



Innowacyjne procesy wytwórcze

redakcja naukowa

Antoni Świć

Wiktor Taranenko

MONOGRAFIE

Innowacyjne procesy wytwórcze

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Innowacyjne procesy wytwórcze

redakcja
Antoni Świć
Wiktor Taranenko



Politechnika Lubelska
Lublin 2013

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Miron Czerniec

dr hab. inż. Jerzy Lipski, prof. Politechniki Lubelskiej

Redakcja i skład: Łukasz Wojciechowski

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-44-0

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

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 80 egz.

SPIS TREŚCI

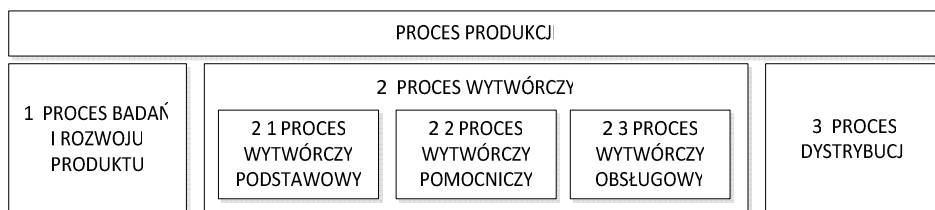
JOANNA HELMAN DETERMINANTY NIESTABILNOŚCI PROCESÓW WYTWÓRCZYCH.....	6
PIOTR CHWASTYK, MAGDALENA JURCZYK-BUNKOWSKA ZASTOSOWANIE ANALIZY SKUPIEŃ ORAZ METODY PARAMETRYCZNEJ W SZACOWA- NIU KOSZTÓW WE WCZESNYCH FAZACH PROCESÓW INNOWACJI.....	14
ALFRED PASZEK, PIOTR WITTBRODT METODA PROJEKTOWANIA PROCESU TECHNOLOGICZNEGO WSPOMAGANEGO SY- STEMEM DORADCZYM.....	28
JERZY STAMIROWSKI, DAWID SKRZYPCZYŃSKI ZNACZENIE AUTOMATYZACJI PROCESÓW PRODUKCYJNYCH DLA ZASPOKAJANIA POTRZEB KLIENTA I ZMIAN CHARAKTERU PRACY W PRZEMYŚLE.....	42
PIOTR WITTBRODT, ALFRED PASZEK ALGORYTMY SAMOUCZĄCE W ZASTOSOWANIU DO TECHNOLOGICZNYCH SYSTE- MÓW PROGNOZUJĄCYCH PROCES OBRÓBKI FREZOWANIEM.....	52
KAZIMIERZ ZALESKI, KRZYSZTOF CIECIELĄG BADANIA MOMENTU SKRAWANIA I SIŁY BIERNEJ W PROCESIE FREZOWANIA KOMPO- ZYTÓW POLIMEROWYCH WZMACNIANYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI I ARAMIDO- WYMI.....	68
AGNIESZKA SKOCZYŁAS, KAZIMIERZ ZALESKI, HUBERT KOWALCZYK BADANIA PORÓWNAWCZE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI STALI, STOPU ALUMI- NIUM I STOPU TYTANU PO CIĘCIU STRUMIENIEM WODNO-ŚCIERNYM.....	78
TOMASZ PAŁKA, KAZIMIERZ ZALESKI CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STOPU ALUMINIUM PO FREZOWANIU Z MINIMA- LNYM.....	87
JANUSZ DĄBSKI, TADEUSZ HEJWOWSKI WPŁYW ZUŻYCIA NOŻY GRANULATORA NA WŁAŚCIWOŚCI OTRZYMYWANYCH PRO- DUKTÓW.....	97
TADEUSZ HEJWOWSKI, JANUSZ DĄBSKI PROBLEMATYKA ZUŻYCIA NAPAWANYCH NOŻY GRANULATORA.....	108
TADEUSZ CISOWSKI, ŁUKASZ WOJCIECHOWSKI MODEL DYSTRYBUCJI PRZESYŁEK DROBNYCH NA KOLEI.....	122
TADEUSZ CISOWSKI, ŁUKASZ WOJCIECHOWSKI LOGISTYCZNE ZARZĄDZANIE POTOKAMI DROBNICY NA KOLEI W WARUNKACH OGRANICZEŃ.....	137

DETERMINANTY NIESTABILNOŚCI PROCESÓW WYTWÓRCZYCH

1. Proces wytwórczy

W literaturze można znaleźć wiele definicji procesów produkcyjnych. Najogólniej ujmując procesy produkcyjne to ciąg czynności, które mają na celu wytworzenie wyrobu w ostatecznej formie, poprzez wykorzystanie różnego rodzaju zasobów. Początek procesu produkcyjnego można określić jako moment dostarczenia materiałów (surowców, półwyrobów) na pierwsze stanowisko produkcyjne. Następnie odbywa się cykl operacji przetwórczych oraz obróbczych w następstwie, którego dokonywany jest montaż podzespołów w wyrób finalny. Ostatnią fazą procesu produkcyjnego jest dokonanie kontroli jakości otrzymanego produktu [1].

W procesie produkcyjnym można wyróżnić trzy główne etapy. Pierwszym z nich jest proces badań i rozwoju produktu, drugim jest proces wytwórczy, trzecim zaś proces dystrybucji wyrobu. Sam proces wytwórczy można podzielić na trzy podetapy – proces wytwórczy podstawowy, proces wytwórczy Pomocniczy oraz proces wytwórczy obsługowy. Ogólny schemat procesu produkcji przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Ogólny schemat procesu produkcji

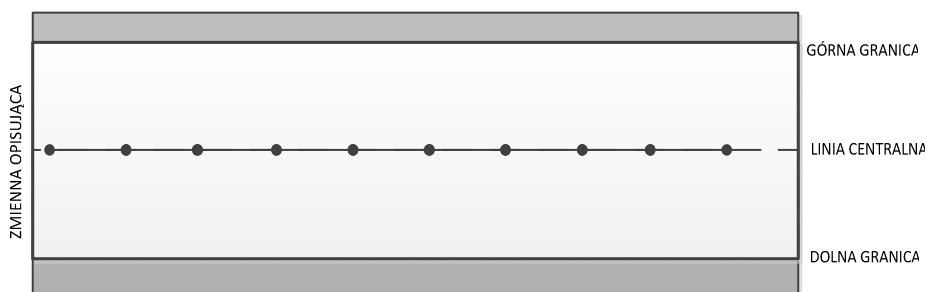
Proces podstawowy polega na przetwarzaniu materiałów na wyrób finalny wykorzystując takie zasoby jak praca ludzka, praca maszyn i urządzeń, itp. Równolegle występujący proces wytwórczy pomocniczy, niezbędny do prawidłowego przebiegu procesu podstawowego, polega na utrzymaniu ruchu maszyn i urządzeń, dostarczeniu materiałów, narzędzi oraz czynników energetycznych, a także w jego zakresie znajduje się utylizacja odpadów produkcyjnych. Ostatni etap to proces wytwórczy obsługowy, który jest

pośrednio związany z procesem podstawowym, polega on na zapewnieniu obsługi administracyjnej, ochronie obiektu, zagwarantowaniu bezpieczeństwa pacy, itp.

2. Stabilność procesów wytwórczych

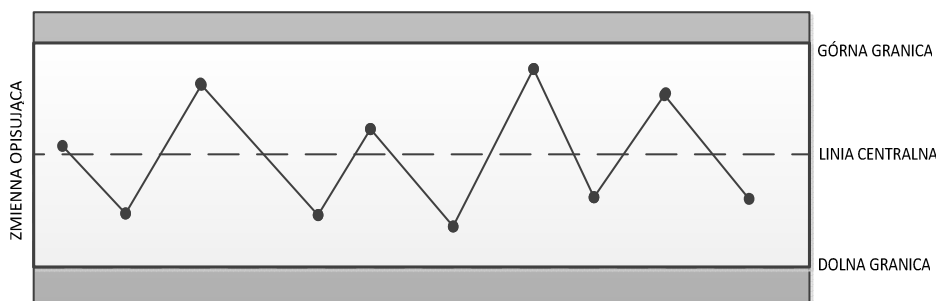
Proces produkcyjny można nazwać stabilnym wówczas, gdy przebiega on bez żadnych zakłóceń, jest powtarzalny w pewnych, określonych granicach. Stabilizacji procesów sprzyja zastosowanie dużej ilości specjalistycznych maszyn i urządzeń przez wysoko wykwalifikowanych pracowników technicznych. Takiego rodzaju produkcja jest najczęściej mało elastyczna, o przebiegu potokowym, z możliwością wykorzystania częściowo automatyzowanych lub całkowicie automatycznych linii produkcyjnych [2].

Idealnie stabilny proces produkcyjny to taki, który za każdym razem przebiega tak samo, nie ma żadnych, nawet najmniejszych odchyłeń od normy zmiennej opisującej proces (może to być czas, ilość, jakość produktów, ilość wykorzystanych surowców, wielkość produkcji, itp.). Schemat przebiegu idealnie stabilnego procesu produkcyjnego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Idealnie stabilny proces produkcyjny

Jednakże w rzeczywistości mało, który proces produkcyjny może poszczycić się takim poziomem stabilności. Wahania zmiennej opisującej proces względem poziomu idealnej powtarzalności są całkowicie naturalne ze względu na ilość zmiennych wpływających na przebieg procesu. Poziom dopuszczalnej powtarzalności wyznaczony jest poprzez górną i dolną granicę. Aby móc określić proces jako stabilny, wartości jego zmiennej opisującej muszą oscylować pomiędzy wyznaczonymi granicami. Schemat przebiegu stabilnego przedstawiono na rysunku 3.

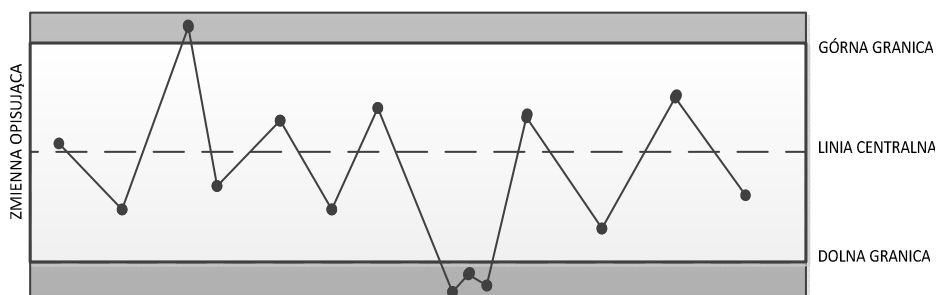


Rys. 3. Stabilny proces produkcyjny

W momencie gdy proces produkcyjny zostanie zaburzony przez dowolny czynnik na tyle, iż spowoduje to wyjście jego wartości poza ustaloną wcześniej granicę, możemy wówczas mówić o niestabilności procesu. Najbardziej narażone na brak stabilności są procesy, w których występuje wysoka elastyczność przy niskim stopniu automatyzacji, małej ilości wykorzystywanych do wytwarzania maszyn i urządzeń, które w głównej mierze są uniwersalne, a także niskich kwalifikacjach technicznych pracowników.

Czynniki mające wpływ na niestabilność procesu produkcyjnego, a zwłaszcza jego najważniejszej części, tj. procesu wytwórczego, można podzielić na dwie grupy przyczyn – przyczyny naturalne i przyczyny specjalne (zwane inaczej niestandardowymi).

Przyczyny naturalne to czynniki ściśle związane z procesem podczas całości jego trwania. Przyczyn tych jest zazwyczaj dużo oraz są one stałe, w związku z tym nie można łatwo określić dominującej przyczyny niestabilności. Efekt wystąpienia jednej z nich jest niewielki dla całości procesu i zazwyczaj krótkotrwały. W celu wyeliminowania przyczyn naturalnych należy dokonać zmiany całego procesu produkcyjnego. Schemat przebiegu procesu niestabilnego spowodowanego przez przyczyny naturalne przedstawia rysunek 4.

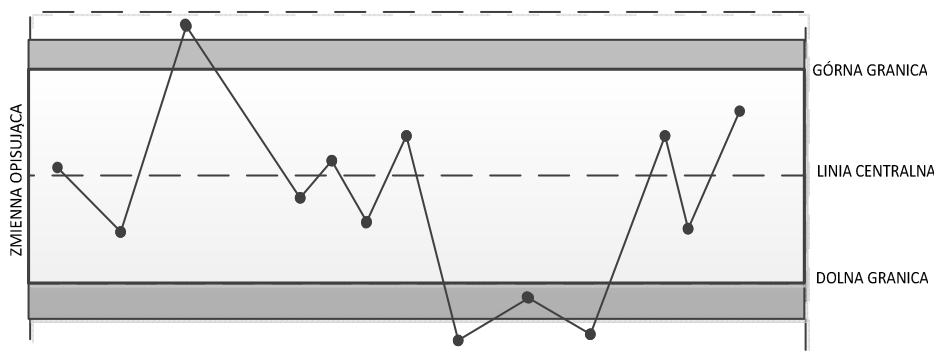


Rys. 4. Niestabilny proces produkcyjny - przyczyny naturalne

Do przyczyn naturalnych niestabilności procesu produkcyjnego najczęściej zalicza się takie czynniki jak [3], [4]:

- błędy wynikające z kontroli jakości,
- brak jasno zdefiniowanych standardów procedur,
- brak nadzoru,
- naturalne zużycie,
- nieodpowiedni wybór maszyn do procesu,
- nieodpowiednia dokładność aparatury pomiarowej,
- nieodpowiednia temperatura,
- nieodpowiednie oświetlenie
- nieodpowiednie procedury,
- nieodpowiednie utrzymanie ruchu maszyn,
- nieodpowiednie warunki pracy,
- surowce niespełniające wymagań,
- zmienność czynników produkcji,
- zmienność ustawień,
- źle zaprojektowany proces,
- źle zaprojektowany wyrób.

Przyczyny specjalne (niestandardowe) to czynniki nie zawsze pojawiające się w procesie, zazwyczaj można je wyjaśnić wystąpieniem zdarzeń niezwiązanych bezpośrednio z procesem, nie można ich przewidzieć. Ich ilość oraz częstotliwość występowania jest zmienna, przez co mają one duży wpływ na stabilność procesu, zwłaszcza w długim okresie. Występowanie przyczyn specjalnych jest przejawem nieprawidłowego przebiegu procesu i znacznie obniża jego jakość. Na rysunku 5 przedstawiono niestabilność procesu spowodowaną przyczynami specjalnymi, które powodują wydłużenie okresu przebiegu zmiennej opisującej.



Rys. 5. Niestabilny proces produkcyjny – przyczyny specjalnej

Do przyczyn specjalnych niestabilności procesów wytwórczych najczęściej zaliczane są takie czynniki jak [3], [4]:

- awaria komputera / oprogramowania,
- błędy operatora,
- nieobecność pracownika,
- nieodpowiednia partia surowców,
- nieodpowiednie dopasowanie wyposażenia,
- nieprawidłowe ustawienia sterowników maszyn,
- niewykwalifikowany operator,
- skoki napięcia,
- uszkodzone części/elementy,
- wadliwe działanie maszyny,
- zastosowanie nieodpowiedniego narzędzia,
- zła jakość surowców,
- złe ustawienie maszyny.

