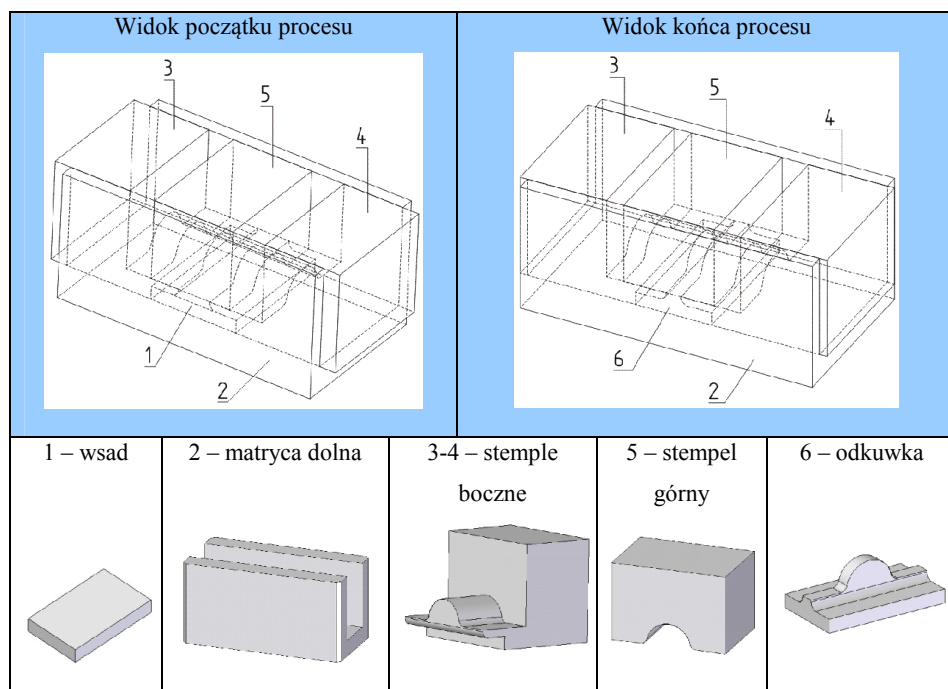
b)



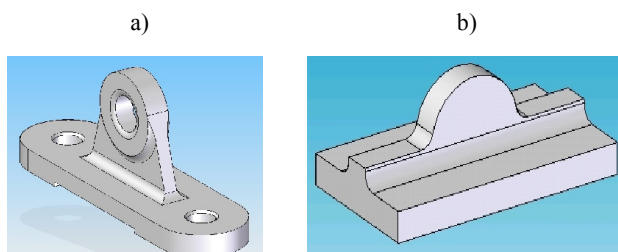
Rys. 10. Wzrostek z jednym żebrem o zarysie falistym stosowany w lotnictwie (a) oraz zaprojektowana odkuwka wzrostka (b) [opracowanie własne]

g) Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrem o zarysie półokrągłym. Patent na wynalazek o numerze P.395407 udzielono w dniu 25.06.2013 r. Często spotyka się w budowie maszyn różnego rodzaju wsporniki o zbliżonym do kołowego zarysu żebra. Dlatego też opracowano sposób kształtowania plastycznego odkuwek wsporników z jednym żebrem o zarysie półokrągłym, który również można zrealizować w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Proces kształtowania polega na tym, że materiał wsadowy w kształcie płyty umieszczany jest w wykroju zamkniętym

na dolnej matrycy, pomiędzy bocznymi stemplami. Następnie wsad zaciskany jest przy pomocy górnej matrycy z wgłębieniem o zarysie półokrągłym. W kolejnym etapie następuje odkształcanie płyty (półfabrykatu), które odbywa się w wyniku spęczniania materiału bocznymi stemplami, zbliżającymi się do siebie w płaszczyźnie poziomej. Płynący materiał wypełnia przestrzeń wykroju górnej matrycy, w wyniku czego kształtowane jest zgrubienie w postaci żebra o zarysie półokrągłym [7]. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie półokrągłym oraz przykładowe wsporniki o podobnym kształcie stosowane w przemyśle lotniczym przedstawiono na rys. 11 i 12.



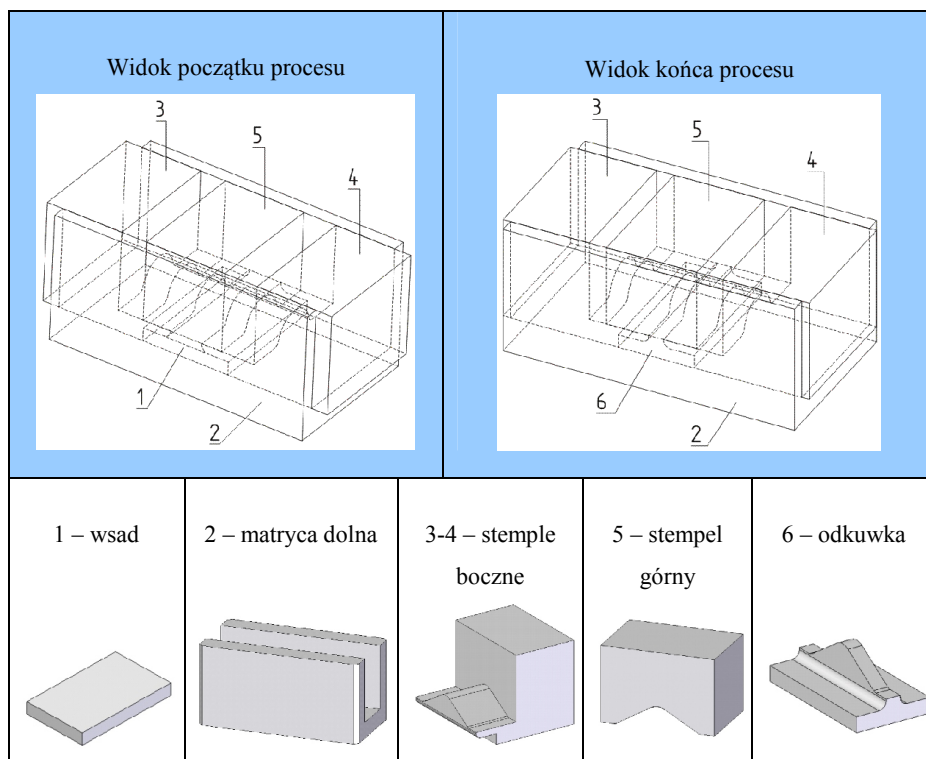
Rys. 11. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie półokrągłym [opracowanie własne]



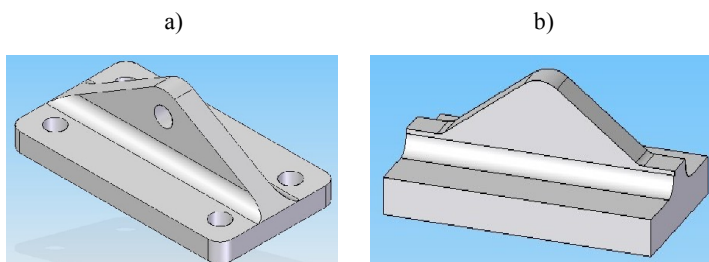
Rys. 12. Wspornik z jednym żebrem o zarysie półokrągłym stosowany w lotnictwie (a) oraz zaprojektowana odkuwka wspornika (b) [opracowanie własne]



h) *Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrem o zarysie trójkątnym.* Patent na wynalazek o numerze P.395408 udzielono w dniu 25.06.2013 r. Bazując na poprzednio przedstawionych rozwiązaniach opracowano sposób kształtowania plastycznego odkuwek wsporników z jednym żebrem o zarysie trójkątnym, realizowany w trójsuwakowej prasie kuźniczej. W czasie procesu materiał wsadowy w kształcie płyty układany jest poziomo na dolnej matrycy pomiędzy bocznymi stemplami kształtującymi. Następnie wsad zaciska się górną matrycą z wykojem o zarysie trójkątnym. Po czym spęcza się materiał płyty podczas ruchu bocznych stempli, które przysuwając się do siebie w płaszczyźnie poziomej, kształtują żebro o zarysie trójkątnym [8]. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie trójkątnym oraz przykładowe wsporniki o podobnym kształcie stosowane w przemyśle lotniczym przedstawiono na rys. 13 i 14.



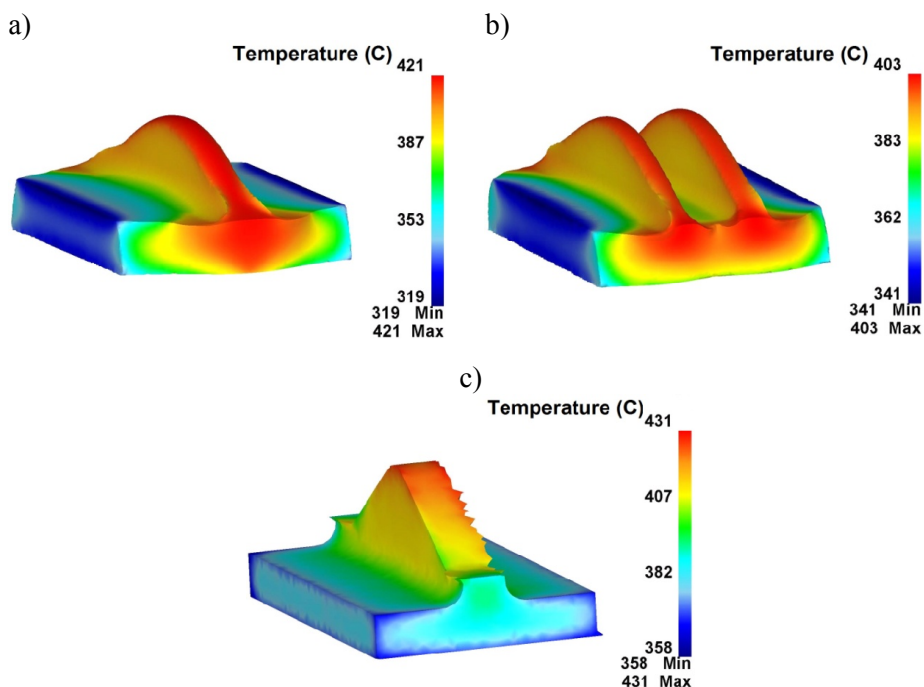
Rys. 13. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym żebrem o zarysie trójkątnym  
[opracowanie własne]



Rys. 14. Wspornik z jednym żebrem o zarysie trójkątnym stosowany w lotnictwie (a) oraz zaprojektowana odkuwka wspornika (b) [opracowanie własne]

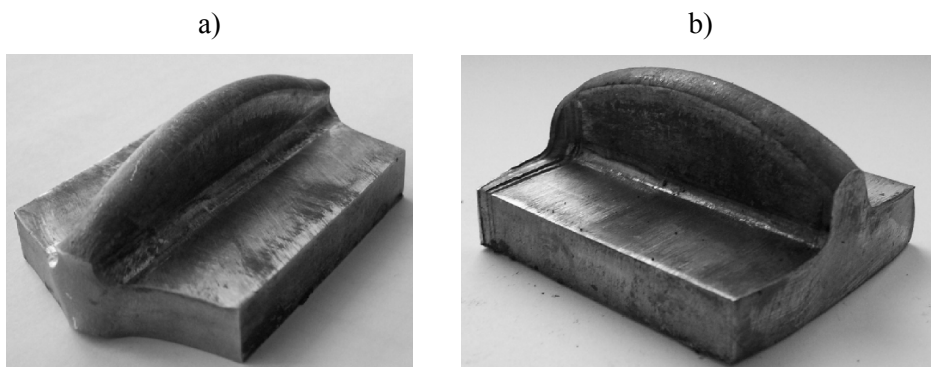
### 3. Rezultaty badań teoretyczno-doświadczalnych kształtowania plastycznego wsporników

Przeprowadzone obliczenia numeryczne w programie Deform 3D bazującym na metodzie elementów skończonych potwierdziły słuszność opracowanych sposobów kształtowania wsporników według założonych koncepcji zawartych w patentach [1–8]. Uzyskano prawidłowe wyroby w postaci wsporników, które przykładowe kształty przedstawiono na rys. 15.

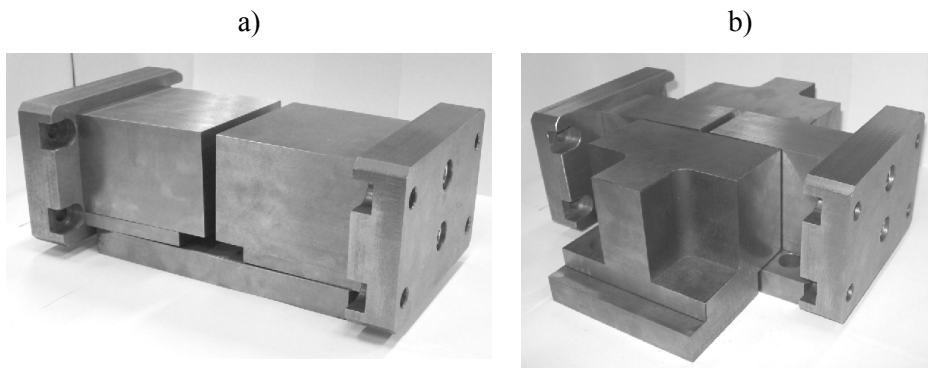


Rys. 15. Kształt wybranych wsporników z rozkładem temperatur uzyskany z symulacji MES:  
a) z jednym żebrem, b) z dwoma żebrowymi, c) z jednym żebrem o zarysie trójkątnym  
[opracowanie własne]

Wyniki teoretyczne uzyskane z symulacji numerycznych zostały z powodzeniem zweryfikowane we wstępnych badaniach doświadczalnych przeprowadzonych w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Na początku próby wykonano dla procesu kształtowania wsporników z jednym żebrem ze stopu magnezu. Uzyskano dobrą zgodność pomiędzy eksperymentem i wynikami teoretycznymi. Kształt wsporników ze stopu magnezu AZ31 otrzymanych z badań doświadczalnych oraz komplet użytych narzędzi do ich kucia przedstawiono na rys.16 i 17.



Rys. 16. Wspornik z jednym żebrem ze stopu magnezu AZ31 uzyskany:  
a) w procesie kształtowania półswobodnego, b) w procesie kształtowania w wykroju zamkniętym [opracowanie własne]



Rys. 17. Komplet narzędzi stosowany do procesu: a) kształtowania półswobodnego wsporników, b) kształtowania w wykroju zamkniętym wsporników [opracowanie własne]

W oparciu o wstępne wyniki prowadzonych badań teoretyczno-doświadczalnych kształtowania wsporników ze stopów magnezu określono zakres parametrów technologicznych, przy których proces przebiega prawidłowo. Zidentyfikowano zjawiska, które mogą ograniczać proces kształtowania odkuwek wsporników. Do głównych ograniczeń procesu zaliczyć można między innymi: wyboczenie

kształtowanego wsadu, zakucia, pęknięcia, nierównomierność kształtu zębra, poszerzenie podstawy wyrobu. Aspekty teoretyczne i doświadczalne występujących ograniczeń procesu szczegółowo podano w opracowaniu [12].

Dotychczas przeprowadzone badania teoretyczno-doświadczalne wskazują, że opracowane rozwiązania kształtowania wsporników metodą kucia w prasie trójsuwakowej, mogą być w efektywny sposób wykorzystywane do wytwarzania tego typu części dla przemysłu lotniczego.

#### **4. Podsumowanie**

Wyniki analiz teoretycznych oraz wstępnych badań laboratoryjnych dotyczące opatentowanych wynalazków potwierdziły możliwość kształtowania wsporników w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Rozwiązania konstrukcyjno – technologiczne, które mają szansę powstać w wyniku wdrożenia wynalazków w znacznym stopniu poprawią ekonomiczność procesu wytwarzania tego typu półfabrykatów dzięki zaletom takim jak:

- znaczące obniżenie zużycia materiału,
- zmniejszenie pracochłonności procesu dzięki możliwości uzyskania wsporników w jednym cyklu roboczym prasy, co wpłynie na wzrost wydajności procesu,
- polepszenie własności użytkowych i wytrzymałościowych gotowych wyrobów,
- możliwość otrzymania półfabrykatów o zbliżonych kształtach i wymiarach do wyrobów gotowych stosowanych w branży lotniczej,
- uniwersalność metod, które mogą być wykorzystane do otrzymania wsporników z różnych materiałów lekkich używanych w lotnictwie, motoryzacji i innych gałęziach przemysłu,
- ograniczenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego poprzez zmniejszenie odpadów do recyklingu i utylizacji będących wynikiem wytwarzania wsporników metodą obróbki skrawaniem.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w procesie kucia półfabrykatów typu wsporniki możliwe jest uzyskanie odkuwek o prawidłowym kształcie i własnościach. Opracowane technologie kształtowania wsporników w trójsuwakowej prasie kuźniczej są unikatowe w skali światowej. Uzasadnione jest więc prowadzenie dalszych badań, rozwijających technologię wytwarzania tego typu części z różnych materiałów lekkich, przeznaczonych do przeróbki plastycznej i stosowanych przy budowie maszyn latających. Opracowanie ogólnych wytycznych do projektowania procesów kucia wsporników z materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych w lotnictwie miałyby duże znaczenie w aspekcie przyszłych zastosowań przemysłowych na znacznie większą skalę.

## **Podziękowania**

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## **Literatura**

1. Gontarz, A., Dziubińska, A., Sposób kształtowania plastycznego półswobodnego wyrobów płaskich z jednym żebrzem. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent 214530. Zatwierdzony 28.01.2013 r.
2. Dziubińska, A., Gontarz, A., Sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z jednym żebrzem. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent 214513. Zatwierdzony 28.01.2013 r.
3. Dziubińska, A., Gontarz, A., Sposób kształtowania plastycznego półswobodnego wyrobów płaskich z dwoma żebrami. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent 214519. Zatwierdzony 28.01.2013 r.
4. Gontarz, A., Dziubińska, A., Sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z dwoma żebrami. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent 214520. Zatwierdzony 28.01.2013 r.
5. Dziubińska, A., Gontarz, A., Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrzem o zarysie prostokątnym. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent P.395392. Zatwierdzony 26.06.2013 r.
6. Gontarz, A., Dziubińska, A., Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrzem o zarysie falistym. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent P.395406. Zatwierdzony 25.06.2013 r.
7. Gontarz, A., Dziubińska, A., Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrzem o zarysie półokrągłym. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent P.395407. Zatwierdzony 25.06.2013 r.
8. Dziubińska, A., Gontarz, A., Sposób kucia półfabrykatu, zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrzem o zarysie trójkątnym. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Patent P.395407. Zatwierdzony 25.06.2013 r.
9. Oczó K., Kawalec A., „Kształtowanie metali lekkich”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
10. Romanowski S., „Technologia śmigłowców”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
11. Tomczak J., Gontarz A., Pater Z., Drozdowski K., “Comparative research on aluminum alloys PA31 and 2618A in the aspect of application in aviation structures, Rudy i Metale Nieżelazne, vol. 6, s. 333-337, 2010.
12. Gontarz A., Dziubińska A., “Identification of important parameters of forming process of flat forgings with one rib from AZ31 alloy”, special edition of journal Steel research international proceedings of the 14th International Conference on Metal Forming in Krakow, Poland, 2012, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, s. 843-846.

## **INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA KSZTAŁTOWANIA ODKUWEK WSPORNIKÓW WYKORZYSTYWANYCH W PRZEMYSŁE LOTNICZYM**

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono nowe możliwości kształtowania odkuwek wsporników wykorzystywanych w przemyśle lotniczym. Przedstawiono analizę literatury w zakresie dotychczasowych metod wytwarzania wyrobów płaskich z żebrami. Opisano nowe technologie kucia wsporników przy zastosowaniu prototypu trójsuwakowej prasy kuźniczej, które zostały opracowane przez pracowników Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Założono, że produkcja wsporników lotniczych w oparciu o metodę kucia w trójsuwakowej prasy kuźniczej pozwoli na poprawę własności użytkowych i mechanicznych wyrobów oraz obniżenie kosztów ich wytwarzania. Innowacyjne rozwiązania technologiczne dotyczące sposobów kształtowania plastycznego odkuwek wsporników opracowano na potrzeby przemysłu lotniczego, a w bieżącym roku uzyskały one ochronę prawną. W artykule przedstawiono 8 patentów dotyczących metod kształtowania odkuwek płaskich z żebrami, które mogą być zastosowane jako wsporniki, pokrywy, klapy, zasłony w konstrukcji samolotów. Wyżej wymienione patenty sklasyfikowano przez Urząd Patentowy RP zgodnie z Międzynarodową Klasyfikacją Patentową w klasie B21J5/02 (Kucie w matrycach), B21J13/02 (Matryce lub zamocowania matryc), B21J5/08 (Spęczanie), B21J5/08 (Prasy spęczające); B21J9/06 (Prasy do kucia profilowego).