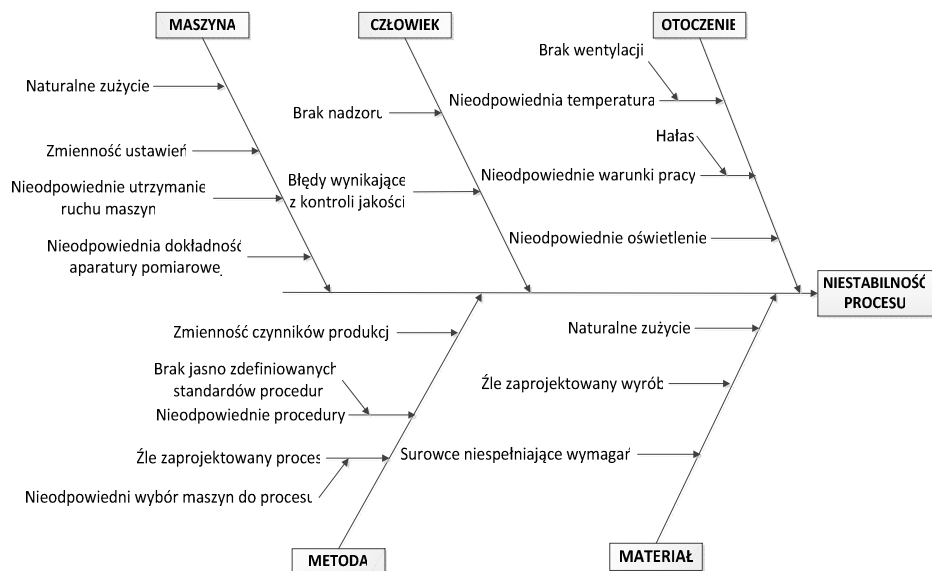
3. Analiza czynników

Do zaprezentowania podziału czynników należących do kategorii przyczyn naturalnych oraz przyczyn specjalnych można posłużyć się diagramem przyczynowo-skutkowym (inaczej zwanym diagramem Ishikawy lub diagramem rybiej ości), za pomocą którego można dokonać graficznej analizy wpływu różnych czynników oraz ich wzajemnych powiązań wywołujących występowanie niestabilności procesu produkcyjnego oraz analizy rezultatów spowodowanych działaniem tych powiązań. Diagram porządkuje przyczyny lub czynności ze względu na zdefiniowany problem w określonych grupach kategorii. Kategorie te zwykle wybierane są z zespołu „5M”:

- człowiek (Man),
- maszyna (Machine),
- materiał (Material),
- stosowana metoda (Method),
- kierownictwo (Management),

W literaturze spotyka się również inne zestawy kategorii, np. „5M + E” gdzie do wyżej wymienionych grup dochodzi jeszcze analiza czynników związanych z otoczeniem przedsiębiorstwa (Environment) lub układ „6M” gdzie dodatkowo analizowany jest pomiar (Measurement) [5].

Przyczyny naturalne niestabilności procesu w głównej mierze można zakwalifikować do grup z czterech kategorii, tj. maszyn, materiału, metody oraz otoczenia. Przykłady przyczyn naturalnych zaprezentowano na diagramie przyczynowo-skutkowym (rys. 6).



Rys. 6. Diagram przyczynowo-skutkowy naturalnych niestabilności procesu

Przyczyny specjalne niestabilności procesu w głównej mierze można zakwalifikować do grup z trzech kategorii, tj. maszyn, ludzkich oraz materiału. Przykłady przyczyn naturalnych zaprezentowano na diagramie przyczynowo-skutkowym (rys. 7).

4. Wnioski

Na stabilność procesów wytwórczych ma wpływ duża ilość zmiennych, które mogą pojawić się w różnym czasie, w różnej kombinacji oraz przy różnym natężeniu. W zależności od źródła pochodzenia przyczyn niestabilności zaburzenie procesu można łatwiej lub trudniej usunąć.

Wśród przyczyn naturalnych niestabilności procesu najliczniejszą grupę stanowią czynniki zakwalifikowane do kategorii związanych z metodą oraz otoczeniem (po 5). Przyczyny z kategorii metody wpływające na niestabilność procesu to zmienność czynników produkcji, nieodpowiednie procedury oraz związany z tym brak jasno zdefiniowanych standardów procedur, a także źle zaprojektowany proces, i co za tym idzie, nieodpowiedni wybór maszyn. Do czynników z kategorii otoczenia zaliczyć można nieodpowiednie oświetlenie, nieodpowiednią temperaturę w miejscu pracy, często spowodowaną brakiem wentylacji oraz nieodpowiednie warunki pracy, często związane z występowaniem hałasu. Trzecią co do liczności grupę (4 przyczyny) stanowią czynniki z kategorii maszyn, czyli naturalne zużycie maszyny, zmienność ustawień, nieodpowiednie utrzymanie ruchu oraz nieodpowiednia dokładność aparatury pomiarowej. Do czwartej grupy przyczyn zaliczyć można 3 czynniki

z kategorii materiału, czyli naturalne zużycie materiałów, surowce niesie-
lniające wymagań jakościowych oraz źle zaprojektowany wyrób. Ostatnią,
najmniej liczną grupą są przyczyny związane z czynnikiem ludzkim, czyli
brakiem nadzoru oraz błędami wynikającymi z kontroli jakości.

Wśród przyczyn specjalnych niestabilności procesu najliczniejszą grupę
stanowią czynniki zakwalifikowane do kategorii związanych z maszynami.
Zaliczyć do nich można złe ustawienia maszyny oraz związane z nimi
nieprawidłowe ustawienia sterowników maszyn, wadliwe działanie maszyny,
które może być spowodowane skokami napięcia oraz awarie komputerów lub
oprogramowania maszyn. Drugą co do liczności grupę składającą się z 4 czynni-
ków są przyczyny związane z udziałem człowieka w procesie, a mianowicie
błędy operatora, nieobecność pracowników oraz ich niskie kwalifikacje (lub ich
brak), które mogą przyczynić się do zastosowania nieodpowiednich narzędzi lub
urządzeń. Czynniki związane z materiałem stanowią 3 przyczyny, tj. uszkodzone
części (elementy), nieodpowiednie partie surowców oraz ich zła jakość.
Specjalną przyczyną niestabilności procesu w kategorii metody może być
nieodpowiednie dopasowanie wyposażenia do konkretnego procesu.

LITERATURA

1. Liwowski, R. Kozłowski, Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją, Wolters Kluwer Polska, 2007.
2. Mazurczak J., Gania I., Kryteria klasyfikacji warunków organizowania systemów produ-
kcyjnych, Logistyka i zarządzanie produkcją. Reg. Fertsch M., Grzybowska K., Stachowiak
A., Politechnika Poznańska, Poznań 2008.
3. Common and Special Causes of Variation, Statistical Inference, Statistical Control Charts,
Australian National University, 2006.
4. Encyclopedia of Production and Manufacturing Management, red. Paul M. Swamidass,
Kluwer Academic Publishers, Massachusetts 2000.
5. Łańcucki J., Zarządzanie jakością w przedsiębiorstwie, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu
Organizacyjnego, Bydgoszcz 1995.

DETERMINANTS OF MANUFACTURING PROCESSES INSTABILITY

Abstract

The article describes the production processes taking into account the manufacturing
processes. The conditions that must be satisfied so the manufacturing process can be
described as stable were defined. On this basis the definition of instability manufacturing
process was settled, and the factors affecting the instability divided into natural causes
and special causes were presented. For each of the group different possible processes'
interference causes were assigned. Using the cause-and-effect diagram each of the
causes were qualified for one of the groups involved in the process of describing the
man, machine, material, method, management and the environment.

Based on this analysis the largest group of causes were determined – natural causes of process instability can be classified as the cause of the method and the environment, and for special causes, factors associated with the machines.

Keywords: manufacturing process, instability, factors of instability

DETERMINANTY NIESTABILNOŚCI PROCESÓW WYTWÓRCZYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono podział procesów produkcyjnych, na podstawie którego określono jego ogólny schemat, uwzględniający procesy wytwórcze. Opisano warunki, jakie musi spełniać proces produkcyjny, aby można go było nazwać stabilnym. Na tej podstawie zdefiniowano niestabilność procesu produkcyjnego, a także przedstawiono podział czynników wpływających na niestabilność na przyczyny naturalne oraz przyczyny specjalne. Do każdej z grup przyporządkowano poszczególne potencjalne przyczyny zakłóceń procesów. Wykorzystując diagram przyczynowo-skutkowy zakwalifikowano każdą z przyczyn do jednej z grup opisujących udział w procesie człowieka, maszyn, materiału, metody, kierownictwa oraz otoczenia. Na podstawie tej analizy określono, iż najliczniejszą grupę przyczyn naturalnych niestabilności procesu mogą stanowić przyczyny zakwalifikowane do kategorii związanych z metodą oraz otoczeniem, a do przyczyn specjalnych, czynniki związane z maszynami.

Słowa kluczowe: proces wytwórczy, niestabilność, czynniki

Mgr inż. Joanna HELMAN
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
50-371 Wrocław, ul. Łukasiewicza 5
tel./fax.: (0-71) 320 43 84
e-mail: joanna.helman@pwr.wroc.pl



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Zadanie współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach
Europejskiego Funduszu Społecznego

ZASTOSOWANIE ANALIZY SKUPIEŃ ORAZ METODY PARAMETRYCZNEJ W SZACOWANIU KOSZTÓW WE WCZESNYCH FAZACH PROCESÓW INNOWACJI

Wstęp

Wdrażanie innowacji jest obecnie jednym z najskuteczniejszych sposobów sprostania wymaganiom globalnego rynku. To także bardzo efektywny element w rozwoju przedsiębiorstw i rywalizacji konkurencyjnej. Wdrażanie innowacji przebiega wskutek realizacji procesów innowacji, a te z kolei wymagają właściwego zarządzania. Trudności występują już na etapie planowania i związane są z występującą niepewnością osiągnięcia zamierzonych celów. Wynika to z podstawowej cechy procesów innowacji, która powoduje, że wyniki realizacji kolejnych faz procesu mają wpływ na przebieg faz następnych. Dotyczy to przede wszystkim zadań realizowanych w ramach badań i rozwoju. Niepewność towarzysząca procesom innowacji sprawia, że mają one bardzo dynamiczny charakter poprzez konieczność ciągłego podejmowania decyzji. W takich warunkach planowanie procesów innowacji i ich realizacja są bardzo trudne.

Plany procesów innowacji są często aktualizowane i uszczegóławiane wraz z postępowaniem prac i stosownie do uzyskiwanych wyników częściowych. Jednym z istotnych kryteriów, które ma wpływ na podejmowanie decyzji podczas planowania procesu innowacji są koszty. Wysokość kosztów procesu ma często decydujące znaczenie przy podejmowaniu decyzji o uruchomieniu, kontynuacji czy też przerwaniu procesu innowacji. Z tego powodu właściwe ich oszacowanie uwzględniając odpowiedni poziom dokładności jest ważnym elementem w zarządzaniu procesami innowacji.

Problemy związane z szacowaniem kosztów były podejmowane w pracach takich autorytetów innowacji jak Kaplan czy Cooper [1]. Wskazując na wagę problematyki szacowania kosztów innowacji zwracali oni również uwagę na małą skuteczność tradycyjnych metod kalkulacji kosztów w odniesieniu do procesów innowacji. Wiele prac przedstawia problemy szacowania kosztów, lecz brakuje kompleksowego podejścia do problemu, które opisywałoby

znaczenie szacowania kosztów w planowaniu procesów innowacji i ich wpływ na jakość podejmowanych decyzji. Z tych względów podjęto się realizacji projektu, który ma za cel opracowanie wytycznych do wyznaczania poziomu przewidywanych kosztów planowanych procesów innowacji wskazując również na metody umożliwiające uzyskanie informacji kosztowych o odpowiedniej dokładności. Niniejsze opracowanie przedstawia fragment badań w zakresie metod szacowania kosztów. Skupiono się w nim na omówieniu proponowanych metod w odniesieniu do ustalenia poziomu kosztów we wczesnych etapach procesu innowacji.

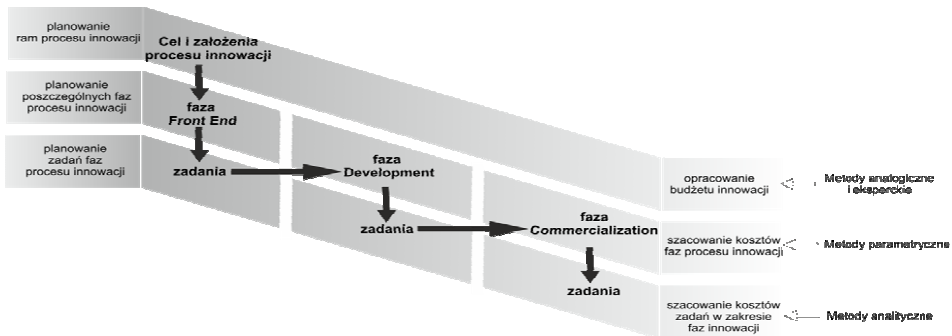
1. Szacowanie kosztów procesu innowacji

Wiedza na temat kosztów, jakie zostaną poniesione przy realizacji procesu innowacji stanowi ważny element w podejmowaniu decyzji. Mają one duże znaczenie przy opracowywaniu planów wdrażania innowacyjnych rozwiązań. Przede wszystkim pozwalają na ocenę opłacalności tak ryzykownego przedsięwzięcia, jakim jest realizacja zadań znacząco odbiegających od tych, które realizowane są w bieżącej działalności przedsiębiorstwa. Procesy innowacji cechuje duża dynamika w związku z sekwencyjnym charakterem procesu oraz niepewnością w osiąganiu zamierzonych celów [2]. Tylko informacje o wysokim poziomie jakości pozwalają na podejmowanie właściwych decyzji umożliwiających sprawny przebieg procesu innowacji.

Koszty procesu, które są głównym czynnikiem decyzyjnym w zakresie prowadzenia procesów innowacji, są tym rodzajem informacji, do której powinno się przywiązywać ogromną wagę. Ze względu na unikalny charakter procesów innowacji do problemu szacowania kosztów należy podejść bardzo poważnie. Badania przeprowadzone w polskich przedsiębiorstwach wskazują na brak takiego podejścia. Koszty procesów innowacji szacowane są wyłącznie w początkowej fazie wyłącznie w celu określenia przyszłych nakładów finansowych. Ten moment nie pozwala na uzyskanie dokładnych informacji. Niepewność lub brak wielu niezbędnych danych do przeprowadzenia szacowania kosztów sprawia, że wykorzystuje się wyłącznie metody intuicyjne. Błędy w tym przypadku dochodzą do kilkudziesięciu procent. To efekt braku dostatecznej wiedzy oraz doświadczenia w zakresie prowadzenia procesów innowacji. Również nie przywiązuje się wagi do szacowania kosztów w trakcie realizacji procesu innowacji, a jest to niezbędne dla weryfikacji wcześniejszych wyników oraz umożliwia podejmowanie stosownych działań w przypadku przekroczenia założonego budżetu.

Proces innowacji składa się z trzech głównych faz. Ich szeregowe ułożenie zgodnie z ideą Stage-Gate sugeruje, że każda z nich odrębne cele i stopień ich osiągnięcia ma istotne znaczenie dla faz kolejnych [3]. Proces innowacji można także podzielić na poziomy, które określają szczegółowość w zakresie planów realizacji (rys. 1). Poziom pierwszy to określenie głównego celu procesu

innowacji, jego ram czasowych oraz typu innowacji (produktowej, procesowej, organizacyjnej, rynkowej). Drugi poziom, to określenie celów do osiągnięcia w ramach każdej z faz. Trzeci poziom o charakterze operacyjnym, to zaplanowanie zadań koniecznych do wykonania aby osiągnąć cele z poziomu wyższego. Każdy z poziomów pozwala na podejmowanie decyzji w oparciu o różne jakościowo dane. Poziom najwyższy cechuje duża niepewność. Dane będą niepełne. Na najniższym poziomie można już uzyskać dane o dużej dokładności. W zakresie szacowania kosztów można więc będzie uzyskiwać wyniki o mniejszej dokładności na poziomie planowania ram procesu innowacji, aż po wyniki o dużej dokładności na poziomie planowania zadań operacyjnych.



Rys. 1. Przebieg szacowania kosztów w procesie innowacji

Z tego powodu szacowanie kosztów procesów innowacji podzielono na trzy główne etapy (rys. 1) [4]:

- etap budżetowania – obejmujący szacowanie kosztów w momencie określenia obszaru innowacji, zdefiniowania celu innowacji, rodzaju innowacji oraz jej horyzontu czasowego,
- etap szacowania kosztów faz procesu innowacji – oszacowane są orientacyjne koszty poszczególnych faz procesu innowacji na podstawie opracowanych celów częściowych opisujących efekty, jakie dana faza powinna przynieść,
- etap szacowania kosztów zadań w ramach faz procesu innowacji – umożliwia najdokładniejsze szacowanie kosztów na podstawie szczegółowych planów realizacji poszczególnych faz opisujących zadania do przeprowadzenia z przydzielonymi do nich zasobami.