**Słowa kluczowe:** wsporniki, trójsuwakowa prasa kuźnicza, kucie, patenty

## **INNOVATIVE METHODS FOR FORMING AIRCRAFT BRACKETS**

### **Abstract**

The paper presents new methods for forming brackets used in the aerospace industry. An overview of the literature on the so-far employed methods for producing flat ribbed products is given. New forging techniques for producing brackets using a prototype of a three-slide forging press developed at the Department of Computer Modelling and Metal Forming Technologies at Lublin University of Technology are described. It was assumed that producing aircraft brackets by the forging method using a three-slide forging press would lead to improving the functional and mechanical properties of these products, decreasing their production costs at the same time. Developed for the needs of the aerospace industry, the innovative methods for forming brackets were granted patent protection this year. In the paper, eight patents are presented, and they all relate to the methods for forming flat ribbed products that can be used as brackets, covers, flaps or screens in aircraft and car construction. The patents have been classified by the Polish Patent Office in compliance with the International Patent Classification system under B21J5/02 (die forging), B21J13/02 (die), B21J5/08 (upsetting), B21J5/08 (upsetting press); B21J9/06 (Profiled forging press).

**Keywords:** brackets, three-slide forging press, forging, patents

## **Charakterystyka zabezpieczeń magnetycznych na przykładzie wybranego stopu amorficznego**

### **Wstęp**

Każdy z nas na co dzień spotyka się ze stopami amorficznymi różnego typu. Jesteśmy tego bardziej lub mniej świadomi. Jednym z popularniejszych zastosowań są zabezpieczenia przed kradzieżą w sklepie. Robiąc zakupy nie zastanawiamy się nad tym jak działają zabezpieczenia sklepowe, ile to kosztuje i z czego jest zrobione. To właśnie w tych urządzeniach stosowane są materiały przyszłości, które już od wielu lat pojawiają się zarówno na polskim jak i międzynarodowym rynku. Zabezpieczenia magnetyczne wykonywane są ze stopów o budowie amorficznej i specjalnych właściwościach magnetycznych. Opisywane zabezpieczenia można zobaczyć na perfumach, paście do zębów czy też innych produktach drogerijnych.

Tematyka większości artykułów naukowych opisujących stopy amorficzne stosowane na zabezpieczenia antykradzieżowe, skupia się na opisie ich własności magnetycznych. Dlatego też interesujące wydaje się być zbadanie właściwości eksploatacyjnych i mechanicznych (np. odporności na zużycie ścierne i twardości) na przykładzie komercyjnie stosowanych taśm, wykonanych ze stopów amorficznych.

Niniejsza praca ma na celu zaprezentowanie zastosowań stopów amorficznych. Kolejnym celem jest określenie wybranych właściwości eksploatacyjnych i mechanicznych komercyjnego stopu amorficznego, stosowanego do produkcji zabezpieczeń magnetycznych.

### **1. Zabezpieczenia sklepowe wykonywane ze stopów amorficznych**

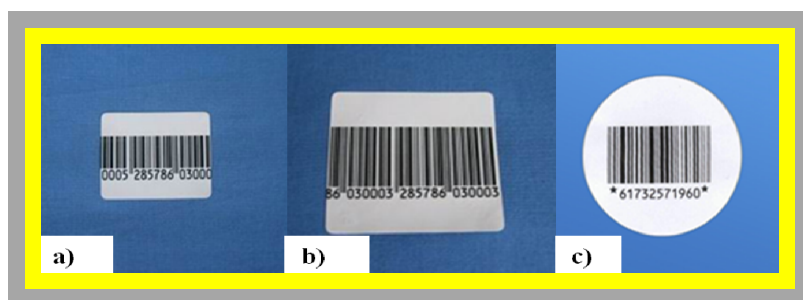
Wyróżniamy różnego typu zabezpieczenia sklepowe, jest to cała gama produktów tego typu. Oferowany na rynku asortyment można podzielić na kilka kategorii w zależności od tego do jakich przedmiotów chcemy użyć takie zabezpieczenie. Producenci prześcigają się w wymyślaniu coraz to nowszych technologii i dlatego już teraz możemy się spotkać z takimi zabezpieczeniami jak: klipsy, etykiety, bramki, pajęczki, systemy linkowe, szpilki barwiące i wiele innych. Zabezpieczenia w postaci etykiet można podzielić na kilka grup:

---

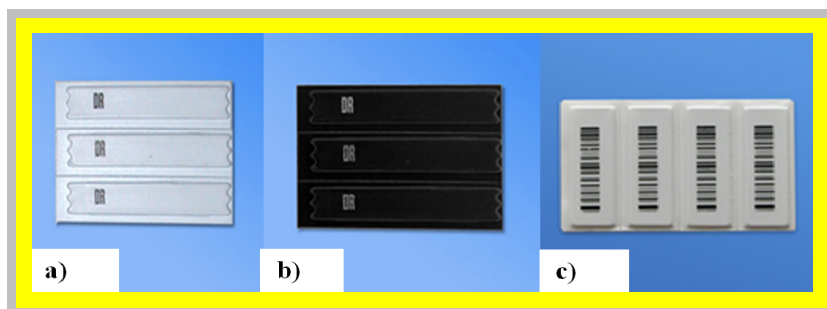
<sup>1</sup> Email: [kzdrodowska@wip.pcz.pl](mailto:kzdrodowska@wip.pcz.pl), Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Instytut Inżynierii Materiałowej

- etykiety do systemów radiowych (RF),
- etykiety do systemów akustyczno magnetycznych (AM),
- etykiety do systemów elektromagnetycznych (EM).

Zdjęcia przedstawiające wymienione etykiety zamieszczono na rysunkach 1÷4. Przykładowe zabezpieczenia jakie są jeszcze dostępne na produktach w sklepach zamieszczono na rysunku 5÷7. Etykiety to rodzaj zabezpieczeń dla specjalnej grupy towarów. To właśnie one działają na podobnych zasadach jak klipsy jednak są mniej widoczne i łatwiej można zaaplikować na produkcie. Standardowy rozmiar etykiet, który jest najczęściej stosowany to 4x4 cm i 5x5 cm. Zaletą jest też to, że są dobrze wykrywane przez bramki antykradzieżowe, jednak zasadniczym warunkiem działania takiego zabezpieczenia jest rozstaw bramek, który nie przekracza 150cm. Odpowiednio przygotowane, poddawane są procesowi namagnesowania, dzięki czemu są łatwo wykrywalne przez antykradzieżowe bramki. Cena systemu zależy od szerokości przejścia jakie może on zabezpieczyć i od odporności na powstawanie fałszywych alarmów. Najczęściej stosowane zabezpieczenia działają w częstotliwości 8,2 MHz i wykorzystują do swojego działania najnowsze osiągnięcia w dziedzinie zabezpieczenia towarów oraz akustyczno magnetyczne systemy bramkowe 58 kHz [1÷5].

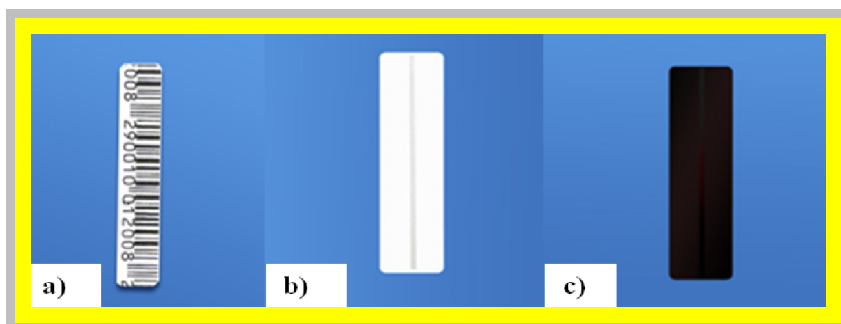


Rys. 1. Na rysunku zamieszczono etykiety takie jak a) etykieta 30x37 (GME 01/RF), b) etykieta 50x50 (GME 03/RF), c) etykieta Y40 (GME 06/RF) [6]

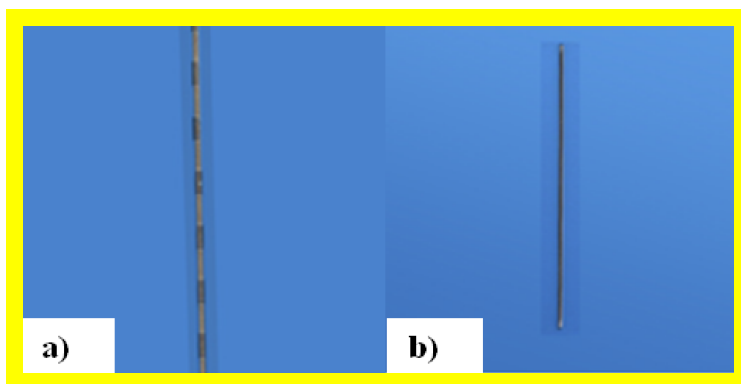


Rys. 2. Na rysunku zamieszczono etykiety takie jak a) etykieta 40x10 biała (GME 05/AM), b) etykieta 40x10 czarna (GME 05/AM), c) etykieta 40x18 KOD (GME 06/AM) [6]





Rys. 3. Na rysunku zamieszczono etykiety takie jak a) EM KOD 63x10, b) etykieta EM biała 63X6, c) etykieta EM czarna [6]



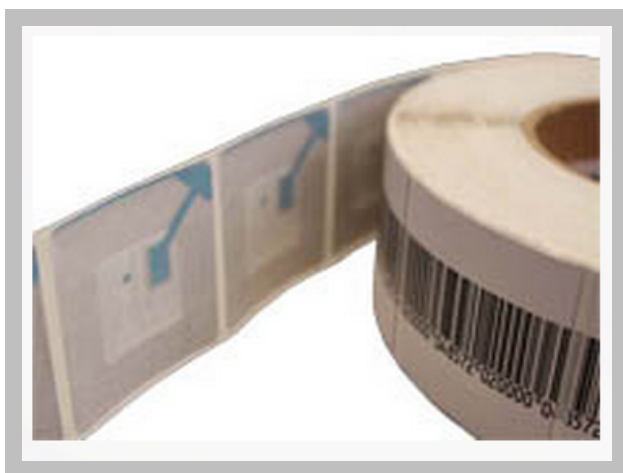
Rys. 4. Na rysunku zamieszczono etykiety takie jak:  
a) etykieta Em do bibliotek 165x6, b) etykieta EM transparentna [6]



Rys. 5. Zabezpieczenie przed kradzieżą w postaci klipsa [1]



Rys. 6. Zabezpieczenia kabelkowe droższego asortymentu [1]



Rys. 7. Etykiety zabezpieczające [1]

Bardzo ciekawym zabezpieczeniem są etykiety, które w dyskretny sposób można umieszczać na pudełkach produktu, czy też bezpośrednio przyczepiać do ubrań. Taki rodzaj oznakowania wykazuje wiele korzyści, ponieważ element jest mało widoczny, można go aplikować już na linii produkcyjnej, a jego działanie jest często jednorazowe. Wchodząc do kolejnego sklepu z zakupionym wcześniej towarem nie jesteśmy narażeni na nieprzyjemności związane z dźwiękiem przy bramkach, gdyż raz rozkodowana etykieta zazwyczaj nie działa ponownie. Problem kradzieży jest znany na całym świecie i zmagają się z nim nie tylko duże sieci handlowe, ale również małe osiedlowe sklepiki. W zależności od budżetu jakim dysponuje sprzedawca, ale również od wartości

asortymentu dobierane są odpowiednie zabezpieczenia. W Stanach Zjednoczonych już 90% farmaceutów i sklepów drogeryjnych stosuje zabezpieczenia w postaci etykiet znanych również pod nazwą Check point. Etykieta zabezpieczająca przed kradzieżą zamieszczona na rys. 7 jest interesującym rozwiązaniem, ponieważ między widocznym tworzywem umieszcza się stop amorficzny, który jest zwijany w charakterystyczną sieć. Występują również takie etykiety w których stop amorficzny układa się jeden na drugim w postaci cienkich pasków.

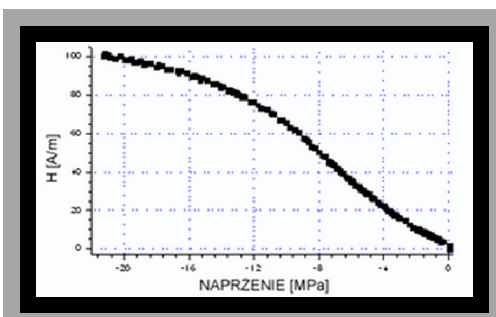
### **1.1. Czujniki magnetyczne ze stopów amorficznych**

Czujniki najłatwiej scharakteryzować jako przetworniki, które służą do zmiany energii na inną. Bardzo dobre właściwości magnetyczne jak i mechaniczne wykazują materiały magnetyczne w związku z brakiem anizotropii magneto krystalicznej można je wykorzystać jako czujniki wielkości elektrycznych jak również nie elektrycznych. Stopy amorficzne ze względu na powyższe możliwości aplikacyjne można podzielić na dwie grupy takie, które charakteryzują się wysoką magnetostrycją lub stopy o magnetostrykcji bliskiej lub równej zero [7].

Magnetostrykcja to zjawisko powstawania odkształceń w ferromagnetykach pod wpływem pola magnetycznego. Jedną z możliwości wykorzystania efektu magnetostrykcji jest generator ultradźwięków. W przemyśle elektrotechnicznym efekt magnetostrykcji występuje często jako zjawisko niekorzystne, które wywołuje falę akustyczną wokół maszyny elektrycznej, czy też transformatora. Pożądanym zastosowaniem opisanego zjawiska będzie alarm akustyczno magnetyczny zabezpieczeń sklepowych. Popularnym jest już stwierdzenie, iż materiały magnetostrykcyjne należą do grupy materiałów inteligentnych. Mają zdolność przekształcania energii magnetycznej w energię odkształcenia sprężystego. Jako pierwszy zjawisko magnetostrykcji zaobserwował J. P. Joule w 1842, angielski fizyk, członek Towarzystwa Królewskiego Royal Society. Pierwszym pierwiastkiem wykorzystującym zjawisko magnetostrykcji było żelazo, a kolejne to nikiel kobalt oraz ich stopy. Magnetostrykcja tych materiałów jest rzędu  $50 \cdot 10^{-6}$ , a najnowsze stopy osiągają wartości 60 razy większe, rzędu  $3000 \cdot 10^{-6}$ . Przełom został osiągnięty w 1963 roku, gdy A. E. Clark zastosował pierwiastki ziem rzadkich takie jak Tb i Dy w stopach. Zapoczątkowało to nową grupę materiałów o gigantycznej magnetostrykcji, wykazywaną przez materiały rzędu  $10\,000 \cdot 10^{-6}$ , występowała w temperaturach bliskich zero bezwzględnemu. Modyfikacja składu chemicznego pozwoliła przesunąć punkt Curie do obszaru temperatur pokojowych. W odróżnieniu od materiałów konwencjonalnych również ich czas odpowiedzi na sygnał magnetyczny jest dość krótki, rzędu  $1 \cdot 10^{-6}$  sekundy. Na rysunku 8 pokazana jest struktura stopu  $\text{Fe}_{67,5}\text{Tb}_{9,6}\text{Dy}_{22,9}$ , a rysunku 9 GMM jako czujnik pola magnetycznego [7÷10].



Rys. 8. Struktura stopu  $\text{Fe}_{67.5}\text{Tb}_{9.6}\text{Dy}_{22.9}$  [8]



Rys. 9. GMM jako czujnik [8]

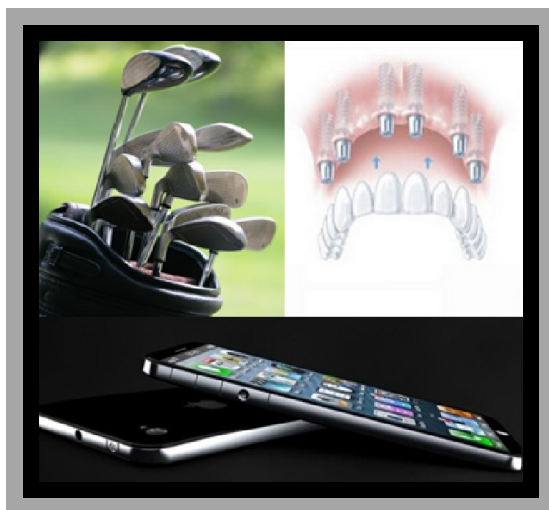
## 1.2. Właściwości stopów amorficznych

W wielu uznanych periodykach możemy znaleźć informację dotyczącą właściwości magnetycznych stopów amorficznych, naukowcy z całego świata bardzo chętnie zajmują się tą tematyką. Do najpopularniejszych można zaliczyć Inoue i jego zespół [15÷17]. Z porównania niektórych właściwości szkieł metalicznych oraz tradycyjnych stopów metali wynika, iż szkła metaliczne stanowią bardzo perspektywiczną grupę materiałów inżynierskich. Jest to spowodowana zarówno bardzo dobrymi właściwościami magnetycznymi jak i wytrzymałościowymi [15÷17]. Brak mechanizmów dyslokacyjnych ułatwiających odkształcanie plastyczne powoduje, że szkła metaliczne są materiałami o stosunkowo wysokiej wytrzymałości. Stopy amorficzne cieszą się sporym zainteresowaniem jako materiał wykorzystywany na rdzenie transformatorów.

Cienkie taśmy materiałów szklistych są odlewane za pomocą metody melt-spinning (czyli odlewanie stopu na wirujący miedziany bęben chłodzony cieczą, które daje możliwość chłodzenia z prędkościami w granicach  $10^4\div 10^6\text{K/s}$ ), a następnie wyżarzane. Przy zastosowaniu takiej obróbki otrzymamy nanokryształy w szklistej osnowie. Najpopularniejszy stop tego typu jest znany pod handlową nazwą FINEMET [10]. Zastosowanie cienkich taśm w urządzeniach pracujących przy wysokiej częstotliwości jest korzystne z powodu redukcji prądów wirowych. W warunkach naprężeń rozciągających, odkształcenie plastyczne cienkich taśm amorficznych wynosi około 2% co znacznie odbiega od stopów krystalicznych. Granica plastyczności szkieł metalicznych zarówno podczas ściskania jak i rozciągania cechuje się stosunkowo wysoką wartością w porównaniu do stopów krystalicznych [10]. Stopy amorficzne podczas procesu odkształcenia wykazują plastyczne płynięcie, przy braku umocnienia odkształceniowego. Stopy amorficzne wykazują tendencję do mięknięcia pod wpływem odkształcenia przez rozciąganie. Lokalizacja plastycznego płynięcia głównie w pasmach ścinania, znacznie ogranicza całkowitą plastyczność, powodując że próbki ze szkieł metalicznych

pękają krucho. Zespół Inouego uzyskał nanokompozyty, które charakteryzują się odkształceniem plastycznym w próbie ściskania na poziomie 2,5% [10,15,16]. Szkła metaliczne mogą być stosowane w miejscach gdzie wymagane jest zgromadzenie dużej energii sprężystej, a to za sprawą takich właściwości jak: duże odkształcenie sprężyste, wysoka granica plastyczności, duża odporność na pękanie.

Z uwagi na powyższe właściwości stopy amorficzne znalazły również zastosowanie w końcówkach kijów golfowych, czy też sprężynach (rys. 10). Obszar zastosowań szkieł metalicznych jest bardzo szeroki z uwagi na połączenie właściwości wytrzymałościowych, sprężystości, twardości i odporności na ścieranie. Stopy amorficzne to nie tylko zabezpieczenia magnetyczne przed kradzieżą, z którymi na co dzień się spotykamy, ale również obudowy telefonów komórkowych, akcesoria sportowe, narzędzia chirurgiczne, jak również implanty, które zastępują kości [7÷12].

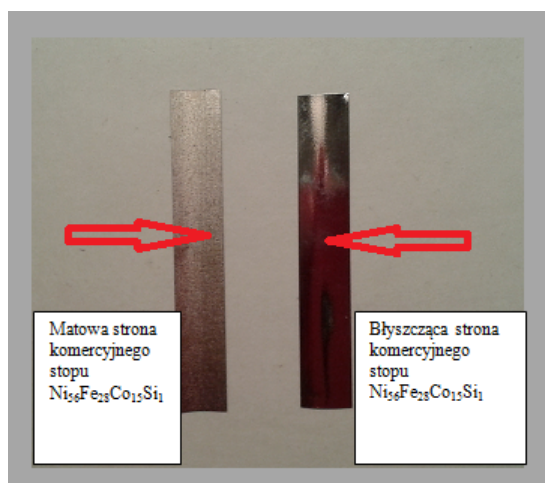


Rys. 10. Przykładowe zastosowania stopów amorficznych [13÷15]

## 2. Materiał i metody

Na rysunku 11 przedstawiono wybrane do analizy próbki badanego stopu z zaznaczoną stroną matową i błyszczącą. Strony analizowanego stopu różnią się od siebie i jest to związane z technologią ich wytwarzania (metoda melt-spinnig). Do badań użyto komercyjnego stopu amorficznego który został pobrany z etykiety sklepowej co przedstawiono na rysunku 12. Wszystkie badania wykonano na błyszczącej stronie analizowanego materiału. W celu ujawnienia struktury amorficznej materiału wykonano analizę rentgenowską na dyfraktometrze rentgenowskim SEIFFERT 3003, (rys. 13). Na mikroskopie skaningowym JOEL JSM – 6610LV z przystawką EDS OXFORD Instruments

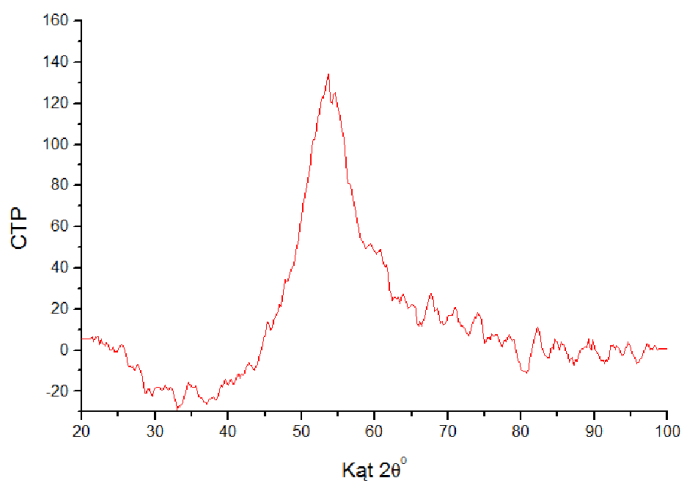
wykonano analizę składu chemicznego badanego stopu w losowo wybranym punkcie na jego powierzchni, wyniki zamieszczono w tab. 1. Na testerze do badań odporności na ścieranie materiałów metodą „ball-on-disc” wykonano test ścieralności z wykorzystaniem kulki cyrkonowej (jako przeciwpróbka), zastosowano kulkę  $\varnothing 20\text{mm}$ . Badania prowadzono w oparciu o metodykę opisaną w pracy [19]. Ze względu na stosunkowo małą grubość badanej próbki (grubość 1mm) oraz jej niską sztywność, w celu wykonania badań ścieralności przymocowano badany stop do metalowej podstawy usztywniającej. Czas wykonania testu wynosił 1 godzinę. Powierzchnię z zaznaczonym wytarciem na stronie błyszczącej, przedstawiono na rysunku 14. Na mikrotwardościomierzu FUTURE-TECH wykonano pomiar mikrotwardości metodą Vickersa dla obciążenia 0,4903N, i czasu działania obciążenia 6s. Pomiarzy wykonano na stronie błyszczącej, wyniki zestawiono w tabeli 2.



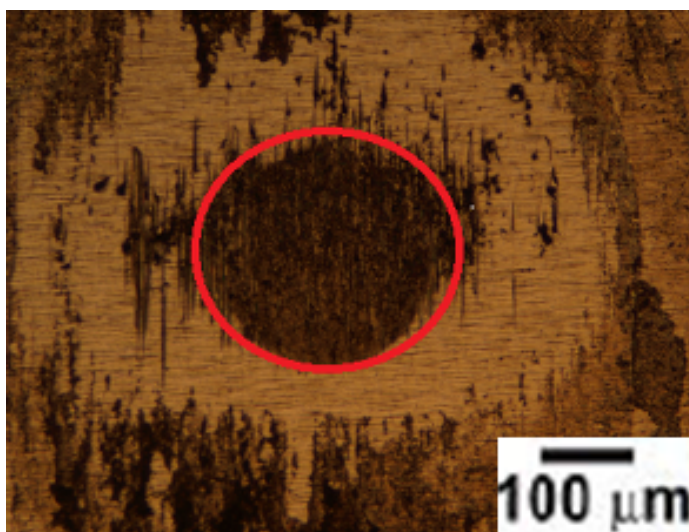
Rys. 11. Próbką użytą do badań z zaznaczoną matową i błyszczącą stroną.  
Wymiary próbki to 5mm x 35mm, grubość 1mm



Rys. 12. Badany stop w postaci etykiety, przedstawiono zawartość środka oraz wygląd zewnętrzny zabezpieczenia z którego pobrano próbkę do badań



Rys. 13. Dyfraktogram rentgenowski badanego stopu



Rys. 14. Przykładowy ślad zużycia ściernego błyszczącej powierzchni próbki z zaznaczonym wytarciem, czas procesu ściernia 1h

Tabela 1. Skład chemiczny badanego stopu otrzymany z analizy EDS

| Skład chemiczny analizowanego stopu [% wag.] |      |       |      |
|----------------------------------------------|------|-------|------|
| Ni                                           | Fe   | Co    | Si   |
| 56,55                                        | 28,4 | 14,24 | O,82 |

Tabela 2. Pomiary mikrotwardości metodą Vickersa HV0,5 dla strony błyszczącej

| Twardość HV 0,5 |         |      |         |                        |                  |
|-----------------|---------|------|---------|------------------------|------------------|
| L.p.            | Wartość | L.p. | Wartość | Odchylenie standardowe | Średnia twardość |
| 1               | 464,1   | 6    | 406,6   | 38,9                   | 419,1            |
| 2               | 460,2   | 7    | 438,9   |                        |                  |
| 3               | 440,5   | 8    | 402,4   |                        |                  |
| 4               | 443,7   | 9    | 407,5   |                        |                  |
| 5               | 393,3   | 10   | 333,9   |                        |                  |

## 2.1. Analiza wyników

Kluczowe znaczenie przy formowaniu struktury amorficznej stopów ma skład chemiczny. Na podstawie analizy rysunku 13, można stwierdzić obecność fazy amorficznej bogatej w nikiel oraz innych nie zidentyfikowanych faz krystalicznych. Na podstawie porównania wyników badań (tab. 1) z danymi literaturowymi określono gatunek badanego stopu jako  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$ .

W badaniach odporności na ścieranie stwierdzono równomierne wycieranie się powierzchni stopu (rys. 14). Po godzinie badań odnotowano wyraźne przetarcie do materiału bazowego, na którym została umieszczona próbka.

Porównując morfologię otrzymanego śladu ścierania badanego stopu  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$  z wytarciem uzyskanym dla stopu  $\text{Fe}_{73}\text{Co}_5\text{Y}_3\text{B}_{19}$  w pracy [18] stwierdzono iż wyższą odpornością tribologiczną cechują się stopy na bazie żelaza niż na bazie niklu. W badaniach tribologicznych stopu amorficznego na bazie żelaza, prowadzonych w tych samych warunkach, odnotowano wyłącznie obecność delikatnego zarysowania [18]. Mniejsza odporność na ścieranie stopu może mieć związek z wyższą sprężystością stopu  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$  od stopu  $\text{Fe}_{73}\text{Co}_5\text{Y}_3\text{B}_{19}$ . Ta cecha materiału nie jest korzystna w przypadku zastosowania stopu na konstrukcje elementów takich jak np. zwoje transformatorów, gdzie podczas nawijania mogą one ulegać przetarciom.

Rozkład mikrotwardości w zakresie od 333,9 do 464,1HV0,5 i średnim poziomie równym 419,1HV0,5. Wyniki pomiarów rozkładu mikrotwardości w porównaniu z wartościami mikrotwardości innych stopów amorficznych są stosunkowo niskie, co może być spowodowane doбором ilościowym poszczególnych pierwiastków w stopie [18,19].

Na podstawie analizy literaturowej oraz przeprowadzonych badań można wnioskować, iż komercyjny stop  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$  nie przedstawia wysokich wartości wybranych właściwości mechanicznych jednakże może być stosowany jako element etykiet zabezpieczających.



### 3. Wnioski

Potwierdzono, iż materiał z którego wykonano taśmę to stop amorficzny gat.  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$ . Wyniki pomiarów mikrotwardości w porównaniu z innymi stopami amorficznymi są stosunkowo niskie, co może być spowodowane doбором ilościowym poszczególnych pierwiastków [18,19]. Wstępna analiza właściwości wytrzymałościowych wykazała, że badany stop  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$  ma słabe właściwości tribologiczne i jest mało odporny na ścieranie w stosunku do stopu amorficznego na bazie żelaza [18].

Stop amorficzny  $\text{Ni}_{56}\text{Fe}_{28}\text{Co}_{15}\text{Si}_1$  ze względu na właściwości magnetyczne, może być stosowany m.in. na elementy zabezpieczeń antykradzieżowych.

### Literatura

1. <http://www.inter-trade.net.pl/>
2. <http://www.bak-s.pl/klipsy-i-etykiety>
3. <http://www.anykradziezowe-bramki.pl>
4. <http://www.checkpointssystem.com.pl>
5. <http://www.eassysytem.eu/info>
6. <http://www.bramki.ipr.pl/etykiety>.
7. Markowski G., Czujniki magnetyczne ze stopów amorficznych. Budowa i przykładowe zastosowania, II Konferencja Naukowo Techniczna Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektrotechnice 1997, str. 179-185.
8. <http://www.matint.pl>
9. Misiak D., Szczygłowski J., Zastosowanie materiałów amorficznych w czujnikach I/U", II Konferencja Naukowo Techniczna Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektrotechnice 1997, str. 175-177.
10. Ziewiec K., Szkła metaliczne otrzymywanie z jednorodnej fazy ciekłej oraz z zakresu niemieszalności cieczy. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego Kraków 2011.
11. Du S.W., Ramanujan R.V., Crystallization and magnetic properties of  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{B}_{18}\text{Mo}_4$  amorphous alloy, *Journal of Non-Crystalline Solids* 351 (2005) 3105–3113.
12. S.W. Du, R.V. Ramanujan, „Mechanical alloying of Fe–Ni based nanostructured magnetic materials”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 292 (2005) 286–298.
13. <http://luxluxlux.pl/2011/09/18/magia-golfa-czyli-gra-wszechczasow>
14. <http://www.strefamobile.pl/aktualnosci/1977/iphone-6-z-obudowa-liquidmetal>
15. Yamaura S., Inoue A., Effect of surface coating element on hydrogen permeability of melt-spun  $\text{Ni}_{40}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_5\text{Zr}_{30}\text{Co}_5$  amorphous alloy, *Journal of Membrane Science*, 349 (2010) 138–144.
16. Takeuchi A., Inoue A., Size dependence of soft to hard magnetic transition in (Nd, Pr)–Fe–Al bulk amorphous alloys, *Materials Science and Engineering A*, 375–377, (2004) 1140–1144.
17. Matsuura M., Fukuhara M., Konno K., Fujita T., Chen M.W., Fujima N., Inoue A., Distorted icosahedral  $\text{Ni}_5\text{Nb}_3\text{Zr}_5$  clusters in the as-quenched and hydrogenated

- amorphous (Ni<sub>0.6</sub>Nb<sub>0.4</sub>)<sub>0.65</sub>Zr<sub>0.35</sub> alloys, Journal of Non-Crystalline Solids 357 (2011) 3357–3360.
18. Zdrodowska K., Kwarciać P., Jędryka J., Szota M., Nabiałek M., Thin-layered amorphous Fe<sub>73</sub>Co<sub>5</sub>Y<sub>3</sub>B<sub>19</sub> strips produced by the melt-spinning method, Inżynieria Materiałowa, nr 4, s. 401-404, 2013.
  19. Bukowska A., Pierusiewicz P., Zdrodowska K., Szota M., The Surface Structural and Mechanical Properties of the Amorphous Co<sub>22</sub>Y<sub>54</sub>Al<sub>24</sub> ribbon, Advances in Science and Technology Research Journal Vol.7 nr 9, 2013.

## **CHARAKTERYSTYKA ZABEZPIECZEŃ MAGNETYCZNYCH NA PRZYKŁADZIE WYBRANEGO STOPU AMORFICZNEGO**

### **Streszczenie**

Zabezpieczenia magnetyczne to jeden ze sposobów ochrony towarów przed kradzieżą. Już dziś na rynku funkcjonuje cała gama tego typu produktów, których zadaniem jest utrudnić złodziejowi wyniesienie cennych przedmiotów ze sklepu. W wielu uznanych czasopismach naukowych można znaleźć liczne badania, które dotyczą własności magnetycznych stopów amorficznych, jest to spowodowane ich późniejszym zastosowaniem. W pracy wykonano badania takie jak test ścieralności czy mikrotwardość w celu charakterystyki wytrzymałościowej stopu komercyjnego Ni<sub>56</sub>Fe<sub>28</sub>Co<sub>15</sub>Si<sub>1</sub>.

**Słowa kluczowe:** Zabezpieczenia sklepowe, etykiety, stopy amorficzne

## **CHARACTERISTICS OF MAGNETIC LABELS ON EXAMPLE OF SELECTED AMORPHOUS ALLOY**

### **Abstract**

Magnetic security is one way of securing goods in a shop. Today may encounter with the entire range of products, which have a task hinder the thief stealing valuables. In many recognized scientific journals, we can find numerous studies that relate to the magnetic properties of amorphous alloys is due to their subsequent use. The work performed tests such as abrasion or micro-hardness test for the strength characteristics of the alloy commercial Ni<sub>56</sub>Fe<sub>28</sub>Co<sub>15</sub>Si<sub>1</sub>.

**Keywords:** Check point, labels, amorphous alloys

## **Badania eksploatacyjne pojazdu jednośladowego z napędem elektrycznym**

### **1. Wstęp**

Wzrost zainteresowania problemami ekologicznymi wynikającymi z eksploatacji znacznej ilości środków transportu, zainicjował poszukiwania pojazdów niezanieczyszczających środowisko naturalne. Rozwiązaniem szczególnie korzystnym w aspekcie ekonomicznym jest użytkowanie pojazdu jednośladowego z napędem elektrycznym.

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele gotowych modeli tego typu pojazdu. Jednak warto zwrócić uwagę na możliwość modyfikacji eksploatowanego pojazdu jednośladowego i przystosowanie go do zamontowania elektrycznego układu napędowego dostosowanego do potrzeb użytkownika. W celu określenia podstawowych parametrów pracy silnika elektrycznego zamontowanego w pojeździe jednośladowym przeprowadzono badania drogowe dla założonych warunków ruchu [1,2].

### **2. Opis obiektu badań**

Do przeprowadzenia badań użyto roweru z silnikiem elektrycznym trójfazowym synchronicznym, umieszczonym w piaście przedniego koła.

Obiekt został zbudowany własnoręcznie, a użyto do tego celu: ramy roweru typu damka – wyposażonej w koła 26 calowe oraz kompletnego silnika wraz z wyposażeniem, przeznaczonego do tego typu pojazdów. Dodatkowym elementem wyposażenia, był rowerowy czujnik prędkości. Badany pojazd składał się z poszczególnych elementów przedstawionych na rysunku 1.

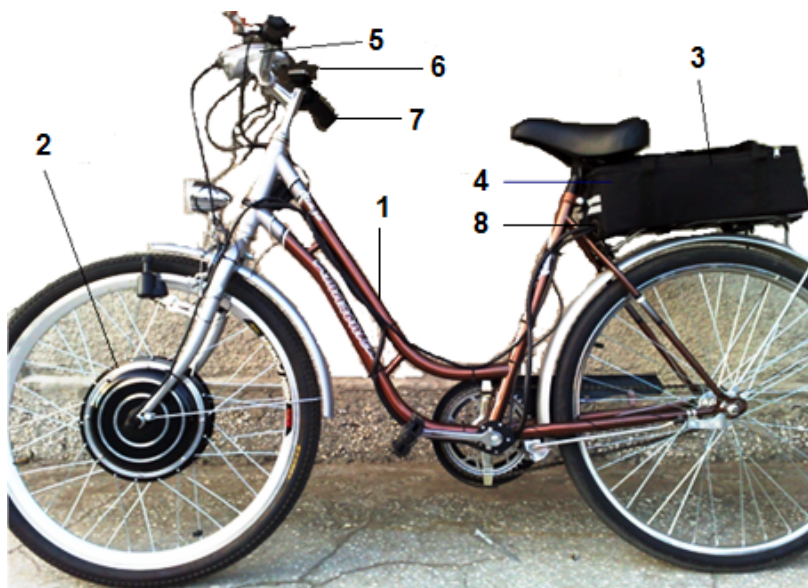
Elementy zamontowane w celu wykonania pomiarów to: rowerowy czujnik prędkości, przetwornik USB 6009, indukcyjny czujnik prędkości, liniowy czujnik prędkości, bocznik prądowy oraz dzielnik napięcia.

Pojazd został wyposażony w dwa rodzaje czujników prędkości. Jako pierwszy wzornik prędkości posłużyła prądniczka tachometryczna, której wartość wytwarzanego napięcia wzrastała proporcjonalnie do prędkości badanego obiektu. W celu eliminacji zakłóceń i ułatwienia porównywania wartości napięcia zastosowano mostek prostowniczy, wraz z kondensatorem

---

<sup>1</sup> Email: e.siemionek@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów Samochodowych

elektrolitycznym o pojemności  $2200\mu\text{F}$ . Pomiar prędkości drugim sposobem polegał na zamontowaniu czujnika indukcyjnego oraz magnesu trwałego do obręczy koła napędowego. W momencie kiedy magnes przemieszczał się w niewielkiej odległości od czujnika wytwarzany był impuls napięciowy. W czasie pomiaru ze względu na brak możliwości odczytywania na bieżąco przez użytkownika wartości prędkości ustalonej, zamocowano rowerowy czujnik prędkości, którego wskazania nie były brane pod uwagę do obliczeń.



Rys. 1. Widok jednośladowego pojazdu z elektrycznym układem napędowym 1 – rama roweru, 2 – silnik trójfazowy synchroniczny o magnesach trwałych 500W/36V, 3 – akumulatory 3 sztuki po 12V i 4,5 Ah połączone szeregowo, 4 – sterownik silnika wraz regulatorem prędkości, 5 – wskaźnik poziomu naładowania baterii, 6 – przełączniki pozwalające na przejście ze stanu napędu w stan odzysku energii, 7 – regulator prędkości, 8 – wyłącznik główny wraz z bezpiecznikiem [opracowanie własne]

### 3. Metodyka przeprowadzenia eksperymentów

Mierzone parametry miały na celu określenie sprawności układu oraz kosztów jego eksploatacji. Wielkościami mierzonymi były:

- napięcie na akumulatorach,
- wartość natężenia prądu pobierana z akumulatorów przez silnik elektryczny oraz układ sterujący,
- wartość prędkości średniej pojazdu (prędkość mierzona przy użyciu prędkościomierza tachometrycznej),
- wartość prędkości chwilowej mierzonej z wykorzystaniem czujnika indukcyjnego.

W celu dokładnego sprawdzenia zachowania się pojazdu w różnych warunkach eksploatacyjnych badania przeprowadzono na trzech rodzajach nawierzchni:

- asfalcie,
- kostce brukowej (droga utwardzona),
- drodze nie utwardzonej.

Powierzchnie te zostały wybrane ponieważ są to najczęstsze powierzchnie po jakich poruszają się pojazdy tego typu. Pojazd był badany na drogach o różnym nachyleniu:

- podczas podjazdu na wzniesienia o nachyleniu: 4%, 8%, 12%,
- na drodze o nawierzchni poziomej,
- podczas zjazdu z trzech rodzajów wzniesień o nachyleniu : 4%, 8%, 12%.

Na każdej powierzchni i na każdym rodzaju nachylenia drogi pomiar był przeprowadzony dla trzech wartości prędkości : 10km/h, 15km/h oraz prędkości maksymalnej. Dobór obciążenia zależny był od masy kierowców i wynosił: 60kg, 75kg, 85kg. Aby pomiar był obciążony możliwie jak najmniejszym błędem każde badanie było przeprowadzone na odcinku drogi nie mniejszym niż 500m, a akumulatory były w pełni naładowane. Wszystkie mierzone wielkości były rejestrowane co 0,01 sekundy. Ze względu na niedogodne warunki pracy silnika, przy prędkościach rozruchowych pojazd był wprowadzany w ruch mechanicznie do momentu uzyskania zadanej prędkości, a następnie był przełączany na napęd elektryczny. W celu uzyskania stałego współczynnika oporu powietrza oraz mając na uwadze wydajność akumulatorów, pomiary przeprowadzono przy możliwie bezwietrznej słonecznej pogodzie, przy jednakowej temperaturze 15 °C.

Prąd pobierany przez silnik był mierzony z wykorzystaniem bocznika prądowego umieszczonego pomiędzy sterownikiem a ogniwami zasilającymi. Założone było, że silnik wraz ze sterownikiem stanowi układ napędowy.

Wszystkie sygnały były rejestrowane z częstotliwością próbkowania 0,01sekundy przy użyciu przetwornika USB-6009 oraz komputera umocowanego przy kierownicy. Wartość próbkowania została ustalona doświadczalnie. Mniejsza częstotliwość uniemożliwiała dokładne zliczanie prędkości, natomiast większa powodowała nadmiar zbytecznych wyników co uniemożliwiała ich przetworzenie i zapis. Pomiary odbywały się na odcinkach drogi o możliwie jednakowym nachyleniu i rodzaju nawierzchni oraz przy jednakowych warunkach pogodowych. Każdy pomiar był wykonany na możliwie długim odcinku drogi, z jednakową prędkością, aby wyeliminować wpływ intensywności przyspieszania na pobieraną energię.

W każdym z przeprowadzonych badań, uzyskano cztery sygnały świadczące o parametrach pracy napędu badanego obiektu. Wyjściowe sygnały były dostarczane do komputera poprzez przetwornik przez cztery kanały analogowe.

Do pierwszego kanału przetwornika doprowadzono sygnał napięcia akumulatorów. Wartość siły elektromotorycznej wytworzonej przez akumulatory ze względu na zakres pomiarowy przetwornika zmniejszono poprzez dzielnik napięcia. Wartość rzeczywistego napięcia, przy założeniu, że wszystkie oporniki dzielnika posiadały jednakowy opór ( $\pm 5\%$ ) była równa iloczynowi zmierzonego napięcia i liczby oporników. Rezystancja oporników została tak dobrana aby zminimalizować pobór prądu przez dzielnik i przetwornik (wytwarzane ciepło było możliwe do odprowadzenia) [3,4].