Ze względu na dostępność danych, każdy etap wymaga zastosowania innej metody szacowania kosztów. Metody eksperckie oraz analogiczne będą miały zastosowanie przy ustalaniu budżetu. Metody parametryczne przy określaniu ram innowacji, a metody analityczne znajdą zastosowanie na etapie planowania zadań. Ta różnorodność metod pozwoli na uzyskiwanie odpowiedniej dokładności wyników oraz umożliwi ich weryfikację. Wśród wymienionych metod

można znaleźć wiele odmian, które można dopasować do rodzaju innowacji, która będzie wdrażana w wyniku planowanego procesu. Ponieważ od metod opartych na intuicji znacznie lepsze rezultaty dają metody wykorzystujące dane empiryczne w dalszej części artykułu przedstawione zostaną przykłady metod, które można wykorzystać do szacowania kosztów na poziomie budżetowania oraz szacowania kosztów faz procesu innowacji.

2. Zastosowanie analizy skupień w budżetowaniu procesów innowacji

W sytuacji, gdy przedsiębiorstwo posiada już szereg zrealizowanych procesów innowacji możliwe jest wykorzystanie ich jako materiału porównawczego. Na etapie budżetowania można wykorzystać metody analogiczne, które pozwolą na oszacowanie kosztów w oparciu o dane historyczne. Metody te polegają na określeniu podobieństwa z przypadkami, które już miały miejsce. Odpowiedni stopień podobieństwa pozwala na założenie, że koszty będą kształtowały się na podobnym poziomie.

Przykładem takich metod są metody oparte na grupowaniu i klasyfikacji obiektów. Jedną z nich jest analiza skupień (ang. cluster analysis) [5]. Polega na organizowaniu obserwowanych danych w sensowne struktury lub grupy poprzez analizę podobieństw w elementach poddanych badaniom według założonych kryteriów. Czyli zadaniem analizy skupień jest wyszukiwanie w badanej zbiorowości elementów w ten sposób, aby utworzyć grupy (skupienia), w których pod względem określonych cech elementy te będą do siebie jak najbardziej podobne i jednocześnie maksymalnie inne niż w pozostałych grupach. Tworzenie grup nazywa się aglomerowaniem lub agregacją. Zaletą analizy skupień w porównaniu do innych metod bazujących na ustalaniu podobieństw jest możliwość wykorzystania do porównania wielu kryteriów, które mogą być opisywane nie tylko ilościowo ale również jakościowo.

Podstawą do tworzenia skupień są miary odległości będące funkcjami wartości cech elementów. Najbardziej popularne miary odległości to [6]:

- odległość Euklidesa – najbardziej naturalna metryka reprezentująca odległość geometryczną w przestrzeni wielowymiarowej,
- kwadrat odległości euklidesowej – stosowana, gdy zamierza się przypisać większą wagę obiektom, które są bardziej oddalone,
- odległość miejska – podobna do odległości euklidesowej, lecz osłabia znaczenie dalej oddalonych elementów,
- odległość Czebyszewa – stosowana, gdy różnica między elementami jest nieznaczna i dotyczy np. w niewielkim stopniu tylko jednej z cech.

Ponieważ do określenia odległości konieczna jest możliwość porównywania wartości różnorodnych cech, dlatego stosowanie jakiegokolwiek z miar odległości wymaga wcześniejszej standaryzacji cech. Przyporządkowanie danej grupie nowego elementu pozwala na przypisanie mu wartości cech opisujących to skupienie. Ten fakt można wykorzystać przy szacowaniu kosztów procesów

innowacji. Na podstawie znanych cech opisujących proces innowacji należy odszukać najbliższe skupienie stosując odpowiednią metrykę. Koszt charakteryzujący te skupienie można będzie przyjąć jako przewidywany koszt nowego procesu innowacji.

3. Przykład zastosowania analizy skupień do określania budżetu innowacji

W celu przedstawienia idei zastosowania analizy skupień w zakresie ustalenia budżetu projektu o charakterze innowacji korzysta się ze zbioru danych o projektach zrealizowanych w przeszłości. Za przykład posłuży przypadek firmy produkującej armaturę przemysłową z województwa opolskiego. Firma ta ma ugruntowaną pozycję w branży na polskim rynku. Produkuje elementy armatury przemysłowej, głównie zawory, zasuwy, osadniki i kłapy. Wieloletnie doświadczenie i posiadana wiedza pozwala na produkowanie armatury o bardzo szerokim zakresie parametrów. Ustabilizowana pozycja rynkowa oraz konieczność dotrzymywania norm sprawia, że wszelkiego rodzaju innowacje mają charakter usprawniający. Polegają one na modyfikacjach istniejących wyrobów np. poprzez zastosowanie zmian w konstrukcji poprawiających przepływ czynnika, lub wprowadzania zmian w zakresie realizowanych procesów technologicznych np. zamiast azotowania powierzchni siedliska zastosowano napawanie stellite. Podany przykład dotyczy kolejnego rozwiązania innowacyjnego, które związane jest ze zmianą kształtu kanału ograniczającego opory przepływu. Do analizy wybrano szereg wcześniej zrealizowanych innowacji o podobnym charakterze. Charakterystycznymi zmiennymi będą w tym przypadku średnica zaworu, ciśnienie zaworu, typ zaworu oraz koszt procesu innowacji. Ze względu na poufność danych wartości kosztów zostały określone procentowo zakładając, że koszt jednego z wariantów wynosi 100%. Koszty pozostałych wariantów zostały przedstawione relatywnie do wariantu podstawowego. Dane wraz z wartościami zmiennych zostały przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Dane do analizy skupień

Nr wariantu	Średnica [mm]	Ciśnienie [bar]	Typ	Koszt [%]
1	40	40	1	100
2	65	40	1	125
3	65	63	1	140
4	100	40	2	180
5	25	63	3	90
6	40	63	3	120
7	120	63	2	210
8	32	100	2	160
9	50	100	1	170
10	80	100	3	190

Typ: 1-zawór zaporowy prosty, 2- zawór zaporowy kątowy, 3- zawór zaporowy skośny

Ze względu na różnice w jednostkach zastosowanych zmiennych, aby można było dokonać ich porównywania konieczne jest przeprowadzenie standaryzacji posługując się wzorem:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (1)$$

gdzie: z_{ij} – wartość po normalizacji,
 x_{ij} – rzeczywista wartość zmiennej,
 $\bar{x}_j$ – wartość średnia,
 S_j – odchylenie standardowe.

Tabela 2 pokazuje wynik standaryzacji danych. Dzięki niej wszystkie cechy są porównywalne. Mają tę samą wartość średniej i odchylenia standardowego.

Tab. 2. Wyniki przeprowadzonej standaryzacji danych

Dane wejściowe					Standaryzacja			
Wariant	Średnica	Ciśnienie	Typ	Koszt	Średnica	Ciśnienie	Typ	Koszt
1	40	40	1	100	-0,70	-1,10	-1,03	-1,22
2	65	40	1	125	0,11	-1,10	-1,03	-0,59
3	65	63	1	140	0,11	-0,17	-1,03	-0,21
4	100	40	2	180	1,24	-1,10	0,11	0,79
5	25	63	3	90	-1,19	-0,17	1,26	-1,47
6	40	63	3	120	-0,70	-0,17	1,26	-0,71
7	120	63	2	210	1,89	-0,17	0,11	1,54
8	32	100	2	160	-0,96	1,32	0,11	0,29
9	50	100	1	170	-0,38	1,32	-1,03	0,54
10	80	100	3	190	0,59	1,32	1,26	1,04
$\bar{x}_j$	61,70	67,20	1,90	148,50	0,00	0,00	0,00	0,00
S_j	30,79	24,76	0,88	39,86	1,00	1,00	1,00	1,00

Kolejny etap polega na obliczeniu odległości, które będą podstawą do definiowania kolejnych skupień. Naturalną miarą odległości jest odległość Euklidesowa obliczana według wzoru:

$$d(x_i, x_k) = d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{kj})^2} \quad (2)$$

gdzie: x_{ij} – wartość obiektu x_i pod względem cechy j ,
 p – liczba cech.

Na podstawie obliczonych odległości tworzy się macierz odległości $D=[d_{ik}]$ (tab. 3). Kolejność w dalszym postępowaniu dla ustalenia skupień obiektów podobnych jest realizowana poprzez:

1. Znalezienie pary obiektów najbardziej podobnych i połączenie je w jedno skupienie – w sensie najmniejszej odległości. Obiekty te zastąpione będą od tej pory jednym, o współrzędnych punktu ciężkości skupienia zgodnie z wzorem (tab. 4):

$$\bar{X} = \left| \bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p \right| \quad (3)$$

gdzie: $\bar{X}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_{ij}$,

r – liczba obiektów w danym skupieniu,

p – liczba cech opisujących obiekty.

2. Zredukowanie wymiaru macierzy D o jeden (dwa obiekty zostały zastąpione jednym) i przeliczeniu odległości pomiędzy nowym skupieniem, a pozostałymi obiektami (tab. 5).

Kroki te powtarzamy aż do uzyskania jednego skupienia zawierającego wszystkie obiekty.

Tab. 3. Pierwsza macierz odległości

Macierz odległości – Krok 1										
Skupienia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	1,03	1,59	3,02	2,53	2,52	4,07	3,08	3,01	4,23
2	1,03	0,00	1,00	2,12	2,92	2,60	3,15	3,02	2,72	3,74
3	1,59	1,00	0,00	2,11	2,91	2,48	2,75	2,22	1,74	3,04
4	3,02	2,12	2,11	0,00	3,63	2,87	1,36	3,32	3,14	2,77
5	2,53	2,92	2,91	3,63	0,00	0,90	4,46	2,58	3,48	3,42
6	2,52	2,60	2,48	2,87	0,90	0,00	3,63	2,15	3,02	2,65
7	4,07	3,15	2,75	1,36	4,46	3,63	0,00	3,46	3,12	2,34
8	3,08	3,02	2,22	3,32	2,58	2,15	3,46	0,00	1,31	2,07
9	3,01	2,72	1,74	3,14	3,48	3,02	3,12	1,31	0,00	2,53
10	4,23	3,74	3,04	2,77	3,42	2,65	2,34	2,07	2,53	0,00

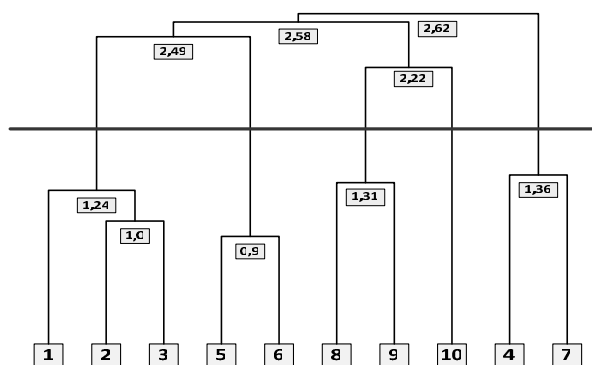
Tab. 4. Lista skupień po realizacji pierwszego etapu

Dane do realizacji kroku 2				
Wersja	Średnica	Ciśnienie	Typ	Koszt
1	-0,70	-1,10	-1,03	-1,22
2	0,11	-1,10	-1,03	-0,59
3	0,11	-0,17	-1,03	-0,21
4	1,24	-1,10	0,11	0,79
5,6	-0,95	-0,17	1,26	-1,09
7	1,89	-0,17	0,11	1,54
8	-0,96	1,32	0,11	0,29
9	-0,38	1,32	-1,03	0,54
10	0,59	1,32	1,26	1,04

Tab. 5. Macierz odległości uwzględniająca nowe skupienie

Macierz odległości - Krok 2									
Skupienia	1	2	3	4	5,6	7	8	9	10
1	0,00	1,03	1,59	3,02	2,48	4,07	3,08	3,01	4,23
2	1,03	0,00	1,00	2,12	2,73	3,15	3,02	2,72	3,74
3	1,59	1,00	0,00	2,11	2,67	2,75	2,22	1,74	3,04
4	3,02	2,12	2,11	0,00	3,24	1,36	3,32	3,14	2,77
5,6	2,48	2,73	2,67	3,24	0,00	4,04	2,33	3,23	3,03
7	4,07	3,15	2,75	1,36	4,04	0,00	3,46	3,12	2,34
8	3,08	3,02	2,22	3,32	2,33	3,46	0,00	1,31	2,07
9	3,01	2,72	1,74	3,14	3,23	3,12	1,31	0,00	2,53
10	4,23	3,74	3,04	2,77	3,03	2,34	2,07	2,53	0,00

Po doprowadzeniu do uzyskania jednego skupienia zawierającego wszystkie obiekty należy przyrzeć się uważnie kolejnym odległościom, które posłużyły do łączenia obiektów w grupy. Celem jest ustalenie optymalnej liczby skupień, najlepiej oddających podobieństwo obiektów ze względu na analizowane cechy. W tym wypadku można posłużyć się dendrogramem (rys. 2).

**Rys. 2. Przebieg szacowania kosztów w procesie innowacji**

Wybór najlepszej liczby skupień jest często podejmowany subiektywnie na podstawie analizy odległości. Jeżeli wartości zaczynają znacząco rosnąć, oznacza to, że podobieństwo pomiędzy obiektami jest mniejsze i jest to sygnał do zakończenia procedury aglomeracji obiektów. W analizowanym przypadku tak właśnie postąpiono, wybierając pięć skupień:

- skupienie I z obiektami 1, 2 i 3,
- skupienie II z obiektami 5 i 6,
- skupienie III z obiektami 8 i 9,
- skupienie IV jednoelementowe z obiektem 10,
- skupienie V z obiektami 4 i 7.

Zdefiniowanie skupień, które reprezentują podobne przypadki realizowanych procesów innowacji, dają możliwość skonfrontowania z nimi nowo planowanego procesu innowacji o podobnym charakterze. Celem jest określenie przewidywanego kosztów procesu innowacji na podstawie największego podobieństwa do jednego ze skupień. Nowo projektowany wyrób posiada znane cechy: średnicę 50 mm, ciśnienie robocze 63 bary oraz typ 3, ponieważ będzie to zawór zaporowy skośny. Po przeprowadzeniu standaryzacji tych cech, korzystając ze wzoru (1), obliczane są odległości do kolejnych skupień (tab. 6). Najbliższa odległość wyznaczy najwyższy stopień podobieństwa. Przewidywany koszt procesu innowacji dla tego rozwiązania będzie kosztem charakteryzującym wskazane skupienie.

Tab. 6. Wartości cech nowego obiektu oraz jego odległości od istniejących skupień

Cechy nowego obiektu				Odległości do środków skupień		
	Średnica	Ciśnienie	Typ	I	1,2,3	2,39
	50,00	63,00	3,00	II	5,6	0,57
po standaryzacji	-0,38	-0,17	1,26	III	8,9	2,29
				IV	10	1,78
				V	4,7	2,31

Największe podobieństwo występuje ze skupieniem nr II. Współrzędne środka tego skupienia to -0,95, -0,17, 1,26, -1,09. Koszt jest opisany ostatnią współrzędną. Uwzględniając, że została ona poddana standaryzacji należy ustalić jej rzeczywistą wartość. W tym przypadku jest to 105. W ten sposób otrzymano przewidywany koszt procesu innowacji dla nowo projektowanego zaworu.

4. Przykład zastosowania metody parametrycznej do szacowania kosztów procesu innowacji

Modele parametryczne wykorzystują metody statystyczne i wyrażają koszty jako funkcje zmiennych, których wartości odzwierciedlają poziom kosztów. Techniki parametryczne są skuteczne w sytuacjach, gdy można jednoznacznie i w sposób prosty wyodrębnić te zmienne. Należą one do szybkich metod szacowania kosztów, ale uzależnienie kosztów od jednego czynnika w prostym modelu regresji może nie dawać satysfakcjonującej dokładności wyników. Przy zastosowaniu większej liczby czynników determinujących koszt, wyniki są dokładniejsze, ale w związku z tym modele regresji są bardziej złożone i wymagają większego nakładu pracy [7]. Metody parametryczne ze względu na swoje zalety są chętnie stosowane do szacowania kosztów we wczesnych fazach projektowania. Częściej wykorzystuje się je do szacowania kosztów nowo projektowanych wyrobów niż do szacowania kosztów projektów [8].

Do zaprezentowania metody parametrycznej wykorzystany zostanie wyrób, dla którego koszty procesu innowacji szacowano z wykorzystaniem analizy skupień. Tym razem metoda parametryczna dotyczy kolejnej z faz procesu innowacji – fazy development. O ile na etapie budżetowania dysponuje się bardzo niepewnymi informacjami (pod uwagę brano wyroby o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych określonych cechą typ), o tyle na etapie rozwoju (development) parametry przyszłego innowacyjnego produktu są już bardziej sprecyzowane. W przytoczonym przypadku postanowiono, że projektowany zawór będzie zaworem zwrotnym skośnym – typ 3. W tym wypadku metoda parametryczna będzie uwzględniać tylko zawory o tej konstrukcji. Do opracowania modelu parametrycznego wzięto 14 reprezentantów wyrobu oraz zastosowano parametr średnicy nominalnej (tab. 7).

Tab. 7. Dane wejściowe do metody parametrycznej

Średnica nominalna [mm]	Koszt procesu [%]
15	74,00
20	82,00
25	90,00
32	100,00
40	111,00
50	128,00
65	142,00
80	161,00
100	178,00
125	198,00
150	217,00
200	286,00
250	326,00
300	365,00

Koszt podobnie jak w poprzednim przykładzie, z uwagi na poufność informacji, ustalono jako udział procentowy w odniesieniu do zaworu o średnicy 32 mm, który przyjęto za wzorcowy. Metoda polega na opisanu zależności pomiędzy kosztem a parametrem średnica nominalna. Konieczne jest w tym wypadku znalezienie wartości stałych a i b .

$$K = ad_n + b \quad (4)$$

gdzie: K – koszt montażu
 d_n – średnica nominalna zaworu,
 a, b – stałe.

Do obliczenia stałych a i b wykorzystana zostanie metoda najmniejszych kwadratów. Polega ona na znalezieniu takich wartości ocen parametrów strukturalnych modelu, by suma kwadratów odchyleń empirycznych wartości zmiennej objaśnianej od jej wartości teoretycznych wyznaczonych z modelu była jak najmniejsza. Warunek ten można opisać następująco:

$$\sum_{t=1}^n e_t^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

gdzie: $e_t = K_t - b - ad_{nt}$ – odchylenia rzeczywistych wartości od jej wartości teoretycznych, czyli tzw. reszty modelu.

Wyznaczenie pochodnych cząstkowych względem a i b i przyrównaniu ich do zera pozwala na otrzymanie następujących wzorów:

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n (K_t - \bar{K})(m_t - \bar{m})}{\sum_{t=1}^n (m_t - \bar{m})^2}, \quad b = \bar{K} - a\bar{m} \quad (6)$$

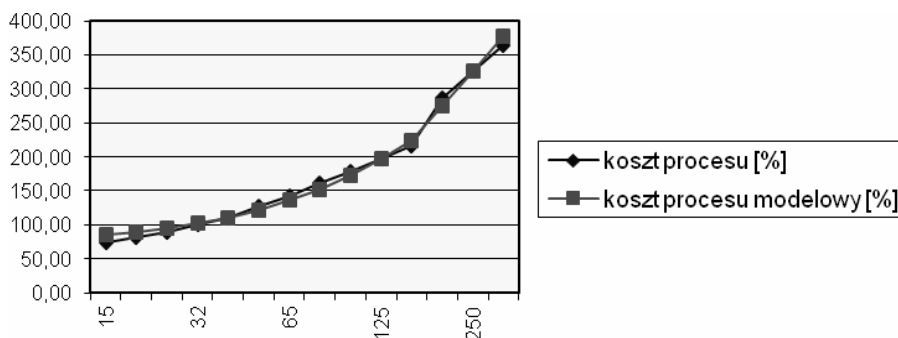
gdzie: $\bar{K}, \bar{m}$ - średnie arytmetyczne zmiennych K i m .

Na podstawie powyższych wzorów obliczono obie stałe, które wyniosły:

$$a = 1,0233, \quad b = 69,4449$$

Zatem model parametryczny jest opisany funkcją:

$$K = 1,0233 d_n + 69,449 \quad (7)$$



Rys. 3. Dopasowanie modelu do danych empirycznych

Dla stwierdzenia, czy zbudowany model jest poprawny należy przeprowadzić jego weryfikację. W tym celu:

- określono poziomy istotności dla parametru a i b,
- obliczono wartości błędów względnych,
- obliczono współczynnik determinacji
- wykonano test symetrii i test liczby serii,
- sprawdzono warunek stacjonarności
- przeprowadzono autokorelację za pomocą testu Durбина-Watsona.

Wszystkie testy dały wyniki pozytywne, co wskazuje na poprawność modelu. Obliczenie kosztu procesu innowacji dla nowego produktu jest więc możliwe za pomocą funkcji (7). Zatem koszt ten wynosi:

$$K = 1,0233 \cdot 50 + 69,449 = 131,1$$

Otrzymany wynik różni się od tego, który uzyskano w wyniku analizy skupień. Czy jest dokładniejszy? Z całą pewnością tak. Analiza skupień bazuje na podobieństwie ustalonym na podstawie przynależności do danego skupienia. W takim przypadku przyjmuje się jako wartości reprezentatywne te, które opisują środek skupienia. To sprawia, że z pewnością należy liczyć się ze znacznymi błędami. Metoda parametryczna to znacznie precyzyjniejsze narzędzie. Wyznaczona funkcja określająca zależność pomiędzy parametrami daje dokładne wyniki. Błędy mogą być nieznaczne i wynikające z niewystarczająco dużej liczby danych do opracowania modelu oraz ograniczonej liczby parametrów opisujących szukaną wielkość. Dlatego lepiej zastosować model liniowy z wieloma zmiennymi, co poprawi dokładność otrzymywanych wyników.

5. Wnioski

Szacowanie kosztów w przypadku każdego przedsięwzięcia stanowi duże wyzwanie dla menadżerów. W przypadku procesów innowacji jest to szczególnie trudny problem do rozwiązania ze względu na niemożliwość opracowania stabilnych planów realizacji. Zmienność procesów innowacji i niepewność informacji nie pozwalają ufać wynikom uzyskanym za pomocą jednej metody i prowadzonych jednorazowo. Z tego powodu opracowano modelowe podejście do szacowania kosztów procesów innowacji, które uwzględnia specyfikę tych procesów. Wraz z zaawansowaniem procesu innowacji uzyskiwane są nowe dane, i ten fakt należy wykorzystać do weryfikacji wyników. Dlatego trzystopniowy proces szacowania kosztów i różne metody. Przedstawione w pracy dwie wybrane metody stanowią przykład o słusznym założeniu dotyczącym wieloetapowego procesu szacowania. Obie metody dotyczyły sytuacji, gdy dysponuje się danymi empirycznymi, ale istnieje również wiele metod, które umożliwiają oszacowanie kosztów bez posiadania danych historycznych. Różnorodność metod pozwala na dopasowanie ich do każdego procesu innowacji.

Projekt sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu badawczego Nr 4025/B/H03/2011/40 pt.: "Opracowanie modelu planowania i szacowania kosztów innowacji".

LITERATURA

1. Cooper, R., Kaplan, R. S.: How Cost Accounting Distorts Product Costs. *Management Accounting*, 1988, No 69/10, pp. 20–27.
2. Rothwell R.: Successful industrial innovation: critical factors for the 1990s'. *R&D Management*, Vol. 22, No. 3, 1992, pp.221–39.
3. Cooper R. G.: *Winning at new products: Accelerating the process from idea to launch*. Basic Books, New York 2001.
4. Chwastyk P.: The possibility of applying the selected cost estimation techniques in innovation processes. *Innovation in Management and Production Engineering*. Oficyna Wydawnicza PTZP, Opole 2013, pp. 18-28.
5. Gatnar E., Walesiak M.: *Metody statystycznej analizy wielowymiarowej w badaniach marketingowych*. Wydawnictwo AE, Wrocław, 2004.
6. Grabiński T.: *Metody taksonometrii*. Wydawnictwo AE, Kraków, 1988.
7. Cavalieri, S., Maccarrone, P., Pinto, R.: Parametric Vs Neural Network Models for the Estimation of Production Costs: A Case Study in the Automotive Industry. *The International Journal of Production Economics*, 2004, No 91/2, pp. 165–177
8. Dewhurst, P., and Boothroyd, G.: Early Cost Estimating in Product Design. *The Journal of Manufacturing Systems*, 1988, No 7/3, pp. 183–191.

THE COST ESTIMATION IN THE EARLY STAGES OF INNOVATION PROCESS WITH USE THE CLUSTER ANALYSIS AND PARAMETRIC METHOD

Abstract

The article concerns the problem the cost estimating of innovation processes. The costs are often the most important criterion for assessing the cost-effectiveness of the implementation of innovative solutions. They are also an important element in decision-making in the planning and implementation of innovation processes. This paper presents an approach to cost estimating of innovation processes, which involves a three-step estimation. It also presents examples of the use of cluster analysis and parametric method to cost estimation in the early stages of the innovation processes.

Keywords: innovation process, cost estimation, cluster analysis, parametric method.

ZASTOSOWANIE ANALIZY SKUPIEŃ ORAZ METODY PARAMETRYCZNEJ W SZACOWANIU KOSZTÓW WE WCZESNYCH FAZACH PROCESÓW INNOWACJI

Streszczenie

Artykuł dotyczy problemu szacowania kosztów procesów innowacji. Koszty stanowią często najważniejsze kryterium oceny opłacalności wdrażania rozwiązań innowacyjnych. Są także ważnym elementem w podejmowaniu decyzji przy planowaniu i realizacji procesów innowacji. W artykule przedstawiono podejście do szacowania kosztów procesów innowacji, które zakłada trzystopniowy sposób szacowania. Zaprezentowano także przykłady zastosowania analizy skupień oraz metody parametrycznej w szacowaniu kosztów na wczesnych etapach procesu innowacji.

Słowa kluczowe: proces innowacji, szacowanie kosztów, analiza skupień, metoda parametryczna.

Dr inż. Piotr CHWASTYK
Dr inż. Magdalena JURCZYK-BUNKOWSKA
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
tel./fax.: (0-77) 44 98 849
e-mail: p.chwastyk@po.opole.pl
m.jurczyk-bunkowska@po.opole.pl

METODA PROJEKTOWANIA PROCESU TECHNOLOGICZNEGO WSPOMAGANEGO SYSTEMEM DORADCZYM

Wstęp

Konkurencja istniejąca na rynku wymusza na producentach maszyn i urządzeń sięganie po efektywne narzędzia, pozwalające na maksymalne skrócenie czasu przygotowania procesu produkcyjnego. Celem technologicznego przygotowania produkcji jest optymalne rozwiązanie problemów związanych z projektowaniem struktury procesu technologicznego, przy uwzględnieniu założonych kryteriów oraz występujących aktualnie ograniczeń. Podejmowane działania powinny prowadzić do uzyskania wyrobu, który spełnia warunki dotyczące dokładności wymiarowo-kształtowe oraz jakości powierzchni przy założeniu minimalizacji kosztów produkcji [1, 2].

Ogólnie problemy związane z projektowaniem procesów technologicznych można podzielić na dwa rodzaje. Do pierwszego rodzaju można zaliczyć problemy o znanym algorytmie rozwiązania. Są to problemy związane m.in. z doбором parametrów skrawania w obróbce elementów maszyn. Rozwiązanie najczęściej jest zawarte w dostępnych normatywach, tabelach i instrukcjach technologicznych. Do drugiego rodzaju należą problemy, których rozwiązanie jest ściśle zależne od warunków produkcyjnych przedsiębiorstwa związanych z posiadanym parkiem maszynowym. Przykładami takich problemów są: opracowanie planu operacji procesu technologicznego, wybór maszyn i urządzeń technologicznych itp. Ważne jest, że problemy te bazują na wiedzy technologicznej pracowników przedsiębiorstwa [3, 4].

W aspekcie wspomagania rozwiązywania problemów, szczególnie drugiego rodzaju, w projektowaniu procesów technologicznych elementów maszyn, uzasadnione jest dążenie do opracowania systemu doradczego, w którym zgromadzona zostanie wiedza technologiczna, osadzona w realiach danego przedsiębiorstwa produkcyjnego. Zaletą stosowania systemów doradczych jest możliwość uzyskania wyselekcjonowanej i przeanalizowanej informacji, a także w pewnym sensie wspomaganie podejmowania nierutynowych decyzji w sposób interaktywny. Z tego powodu można je stosować we wspomaganiu realizacji planistycznych i decyzyjnych funkcji przedsiębiorstwa [4, 5, 6].

1. Analiza technicznego przygotowania produkcji

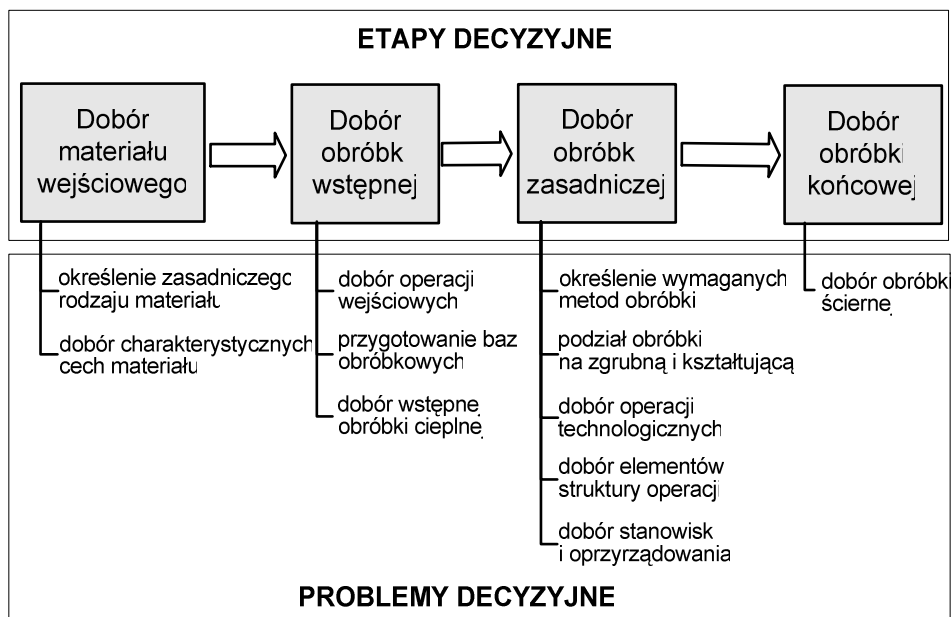
Punktem wyjściowym opracowania metody projektowania procesu technologicznego z zastosowaniem systemu doradczego jest analiza przygotowania produkcji wybranych elementów maszyn. Analiza ta prowadzi do wyboru problemów decyzyjnych rozwiązywanych przez system doradczy oraz określenia wymaganych zbiorów informacji wejściowych oraz wyjściowych.

Pod kątem możliwości zastosowania systemu doradczego należy badać następujące obszary przygotowania produkcji [2]:

- przygotowanie konstrukcyjne elementów maszyn – polega głównie na analizie cech konstrukcyjnych i fizycznych np. wymiarów geometrycznych, dokładności wymiarowo-kształtowych powierzchni, chropowatości powierzchni, występowanie obróbki cieplnej, twardości powierzchni, rodzaju powłoki galwanicznej,
- charakterystyka technologiczna systemu wytwarzania – związana jest z analizą możliwości wytwórczych danego zakładu produkcyjnego; są to np. dane techniczne obrabiarek, zakres zadań realizowanych na danym stanowisku technologicznym, baza przyrządów i uchwytów, narzędzi skrawających i pomiarowych,
- związki pomiędzy cechami elementów maszyn oraz strukturą procesów technologicznych – analiza ta prowadzi do określenia ogólnych i szczegółowych zasad opracowania procesów technologicznych np. doboru zabiegów technologicznych niezbędnych dla uzyskania wymaganych cech przedmiotu obrabianego,
- analiza możliwości tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjnych elementów oraz właściwych im procesów technologicznych – jest to najtrudniejszy etap, gdyż wymaga szczegółowej wiedzy z dziedziny produkcyjnej przedsiębiorstwa; polega na określeniu cech elementów maszyn możliwych do uzyskania w konkretnym systemie wytwarzania tzn. na danym parku maszynowym i oprzyrządowaniu technologicznym przedsiębiorstwa.

W celu zastosowania systemu doradczego przyjmuje się etapy decyzyjne w projektowaniu procesów technologicznych elementów maszyn. Kolejność etapów decyzyjnych wynika z doboru działań wytwórczych, mających na celu zwiększanie dokładności wymiarowo-kształtowej i nadawanie odpowiednich własności gotowym elementom [7].