Do drugiego kanału podłączono przewód sygnałowy czujnika indukcyjnego zamocowanego na widelcu. Na obręczy koła roweru przyklejono magnes trwały. Podczas obrotu koła gdy magnes znajdował się w pobliżu czujnika wytwarzany był impuls napięciowy o wartości nie przekraczającej 6 woltów. Określenie czasu pomiędzy poszczególnymi pikami oraz wyznaczenie promienia tocznego koła umożliwiło obliczenie prędkości. W pierwszej kolejności obliczenia polegały na ustaleniu minimalnej wartości mierzonego sygnału. Po utworzeniu charakterystyki czasowej sygnału czujnika indukcyjnego określano minimalne wartości pików napięciowych zawierających się w zakresie od 0,8 V do 2V. Wartości te wzrastały proporcjonalnie do prędkości badanego pojazdu. Po określeniu minimalnej wartości napięcia z uzyskanego sygnału stworzono funkcję logiczną, w której występowanie pików określono wartością równą 1, a czas w którym ten sygnał nie występował wartością równą 0. Dzięki czemu uzyskano sygnał 0 lub 1. Uzyskano to poprzez zastosowanie równania logicznego „jeżeli” badana wartość jest mniejsza niż minimalna wartość pików wtedy wynik jest równy „0” natomiast w sytuacji gdy jest większa od minimalnej wartości pików napięciowych: wynik jest równy „1”. Następną kolumnę dla ułatwienia obliczeń zanegowano. Kolejnym etapem było zliczenie czasu występowania wartości „1”.

Kolejnym etapem w obliczeniach było wyodrębnienie uzyskanego czasu zliczania. Polegało to na zastosowaniu funkcji iloczynu wartości uzyskanej z czasu zliczania i wartości z sygnału 0 lub 1. Następnie wyodrębnione wartości zostały powielone, żeby różnica czasu występowania pików była taka sama, aż do momentu wystąpienia następnego pików. Ostatni etap polegał na przeliczeniu uzyskanej częstotliwości występowania pików na prędkość.

Do trzeciego kanału został podłączony sygnał wychodzący z bocznika prądowego. Na boczniku mierzona była wartość napięcia która pomnożona przez przełożenie dawała wartość natężenia prądu jaki przepływał przez bocznik. Bocznik posiadał przełożenie 1 do 100, co oznaczało że jednemu amperowi odpowiadała wartość napięcia równa 100mV. Napięcie odkładające się na boczniku nie przekraczało 0,4V.

Do czwartego kanału został podłączony sygnał wyjściowy z prądniczki tachometrycznej której wirnik toczył się po oponie napędzanego koła. Zastosowanie tego sygnału miało umożliwić średni pomiar prędkości. Wraz ze wzrostem prędkości miała wzrastać liniowo wartość napięcia uzyskiwanego

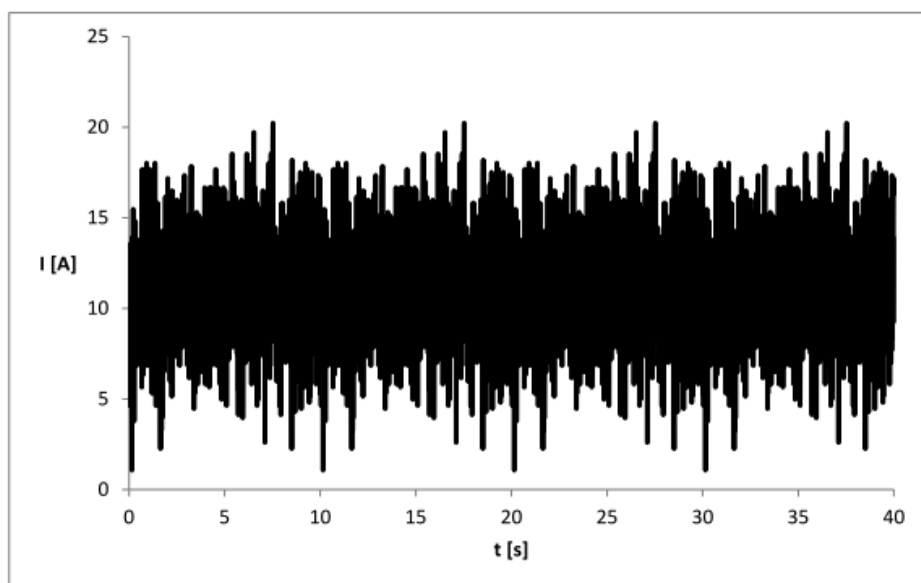
z prądniczki, ze względu jednak na nadmierną ilość zakłóceń jakie powodował ten sygnał napięcie zostało wyprostowane przez mostek prostowniczy, a następnie wystabilizowane przez kondensator  $2200\mu\text{F}$ . Sygnał został podłączony do masy przez opornik  $220\Omega$ . W celu stopniowego rozładowania kondensatora. Zastosowanie tego rozwiązania znacznie wyeliminowało zakłócenia i ich wpływ na pomiary [5,6].

Mając wartości napięcia prądu i prędkości możliwe było wykonanie niezbędnych obliczeń, w celu określenia parametrów charakteryzujących badany obiekt.

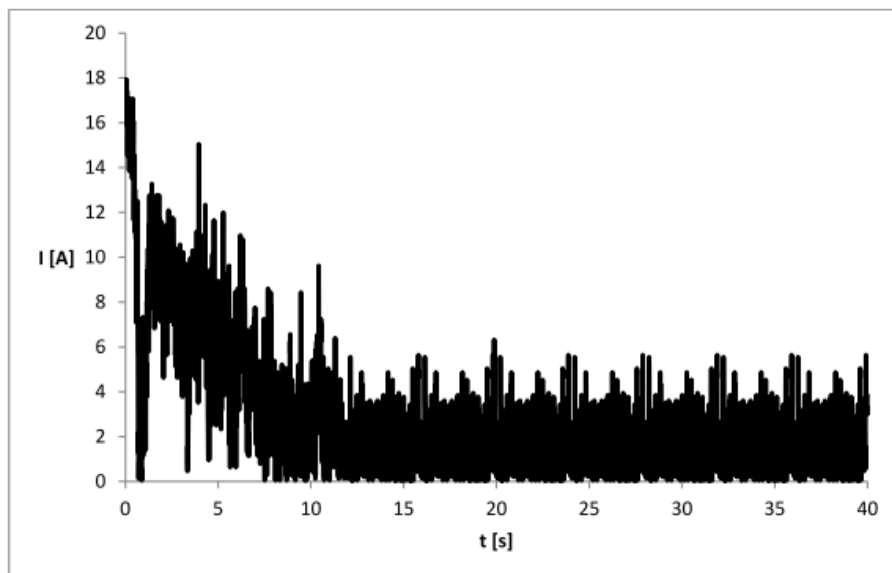
Najważniejszą wielkością charakterystyczną była moc pobierana przez silnik wraz ze sterownikiem, była ona obliczona przez iloczyn wartości natężenia prądu i napięcia. Moc pomnożona przez czas jaki był niezbędny do pokonania trasy pozwalała na wyliczenie wartości energii niezbędnej do pokonania danej trasy przy stałych warunkach eksploatacji.

#### **4. Wyniki z przeprowadzonych badań**

Na rysunkach 2 i 3 zostały przedstawione wykresy poboru prądu w czasie przykładowych pomiarów. Pobór prądu jest najistotniejszym wynikiem uzyskanym w czasie badań, to jego wartość najbardziej wpływa na pobór energii w czasie pokonywania oporów.



Rys. 2. Charakterystyka czasowa poboru prądu przy prędkości 20 km/h na wzniesieniu o nachyleniu 4% , dla obciążenia 85 kg [5]



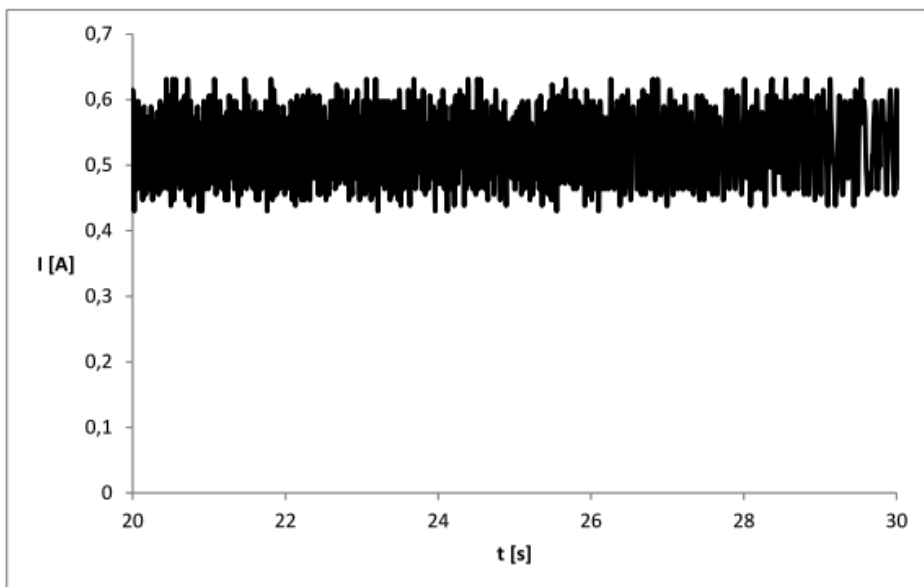
Rys. 3. Charakterystyka czasowa poboru prądu przy prędkości 10 km/h na drodze poziomej, dla obciążenia 85 kg [5]

Z przedstawionych wykresów można zauważyć, że wartość pobieranego prądu, po ustabilizowaniu warunków początkowych zawiera się w stałym przedziale. Największy pobór występuje w momencie przyspieszania, jest to widoczne na rys. 3 w czasie od 0 do 5 sekundy. Prąd ten jest zużywany na nadanie pędu pojazdowi oraz pokonanie oporów podczas ruchu, a jego wartość zależy w dużej mierze od intensywności przyspieszania. Ze względu na brak możliwości jednoznacznego określenia warunków (intensywności) przyspieszania pomiary były przeprowadzane przy stałych wartościach prędkości. Wykresy na rysunkach 2 i 3 różnią się przede wszystkim wartościami pobieranego prądu, im większa wartość oporów jakie musi pokonać silnik tym większa wartość pobieranego prądu.

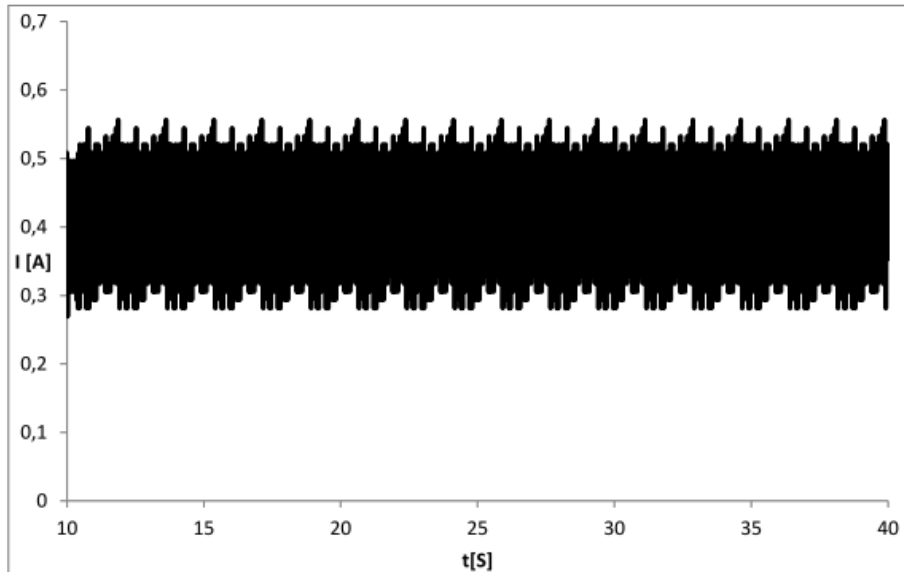
Na rysunkach 4 i 5 została przedstawiona zależność prądu od czasu. W tym wypadku prąd był wytwarzany przez silnik czyli wystąpiła rekuperacja energii. Wartość odzysku energii była niewielka, i zależała od wartości prędkości z jaką toczył się badany pojazd.

Silnik przechodzi w stan odzyskiwania energii w momencie kiedy prędkość zadana przez użytkownika jest mniejsza od prędkości pojazdu podczas ruchu. Niewielki odzysk energii jest spowodowany tym, że w czasie odzysku energii silnik stawia niewielkie opory. Stanowi to kompromis pomiędzy ilością odzyskiwanej energii, a dodatkową siłą przeciwdziałającą poruszaniu się pojazdu. Należy wspomnieć, że wartość odzyskiwanego prądu oraz siły potrzebnej do jego wytworzenia w dużej mierze zależy od stopnia rozładowania akumulatorów.



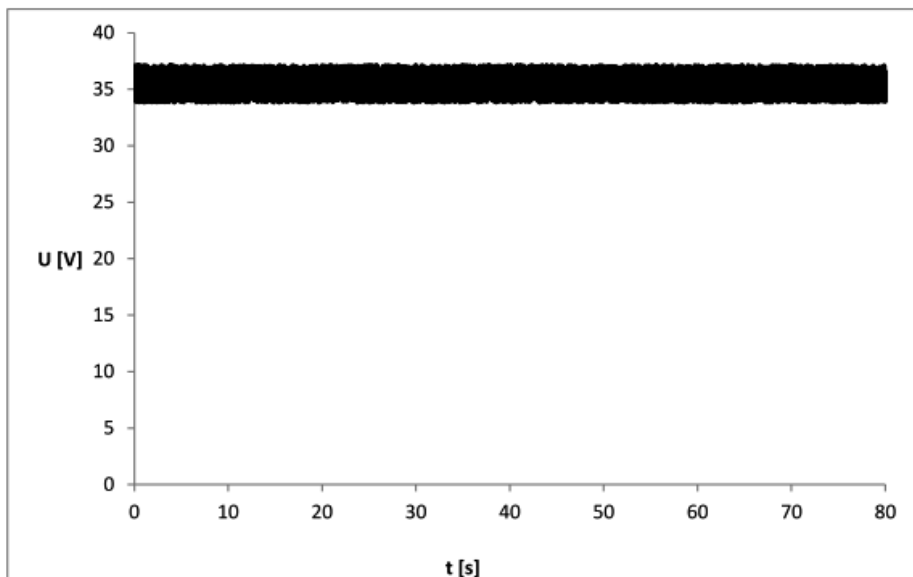


Rys. 4. Charakterystyka czasowa wartości natężenia prądu podczas zjazdu ze wzniesienia o nachyleniu 8 %, przy prędkości 20 km/h, dla obciążenia 75 kg [5]

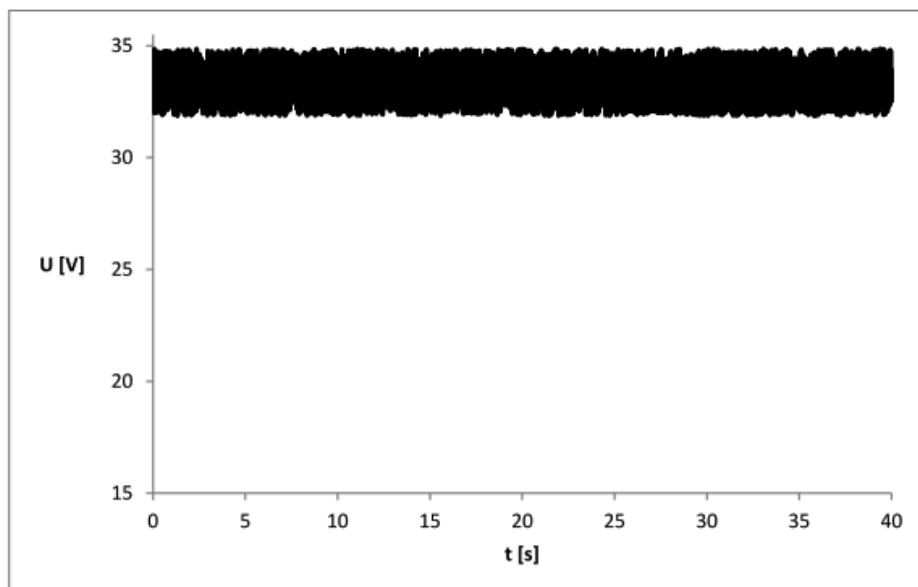


Rys. 5. Charakterystyka czasowa wartości natężenia prądu podczas zjazdu ze wzniesienia nachyleniu 8 %, przy prędkości 15 km/h, dla obciążenia 75 kg [5]

Na wykresach 6 i 7 przedstawiono przebiegi czasowe wartości napięcia akumulatorów będących pod obciążeniem w czasie ruchu pojazdu.

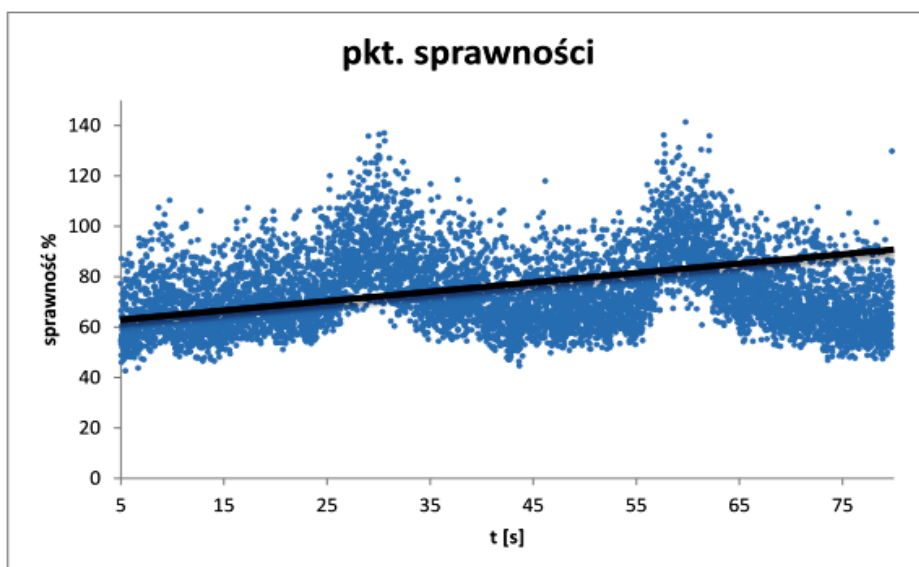


Rys. 6. Wartości napięcia akumulatorów zarejestrowane na drodze poziomej brukowanej, przy prędkości 15 km/h i obciążenia 85 kg [5]



Rys. 7. Wartości napięcia akumulatorów zarejestrowane na drodze asfaltowej, podczas podjazdu na wzniesienie o nachyleniu 8% , przy prędkości 20 km/h , dla obciążenia 75 kg [5]

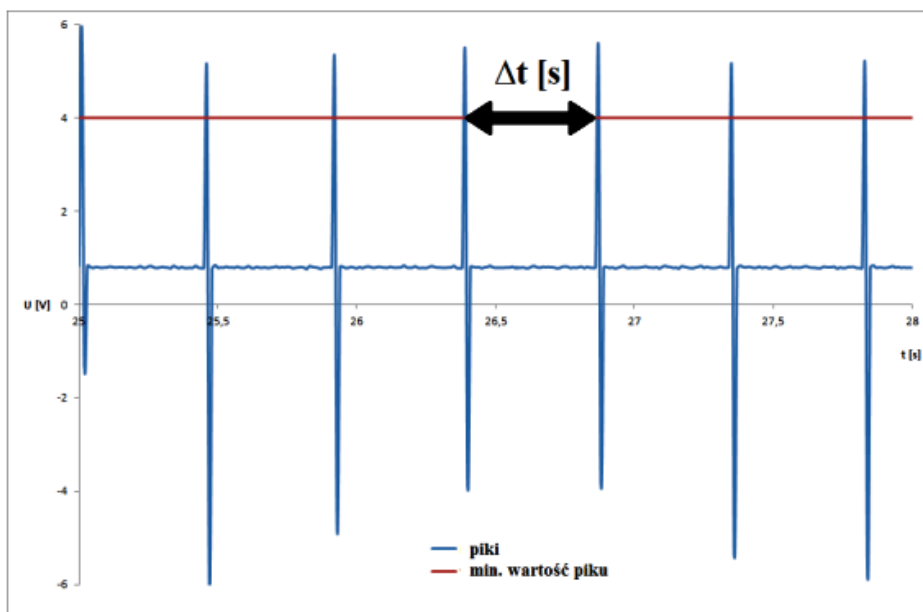
Jak widać z zamieszczonych przebiegów czasowych wartość napięcia nie ulega znaczącym zmianom, jego wartość oscyluje w granicach 36V i zmienia się pod wpływem większego poboru prądu przez silnik. Wartość napięcia informuje nas o stanie naładowania akumulatorów. Ze względu, na to że badany był pojazd, a nie jego źródło zasilania dążono do tego aby akumulatory jak najbardziej były zbliżone do idealnego źródła zasilania. Dlatego przed badaniami maksymalnie je naładowano, aby wykluczyć negatywny wpływ na pracę silnika. Wykres z rysunku 8 przedstawia przewidywaną sprawność obliczoną na podstawie pobieranej mocy oraz minimalnej, potrzebnej do pokonania oporów.