W ramach poszczególnych etapów decyzyjnych wybierane są problemy właściwe dla postawionego celu cząstkowego. Dzięki temu możliwa jest identyfikacja zbiorów wiedzy potrzebnej do rozwiązania danego problemu, a następnie ich uporządkowanie według przyjętej metody budowy systemu doradczego. Na rys. 1 przedstawiono opracowanie przykładowych etapów decyzyjnych w projektowaniu procesów wraz z wyróżnionymi problemami.



Rys. 1. Etapy i problemy decyzyjne w projektowaniu procesów technologicznych

Zasoby wiedzy potrzebnej do rozwiązania wyróżnionych problemów decyzyjnych gromadzone są na podstawie analizy dokumentacji konstrukcyjno-technologicznej elementów maszyn oraz konsultacji z wybranymi pracownikami przedsiębiorstwa.

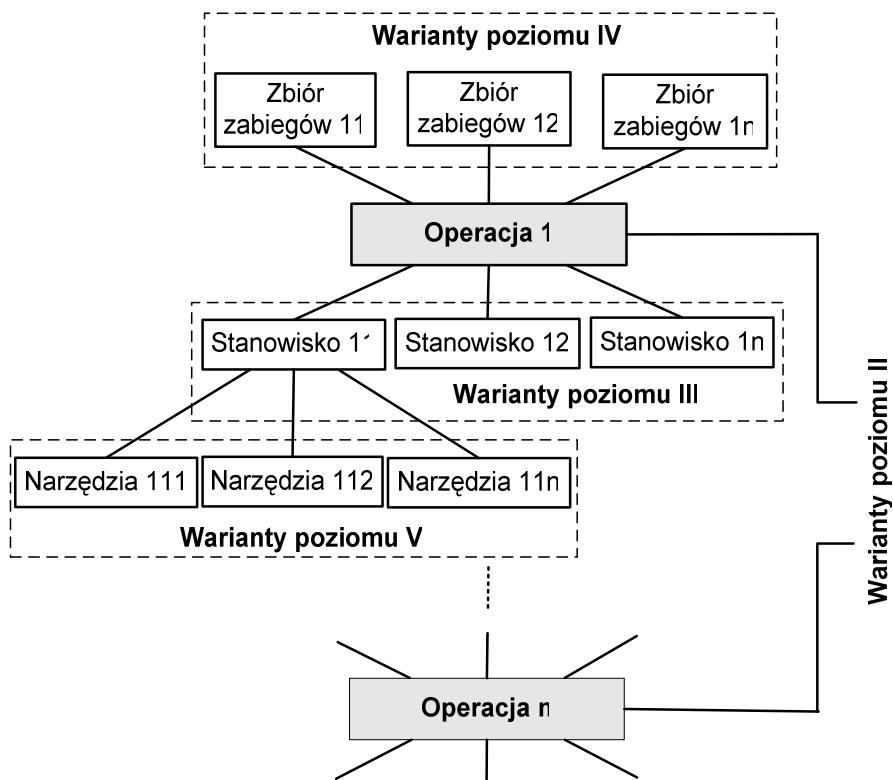
2. Opracowanie wielowariantowej struktury procesu technologicznego

Proces rozwiązywania problemów decyzyjnych wymaga utworzenia dopuszczalnych wariantów rozwiązań z punktu widzenia możliwości technologicznych systemu wytwarzania oraz optymalizacji produkcji w zakresie minimalizacji kosztów produkcji oraz czasu jednostkowego obróbki.

Uwzględniając stopień szczegółowości opisu struktury procesu technologicznego warianty tworzone są na następujących poziomach [8]:

- poziom I – warianty materiałów wejściowych,
- poziom II – warianty operacji technologicznych,
- poziom III – warianty stanowisk technologicznych,
- poziom IV – warianty zabiegów technologicznych,
- poziom V – warianty oprzyrządowania technologicznego.

Na rysunku 2 pokazano strukturę oraz związki zachodzące pomiędzy wariantami dla poziomów II÷V. Można zauważyć, że w miarę wzrostu poziomu tworzenia wariantów rośnie też poziom szczegółowości opisu procesu technologicznego.



Rys. 2. Schemat tworzenia wariantów technologicznych

Warianty na poziomie II są związane z liczbą i kolejnością operacji technologicznych, przeprowadzanych dla konkretnych elementów maszyn. Wybór odpowiedniego wariantu jest zależny przede wszystkim od wielkości produkcji danego elementu. Dla produkcji jednostkowej i małoseryjnej występuje mniejsza liczba operacji. Można zauważyć, że większa produkcja charakteryzuje się też większą liczbą zróżnicowanych operacji. Zasadne jest więc zastosowanie systemu doradczego w projektowaniu, który wspomaga wybór tych operacji oraz przedstawienie ich we właściwej kolejności. Warianty poziomu III opracowane zostają na podstawie analizy możliwości wytwórczych parku maszynowego przedsiębiorstwa oraz określenia warunków stosowalności stanowiska technologicznego w danej operacji. Poziom IV wariantów jest ściśle związany z operacją technologiczną, a sposób opracowania wynika z jej struktury. Przedstawione zostają wymagane zabiegi, związane z obróbką powierzchni przedmiotu, przy czym mogą się one różnić kolejnością oraz zakresem zastosowania (obróbka zgrubna, kształtująca itp.). Z kolei poziom V charakteryzuje się mniejszą liczbą wariantów w porównaniu z poprzednio przedstawionymi poziomami. Powodem tego jest fakt, że z reguły oprzyrządowanie technologiczne jest ściśle związane z wybranym stanowiskiem, dla

którego w sposób jednoznaczny określa się zbiór dopuszczalnych narzędzi skrawających, przyrządów i uchwytów obróbkowych. Jeżeli więc w trakcie rozwiązywania danego problemu decyzyjnego została wybrana operacja i wiadomo, na którym stanowisku zostanie ona przeprowadzona, wówczas należy jeszcze określić, czy będzie stosowane oprzyrządowanie typowe bądź specjalne.

3. Formalizacja wiedzy technologicznej w bazie wiedzy systemu doradczego

W budowie systemu doradczego wspomagającego projektowanie procesów technologicznych występuje baza wiedzy technologicznej. Struktura bazy wiedzy wynika z opisanego wcześniej, wieloetapowego rozwiązywania problemów decyzyjnych. Podstawowym celem formalizacji wiedzy jest odpowiednie przygotowanie zgromadzonych zbiorów wiedzy do zapisu w bazie wiedzy systemu doradczego. Wiedza przedstawiana jest w pewnej reprezentacji, która zostaje wyrażona za pomocą reguł i ram.

Formalizacja wiedzy polega na opracowaniu tzw. *reguł projektowania*, które określają zasady doboru procesu technologicznego dla wybranego przedmiotu produkcji. Reguły te przedstawiają związki pomiędzy wejściowymi informacjami o charakterystyce konstrukcyjno-technologicznej wyrobów, a wyjściowymi informacjami o strukturze procesu technologicznego. W częściach warunkowych reguł zamieszczone są informacje o wyróżnionych składnikach konstrukcji, natomiast część działaniowa zawiera odpowiadający im opis struktury procesu technologicznego (operacji, zabiegów, oprzyrządowania itp.) według założonego poziomu szczegółowości. Poszczególne części reguł mogą się składać z wielu członów połączonych funktorami logicznymi. Dla części warunkowych stosowany jest operator koniunkcji, natomiast w częściach działaniowych występują operatory koniunkcji i alternatywy. Ogólna budowa takich reguł jest następująca:

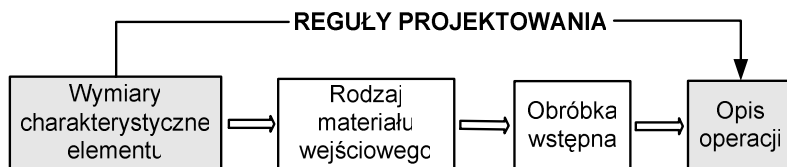
Jeżeli <konstrukcja 1> **i** <konstrukcja 2> **i** <konstrukcja n>
to <struktura 1> **i/lub** <struktura 2> **i/lub** <struktura n>

Badania nad zapisem reguł projektowania prowadzone są w trzech etapach, a mianowicie:

- I etap – ustalenie związków wymiarów charakterystycznych elementu ze strukturą procesu technologicznego,
- II etap – połączenie wyróżnionych obiektów konstrukcyjnych z elementami struktury procesu technologicznego,
- III etap – uszczegółowienie zabiegów obróbkowych procesu technologicznego.

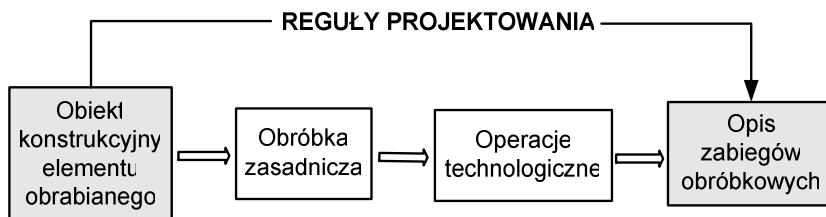
W pierwszym etapie opis struktury procesu technologicznego uzyskuje się na podstawie opisu operacji. Ustalono, że wymiary charakterystyczne elementu wpływają na postać materiału wejściowego. Stało się to podstawą do opraco-

wania schematu formalizacji reguł projektowania dla obróbki wstępnej (rys. 3). Dla dobranego materiału wejściowego występuje ściśle określona obróbka wstępna i problemy decyzyjne związane z tą obróbką. Podstawą doboru tej obróbki są operacje technologiczne. Poprzez uszczegółowienie opisu operacji określone są pozostałe elementy struktury procesu technologicznego.



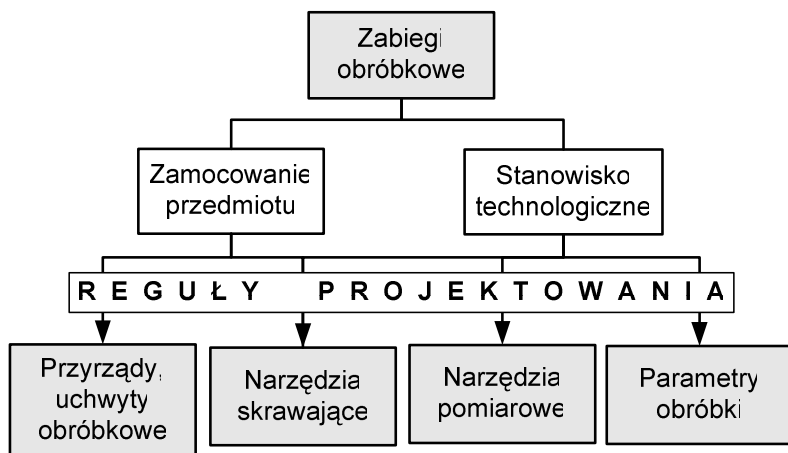
Rys. 3. Schemat formalizacji reguł projektowania dla obróbki wstępnej

Następny etap dotyczy uszczegółowienia struktury operacji procesu technologicznego. Ustalane są związki pomiędzy wyróżnionymi obiektami konstrukcyjnymi przedmiotu obrabianego (np. powierzchnie walcowe, stożkowe, gwintowe itp.), a elementami struktury operacji technologicznych w postaci zabiegów obróbkowych (rys. 4). Dzięki opracowanym regułom projektowania uzyskuje się informacje o sposobie przeprowadzenia zabiegów technologicznych w obróbce zasadniczej, niezbędnych dla wyprodukowania elementów maszyn według wymaganych dokładności wymiarowo-kształtowych oraz jakości powierzchni.



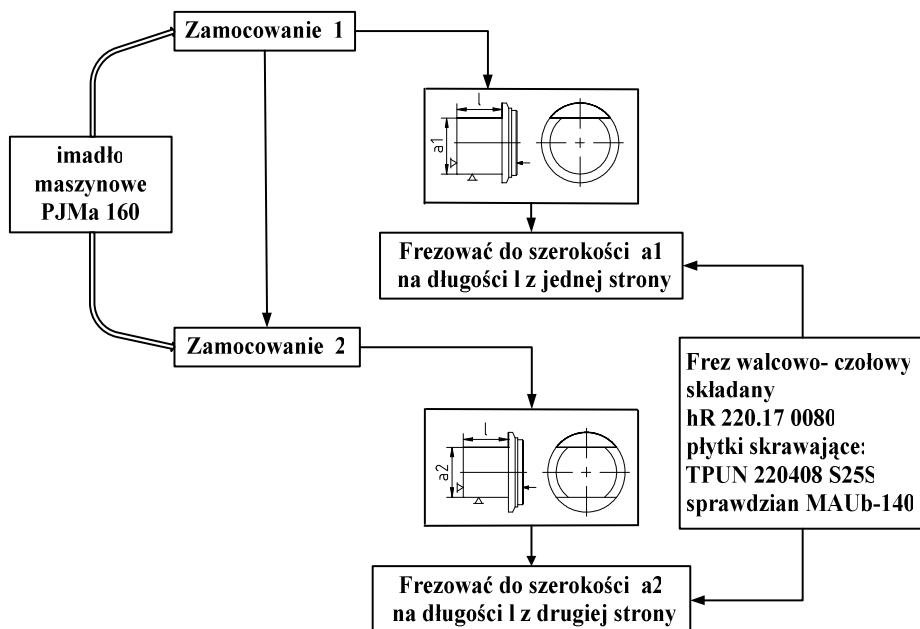
Rys. 4. Schemat formalizacji reguł projektowania dla obróbki zasadniczej

Ostatni etap formalizacji wiedzy prowadzi do budowy reguł projektowania, które umożliwiają uszczegółowienie zabiegów obróbkowych procesu technologicznego (rys. 5). Zabiegi obróbkowe, z których składa się dana operacja, związane są z zamocowaniem przedmiotu na stanowisku technologicznym, wyposażonym w odpowiednie oprzyrządowanie obróbkowe. Zabiegi te wykonywane są za pomocą narzędzi skrawających zgodnie z dobranymi parametrami obróbki.



Rys. 5. Schemat formalizacji reguł projektowania dla projektowania zabiegów obróbkowych

Przykład formalizacji reguł projektowania pokazano dla doboru obróbki frezowania wybranego elementu maszyny. Na podstawie analizy procesu technologicznego tego elementu ustalono, że obróbka jest przeprowadzana na frezarce pionowej. Na rysunku 6 przedstawiono graficzną formalizację reguł projektowania wybranej operacji.



Rys. 6. Przykład graficznej formalizacji reguł projektowania operacji obróbkowej

Na podstawie rysunku 6 można sformułować następujące reguły projektowania procesu technologicznego, które zostaną zapisane w bazie wiedzy systemu doradczego:

JEŻELI frezowanie elementu

TO obróbka w dwóch zamocowaniach w imadle maszynowym PJMa 160

JEŻELI frezowanie w dwóch zamocowaniach

TO frezować do szerokości a_1 na długości l z jednej strony

I frezować do szerokości a_2 na długości l z drugiej strony

Można zauważyć, iż reguły opracowane są z różnym stopniem szczegółowości opisu struktury procesu technologicznego, zgodnie z poziomami opracowania wariantów technologicznych.

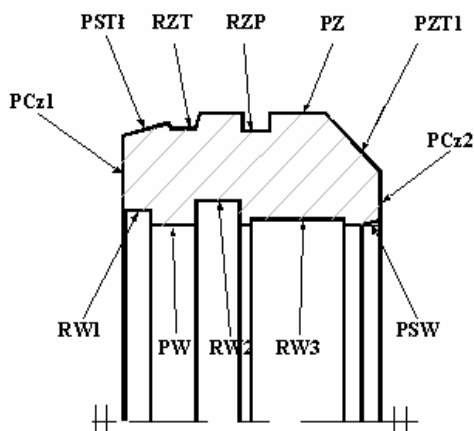
4. Przebieg projektowania procesu technologicznego wspomagane systemem doradczym

Przebieg projektowania procesu technologicznego zależy od charakterystyki konstrukcyjno-technologicznej elementu oraz warunków technicznych związanych z przedsiębiorstwem. W trakcie tego procesu realizowane są następujące procedury projektowania:

- formułowanie problemu decyzyjnego (wprow. informacji wejściowych),
- dobór materiału wejściowego,
- dobór rodzaju i kolejności operacji technologicznych,
- dobór struktury operacji technologicznej obróbki skrawaniem,
- dobór stanowisk technologicznych.

Formułowanie problemu decyzyjnego bazuje na danych wejściowych przyjętych na podstawie analizy ich wpływu na proces technologiczny elementów maszyn. Podstawowy wpływ na strukturę procesu technologicznego mają następujące dane wejściowe: rodzaj elementu, wielkość produkcji, rodzaj tworzywa, warunki techniczne (np. rodzaj powłoki) oraz cechy geometryczne konstrukcji elementu. Część procedur realizowanych jest na podstawie metody wyboru określonego wariantu danych wejściowych (np. rodzaj elementu), natomiast inne, takie jak np. określenie wielkości produkcji, za pomocą metody bezpośredniego wprowadzenia wartości wejściowej. Najbardziej złożoną procedurą pod względem liczby uzyskiwanych rozwiązań jest opis konstrukcji elementu. Metoda opisu konstrukcji bazuje na identyfikacji wymiarów charakterystycznych i obiektów elementarnych oraz przyporządkowaniu im symboli. Wymiarami charakterystycznymi są wymiary gabarytowe elementu jak również wymiary istotnych powierzchni funkcjonalnych elementu, współpracujących z innymi powierzchniami. Obiektami elementarnymi są grupy powierzchni lub pojedyncze powierzchnie elementu spełniające istotną funkcję we

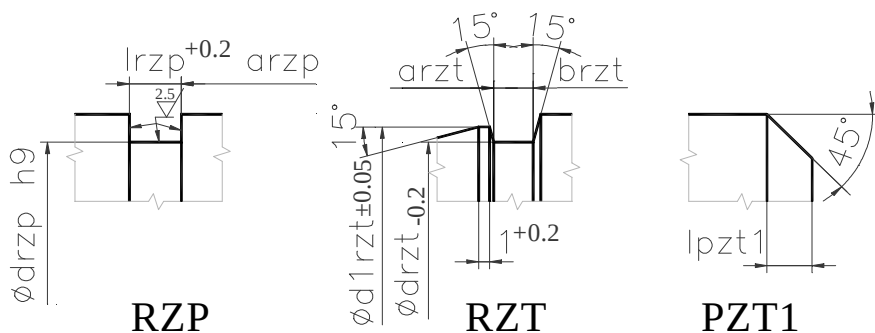
współdziałaniu danego elementu z innymi elementami. Przykładami takich obiektów są: powierzchnie walcowe zewnętrzne i wewnętrzne, powierzchnie czołowe, rowki pod pierścienie uszczelniające, powierzchnie stożkowe itp. Na rys. 7 pokazano wyróżnione obiekty elementarne tulei wraz z ich symbolami.



Rys. 7. Obiekty elementarne tulei

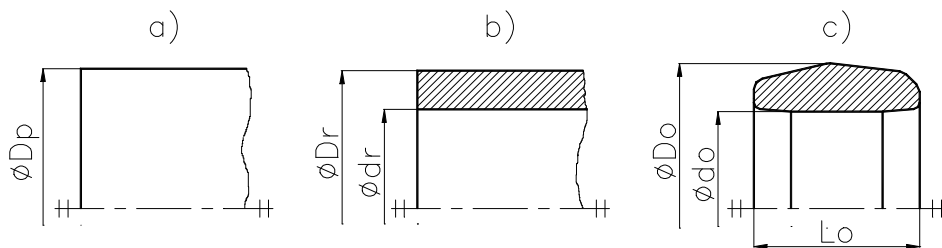
Obiekty elementarne scharakteryzowano za pomocą geometrycznych cech konstrukcyjnych. Przyjęto, że cechy te mogą być stałe lub zmienne. Stałe wymiary cechy są na stałe związane z danym obiektem elementarnym i ich wartość pozostaje niezmienna w trakcie tworzenia zbioru symboli opisującego konstrukcję. Natomiast zmienne wymiary cechy określane są w trakcie dialogu użytkownika z systemem doradczym.

Na rys. 8 przedstawiono wybrane obiekty elementarne tulei wraz z wprowadzonymi cechami konstrukcyjnymi.



Rys. 8. Geometryczne cechy konstrukcyjne obiektów elementarnych tulei

W następnej procedurze projektowania procesu technologicznego podstawowym czynnikiem decydującym o doborze materiału wejściowego jest konstrukcja elementu. W przypadku kilku możliwych wariantów rozwiązań decydującą rolę odgrywają wymiary charakterystyczne elementu (długość całkowita, maksymalna średnica zewnętrzna) oraz wielkość produkcji wyrażona liczbą sztuk produkowanego elementu. Przykładowo, element typu tuleja może być produkowany z trzech różnych materiałów wejściowych: pręta walcowanego, rury grubościennej lub odkuwki matrycowej (rys. 9).



Rys. 9. Możliwe warianty materiałów wejściowych; a - pręt walcowany, b - rura grubościenna, c - odkuwka matrycowa

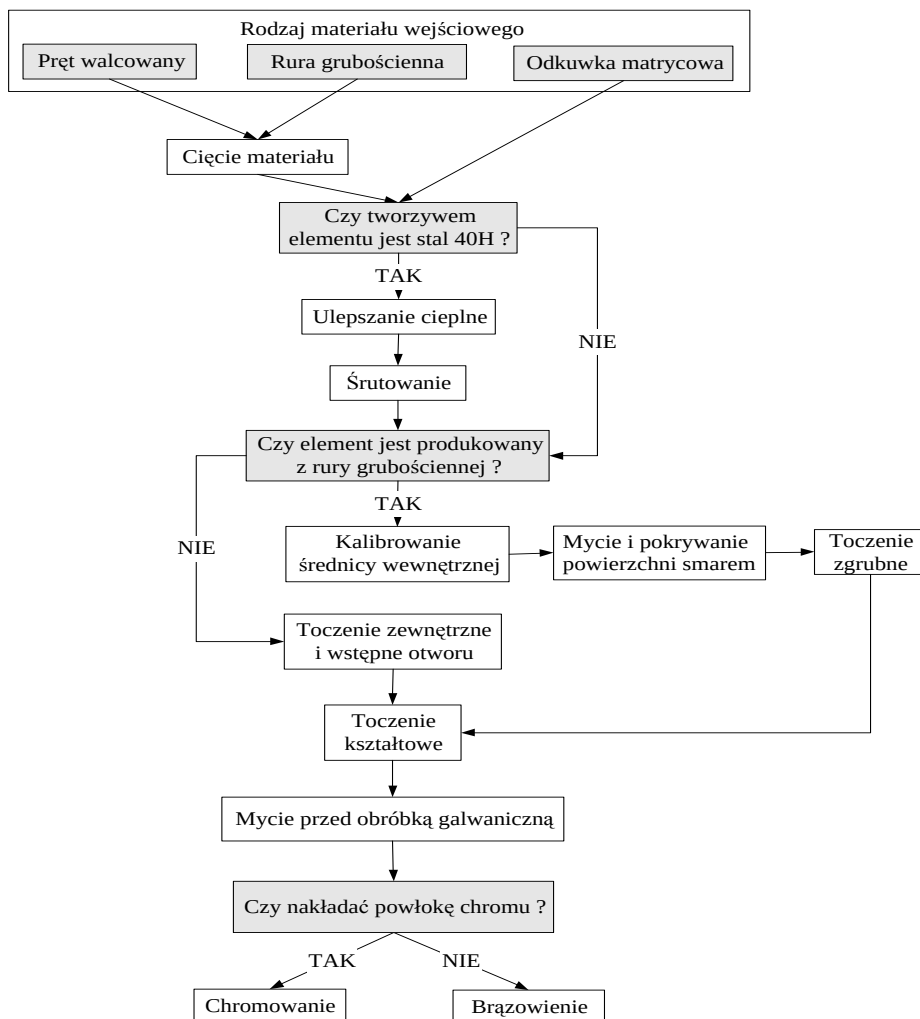
Na dobór rodzaju i kolejności operacji technologicznych mają wpływ takie czynniki, jak: konstrukcja elementu (w tym rodzaj tworzywa), rodzaj materiału wejściowego, rodzaj powłoki itp. Procedura ta jest realizowana najczęściej za pomocą struktury drzew decyzyjnych. Węzły takich drzew opisują dane wejściowe do projektowania oraz dobrane operacje technologiczne, natomiast gałęzie wychodzące z węzła zależą od wartości logicznych spełnienia warunku wyboru i bezpośrednio kierują do kolejnych węzłów sprawdzania warunków. Przemieszczając się po elementach drzewa, otrzymuje się rozwiązanie problemu. Na rys. 10 przedstawiono przykładową strukturę drzewa decyzyjnego dla projektowania procesu technologicznego tulei. W przedstawionej strukturze węzły drzewa decyzyjnego zawierają zapis danych wejściowych do projektowania (np. rodzaj materiału wejściowego – pręt walcowany), zapis warunku wyboru (np. Czy tworzywem elementu jest stal 40H?) oraz nazwy dobieranych operacji technologicznych (np. cięcie materiału). Natomiast gałęzie drzewa decyzyjnego przedstawiają wartości logiczne spełnienia warunku wyboru (TAK, NIE) oraz połączenia kolejnych węzłów drzewa.

Przemieszczając się po elementach drzewa otrzymuje się reguły projektowania. Na podstawie drzewa decyzyjnego można wygenerować następujące reguły:

**Jeżeli materiałem wejściowym jest pręt walcowany
to zastosować operację cięcia materiału**

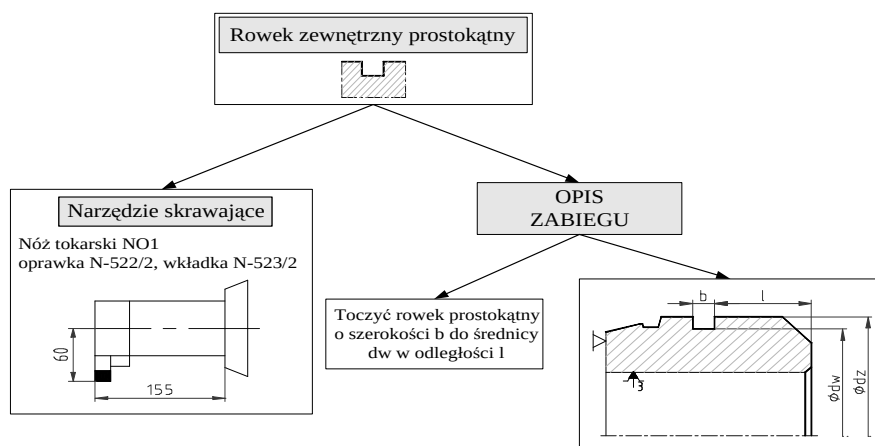
**Jeżeli tworzywem elementu jest stal 40H
to zastosować operację ulepszania cieplnego i śrutowania**

W następnej procedurze określana jest struktura operacji technologicznej. Ze względu na to, że najbardziej pracochłonne w przygotowaniu produkcji są operacje obróbki skrawaniem, założono ogólną strukturę tych operacji według przyjętego poziomu szczegółowości opisu operacji. W tej strukturze wyróżniono podział na zamocowania przedmiotu obrabianego, do których dobierane są przyrządy i uchwyty obróbkowe. Ustalone zadanie obróbkowe dzieli się na zabiegi technologiczne. Danymi wejściowymi do procesu tworzenia struktury operacji jest przede wszystkim konstrukcja elementu. Konstrukcję podzielono na obiekty elementarne. Z obiektami elementarnymi związane jest dobór środków technicznych oraz parametry zabiegów technologicznych.



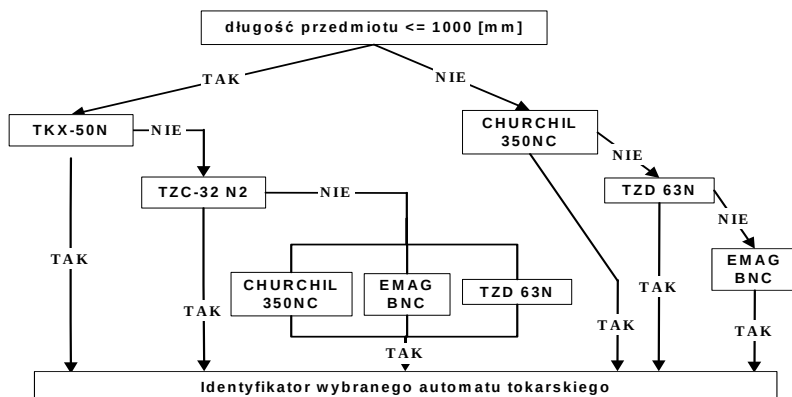
Rys. 10. Drzewo decyzyjne doboru rodzaju i kolejności operacji technologicznych tulei

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy związek pomiędzy obiektem elementarnym w postaci rowka zewnętrznego prostokątnego (RZP), a narzędziem skrawającym użytym do obróbki tego rowka oraz opisem zabiegu (wraz ze szkicem) będącego częścią struktury operacji obróbki tulei.



Rys. 11. Przykład związku pomiędzy obiektem elementarnym tulei a strukturą operacji

Na procedurę doboru stanowisk technologicznych ma wpływ przede wszystkim rodzaj operacji technologicznej. Punktem wyjściowym doboru jest analiza możliwości technologicznych tego stanowiska. Prowadzi to do tworzenia zbioru wariantów możliwych do zastosowania. Po utworzeniu wariantów dalszy dobór przebiega na podstawie ustalonej hierarchii ważności zastosowania danego stanowiska. Procedura doboru stanowisk dla konkretnych operacji technologicznych bazuje na regułach projektowania opracowanych za pomocą drzew decyzyjnych (rys. 12).



Rys. 12. Przykład drzewa decyzyjnego doboru automatów tokarskich

5. Wnioski

Przedstawiona metoda projektowania procesu technologicznego uwzględnia wielowariantowość rozwiązań w przyjętych etapach i problemach decyzyjnych. Zastosowanie systemu doradczego wydaje się korzystne, gdyż system ten umożliwia wyszukiwanie i wymianę informacji oraz przedstawianie ich w żądanej postaci dokumentacji technologicznej. Z funkcjonalnego punktu widzenia opracowany system może być stosowany:

- jako doradca w przypadku projektowania nowych procesów technologicznych,
- jako baza wiedzy dla istniejących procesów technologicznych.

System doradczy powinien być przeznaczony dla konkretnych użytkowników tj. przedsiębiorstw produkcyjnych. Z tego też względu baza wiedzy systemu powinna zawierać zbiory wiedzy technologicznej stosowanej przez wytypowanych użytkowników, które obejmują środki produkcji (park maszynowy, oprzyrządowanie technologiczne itp.) stanowiące stałe wyposażenie zakładów produkcyjnych. Należy przy tym uwzględnić realia inwestycyjne przedsiębiorstw oraz doświadczenia personelu nabyte w trakcie przygotowania produkcji elementów maszyn. Z punktu widzenia optymalizacji procesów produkcyjnych należy stwierdzić, że procesy realizowane w wybranych zakładach produkcyjnych przed wprowadzeniem do systemu powinny być zoptymalizowane, więc nie ma potrzeby optymalizacji procesów generowanych przez system doradczy. Gdyby jednak uwzględnić kryteria globalne, procesy te mogą okazać się nieoptymalne, ale w konkretnym zakładzie nie będą one jednak możliwe do zrealizowania ze względu na ograniczony park maszynowy.

LITERATURA

1. Mital A., Anand S.: Handbook of Expert Systems Application in Manufacturing. Structures and Rules. Chapman & Hall, London, 1994.
2. Paszek A.: Budowa systemu zarządzania wiedzą w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Część I: Metodyka. Zarządzanie przedsiębiorstwem, 2, 2009, str. 58-64.
3. Knosala R. i zespół: Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
4. Trajer J., Paszek A., Iwan S.: Zarządzanie wiedzą. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2012.
5. Niederliński A.: Regułowo-modelowe systemy ekspertowe rmse. Wydawnictwo Pracowni komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2006.
6. Rutkowski L.: Metody i techniki sztucznej inteligencji. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2005.
7. Paszek A.: Budowa systemu zarządzania wiedzą w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Część II: Przykład. Zarządzanie przedsiębiorstwem, 1, 2011, str. 35-43.
8. Paszek A., Knosala R.: Budowa systemu eksperckiego wspomagającego technologiczne przygotowanie produkcji. Cz. II Przykład. Zarządzanie Produkcją, 3-4, 1999, str. 23-29.