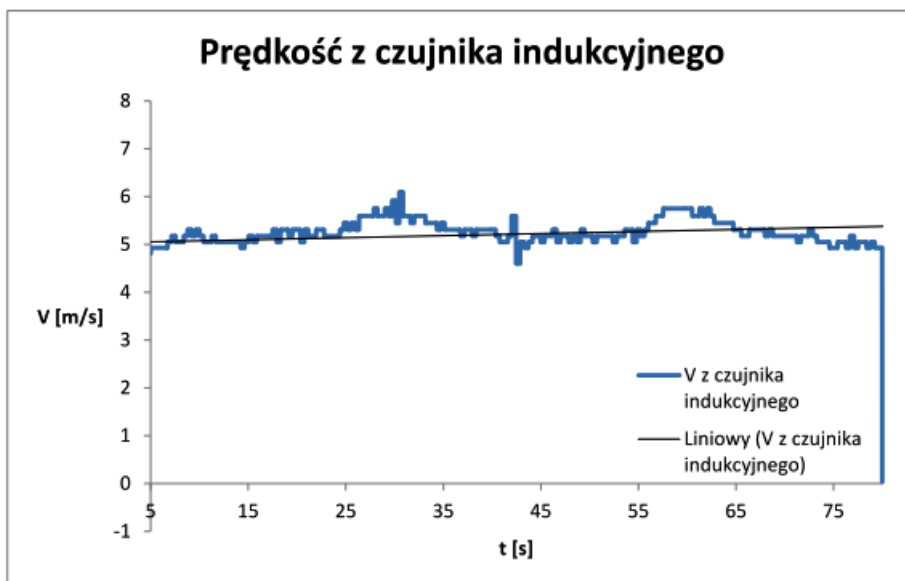
Rys. 8. Sprawność obliczona na podstawie pomiarów na drodze poziomej, asfaltowej, przy prędkości 22 km/h, dla obciążenia 75 kg [5]

Sygnał pochodzący z czujnika indukcyjnego, na podstawie którego obliczana jest prędkość poruszającego się pojazdu przedstawiono na rysunku 9. Strzałką został zaznaczony okres czasu umożliwiający określenie wartości prędkości. Czerwonym kolorem została zaznaczona linia powyżej której wartość pików była uznawana za sygnał pożądaný, a wartość poniżej jako zakłócenie. Warto zwrócić uwagę na nierównomierne wartości występowania pików przy niewielkich odchyleniach prędkości. Częstotliwość ich występowania była zgodna z założoną prędkością poruszającego się pojazdu [7,8,9].

Na rysunku 10 została przedstawiona prędkość obliczona na podstawie sygnału z czujnika indukcyjnego. Prędkość ta charakteryzuje się niewielką niepewnością pomiarową i obliczeniową. Jest to chwilowa wartość, na którą w znacznym stopniu wpływa nierówność terenu i szereg innych czynników, których nie sposób wyeliminować.



Rys. 9. Przebieg sygnału z czujnika indukcyjnego podczas pokonywania wzniesienia o nachyleniu 8% z prędkością 15 km/h, dla obciążenia 85 kg [5]

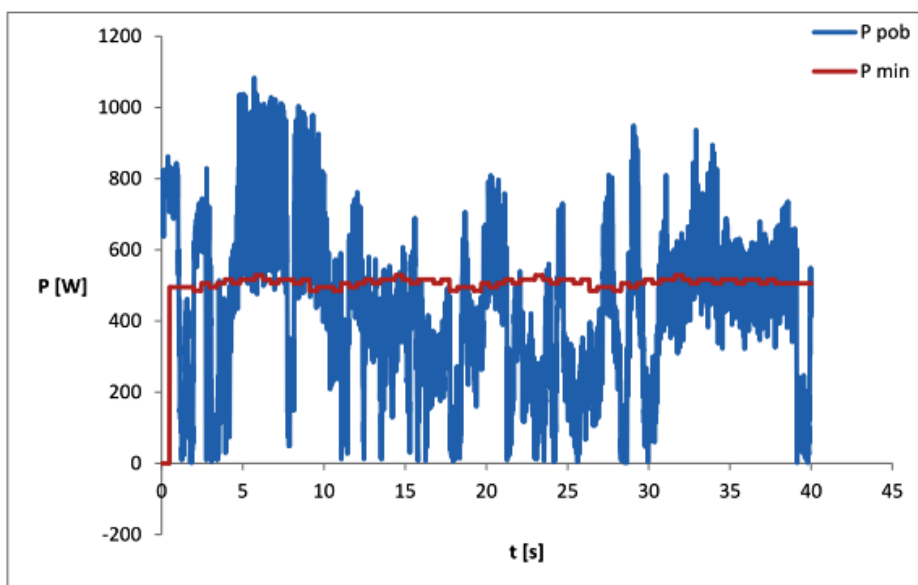


Rys. 10. Wykres obliczonej prędkości z sygnału czujnika indukcyjnego, podczas jazdy z prędkością 17 km/h, na drodze poziomej brukowanej, dla obciążenia 75 kg [5]

Wartość mocy pobieranej przez silnik i wartość minimalnej mocy potrzebnej do pokonania oporów przeciwdziałających poruszającemu się pojazdowi pokazuje rysunek 11. Charakterystyki te informują o sprawności układu napędowego.

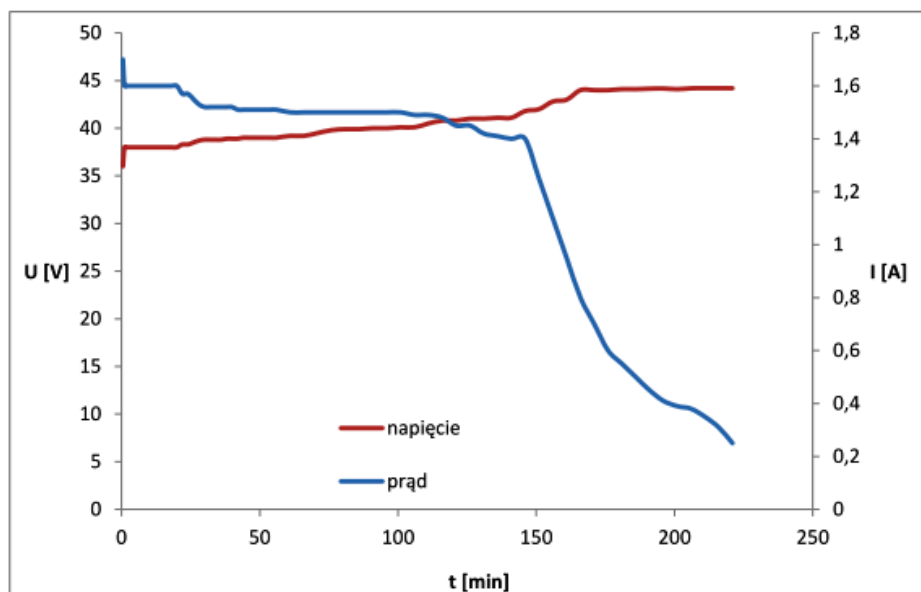
Mimo znacznych zakłóceń widoczna jest bardzo duża sprawność pojazdu, czyli wartość mocy pobieranej przez pojazd jest niewiele większa od minimalnej mocy potrzebnej do przezwyciężenia działających sił. Należy zwrócić jednak uwagę na fakt, że wartość mocy minimalnej jest tylko teoretyczna, gdyż niemożliwe jest dokładne określenie wartości wszystkich sił oddziałujących na pojazd.

Na kolejnym rysunku 12 przedstawiono wartość prądu i napięcia podczas ładowania akumulatorów. Przy czym skala dla napięcia została umieszczona na lewej osi wykresu a skala poboru prądu na prawej osi.

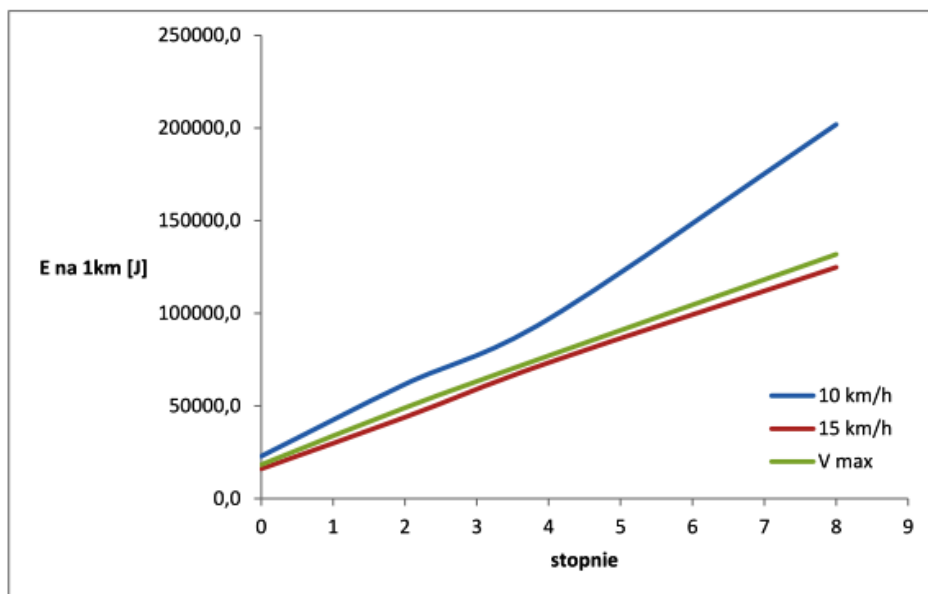


Rys. 11. Charakterystyka mocy pobieranej przez silnik i jej minimalnego zapotrzebowania na pokonanie oporów ruchu podczas wjazdu na wzniesienie o nachyleniu 12% na drodze asfaltowej z prędkością 15 km/h, dla obciążenia 75 kg [5]

Wartość napięcia w procesie ładowania nie ulegała znacznym zmianom. Systematycznie rosła aż do 180 minuty gdzie została uzyskana wartość nominalna napięcia naładowanych akumulatorów. Pełen cykl ładowania akumulatorów trwał od momentu całkowitego rozładowania baterii, gdy pojazd nie był w stanie się samodzielnie poruszać bez obciążenia, do momentu przejścia ładowarki w stan czuwania. Pobór prądu malał proporcjonalnie, do 150 minuty gdzie nastąpił nagły spadek świadczący o tym, że akumulator jest naładowany. Czas pełnego cyklu ładowania trwał ponad cztery godziny.



Rys. 12. Charakterystyka czasowa natężenia prądu i napięcia podczas cyklu ładowania akumulatorów [5]

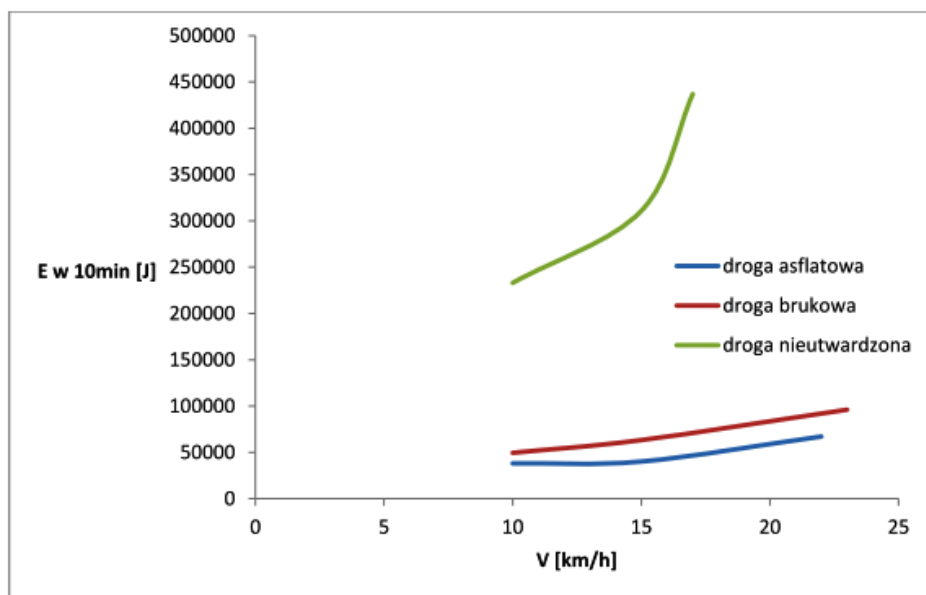


Rys. 13. Wykresy pobieranej energii w funkcji kąta nachylenia wzniesienia dla różnych prędkości

Zależność pobieranej energii od kąta nachylenia wzniesienia przedstawiono na rysunku 13. Czas niezbędny do obliczenia zużywanej energii został obliczony na podstawie, czasu potrzebnego do przejechania odcinka drogi długości 1km, dzięki czemu można zauważyć z jaką prędkością należy pokonywać dane wzniesienie, aby zużycie energii było minimalne.

Przedstawiony wykres informuje nas, o wpływie kąta nachylenia drogi na ilość pobieranej energii. Najbardziej wydajną prędkością do pokonywania wzniesień jest prędkość 15 km/h, przy której silnik pobiera najmniejszą ilość energii.. Największe zużycie energii występowało dla prędkości 10 km/h, gdyż silnik przy niskich obrotach dysponował małym zapasem mocy. Wykresy uzyskano ze średnich wartości zarejestrowanych sygnałów pomiarowych.

Istotną rolę odgrywa dobór nawierzchni, po której porusza się badany pojazd. (rys. 14). Najmniejszy opór toczenia występuje dla nawierzchni asfaltowej, co wiąże się z występowaniem najmniejszego zużycia energii. Uzyskana energia została obliczona dla czasu 10 minut, dla tego samego obciążenia pojazdu  $m=75\text{kg}$  [10-13].



Rys. 14. Wykres przedstawiający zależność pobieranej energii od prędkości pojazdu, dla różnych rodzajów nawierzchni na drodze poziomej i czasie równym 10min [5]

## **5. Podsumowanie i wnioski**

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zmieniając następujące parametry tj. rodzaj nawierzchni, prędkość pojazdu, masę obciążającą pojazd, kąt nachylenia nawierzchni:

1. Silnik zachowuje największą sprawność w zakresie prędkości 14-18 km/h, natomiast najmniejszą przy prędkościach minimalnych, poniżej 10 km/h.

2. Wpływ wartości obciążenia znajdującego się na pojeździe na zarejestrowane sygnały pomiarowe jest stosunkowo niewielki.

3. Najbardziej znaczący dla poboru energii jest rodzaj nawierzchni, po której porusza się badany pojazd.

4. Wyliczona sprawność dla silnika przedstawiona na rysunku 8. potwierdza uzyskanie wartości sprawności około 70%.

5. Rejestrowanie prędkości za pomocą 2 czujników spełniło oczekiwania, jednak dokładność z czujnika indukcyjnego jest dużo większa niż pomiar z wykorzystaniem prądniczki tachometrycznej.

6. Zarejestrowane przebiegi mocy pobieranej przez silnik potwierdzają duże zmiany wartości chwilowych, które mogą wynikać z pracy układu sterującego.

7. Przeprowadzona rejestracja procesu ładowania akumulatorów potwierdza funkcje układu sterującego (przejście w stan czuwania).

8. Na podstawie analizy wykresu przedstawiającego zależność pobieranej energii w zależności od kąta wzniesienia drogi dla różnych prędkości można stwierdzić że jazda z prędkością 15 km/h jest optymalną przy pokonywaniu wzniesienia.

9. W czasie badań potwierdził się wzrost pobieranej energii w zależności od masy obciążającej pojazd i kąta wzniesienia.

10. Zależność pobieranej energii jest uwarunkowana rodzajem podłoża co powoduje nadmierny pobór energii dla drogi nieutwardzonej.

11. Największy odzysk wytwarzanej energii zauważalny jest przy minimalnych prędkościach jazdy.

12. Analizując przewidywany zasięg pojazdu wyposażonego w akumulatory o pojemności 4,5Ah w funkcji kąta nachylenia wzniesienia największy zasięg uzyskano dla poziomej nawierzchni przy prędkości 15km/h. Natomiast biorąc pod uwagę rodzaj nawierzchni stwierdzono, że największy zasięg uzyskano podczas jazdy z prędkością około 16km/h na drodze asfaltowej poziomej.

13. W dalszej części badań należałoby:

- zwrócić szczególną uwagę na pomiar prędkości linowej,
- wyznaczyć wpływ wartości przyspieszenia na energochłonność pojazdu,
- wyznaczyć rozkład napięć na uzwojeniach silnika,
- zmierzyć wartość poboru prądu przez dane uzwojenie,
- zbadać pobór prądu tylko przez sterownik,
- zbadać wpływ ciśnienia w ogumieniu na energochłonność pojazdu,
- zbadać wpływ panujących warunków atmosferycznych na energochłonność.



## **Literatura**

1. Szlachta J.: Niekonwencjonalne źródła energii, Wydawnictwo Akademii Rolniczej Wrocław 1999.
2. Siłka W.: Energochłonność ruchu samochodu. WNT, Warszawa – 1998.
3. Chan K.T.: Modern Electric Vehicle Technology Oxford University London 2001.
4. Eton Power Service manual 2009.
5. Hałka J.: Badanie pojazdu jednośladowego, praca inżynierska, Lublin 2011.
6. Michałowski K., Ocioszyński J.: Pojazdy samochodowe o elektrycznym i hybrydowym WKiŁ Warszawa 1986.
7. Popławski E.: Samochody z napędem elektrycznym WKiŁ Warszawa 2009.
8. Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne WNT 2009.
9. Herner A.: Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych 2004.
10. Dziubiński M.: Elektroniczne układy pojazdów samochodowych. 1999.
11. Dziubiński M., Ocioszyński J.: Elektrotechnika i elektronika samochodowa Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej 1999.
12. Henryk A.: Elektronika w samochodzie: wybrane układy. WKiŁ Warszawa 2001.
13. Sokolik J.: Elektronika samochodowa Wsip Warszawa 1999.

## **BADANIA EKSPLOATACYJNE POJAZDU JEDNOŚLADOWEGO Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono metodę badawczą pojazdu jednośladowego z zamontowanym silnikiem elektrycznym trójfazowym synchronicznym wraz ze sterownikiem. Pomiary przeprowadzono dla określonych warunków eksploatacyjnych uwzględniających: ruch wymuszony dla odcinka drogi poziomej, pokonywanie wzniesienia, zmianę rodzaju nawierzchni drogi oraz obciążenia pojazdu. Rozważono wpływ wybranych parametrów eksploatacyjnych na pracę elektrycznego układu napędowego. Opisano również przykładowe wyniki z przeprowadzonych badań drogowych pojazdu.

**Słowa kluczowe:** jednośladowy pojazd elektryczny, badania eksploatacyjne, elektryczny układ napędowy

## **PERFORMANCE TESTS OF A ONE-TRACK VEHICLE WITH AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM**

### **Abstract :**

The paper describes a research method for testing a one-track vehicle equipped with a three-phase electric synchronous engine, including a controller. The tests were conducted for specified operating conditions involving the following: constrained motion on a horizontal road section, gradient negotiation, changes in road surface type, and vehicle load. The effect of selected operating parameters on the work of the electric drive system was investigated. The paper also gives examples of the results of the conducted road tests of the vehicle

**Keywords:** one-track electric vehicle, performance tests, electric drive system

## Uszkodzenia eksploatacyjne elementów pojazdów

### Wstęp

Elementy pojazdów w przeważającej większości nadal wytwarzane są z metali i ich stopów, które cechuje stosunkowo wysoka wytrzymałość oraz odporność na zużycie w porównaniu do innych tworzyw konstrukcyjnych. Właściwości mechaniczne materiałów metalowych mogą być kształtowane (podwyższane), przez obróbkę cieplną, mechaniczną oraz na etapie wytapiania – przez wprowadzanie odpowiednich dodatków stopowych [1]. Istotnym czynnikiem przy doborze materiału metalowego do danego, określonego, praktycznego zastosowania wydaje się być jego budowa wewnętrzna, czyli struktura [2]. Do oceny struktury metali i ich stopów służą między innymi badania metalograficzne które można podzielić wg Przybyłowicza [3] na:

- Badania makroskopowe – przeprowadza się gołym okiem lub przy niewielkim powiększeniu, do ok. 30 razy,
- Badania mikroskopowe – przeprowadza się przy użyciu różnych mikroskopów metalograficznych, a obserwacjom poddaje się wypolerowane i zwykle wytrawione zgłady. Graniczne możliwe powiększenia nie przekraczają ok. 2500 razy.
- Badania submikroskopowe – przeprowadza się za pomocą mikroskopów elektronowych transmisyjnych (TEM – transmission electron microscope), skaningowych (SEM – scanning electron microscope). Umożliwiają one uzyskanie bardzo dużych powiększeń, rzędu miliona razy przy zachowaniu bardzo dużej głębi ostrości [3,4].