METHOD OF PLANNING THE TECHNOLOGICAL PROCESS AIDED EXPERT SYSTEM

Abstract

This paper presents the steps and decision-making problems that occur in the design technological processes. Shown in diagram creation of technological variants. Formalization of design rules have been developed processes of machine elements. Steps of the design technological process aided expert system was characterized. Describes the objects relating to the construction of machine element and their use in the design. Based on examples decision trees the selection of type and order process operations, and automatic lathes for sleeve was presented.

Keywords: expert system, technological process, technological knowledge, design rule, decision tree

METODA PROJEKTOWANIA PROCESU TECHNOLOGICZNEGO WSPOMAGANEGO SYSTEMEM DORADCZYM

Streszczenie

W pracy przedstawiono etapy i problemy decyzyjne występujące w projektowaniu procesów technologicznych. Pokazano schemat tworzenia wariantów technologicznych. Dokonano formalizacji reguł projektowania procesów obróbki elementów maszyn. Scharakteryzowano przebieg projektowania procesu technologicznego wspomaganego systemem doradczym. Opisano obiekty elementarne związane z konstrukcją przedmiotu oraz ich zastosowanie w projektowaniu. Na podstawie drzew decyzyjnych pokazano przykłady doboru rodzaju i kolejności operacji technologicznych oraz automatów tokarskich w obróbce elementów typu tuleja.

Słowa kluczowe: system doradczy, proces technologiczny, wiedza technologiczna, reguła projektowania, drzewo decyzyjne

Dr inż. Alfred PASZEK
Dr inż. Piotr WITTBRODT
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
ul. Ozimska 75, 45-370 Opole
e-mail: a.paszek@po.opole.pl
p.wittbrodt@po.opole.pl

ZNACZENIE AUTOMATYZACJI PROCESÓW PRODUKCYJNYCH DLA ZASPOKAJANIA POTRZEB KLIENTA I ZMIAN CHARAKTERU PRACY W PRZEMYŚLE

1. Etapy rozwoju zautomatyzowanych systemów wytwarzania

Historyczny początek produkcji przemysłowej łączony jest z XVIII wiekiem, kiedy obok produkcji rzemieślniczej zaczęto wytwarzać wyroby w warunkach przemysłowych. Rozwój systemów produkcyjnych nastąpił jednak daleko później, bo dopiero w XX wieku. Badania naukowe dotyczące historii rozwoju zautomatyzowanych systemów wytwarzania identyfikują trzy główne etapy ilustrujące najważniejsze zmiany systemów produkcyjnych a wynikające z rozwoju automatyzacji. Są to:

- etap „przed-CNC”,
- etap zastosowania w produkcji komputerowych syst. numerycznych (CNC),
- etap rozszerzający stosowanie systemów CNC o systemy oparte o wiedzę.

Każdy z tych etapów wywierał wpływ na zaspokojenie potrzeb klienta i zmieniał charakter pracy w przemyśle. Etapy rozwoju systemów wytwarzania i jego wpływ na zaspokojenie potrzeb klientów przedstawia wykres 1.

Etap produkcji rzemieślniczej i początek produkcji przemysłowej

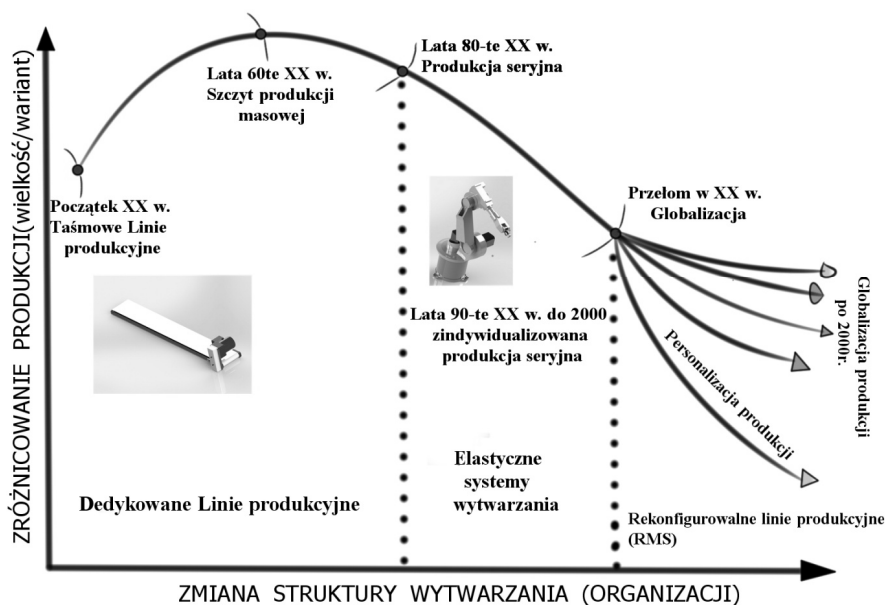
Etap ten charakteryzuje się stosowaniem w wytwarzaniu prostych narzędzi ręcznych. Takie środki wytwarzania pozwalały na indywidualnie zaspakajane potrzeb klientów, chociaż asortyment i ilości wytwarzanych wyrobów były niewielkie. Praca z użyciem prostych narzędzi wymagała kwalifikacji rzemieślniczych i miała czasami charakter pracy twórczej.

Etap "przed-CNC"

Etap „przed-CNC” szacowany jest na lata 1900–1960 [1] i odnoszony jest do okresu produkcji seryjnej i masowej. Stosowane w produkcji dedykowane linie produkcyjne projektowane były tak, żeby nie można było w trakcie produkcji wprowadzać większych zmian w konstrukcji wyrobu.

Podstawowym środkiem mechanizacji i automatyzacji w dedykowanych liniach produkcyjnych były systemy transportowe oraz stałe oprzyrządowanie. Rodzące się zapotrzebowanie na wyroby przemysłu wywierało nacisk na wzrost szybkości i wielkości produkcji. Ze względu na możliwości techniczne, odpowiedzią na potrzeby rynku charakteryzującego się brakiem lokalnej konkurencji była produkcja w liniach produkcyjnych dość dużej ilości wyrobów o niewielkiej liczbie wariantów.

Do szybkiego rozwoju wyspecjalizowanych linii produkcyjnych doszło głównie dzięki rozwojowi przemysłu samochodowego. W 1903 roku powstała fabryka Forda, która już w pierwszym miesiącu pracy sprzedawała pierwszy model samochodu Ford Model A. W ciągu kilkunastu następnych lat sprzedaż Forda [2] rośnie do wielkości 15,5 mln sztuk. W 1908 roku w Detroit powstaje firma General Motors (GM) i rozpoczyna produkcję modeli Buick (1903), Cadillac (1902), Chevrolet (1911) przyczyniając się również do rozwoju systemów produkcyjnych. Wpływ na rozwój systemów produkcyjnych ma również założona w 1902 roku przez Maksa Grabowskiego firma GMC Truck wykupiona 1909 roku przez GM. Firma GMC Truck wyprodukowało pierwsze modele ciężarówek, a do szybkiego rozwoju fabryk przyczynił się rozwój silników spalinowych szacowany na lata 1819–1918.



Wykres 1. Wpływ rozwoju systemów wytwarzania na charakter produkcji i zaspokojenie potrzeb klienta. Opracowanie własne w oparciu o [7]

Następną ważną datą dla rozwoju systemów produkcyjnych jest rok 1921. W roku tym GM jako pierwsza firma w świecie dokonuje analizy ilości materiałów potrzebnych do produkcji samochodów. Nie bez wpływu na rozwój systemów produkcyjnych pozostały również dwie wojny światowe.

Po tych okresach następuje okres względnego spokoju, który sprzyja powolnemu rozwojowi komputeryzacji. W 1946 roku na uniwersytecie w Pensylwanii powstaje pierwszy komputer ENIAC stworzony przez J.P. Eckerta i J.W. Mauchly'ego. Maszyna używana była głównie do obliczeń związanych z balistyką, wytwarzaniem broni jądrowej, prognozowaniem pogody, projektowaniem tuneli aerodynamicznych i badaniem promieniowania kosmicznego. Wykorzystywano ją także do badania liczb losowych i analizowania błędów zaokrąglenia [3].

Ale nie tylko Stany Zjednoczone Ameryki przyczyniały się do rozwoju systemów produkcyjnych. Prace nad rozwojem systemów prowadziła również Japonia. Organizacja pracy japońskiego systemu produkcyjnego pozwalała prawie całkowicie wyeliminować z systemów produkcji magazyny. Magazynowanie przedprodukcyjne, poprodukcyjne jak i międzyoperacyjne było minimalne, ponieważ większość materiałów od dostawców była dostarczana „dokładnie na czas” i tak samo przebiegała wysyłka gotowego produktu. W późniejszym czasie zasady pracy tego systemu przekształciły się w paradygmat Just-in-time.

Wykres 1 pokazuje dla każdego z etapów orientacyjnie zależność wskaźnika zróżnicowania produkcji (wielkość produkcji/liczba wariantów) od istniejących środków produkcji o odpowiednim dla danego etapu poziomie automatyzacji.

W okresie "przed-CNC", kiedy stosowano dedykowane linie produkcyjne, wzrost wielkości produkcji nie wpływał znacząco na zróżnicowanie asortymentu wyrobów. Istniejące urządzenia technologiczne rozwijały się w kierunku pozwalającym na zwiększenie wielkości produkcji przez poprawę wydajności i sprawności urządzeń. Wzrost wielkości produkcji uzyskiwano również przez proste zwielokrotnienie liczby urządzeń technologicznych. Stosowane w liniach urządzenia nie miały natomiast możliwości szybkiego elastycznego przystosowania się do produkcji nowych wyrobów. Uruchomienie produkcji nowego wyrobów wymagało czasochłonnego i kosztownego przebrojenia linii produkcyjnej.

Jak pokazuje rys.1 szczyt wielkości produkcji przy stosunkowo małym jej zróżnicowaniu przypada na lata sześćdziesiąte XX wieku. Produkcja seryjna i masowa realizowana w dedykowanych liniach zaspokajała coraz lepiej popyt rosnącej liczby użytkowników ale tylko na wyroby o małym zróżnicowaniu.

Wzrost wielkości produkcji wpływał na wzrost zatrudnienia w przemyśle, a większość pracowników wykonywała monotonną ciężką pracę fizyczną przy obsłudze linii produkcyjnych i pojedynczych sterowanych ręcznie maszyn. Taka praca nie wymagała w przeważającej liczbie przypadków wysokich kwalifikacji można się było szybko przyuczyć do jej wykonywania.

Etap zastosowania w produkcji komputerowych systemów numerycznych (CNC)

Nowe możliwości zaspokajania potrzeb użytkowników powstały w wyniku przełomu w sterowaniu maszynami technologicznymi. Do sterowania maszyny technologicznych zastosowano numeryczne układy sterowania, początkowo NC (Numerical Control) a później CNC (Computer Numerical Control).

W 1968 roku przytaczana wcześniej firma GM wprowadza do produkcji pierwsze sterowniki PLC, które wywarły wtedy i wywierają obecnie duży wpływ na procesy sterowania. W 1971 roku firma Intel wprowadza do produkcji pierwsze mikrokontrolery, które również wywierają duży wpływ na rozwój sterowań. W oparciu o mikrokontrolery dynamicznie rozwijają się systemy komputerowe. Powstają pierwsze komputery firmy Apple oraz komputery Commodore. Szybki rozwój komputerów przyczynia się do rozwoju numerycznych układów sterowań maszynami technologicznymi NC i CNC oraz do automatyzacji prac inżynierskich. Pod koniec lat 70-tych powstają pierwsze programy typu CAD (ang. *Computer-aided design*) a później CAD/CAM. Było to podejście nowatorskie a pierwszym programem był PADL – stworzony przez H. Volckeza. Systemy tej klasy zautomatyzowały bardzo ważny etap procesu wytwarzania jakim jest techniczne przygotowanie produkcji.

W okresie tym fabryki wprowadzają do linii produkcyjnych roboty i Obrabiarki sterowane numerycznie. Już w 1961 roku Ford, jako pierwsza fabryka na świecie wprowadza roboty do podnoszenia gorących części odlewu ciśnieniowego [3].

Układy sterowania CNC stają się przyczyną przełomu w konstrukcji i sterowaniu obrabiarek i robotów. W związku z nowymi możliwościami sterowania, już w początkowym okresie CNC tj. w latach 70-tych i 80-tych, rozszerzono zakres zadań nałożonych na systemy produkcyjne z położeniem szczególnego nacisku na poprawę jakości produkcji. Maszyny ze sterowaniem CNC były w stanie zapewnić dokładną kontrolę procesu produkcji odpowiedniej liczby wyrobów o odpowiedniej jakości. W powiązaniu z rozwojem środków produkcji sterowanych systemami CNC ugruntowuje się, szczególnie w przemyśle japońskim, paradygmat just-in-time (JIT) wspierający eliminację lub minimalizację zapasów. Surowce, półwyroby dostarczane są dopiero w momencie, kiedy jest na nie zapotrzebowanie. Uznane uzyskuje Total Quality Management (TQM), koncentrujący się na zintegrowaniu celów przedsiębiorstwa z celami jego klientów. Innym ważnym paradygmatem, który miał początek w okresie CNC był „lean manufacturing” opracowany w 1980 roku. Celem paradygmatu jest ograniczenie marnotrawstwa, a metodą – zarządzanie płynnym przepływem produktu od surowców do produktu końcowego. Wielu autorów (Sheridan, 1993; Noaker, 1994) wiąże „lean manufacturing” z poprawą wskaźników produkcji masowej, ponieważ przyjmuje on jej podstawowe zasady. Łączy on jednak cechy produkcji masowej takie jak duża wielkość produkcji i niska cena z produkcją zindywidualizowaną. Celem staje się rozwój systemów, które produkują wyroby w odpowiedzi na zapotrzebowanie klientów, przy znikomej lub żadnej ilości odpadów. Aby zrealizować te cele należy

wprowadzić system zasad, metod i praktyk zmniejszających ilości odpadów w produkcji poprzez dokonanie przeglądu wszystkich aspektów rozwoju produktu, organizacji produkcji, zasobów ludzkich oraz kontaktów z klientami. Dla minimalizacji odpadów idealne są zasady „Key Lean” [4] zwracające uwagę na usunięcie wszystkich działań, które nie dodają wartości i na doskonalenie jakości i elastyczność procesów produkcyjnych. Praktyki te ujęte są również w wymienionych wcześniej paradygmatach „lean manufacturing”, „just-in-time” oraz kompleksowym zarządzaniu jakością TQM. Warto wspomnieć, że do rozwoju wymienionych paradygmatów przyczyniły się głównie, Japonia ze swoją wysoką jakością produkcji połączoną z niskimi kosztami oraz amerykańska firma GM.

Wprowadzanie nowych paradygmatów zarządzania powiązane było ściśle z nowymi możliwościami stworzonymi przez zastosowanie w produkcji nowej klasy sterowanych numerycznie automatów głównie: obrabiarek sterowanych numerycznie i robotów.

Pod koniec lat 80-tych powstaje paradygmat elastycznych linii i systemów produkcyjnych (ESP). Systemy ESP nie powstałyby bez zastosowania do sterowania urządzeniami technologicznymi układów sterowania CNC. ESP zbudowane są z obrabiarek sterowanych układami CNC, sterowanych numerycznie robotów, zautomatyzowanych systemów narzędziowych oraz automatyzowanych systemów przemieszczania i magazynowania. ESP pozwalają dostosować produkcję do zmiennych potrzeb klienta przez umożliwienie produkcji w jednym systemie, szerokiego asortymentu wyrobów. System ESP zdefiniowany został jako sterowany komputerowo system produkcyjny zdolny do produkcji rodziny części. Jest on oparty na niezmiennych dość swobodnie przeprogramowywanych urządzeniach stacjonarnych i charakteryzuje się integralną architekturą (hardware/software), której składniki są ze sobą ściśle powiązane. Taki typ architektury przemysłowej może mieć jednak ograniczone zdolności rekonfiguracji, która jest jedną z metod dostosowywania metod wytwarzania do zmian profilu produkcji.