Badania makroskopowe, będące przedmiotem niniejszego rozdziału, służą głównie do oceny jakości materiałów i jako takie są powszechnie stosowane w kontroli jakości gotowych wyrobów lub półfabrykatów. Obserwacji poddaje się naturalne powierzchnie wyrobów, naturalne lub odpowiednio przygotowane przełomy albo powierzchnie wyszlifowane i wytrawione odpowiednimi odczynnikami (zgłady metalograficzne makroskopowe tzw. przekroje). Często badanie makroskopowe jest pierwszym etapem ekspertyz powypadkowych [2,3].

---

<sup>1</sup> Email: [l.gardynski@pollub.pl](mailto:l.gardynski@pollub.pl), Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, [www.wm.pollub.pl](http://www.wm.pollub.pl), [www.kim.pollub.pl](http://www.kim.pollub.pl)

<sup>2</sup> Email: [m.szala@pollub.pl](mailto:m.szala@pollub.pl), Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, [www.wm.pollub.pl](http://www.wm.pollub.pl), [www.kim.pollub.pl](http://www.kim.pollub.pl)

Na przełomach obserwuje się [2,3]:

- Charakterystyczne cechy przełomu, określające jego rodzaj (np. zmęczeniowy, międzykrystaliczny, transkrystaliczny),
- Większe wtrącenia niemetaliczne,
- Wielkość i kształt ziarn,
- Strukturę pierwotną materiału,
- Nieciągłości materiałowe, pory, pęcherze,
- Grubości charakterystycznych stref elementu, np. strefy zahartowanej.

Na zglądach metalograficznych makroskopowych określa się następujące cechy materiału [2-4]:

- Naruszenie spójności metali i stopów,
- Strukturę pierwotną powstałą w wyniku krzepnięcia,
- Strukturę wtórną powstałą w wyniku przeróbki plastycznej na gorąco (włóknistość) i na zimno (linie odkształceń),
- Niejednorodność struktury i składu wywołaną obróbką cieplną, cieplno-chemiczną, procesem technologicznym,
- Grubości charakterystycznych stref elementu.

Badanie makroskopowe przełomów stanowi ważny wskaźnik oceny materiału. Na podstawie wyglądu i umiejscowienia przełomu można wnioskować o przyczynach zniszczenia elementu konstrukcyjnego, którymi mogą być: wady materiałowe, niewłaściwy kształt elementu, zużycie eksploatacyjne czy też przeciążenie [2].

Szczególnym rodzajem zużycia elementów pojazdów są różnego rodzaju uszkodzenia, w tym pęknięcia. Celem bieżącego rozdziału jest przybliżenie problematyki powstawania i prezentacja wybranych przykładów przełomów jak również pęknięć powstałych wskutek zmęczenia cieplnego.

## **1. Przełomy doraźne**

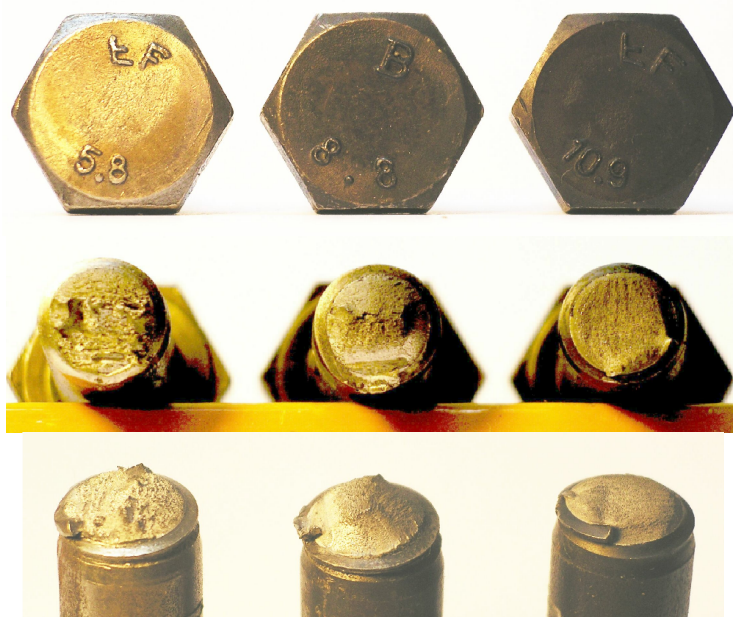
Z przełomem mamy do czynienia, gdy nastąpi uszkodzenie elementu polegające na jego urwaniu, skręceniu, zgięciu lub innym sposobie zniszczenia, któremu towarzyszy powstanie (odsłonięcie) powierzchni składających się z cząstek, które przed zdarzeniem znajdowały się wewnątrz przedmiotu i właśnie te powierzchnie nazywa się przełomami. Przełom nazywamy doraźnym gdy uszkodzenie następuje w wyniku jednorazowego przekroczenia wytrzymałości elementu przez wywołane jego obciążeniami naprężenia.

Wygląd powierzchni przełomu zależy od wielu czynników, takich jak np.:

- Rodzaj, gatunek i stan materiału, w tym wielkość ziarna,
- Szybkość zadziaływania obciążenia,
- Temperatura,
- Historia elementu,
- Rodzaj obciążenia.

W związku z powyższym nawet taki sam przedmiot, wykonany z tego samego materiału może ulec uszkodzeniu z wytworzeniem przełomu (przełomów) o zupełnie innym wyglądzie. Przedmioty o drobnym ziarnie, zwykle po obróbce cieplnej mają przełomy mniej chropowate i jaśniejsze – „suche”. Mniej twarde materiały charakteryzują się zwykle przełomami bardziej „ziarnistymi”, chropowatymi, często na ich wygląd mają wpływ istniejące w przedmiocie linie płynięcia, powstałe w wyniku przeróbki plastycznej. Wyższe temperatury i niższe prędkości obciążania powodują skłonność do „rozluźniania” ziarn i powstawania bardziej chropowatych przełomów międzykrystalicznych, co jest związane między innymi z występowaniem zanieczyszczeń na granicach ziarn. Na kolor przełomu wpływa w dużej mierze zawartość wydzielen, co można wykorzystywać do częściowej identyfikacji i oceny jakości stopów, np. żeliw.

W celu zilustrowania różnorodności wyglądu uzyskiwanych przełomów zestawiono poniżej (rys. 1 i 2) wynik statycznego zginania trzech śrub M10 o jednakowym kształcie wykonanych w klasach wytrzymałości 5.8, 8.8 i 10.9 (zmierzone wartości twardości odpowiednio 26, 30 i 41 HRC). Jak widać w miarę wzrostu wytrzymałości i twardości przełom staje się coraz bardziej gładki. W każdym przypadku w miejscu, znajdującym się po stronie działania siły (strona ściskana przełomu), powstaje charakterystyczna strefa – „zawias”, umożliwiająca określenie kierunku zginania. Rysunki 3-8 przedstawiają przełomy doraźne.



Rys. 1. Wygląd przełomów statycznie zginanych śrub [opracowanie własne]



Rys. 2. Wygląd łbów i przełomów badanych śrub M10 oraz zestawienie w celu zilustrowania kątów trwałego zgięcia, przy których śruby uległy zniszczeniu [opracowanie własne]



Rys. 3. Dwie powierzchnie przełomu półosi napędowej, powstałego w miejscu osłabionym przez korozję pod gumowym tłumikiem drgań skrętnych (Nissan Primera). Widoczne różnice w wielkości ziarna przy powierzchni i wewnątrz przekroju. Spiralny kształt wynika z działania naprężeń skręcających [opracowanie własne]

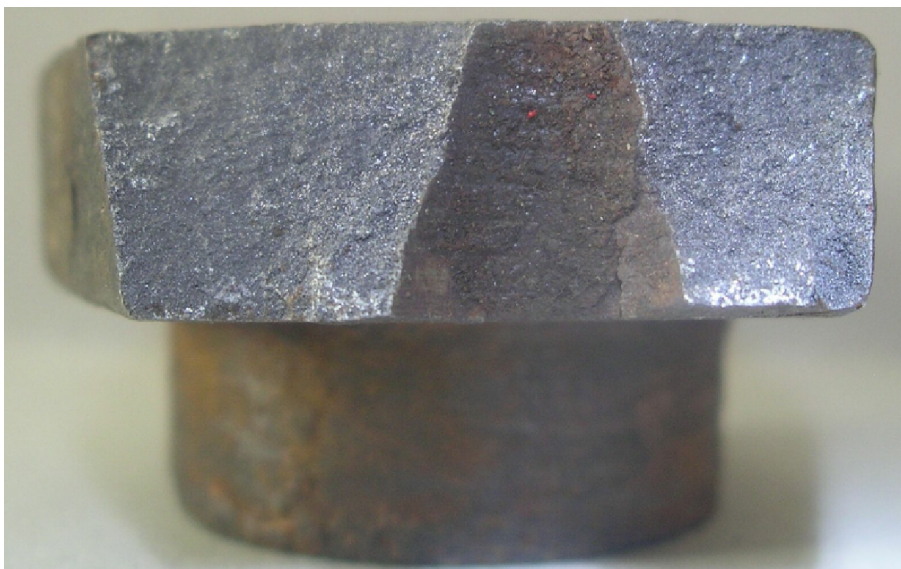


Rys. 4. Dwie części przełomu doraźnego tłoczyska amortyzatora kolumny McPhersona (Daewoo Nubira). Przełom powstał przy pełnym wysunięciu tłoczyska w wyniku uderzenia pojazdu w drzewo. Powierzchnie obu przełomów pokryte nalotem produktów korozji powstałych po zdarzeniu [opracowanie własne]





Rys. 5. Przełom powstały w wyniku zerwania próbki stalowej na maszynie wytrzymałościowej. W środkowej strefie „bardziej chropowaty” występ (uskok) – wynik mniejszego stopnia przewalcowania wewnątrz materiału. Pęknięcie próbki nastąpiło pod kątem  $45^\circ$ , a więc w płaszczyźnie największych naprężeń tnących [opracowanie własne]



Rys. 6. Chropowaty przełom ucha tulei dławicy pompy wodnej, wykonanej z żeliwa szarego [opracowanie własne]



Rys. 7. Doraźnie „ukręcona” końcówka czopa wału głównego przekładni kierowniczej (BMW serii 7), zastosowanej w samochodzie terenowym. Przyczyna – najechanie przednim kołem na twardą przeszkodę. Później powstały nalot korozyjny [opracowanie własne]





Rys. 8. Odłamek korpusu artyleryjskiego pocisku odłamkowo-burzącego.  
Wielokrotne przełomy doraźne w płaszczyznach największych naprężeń tnących skorupy  
[opracowanie własne]

## 2. Przelomy zmęczeniowe

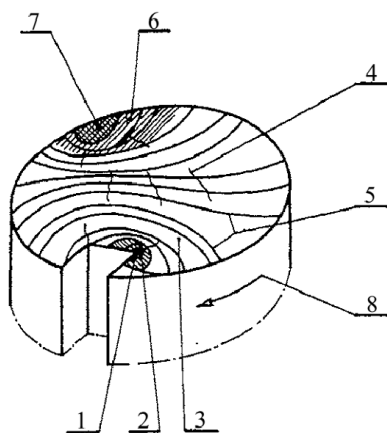
Z przełomem zmęczeniowym mamy do czynienia wtedy, gdy wartość naprężeń w elemencie jest niższa od jego wytrzymałości, lecz działają one w sposób zmienny w czasie, co w niektórych sytuacjach może doprowadzić do zainicjowania pęknięcia, które rozwijając się prowadzi do obniżenia wytrzymałości, a w konsekwencji do uszkodzenia.

Przełom zmęczeniowy (rys. 9) składa się ze strefy (stref) pęknięcia zmęczeniowego mającej początek w ognisku lub ogniskach (gładki, muszlowy kształt z liniami spoczynkowymi, powstającymi w miarę rozwoju przełomu ewentualne produkty korozji) oraz strefy resztkowej (dołamania), wykazującej cechy przełomu doraźnego. Nierzadko przełom rozwija się w różnych „równoległych” powierzchniach, czego efektem są prostopadłe do linii spoczynkowych uskoki na powierzchni strefy zmęczeniowej.

W tabeli 1 przedstawiono typowe formy przełomów zmęczeniowych.

Stosunek wskaźnika wytrzymałości na główny rodzaj obciążenia zniszczonego przekroju do wskaźnika wytrzymałości strefy resztkowej jest tzw. współczynnikiem bezpieczeństwa elementu. Najniższe współczynniki bezpieczeństwa stosuje się właśnie w środkach transportu ze względu na potrzebę ograniczenia masy. W celu zapewnienia bezpieczeństwa elementy poddaje się szczegółowej kontroli w procesie produkcji oraz eksploatacji.

W celu zmniejszenia prawdopodobieństwa zmęczeniowego pęknięcia elementy projektuje się tak aby uniknąć karbów geometrycznych i strukturalnych w niebezpiecznych strefach, a także poddaje się dodatkowym operacjom, np. szlifowanie, kulowanie, dogniatanie, hartowanie powierzchniowe czy specjalna obróbka chemiczna, jak np. anodowe utlenianie powierzchni tłoków silników spalinowych, wykonywanych z siluminów. Wystąpienie pęknięcia zmęczeniowego w pojeździe, zwłaszcza w przypadku elementu mającego wpływ na bezpieczeństwo, jest stanem nieprawidłowym, świadczącym o nieprawidłowej konstrukcji, niewłaściwym wykonaniu lub wadzie materiałowej, może być też wynikiem nieprawidłowej eksploatacji lub wynikać z wcześniejszego uszkodzenia innej części.



Rys. 9. Cechy powierzchni przełomów zmęczeniowych (ujęcie pogładowe) [2]:

- 1 – ognisko, 2 – strefa przyogniskową,
- 3 – uskoki pierwotne, 4 – uskoki wtórne,
- 5 – linie zmęczeniowe, 6 – strefa przejściowa,
- 7 – strefa resztkowa, 8 – kierunek obrotu wału; strefa zmęczeniowa obejmuje powierzchnię złomu, wyłączając strefę resztkową

Tab. 1. Typowe formy przelomów zmęczeniowych w zależności od sposobu i wielkości obciążenia [5]

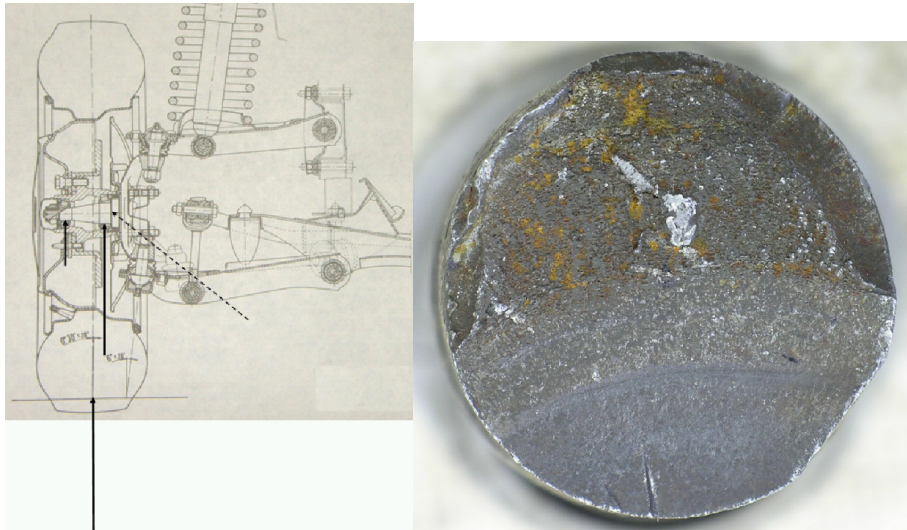
| L<br>p. | Obciążenie            |         | Pręty gładkie    |                 | Pręty z miejscowymi spiętrzeniami naprężeń |    |        |    |
|---------|-----------------------|---------|------------------|-----------------|--------------------------------------------|----|--------|----|
|         | Nazwa                 | Schemat | silnie obciążone | słabo obciążone | dużymi                                     |    | małymi |    |
|         |                       |         | 1                | 2               | 3                                          | 4  | 5      | 6  |
| 1       | Rozciąganie ściskanie |         | a)               | b)              | c)                                         | d) | e)     | f) |
| 2       | Jednostronne zginanie |         | g)               | h)              | i)                                         | j) | k)     | l) |
| 3       | Dwustronne zginanie   |         | m)               | n)              | o)                                         | p) | q)     | r) |
| 4       | Obrótowe zginanie     |         | s)               | t)              | u)                                         | w) | y)     | z) |

## 2.1. Przypadki pęknięcia zmęczeniowego dotyczące sytuacji, które mogą zakończyć się odpadnięciem koła pojazdu i poważnym wypadkiem

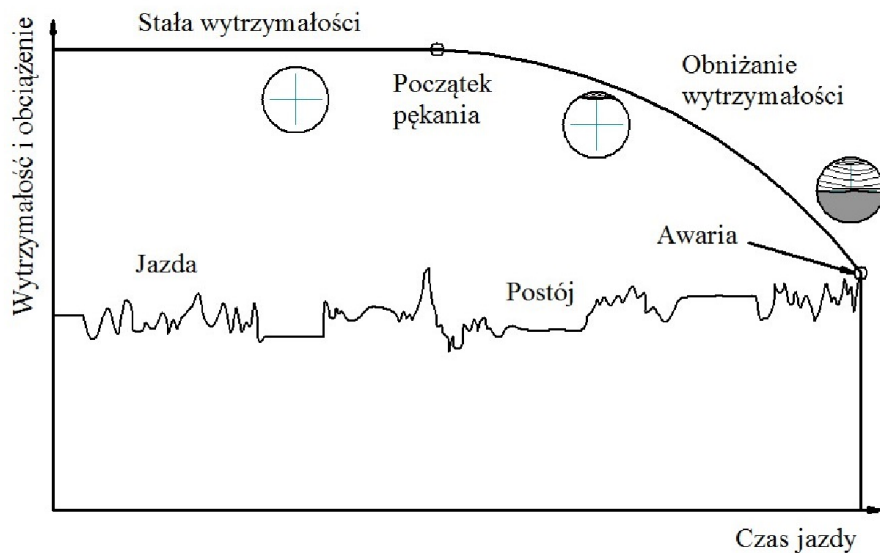
Pononiej opisano dwa przypadki pęknięcia zmęczeniowego dotyczące sytuacji, które mogą zakończyć się odpadnięciem koła pojazdu i poważnym wypadkiem:

W pierwszym przypadku (rys. 10 oraz 11) mamy do czynienia z kołem nienapędowym, a więc np. przednim kołem pojazdu z napędem klasycznym lub tylnym kołem pojazdu ze zblokowanym napędem przednim. Taki sam przypadek zginania czopa piasty koła zachodzi również w przypadku przyczep czy kół nośnych pojazdów gąsienicowych.

W przypadku przedstawionym na rysunku 10 czop zwrotnicy na postoju pojazdu i w czasie jazdy po prostej poddawany jest w krytycznym przekroju głównie zginaniu (dodatkowo jest ścinany oraz w nieznacznym stopniu skręcany momentem równym sumie momentów oporów obracania łożysk). Dodatkowe obciążenia pojawiają się w czasie jazdy po łuku, nierównościach i przy hamowaniu. Schematyczne i uproszczone przedstawienie obciążeń czopa zwrotnicy w czasie, w sytuacji zainicjowania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego przedstawiono na rys. 11.



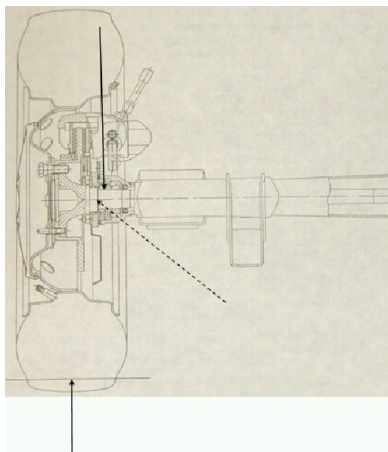
Rys. 10. Schemat działania reakcji podłoża na koło i sił wywołujących moment gnący, działający przez łożyska na czop zwrotnicy przedniej osi nie napędzanej, zginających ją na postoju. Strzałką przerywaną zaznaczono przekrój zwrotnicy najbardziej narażony na pękanie zmęczeniowe w wyniku jednostronnego zginania. W czasie jazdy dochodzą zmienne siły boczne i pionowe, które dodatkowo zwiększają naprężenia, na podstawie [6]. Po prawej obraz przełomu zmęczeniowego elementu poddanego jednostronnemu zginaniu



Rys. 11. Schematyczne i uproszczone przedstawienie zmiany obciążeń czopa zwrotnicy w czasie, w sytuacji zainicjowania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]



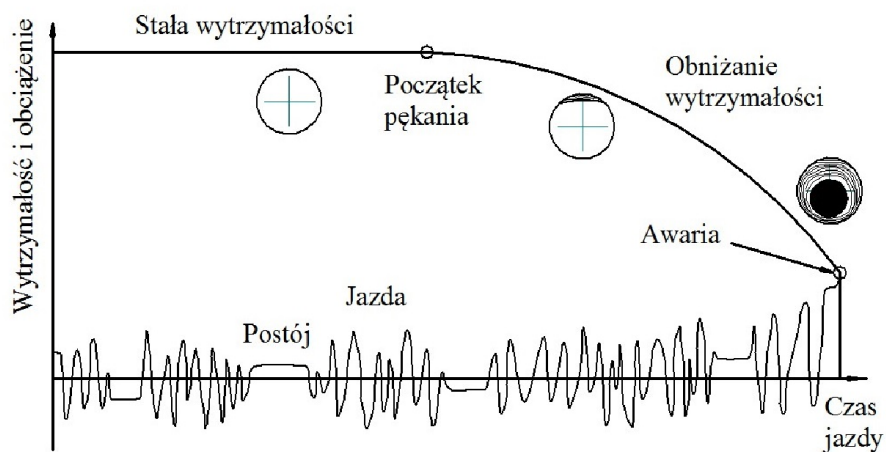
Drugim przypadkiem (rys. 12-14) jest półś pnapędowa obciążona, a więc element poddawany okresowemu skręcaniu, a przede wszystkim zginaniu analogicznemu jak w poprzednim przypadku, lecz z tą różnicą że wykonuje on ruch obrotowy a więc płaszczyzna działania momentu gnącego obraca się względem osi symetrii części.



Rys. 12. Schemat pary sił (reakcji podłoża i siły pionowej przenoszonej przez łożysko), zginających zewnętrzną część obciążonej półosi napędowej mostu napędowego pojazdu na postoju. Strzałką przerywaną zaznaczono przekrój najbardziej narażony na pękanie zmęczeniowe w wyniku obrotowego zginania. W czasie jazdy dochodzą zmienne siły boczne i pionowe, które dodatkowo zwiększają naprężenia od zginania, na podstawie [6]



Rys. 13. Obraz przełomu pękniętej zmęczeniowo półosi samochodu FSO Polonez. Obraz przełomu zatarty częściowo przez produkty korozji powstałe po zdarzeniu. Strefa zmęczeniowa pierścieniem otacza strefę dołamania. Pęknięcie zostało zainicjowane w karbie utworzonym przez uskok średnicy przy czopie łożyskowym. Bezpośrednią przyczyną awarii była próba regeneracji czopa przez napawanie [opracowanie własne]



Rys. 14. Schematyczne i uproszczone przedstawienie zmiany obciążeń pólasi w czasie, w sytuacji zainicjowania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

## 2.2. Przykłady przełomów zmęczeniowych elementów pojazdów

Na rysunkach 15-27 zamieszczono i opisano przykłady przełomów zmęczeniowych elementów pojazdów.



Rys. 15. Powierzchnie dwu przełomów zmęczeniowych drążków stabilizatorów (Ford Escort). Po prawej obraz przełomu zatarty przez produkty korozji powstałe po wystąpieniu uszkodzenia [opracowanie własne]



Rys. 16. Przełom zmęczeniowy sprężyny zawieszenia oraz wyjaśnienie jego zainicjowania w postaci karbu „wybitego” przez koniec pręta sprężyny [opracowanie własne]



Rys. 17. Wielokrotny przełom tulei sprzęgającej o charakterze zmęczeniowym. Ogniska przełomów w karbach utworzonych przez dna rowków wpustowych [opracowanie własne]





Rys. 18. Przykład zmęczeniowego złamania pióra resoru (Volvo FL 10), poniżej wygląd przełomu i powiększenie strefy zmęczeniowej i fragmentu obszaru strefy dołamania – typowy obraz przełomów piór resorów. W górnej strefie przełomu pas produktów korozji powstałych prawdopodobnie w czasie przechowywania elementu, już po uszkodzeniu [opracowanie własne]

W obydwu przypadkach przedstawionych na rys. 19 i 20, do uszkodzeń przyczyniły się znaczne luzy, powodujące uderowe obciążenia. W górnej końcówce dodatkowo miało miejsce nieprawidłowe przyleganie części stożkowej sworznia do otworu we współpracującym elemencie. W obydwu przypadkach strefę resztkową stanowią wąskie „kreski” materiału (rys. 19 i 20). Wynika to z faktu, że przy dwustronnym zganianiu jakiemu poddawane są te elementy, przy ruchu w jedną stronę istniejąca „połówka” pęknięcia przenosi obciążenia ściskające tak jak nieuszkodzony materiał, oraz ze znacznej wartości stosowanych w tych częściach współczynników bezpieczeństwa. Asymetria przełomu jest wynikiem wcześniejszego zainicjowania pęknięcia po jednej stronie.





Rys. 19. Zmęczeniowo pęknięcie sworznie końcówek drążków kierowniczych  
[opracowanie własne]



Rys. 20. Pęknięcie zmęczeniowe końcówki drążka układu kierowniczego (Polonez Truck) w miejscu początku zaciśniętej na nim rury. Obraz przełomów charakterystyczny dla dwukierunkowego zginania [opracowanie własne]



Rys. 21. Przełom zmęczeniowy dźwigni zmiany biegów (Lublin) [opracowanie własne]





Rys. 22. Przełom jednej ze śrub mocowania tylnego koła bliźniaczego (STAR 1142), urwany na skutek nieprawidłowego wykonania śrub. Karby geometryczne w postaci obwodowych rys pochodzących z obróbki skrawaniem nakładające się na początek strefy rowków ustalających. Poniżej przykład prawidłowego wykonania śruby [opracowanie własne]

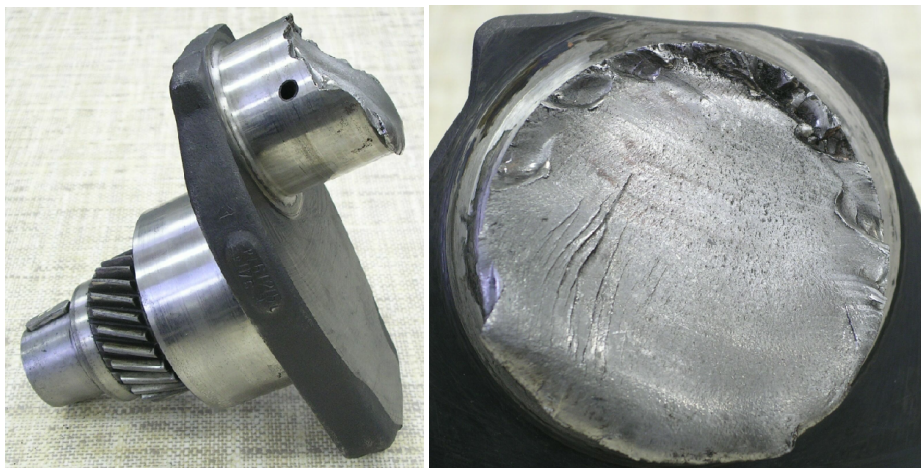


Rys. 23. Pęknięcia zmęczeniowe osi satelitów mechanizmu różnicowego (Bizon Super), powstałe w miejscach karbu geometrycznego [opracowanie własne]





Rys. 24. Pękanie wałów korbowych ma może mieć miejsce niekoniecznie w okolicy koła zamachowego (maksymalna wartość wytworzonego przez silnik momentu obrotowego). Jego umiejscowienie zależy od przypadkowych czynników takich jak np. luzy łożyskowe, prawidłowa geometria korpusu silnika oraz jakość obróbki powierzchni czopów, zwłaszcza w odniesieniu do łuków przejściowych [opracowanie własne]



Rys. 25. Pęknięcie zmęczeniowe pierwszego czopa korbowego kutego wału silnika (Neoplan) [opracowanie własne]



Rys. 26. Mniej „wyraźny” przełom zmęczeniowy czopa wału korbowego wykonanego z żeliwa sferoidalnego (Ford Transit). Pęknięcie wystąpiło po naprawie wcześniej zatartego czopa przez szlifowanie na mniejszy wymiar. Wcześniejsza awaria spowodowała obniżenie twardości a tym samym wytrzymałości zmęczeniowej elementu [opracowanie własne]



Rys. 27. Rozerwany na skutek zmęczenia wirnik sprężarki doładowującej wykonany ze stopu aluminium (Renault Magnum). Strefa zmęczeniowa na lewo od otworu wałka [opracowanie własne]

### **3. Zmęczenie cieplne**

W sytuacji, kiedy element pracuje w zmiennych temperaturach, prowadzi to do powstania zmiennych pól naprężeń, które z kolei mogą powodować powstawanie pęknięć, które określa się mianem zjawiska zmęczenia cieplnego. W praktyce zwykle elementy te poddawane są też zmiennym obciążeniom mechanicznym i właściwie należałoby mówić o zmęczeniu cieplno-mechanicznym. Wiele elementów pojazdów, zwłaszcza silników ulega tego rodzaju uszkodzeniom zmęczeniowym. Najczęściej dotyczą one tłoków i głowic [7,8], co przedstawiono na rysunkach 27 i 28.

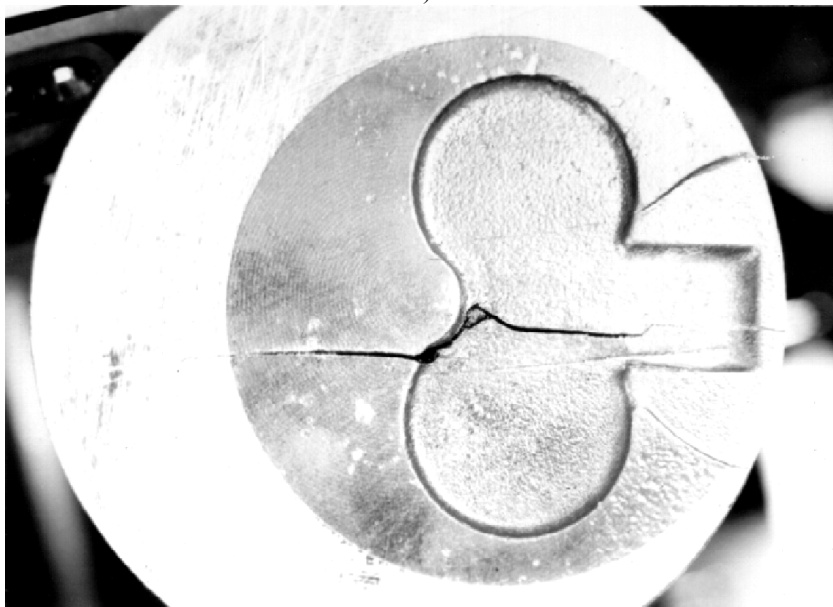
Współczesne silniki samochodów ciężarowych osiągają znaczne wartości mocy jednostkowych dochodzące do  $30 \text{ kW/dm}^3$ , maksymalne wartości średniego ciśnienia efektywnego przekraczają 2 MPa a maksymalna sprawność ogólna zbliża się do 50%. Wysoka efektywność silnika wiąże się ze zwiększeniem obciążeń mechanicznych i cieplnych jego elementów. Jednymi z najbardziej obciążonych cieplnie części są tłoki. Miejscem szczególnie zagrożonym występowaniem pęknięć spowodowanych zmęczeniem cieplnym w tłokach silników wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim jest krawędź zagłębionej w denku komory spalania. Problem pęknięcia denek tłoków dotyczy również silników z wtryskiem do komory wstępnej. Zmęczenie cieplne materiału stanowi barierę rozwoju silników, zwłaszcza wyposażonych w tłoki aluminiowe.



Rys. 27. Pęknięcie mostka międzyzaworowego głowicy aluminiowej, czterosurowego silnika iskrowego, chłodzonego powietrzem (PF 126p) [opracowanie własne]



a)



b)



Rys. 28. Przykłady pęknięcia denek tłoków silników ZS z wtryskiem do komory wirowej (a), na przykładzie tłoka silnika Opel 2.5 D ( $D=92$  mm) i komory wstępnej (b), Mercedes-Benz ( $D=91$  mm). W obydwu przypadkach pęknięcia denka na wskroś [opracowanie własne]



W czasie pracy silnika na tłok działają znaczne siły bezwładności wywołane przyspieszeniem oraz ciśnieniem gazów a także siły tarcia. Siła normalna wywołuje dociskanie tłoka do gładzi cylindra, generując siłę tarcia. Ponadto denko tłoka w czasie pracy styka się z czynnikiem roboczym o temperaturze przekraczającej 2000 K. Wywołuje to zmienne w czasie obciążenie cieplne. Wynikiem obciążenia cieplnego jest rozkład temperatury elementu. Temperatura elementów komory spalania wpływa na wskaźniki wytrzymałościowe materiałów, naprężenia cieplne a także warunki tarcia wywierając bezpośredni wpływ na trwałość i niezawodność silnika. Obciążenia cieplne są głównym ograniczeniem osiągnięć silników wysokoprężnych.

W czasie pracy silnika wymiana ciepła w cylindrze ulega ciągłym zmianom, różne przypadkowe czynniki powodują dodatkowo, że zmiany te nie są do końca okresowe nawet w tzw. ustalonych warunkach pracy silnika. Obok chwilowych zmian temperatury powierzchni i zmiennych obciążeń mechanicznych głównym czynnikiem wywołującym pękanie tłoków są zmiany rozkładów pól temperatur średnich tłoka w różnych stanach pracy silnika, głównie pomiędzy postojem a stanem gdy temperatury osiągają wartości maksymalne. Przyjmuje się, że maksymalna temperatura średnia na powierzchni denka tłoka ze względu na trwałość materiału nie powinna przekraczać  $225\div 350^{\circ}\text{C}$  dla tłoków wykonanych ze stopów lekkich,  $400\div 450^{\circ}\text{C}$  dla tłoków żeliwnych i  $450\div 500^{\circ}\text{C}$  dla stalowych.

Maksymalna temperatura w rowku pierwszego pierścienia uszczelniającego oraz na powierzchni denka tłoka od strony skrzyni korbowej ograniczana jest temperaturą tworzenia laku przez olej silnikowy i w zależności od warunków pracy silnika i rodzaju oleju nie powinna przekraczać  $160\div 220^{\circ}\text{C}$ .

Pole temperatur tłoka jest efektem dostarczania ciepła od czynnika roboczego oraz odbierania ciepła przez układ chłodzenia. Zwiększenie strumienia ciepła doprowadzonego do tłoka wywoływane jest przede wszystkim poprzez wzrost obciążenia silnika oraz wzrost prędkości obrotowej. Istotny wpływ na temperatury tłoka mają również regulacja silnika oraz jego stan techniczny.

W celu obniżenia temperatury tłoka stosowane są różne zabiegi. Należą do nich na przykład:

- Stosowanie żeber na wewnętrznej powierzchni denka tłoka,
- Obniżanie wysokości progu ogniowego poprzez podnoszenie pierwszego pierścienia,
- Stosowanie natrysku oleju na wewnętrzną powierzchnię denka tłoka,
- Różnego rodzaju kanały chłodzące,
- Stosowanie na zagrożone rejonu tłoka materiałów o większej odporności przy podwyższonej temperaturze od aluminium,
- Modyfikację konstrukcji tłoka.

Coraz częściej w silnikach dużych ciężarówek wzorem silników kolejowych stosuje się tłoki składane. Rozwiązanie takie stosowane jest w seryjnych

silnikach między innymi przez firmy Renault, Scania i Volvo, a także przez Detroit Diesel. Denko wykonuje się w takich tłokach z żeliwa lub staliwa np. Volvo w tłokach silnika D10 stosuje ulepszone cieplnie staliwo o zawartości według badań autora 0,4% C, 0,6% Cr i 0,9 % Mn a część prowadzącą z siluminu. Rozwiązanie to umożliwia przejmowanie przez tłok większego obciążenia cieplnego oraz zmniejszenie luzu tłok-tuleja cylindrowa o 30% ze względu na mniejszy współczynnik rozszerzalności cieplnej denka i mniejszą temperaturę części prowadzącej, połączonej z denkiem jedynie przez sworzeń tłokowy. Układ korbowy z tego rodzaju tłokiem składanym jest zdegenerowaną formą układu korbowo-wodzikowego, stosowanego w silnikach okrętowych. Innym, starszym przykładem zabezpieczenia krawędzi komory spalania umieszczonej w denku tłoka jest żaroodporna wkładka składająca się np. z około 75 % Ni i ok. 19 % Cr.

Wahania temperatury materiału tłoka możemy podzielić na duże wahania temperatury średniej związane z pracą silnika w różnych stanach, zwłaszcza pomiędzy postojem a stanem maksymalnego obciążenia cieplnego, osiągające w ekstremalnych warunkach amplitudę nawet 400°C (w tłokach aluminiowych) oraz na małe wahania temperatury powierzchni tłoka w obrębie cyklu pracy.

Przyjmuje się, że tłok nagrzewa się od temperatury otoczenia do temperatury pracy w czasie kilkudziesięciu sekund. Jeszcze krócej trwa proces ustalania się pół średnich temperatur tłoka przy przejściach silnika pomiędzy różnymi stanami obciążenia. Pojedyncze cykle nagrzewania i chłodzenia powierzchni tłoka trwają ułamki sekund, a prędkości nagrzewania powierzchni mogą przekraczać 1000 K/s. Gdy dla uproszczenia założymy, że element powierzchni denka tłoka zamocowany jest sztywno i przyjmiemy chwilowe wahania temperatury powierzchni 15 K, to dla stopu AK12, przy współczynniku rozszerzalności cieplnej  $\alpha = 21 \times 10^{-6}$  1/K i module Younga  $E = 7,1 \times 10^4$  MPa oraz liczbie Poissona  $\nu = 0,26$ , otrzymamy dla płaskiego stanu obciążenia, wartość zmiany naprężeń  $\Delta\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T / (1 - \nu) \approx 30$  MPa. Co jest dla siluminów wartością dużą, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach. Denko tłoka jest narażone na ogromne ilości takich szoków.

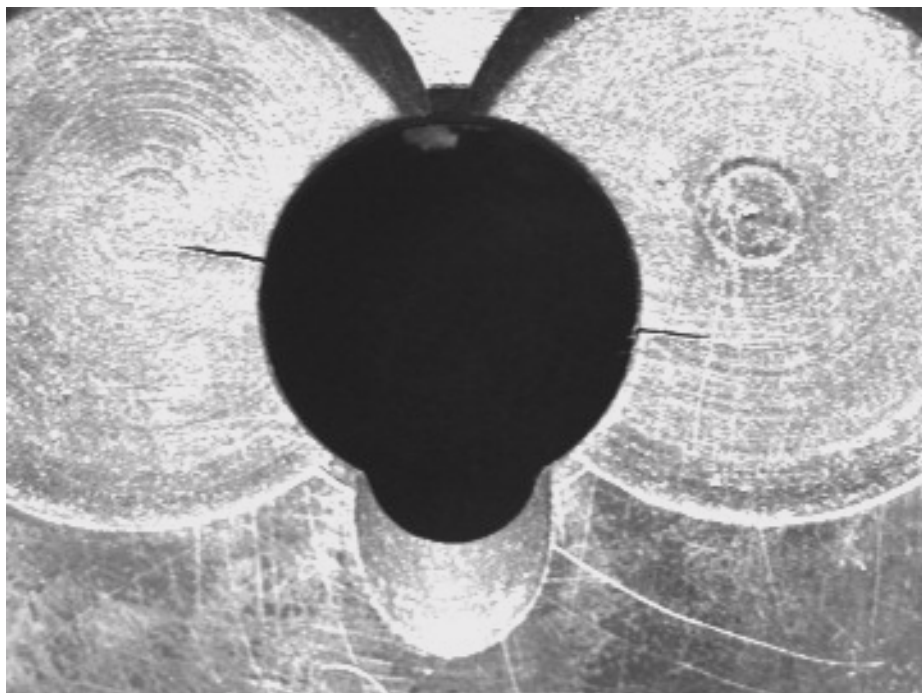
Ilość chwilowych cykli cieplnych dla powierzchni denka tłoka dla typowego silnika ZI o maksymalnej prędkości obrotowej 5500 obr/min i założonej trwałości np. 150 tys. km przebiegu samochodu do naprawy głównej, przy prędkości średniej 60 km/h, i założeniu że silnik pracuje z prędkością obrotową równą połowie maksymalnej, wynosi  $4,125 \times 10^8$  cykli.

W silniku ZS samochodu osobowego przy  $n_{\max} = 4200$  obr/min i przebiegu 250 tys. km ilość cykli cieplnych wynosi odpowiednio  $5,25 \times 10^8$ . W silniku dalekobieżnej ciężarówki przy założeniu  $n_{\max} = 3000$  obr/min i trwałości 1,5 mln km (niektóre pojazdy osiągają taki przebieg do naprawy głównej silnika), liczba cykli cieplnych wynosi aż  $2,25 \times 10^9$ . Widmo dużych wahań temperatury średniej tłoka czyli ich przebieg czasowy zależy od sposobu eksploatacji silnika. Częste

zmiany obciążenia związane z pracą w warunkach nieustalonych towarzyszą silnikom stosowanym do napędzania samochodów poruszających się w warunkach ruchu miejskiego. Bardziej ustaloną pracą charakteryzują się silniki dalekobieżnych ciężarówek, kolejowe, okrętowe oraz stacjonarne [9,10]. Niszczenie wywołane zmęczeniem cieplnym w przypadku tłoków ujawnia się w postaci różnego rodzaju pęknięć występujących na denkach, rys. 30.

W czasie badań największą uwagę zwrócono na tłoki silników krajowych tj. 359 i SW-680. Przeprowadzone badania [9-12] pozwoliły stwierdzić, że w wielu tłokach m.in. w silnikach SW-680 po przebiegu samochodu ok. 300 000 km, tj. typowym przebiegu do naprawy głównej silnika, występują pęknięcia. Przykłady pęknięć powstałych na skutek zmęczenia cieplnego przedstawiono na rysunku 30.

Pęknięcia te występują głównie na krawędzi komory spalania, miejscami ich zapoczątkowania są karby utworzone przez brzegi wgłębień zaworowych. Znacznie bardziej zaawansowane pęknięcia zaobserwowano na denkach tłoków silnika TD-100A ciągnika siodłowego Volvo F10 rok produkcji 1980, prawdopodobny przebieg ok. 600÷800 tys. km. Tłoki silnika TD-100A podobnie jak w silniku SW-680 wykonane są z siluminów okołoeutektycznych.



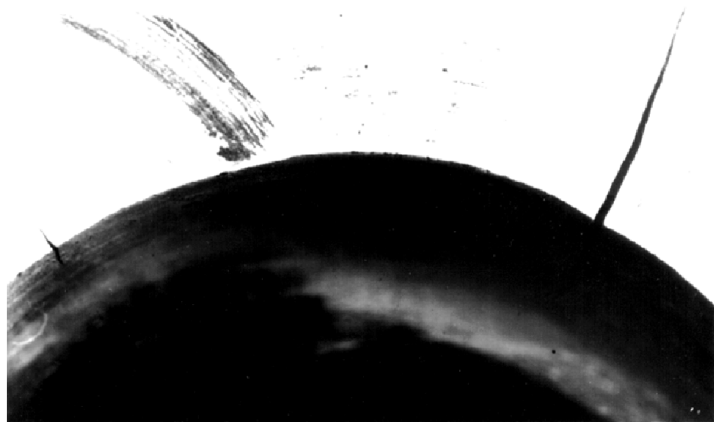
A



B



C



D

Rys. 30. Przykłady pękania tłoków z komorą spalania w denku (wtrysk bezpośredni).

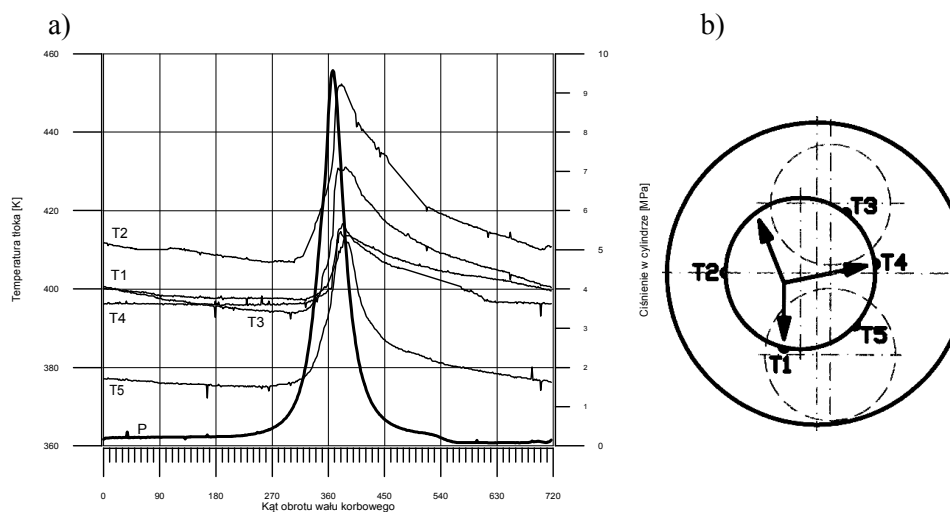
- a) pęknięcia krawędzi komory spalania tłoka silnika S-312 ( $D=112$  mm).
- b) pęknięcia krawędzi komory spalania tłoka silnika KamAZ 740 ( $D=120$  mm)
- c) fragment tłoka silnika SW-680 (średnica cylindra  $D=127$  mm) z pęknięciami. Długość większego pęknięcia ok. 9 mm.
- d) fotografia fragmentu tłoka silnika Volvo TD-100A ( $D=120$  mm) z pęknięciami. Długość większego pęknięcia ok. 24 mm [opracowanie własne]

Pęknięcia denek tłoków często występują w silnikach stosowanych w samochodach Liaz i Kamaz występują często już przy niewielkich przebiegach, nawet 10 tys. km. Innym przykładem silnika z wtryskiem bezpośrednim, w którym zauważono ten rodzaj uszkodzeń jest stosowany w ciągnikach rolniczych Ursus C-330 silnik S-312.

Krawędź komory spalania umieszczonej w tłoku jest praktycznie wolna od naprężeń spowodowanych obciążeniem mechanicznym tłoka. Przyczyn pękania należy się doszukiwać w zmiennych naprężeniach wywołanych obciążeniem cieplnym.

Rozwój pęknięć może prowadzić do różnych, niepożądanych skutków, od zaburzeń procesu spalania do zmniejszenia szczelności komory a nawet do poważnych uszkodzeń silnika. Do pęknięcia denek na wskroś dochodzi najczęściej w przypadku tłoków silników z wtryskiem do komory wstępnej. Tłoki takie charakteryzują się stosunkowo cienkim denkiem o mniejszej sztywności, silnie obciążonym cieplnie w miejscach omywanych płomieniami wydobywającymi się z komory. Taki charakter ma pęknięcie denek w krajowym silniku 4CT90, zwłaszcza intensywnie eksploatowanych przy dużych obciążeniach np. w samochodach LDV i Honker. Proces uszkodzania w tym przypadku ma charakter cieplno-mechaniczny ze względu na małą sztywność płaskiego denka tłoka silnika z wtryskiem do komory wirowej. Również na tym przykładzie widać wyraźny wpływ karbu [13,14].

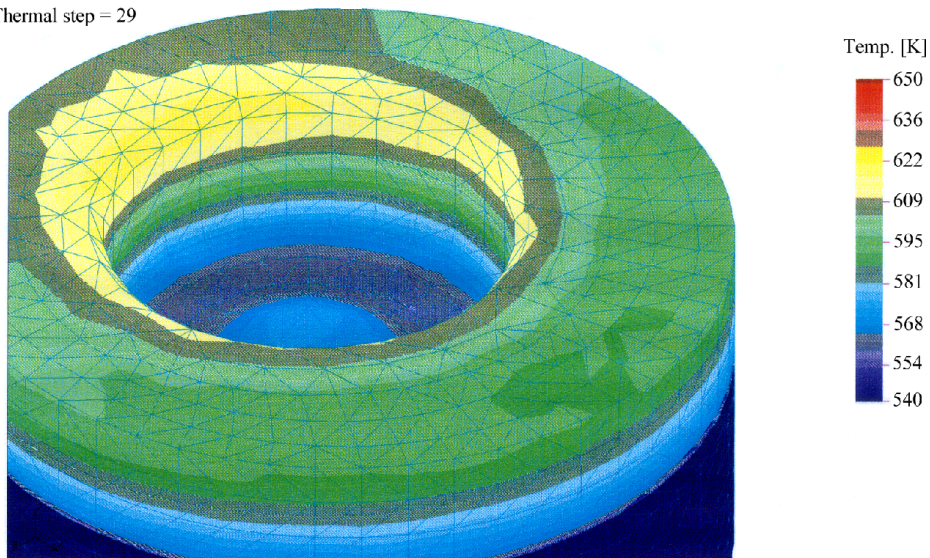
Przeprowadzono badania na tłoku silnika 359M których wyniki przedstawiono na rys. 31-33. Badania na silniku prowadzono przy prędkościach do 1500 obr/min oraz maksymalnym naciśnieniu doładowania 0,12 MPa uzyskiwanemu z niezależnej sprężarki. Dzięki doładowaniu i zwiększonej dawce paliwa uzyskiwano nawet dwukrotny wzrost osiągnięć silnika w stosunku do niedoładowanej wersji oryginalnej. Do pomiarów temperatury krawędzi komory spalania na denku tłoka zastosowano pięć termopar powierzchniowych. Zastosowane termopary charakteryzowały się wykorzystaniem jako jednej z elektrod materiału tłoka. Drugą elektrodę stanowił drut konstantanowy o średnicy 0,5 mm, umieszczony w otworze o średnicy 0,8 mm i odizolowany od jego ścianek ceramiką. Spoinę termopary stanowiła warstwa złota o grubości poniżej 1  $\mu\text{m}$ , dzięki czemu uzyskano wysoką czułość termopar. Zdecydowano się na konstantan gdyż ten materiał wytwarza w połączeniu z aluminium stosunkowo dużą siłę termoelektryczną, ponad 3 mV/100K, a termopara ma prawie liniową charakterystykę. Sygnał z termopar oraz z umieszczonego na krawędzi płaszcza tłoka termistora mierzącego temperaturę odniesienia przesyłano drogą galwaniczną poprzez elastyczną taśmę przewodową, przypinaną do gniazda na płaszczu tłoka. Zarówno budowa zastosowanych termopar jak i sposób transmisji danych zostały są przedmiotem ochrony patentowej.



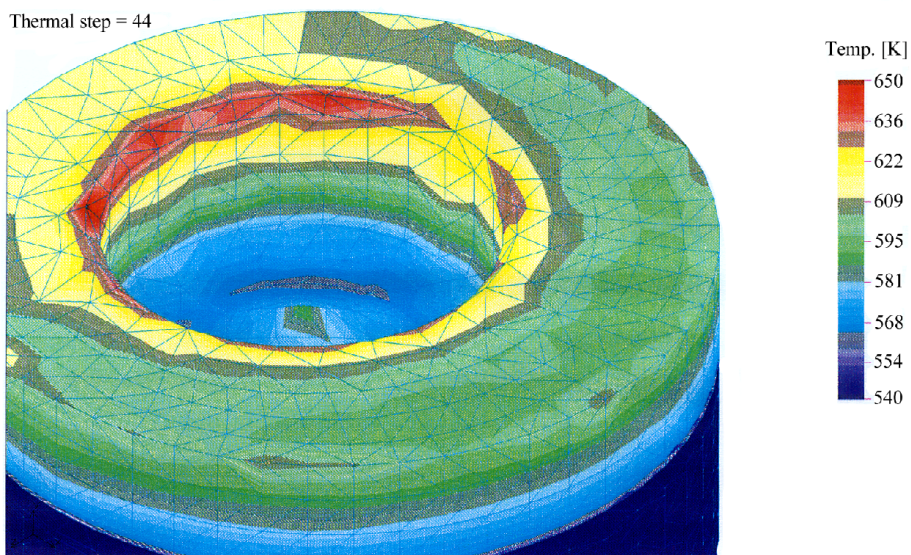
Rys. 31. Przykład przebiegów temperatury pięciu punktów krawędzi komory spalania oraz ciśnienia w cylindrze w pojedynczym cyklu (a), wyznaczonych w czasie badań silnika 359M. Prędkość 585 obr/min, temperatura powietrza w kolektorze dolotowym 335 K, temperatura spalin 363 K, temperatura krawędzi płaszcza tłoka 329.7 K, ciśnienie doładowania 0.12 MPa, średnie ciśnienie indykowane 0.882 MPa. b) Schemat rozmieszczenia termopar na krawędzi komory spalania w tłoku, strzałki oznaczają strugi paliwa z wtryskiwacza [9]



Thermal step = 29

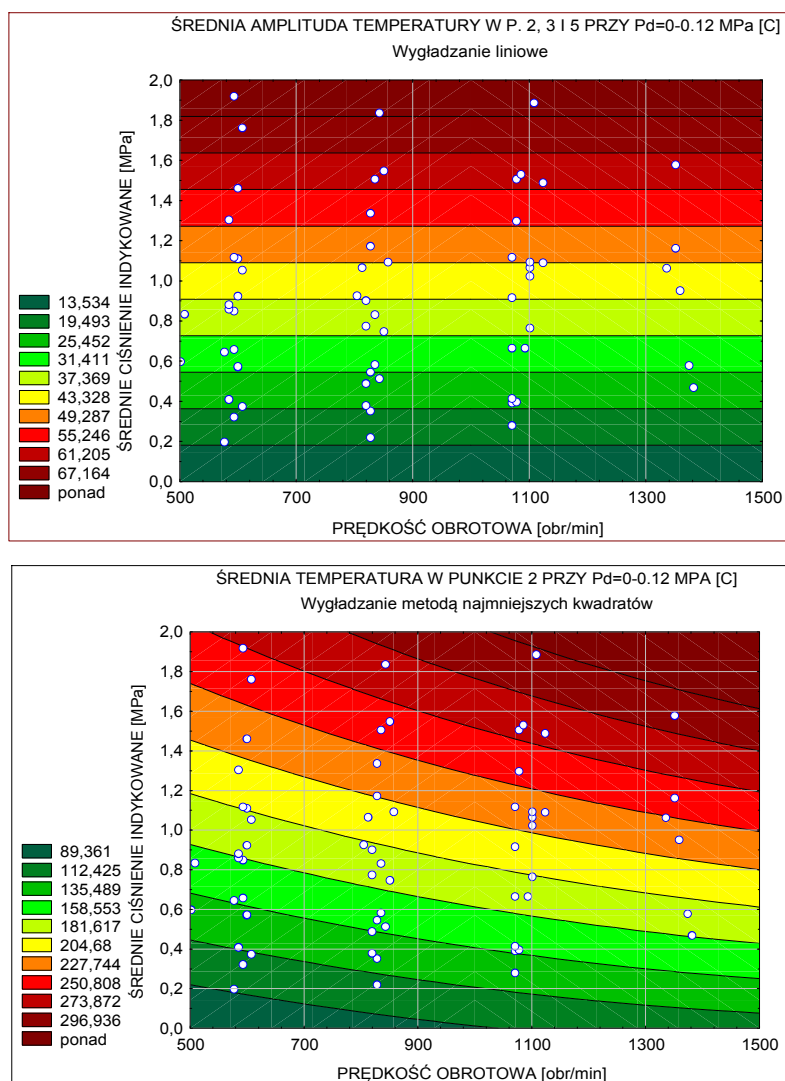


Thermal step = 44



Rys. 32. Wyznaczone na drodze badań modelowych pola minimalnej i maksymalnej temperatury denka tłoka w cyklu pracy [9]



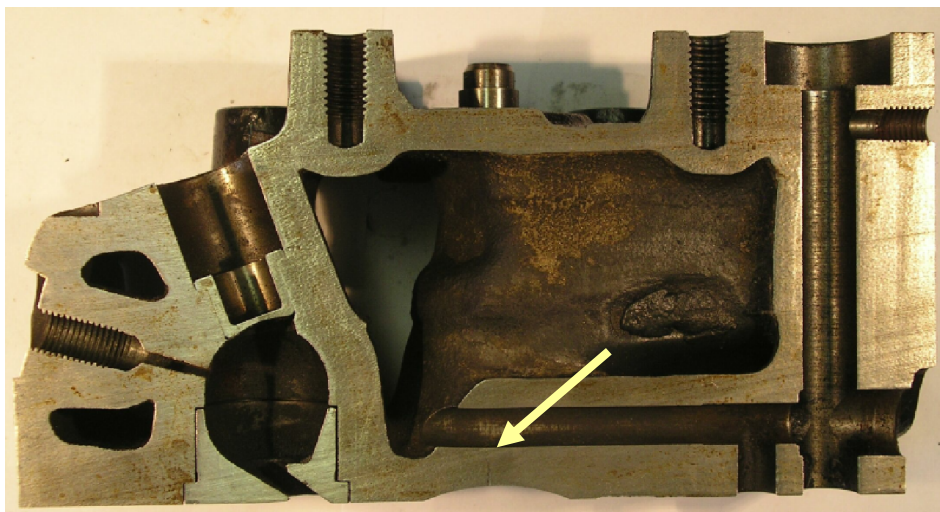


Rys. 33. Rozkład izoterm temperatury średniej w punkcie krawędzi komory spalania o najwyższej temperaturze oraz amplitud temperatury powierzchni w punktach nie trafianych przez strugi paliwa w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia silnika 359M przy różnych wartościach ciśnienia doładowania [9]

Bardzo często zdarzają się pęknięcia na powierzchni ogniowej głowic silników, głównie wysokoprężnych (rys. 34). Prowadzą one do połączenia układu chłodzenia z komorą spalania i szybkiego niszczenia silnika. W niektórych przypadkach mogą spowodować wypadnięcie np. gniazda zaworowego, co prowadzi do zniszczenia awaryjnego. Pęknięcia cieplne wentylowanej i monolitycznej tarczy hamulcowej przedstawiono na rys. 36.



Rys. 34. Pęknięcia zmęczeniowe na jednej z powierzchni  
ogniowych głowicy silników 4C90



Rys. 35. Przekrój ukazujący przebieg pęknięcia zmęczeniowego łączącego komorę spalania  
z kanałem chłodzącym [opracowanie własne]



Rys. 36. Pęknięcia cieplne wentylowanej i monolitycznej tarczy hamulcowej  
[opracowanie własne]

#### 4. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano przykłady pęknięć o charakterze przełomów doraźnych, zmęczeniowych oraz powstałych wskutek zmęczenia cieplnego. Na podstawie przeprowadzonych badań makroskopowych zidentyfikowano i opisano przyczyny zużycia (zniszczenia) poszczególnych elementów.

Na podstawie wyglądu i umiejscowienia przełomu można wnioskować o przyczynach zniszczenia elementów pojazdów, jakimi mogą być: wady materiałowe, zużycie eksploatacyjne powiązane z warunkami pracy elementu czy też przeciążenie.

Badanie makroskopowe uszkodzeń eksploatacyjnych elementów pojazdów stanowią ważny wskaźnik oceny przyczyny powstawania pęknięć.

#### Literatura

1. Ashby M. F., Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim. WNT, 1998.
2. Hucińska J., Metaloznawstwo. Wydaw. Politechniki Gdańskiej, 1995.
3. Przybyłowicz K., Metaloznawstwo. WNT, Warszawa, 2009.
4. ASM Handbook: Formerly Ninth Edition, Metals Handbook. Metallography and microstructures. ASM International, 2004.
5. Drewnowski S.: Formy złomów i zniszczeń elementów konstrukcji metalowych. Arkady, Warszawa, 1969.
6. Kaim E., Naprawa samochodów FSO 125P” WKŁ Warszawa, 1988.
7. Gardyński L.: Badania nad podwyższeniem odporności na zmęczenie cieplne tłoków do wysoko doładowanych silników ZS. Rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. zw. dr hab. inż. Andrzeja Werońskiego, Politechnika Lubelska, 1999.
8. Weroński A., Hejwowski T., Thermal fatigue of Metals. M. Dekker Inc. New York, 1992.

9. Gardyński L., Obciążenia cieplne tłoka silnika wysokoprężnego. Samochody Specjalne, nr 1/2003, Wrocław 2003, str. 75÷79.
10. Gardyński L.: „Investigations of temperature fluctuations of DI diesel engine piston”. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, tom III Lublin 2003, str. 105÷116.
11. Gardyński L.: „Odporność na pękanie zmęczeniowe materiałów stosowanych na tłoki. Cz. I Materiały stosowane na tłoki”. Samochody Specjalne, nr 4/2003, Wrocław 2003, str. 78÷81.
12. Gardyński L.: „Odporność na pękanie zmęczeniowe materiałów stosowanych na tłoki. Cz. II Badania odporności materiału tłoka na zmęczenie cieplne”. Samochody Specjalne, nr 5/2003, Wrocław, 2003, str. 76÷79.
13. Gardyński L., Dębski H., Hejwowski T., Weroński A., Nastaj T.: Analysis of failure causes of 4C90 engine head. Journal of KONES'2008, Warszawa, 2008, s.179÷185.
14. Gardyński L.: „Spostrzeżenia z eksploatacji samochodu terenowego UAZ 31512 z zamontowanym silnikiem wysokoprężnym ANDORIA 4C90”. Problemy Eksploatacji uzbrojenia i sprzętu wojskowego. Zeszyty Naukowe Wyższej szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki. Wrocław 2004. Wydano w roku 2005. Str. 51÷60.

## **USZKODZENIA EKSPLOATACYJNE ELEMENTÓW POJAZDÓW**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono badania makroskopowe elementów pojazdów uszkodzonych eksploatacyjnie. Na podstawie wyglądu i umiejscowienia przełomu można wnioskować o przyczynach zniszczenia elementów pojazdów. Uszkodzenia mają charakter przełomów doraźnych, zmęczeniowych jak również powstałych na skutek zmęczenia cieplnego. Badanie makroskopowe uszkodzeń eksploatacyjnych elementów pojazdów stanowią ważny wskaźnik oceny przyczyny powstawania pęknięć.

**Słowa kluczowe:** Uszkodzenia eksploatacyjne, badania makroskopowe, elementy pojazdów

## **DAMAGE DUE TO THE OPERATION OF VEHICLES**

### **Abstract**

This paper presents the macroscopic examinations of vehicles components damaged operationally. On the basis of the appearance and location of the cracks, destruction causes of the vehicle components could be recognized. Described damages are brittle fractures, fatigue fractures and fractures caused by thermal fatigue of metals. Macroscopic examination state important criteria of evaluation of operational damage vehicle components.

**Keywords:** Operation damaged, macroscopic examinations, vehicles components

## Indeks autorów

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Bulzak Tomasz .....     | 21    |
| Dziubińska Anna.....    | 34    |
| Gardyński Leszek.....   | 76    |
| Gontarz Andrzej.....    | 6, 34 |
| Samółk Grzegorz .....   | 6     |
| Siemionek Ewa .....     | 61    |
| Szala Mirosław .....    | 76    |
| Winiarski Grzegorz..... | 6     |
| Zdrodowska Kamila.....  | 49    |