Zmieniana programowo praca automatycznych urządzeń technologicznych pozwalała elastycznie dostosowywać pracę urządzeń do potrzeb zmiennych programów produkcyjnych przystosowujących produkcję do zmiennych wymagań rynku. Z upływem lat rozwoju systemów ESP, wskaźnik zróżnicowania produkcji (wielkość produkcji/asortyment) maleje (wykres 1). Przyczyną takiej zmiany jest przyjęty kierunek rozwoju systemów, zwiększający ich elastyczności. Wraz z rozwojem systemy zwiększały zdolność produkowania wyrobów o większym zróżnicowaniu. Duża liczba wyrobów produkowanych w dużym asortymencie umożliwiała lepsze zaspokajanie indywidualnych potrzeb klientów.

Zastosowanie systemów produkcyjnych opartych o sterowane numerycznie automaty wpłynęło w znaczny sposób na zmianę sytuacji na rynku pracy. Zmniejszyło się zapotrzebowanie na proste prace fizyczne, a wzrosło zapotrzebowanie na prace umysłowe i twórcze. W wielu przypadkach pracowników obsługujących maszyny zastąpili programiści obrabiarek CNC, robotów i systemów produkcyjnych. Większych kwalifikacji wymagał również nadzór nad pracą systemów i urządzeń technologicznych. Powstała nowa liczna grupa wysoko wykwalifikowanych projektantów i twórców sterowanych numerycznie automatów i systemów oraz ich oprogramowania. Powstały zespoły twórców oprogramowania dla wspomagania prac inżynierskich np. systemów CAD/CAM. Nastąpiło zmniejszenie zapotrzebowania na prace fizyczne a wzrosło zapotrzebowanie na prace umysłowe i twórcze co musiało wpłynąć na zmiany w strukturze zatrudnienia i w systemie edukacji.

Etap rozszerzający stosowanie systemów CNC o systemy oparte o wiedzę

Etap ten charakteryzuje się ugruntowaniem osiągnięć z okresu wdrażania systemów CNC i rozwojem systemów wykorzystujących nowe metody zarządzania i projektowania systemów produkcyjnych oparte o wiedzę.

Początek tego etapu to dynamiczny rozwój systemów wykazujących migrację z centralnych odizolowanych systemów w kierunku zdecentralizowanych form modułowych (np. modułowe maszyny i oprzyrządowanie, otwarta kontrola i architektura systemu). Przyczyniły się do tego badania nad rozwojem wydajniejszych, dokładniejszych i bardziej inteligentnych, obrabiarek, robotów przemysłowych i urządzeń transportu. Przykładem mogą być wózki transzortowe AVG rozpoznające drogę transportu.

W początkowym okresie tego etapu (rok 1993) narodziła się SCADA, system nadzorujący przebieg procesu technologicznego. Jego główne zadania obejmują: zbieranie aktualnych danych o stanie procesu (pomiar), ich przedstawienie graficzne (wizualizacja), sterowanie procesem oraz alarmowanie i archiwizację danych. Dzięki dostępowi do baz danych zawierających historię produkcji można uzyskać lepszą kontrolę oraz poprawić wydajność. Przez połączenie systemów PLC i PAC pracujących w sieciach przemysłowych z sieciami komputerowymi zakładów i korporacji powstają rozproszone systemy sterowania, również bezprzewodowe. Powstają mobilne systemy sterowania pozwalające np. sterować robotami z telefonu komórkowego.

Interesujące jest to, że dzięki architekturze współczesnych systemów komputerowych systemy rozproszone mogą realizować w razie potrzeby funkcje systemów zintegrowanych.

W połowie lat 90 zdefiniowano paradygmat rekonfigurowanego systemu produkcyjnego (RMS). Miała to być odpowiedź na zapotrzebowanie tańszej, bardziej opłacalnej wersji systemu elastycznego wytwarzania[1]. System RMS pozwala rozłożyć jednorazowe koszty ponoszone na prognozowaną na dłuższy przedział czasu elastyczność w ESP, na kolejne rekonfiguracje zapewniające

wymaganą mniejszą i ściślej określoną elastyczność dla określonego przedziału czasu. Rekonfigurowany system produkcyjny (RMS) budowany jest z myślą o przeprowadzaniu dynamicznych zmian struktury, jak również komponentów sprzętowych i programowych tak, aby szybko dostosować moc produkcyjną oraz funkcjonalność architektury do szybkiej odpowiedzi na ciągłe, dynamiczne zmiany na rynku. Można go poprawiać, aktualizować a rzadziej chociaż mniejszym kosztem zastępować. Pod względem konstrukcji RMS ma strukturę modułową (oprogramowanie i sprzęt), która pozwala zastosować strategię rekonfiguracji jako sposób dostosowania się do wymagań rynku. Systemy RMS wykraczają poza funkcje ESP. Zastosowanie modułowości redukuje czas uruchomienia nowych systemów i rekonfiguracji już istniejących, a ponadto pozwala na szybką zmianę produkcji, dzięki szybkiej integracji nowych technologii lub nowych funkcji do istniejących już systemów. Rekonfigurowane systemy produkcyjne (RMS) zawierają cechy medykowanych linii produkcyjnych oraz elastycznych systemów produkcyjnych (ESP). W dzisiejszych czasach zwracają na siebie coraz większą uwagę, ponieważ ich cechy zawierają w jakimś stopniu cechy opisanych wcześniej systemów, a dodatkowo wnoszą cechę, którą można określić jako reaktywności procesu produkcyjnego.

Takie kierunki rozwoju zautomatyzowanych systemów wytwarzania spowodowane były potrzebą zaspokojenia zmieniających się szybko potrzeb. Szybkość przebrojenia systemów na produkcję nowego wyrobu decyduje często o sukcesie firmy.

Należy również zastanowić się, jakie jeszcze nowe tendencje będą towarzyszyły rozwojowi metod wytwarzania. Dzięki rozwojowi programowanych środków produkcji i elastycznych systemów wytwarzania zbliżamy się do personalizacji zaspokajania potrzeb klienta (wykres 1). Obserwowany jest „powrót” do produkcji małoseryjnej lub nawet jednostkowej tak jak to miało miejsce w początkach rozwoju systemów produkcyjnych. Dzięki taniejącemu sprzętowi do wytwarzania część produkcja może być przeniesiona „pod strzechy”. Jako przykład może tu służyć widoczny już teraz szybki rozwój drukarek 3D, dzięki którym producent będzie jedynie dostarczał pomysł a odbiorca sam "wydrukuję" sobie przedmiot lub sam coś zaprojektuje. Oczywiście nie wszystkie produkty będą mogły być tak dostarczane.

Współczesne systemy produkcyjne zaspokajają spersonalizowane potrzeby stosunkowo dużej liczby klientów. O ile w początkowym okresie rozwoju produkcji, uzyskiwane w niewielkich ilościach wyroby wytwarzane były pracą rzemieślniczą przy pomocy prostych narzędzi, o tyle dzisiaj zindywidualizowane potrzeby zaspokajane są przez wyroby produkowane na inteligentnych automatach wyprodukowanych z użyciem zaawansowanych technologii. Można zaryzykować stwierdzenie, że pod względem personalizacji zaspokajania potrzeb mamy szansę wrócić do prawie rzemieślniczego efektu. Efekt ten uzyskiwany jest jednak na zupełnie innym poziomie technicznym. Tworzy go zastosowanie w produkcji automatów niewymagających dużego nakładu pracy

fizycznej. Nowoczesne środki produkcji pozwalają zaspokoić potrzeby dużo większej liczby klientów na zróżnicowane wyroby o dużo wyższym poziomie technicznym. Jednak wytworzenie tych automatów wymaga zaangażowania dużego wysiłku twórczego.

Wzbogacenie produkowanych wyrobów i zautomatyzowanych systemów wytwarzania o elementy oparte o wiedzę w jeszcze większym stopniu zwiększa zapotrzebowanie na prace umysłowe i twórcze a zmniejsza zapotrzebowanie na prace fizyczne.

2. Problemy z automatyzacją

Automatyzacja procesów wytwarzania wywołuje wiele obaw w środowiskach pracowniczych [8]. Obawy te związane są głównie z utratą miejsc pracy. Rodzą się one szczególnie tam, gdzie z różnych względów występują problemy przy uruchomieniu produkcji złożonych technicznie wyrobów, wymagających zaangażowania nowoczesnej wiedzy technicznej w procesach konstruowania i produkcji, a których wytwarzanie wymaga zastosowania nowoczesnych zautomatyzowanych systemach produkcyjnych zapewniających właściwą ilość i jakość wyrobów oraz właściwą elastyczność przy uruchamianiu produkcji nowych wyrobów. Projektowane nowoczesnych złożonych wyroby i ich produkcja w zautomatyzowanych systemach nie powinna jednak wywoływać tylu obaw. Powinien to być naturalny element rozwoju wpływający na zmianę charakteru pracy i strukturę zatrudnienia a przez to na zmianę struktury społeczeństwa. Tworzenie nowych wyrobów i modernizacja już istniejących oraz ich wytwarzanie w zautomatyzowanych systemach produkcyjnych powinno przesuwac pracowników z bezpośredniej produkcji do prac rozwojowych. W postępujących tak społecznościach coraz większy procent pracowników będzie zajmowało się pracą twórczą, która w dziedzinie techniki przyczynia się do rozwoju nowych konstrukcji i technologii włącznie z rozwojem środków automatyzacji. Automatyzacja powinna uwalniać ludzi od ciężkiej pracy fizycznej tworząc warunki do zmiany ich osobowości i zachowań przez kształcenie i wykonywanie prac twórczych. Czynniki te powinny sprzyjać rozwojowi gospodarczemu, a społeczeństwo w coraz większym procencie powinno stawać się społeczeństwem twórców. Jest to proces długi wymagający określonej wrażliwości i wyobraźni. Na obecnym etapie następstwem tego procesu jest również to, że społeczności wykorzystujące postęp technologiczny są producentami złożonych funkcjonalnie i konstrukcyjnie wyrobów, a inne są konsumentami tych wyrobów.

Ze względów gospodarczych i społecznych nowoczesne społeczności nie powinny rezygnować z podejmowania prac badawczych i wdrożeniowych związanych z problematyką projektowania i budowy zautomatyzowanych systemów wytwarzania.

3. Podsumowanie

Badania naukowe dotyczące historii rozwoju zautomatyzowanych systemów wytwarzania identyfikują trzy główne okresy, które ilustrują najważniejsze zmiany w rozwoju systemów produkcyjnych wynikające z automatyzacji. Są to:

- etap „przed-CNC”,
- etap zastos. w produkcji komputerowych systemów numerycznych (CNC),
- etap rozszerzający stosowanie systemów CNC w systemy oparte o wiedzę.

Każdy z tych etapów wywierał wpływ na zaspokojenie potrzeb klienta i zmieniał charakter pracy w przemyśle. Obowiązujące w każdym etapie metody produkcji zmieniały jej charakter od jednostkowej poprzez seryjną i masową do elastycznej spersonalizowanej. Zmiany te odbywały się w związku z automatyzacją procesów wytwarzania. Zmieniał się równolegle charakter pracy wykonywanej na rzecz produkcji przemysłowej. Praca fizyczną zaczęła w coraz większym stopniu zastępować praca umysłowa i twórcza. W tak krótkim artykule można było tylko przedstawić zarys tendencji.

LITERATURA

1. *Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing*. Mehrabi, M.G., Ulsoy, A.G. and Koren, Y. s.l. : Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, 2000, Journal of Intelligent Manufacturing.
2. mojeauto.pl. [Online] 1999-2012. http://www.samochody.mojeauto.pl/ford/historia_koncernu/.
3. Wikipedia. [Online] 2012. <http://pl.wikipedia.org/wiki/ENIAC>.
4. Marchwinski, Chet, Shook, John i Schroeder, Alexis. *Lean Lexicon*. Cambridge, MA, USA : Lean Enterprise Institute, Inc., Marzec 2008.
5. Wikipedia. [Online] 2012. <http://en.wikipedia.org/wiki/Robot>.
6. ElMaraghy, H.A. Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms. 2006, Tomy No. 4: str. 261-276, Vol. 17.
Yoram Koren. The Global Manufacturing Revolution. Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems, John Wiley & Sons Inc. 2010.
7. [http://biznes.interia.pl/praca/news/koniec-pracytwojej,1837288# commentsZoneList](http://biznes.interia.pl/praca/news/koniec-pracytwojej,1837288#commentsZoneList)

THE IMPORTANCE OF MANUFACTURING PROCESS AUTOMATISATION IN MEETING THE CUSTOMER DEMAND AND A ITS INFLUENCE ON THE CHANGING TYPE OF WORK

Abstract

The article describes the basic stages of automated manufacturing process development, such as: pre-CNC, CNC systems and the CNC knowledge-based systems. It demonstrates how at different stages production systems corresponded to the customer demand, how they influenced the change in type of work and in the industry personnel qualifications.

Keywords: automated manufacturing system, automated production system, production line, CNC systems, FMS systems, RMS systems, customer demand, personnel qualifications.

ZNACZENIE AUTOMATYZACJI PROCESÓW PRODUKCYJNYCH DLA ZASPOKAJANIA POTRZEB KLIENTA I ZMIAN CHARAKTERU PRACY W PRZEMYSŁE

Streszczenie

Artykuł omawia podstawowe etapy rozwoju zautomatyzowanych systemów wytwarzania tj.: "przed-CNC", systemy CNC, systemy CNC oparte o wiedzę. Pokazano w nim jak w każdym z tych etapów systemy produkcyjne zaspokajały potrzeby klientów i jak wpływały na zmianę charakteru pracy i kwalifikacje pracowników przemysłu.

Słowa kluczowe: zautomatyzowane systemy wytwarzania, zautomatyzowane systemy produkcyjne, linie produkcyjne, systemy CNC, systemy FMS, systemy RMS, potrzeby klientów, kwalifikacje pracowników.

Dr hab. inż. Jerzy STAMIROWSKI, prof. PŚK
Mgr inż. Dawid SKRZYPCZYŃSKI (doktorant)
Katedra Automatyki i Robotyki
Centrum Laserowych Technologii Metali
Politechnika Świętokrzyska
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
e-mail: e.stamirowska@upcpoczta.pl
davskr@gmail.com

ALGORYTMY SAMOUCZĄCE W ZASTOSOWANIU DO TECHNOLOGICZNYCH SYSTEMÓW PROGNOZUJĄCYCH PROCES OBRÓBK FREZOWANIEM

Wstęp

Od czasu użycia po raz pierwszy metody obróbki skrawaniem nastąpił ogromny postęp w dziedzinie wytwarzania. Spośród wszystkich stosowanych technik mechanicznego wytwarzania stanowi ona około $60 \div 70\%$, a połowa zużytej energii w procesach wytwarzania przypada na procesy obróbki skrawaniem [np.: 1]. Przewiduje się, że skrawanie z wysoką precyzją i wysokimi prędkościami będzie się rozwijało przez najbliższe lata, a szczególnie obróbka frezowaniem.

Rosnące wymagania klienta, jak również czynniki ekonomiczne związane z obniżeniem kosztów produkcji powodują, że projektanci i konstruktorzy tworzą coraz to bardziej skomplikowane kształty wyrobów o zmniejszonej masie. Następstwem tego są trudności podczas wytwarzania. Główną przyczyną tych trudności są drgania występujące podczas obróbki.

Ważnym czynnikiem stymulującym postęp w dziedzinie sterowania procesami obróbki są rosnące wymagania dotyczące dokładności elementów maszyn, a także konieczności utrzymania jak najniższych kosztów produkcji. Jednym ze sposobów obniżenia kosztów jest odpowiednia gospodarka narzędziowa. Ponieważ pochłania ona duże nakłady finansowe, dąży się do doboru najbardziej racjonalnych i optymalnych warunków skrawania. Zastosowanie bardzo dużych prędkości skrawania, dużych wartości posuwów, ograniczenie bądź całkowite wyeliminowanie cieczy obróbkowych powoduje, że żywotność narzędzi może być mała, co stanowi barierę w podnoszeniu efektywności procesu obróbkowego. Wydłużenie okresu trwałości użytkowania narzędzia jest jednym z czynników zmniejszenia kosztów produkcji. Istnieje jednak problem w ocenie bieżącego stopnia zużycia narzędzia, szczególnie frezów kulistych.

Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie systemów monitorujących stan narzędzia. Potwierdzeniem takiej tezy może być zgodność oceny zużycia frezów w prowadzonych badaniach, na podstawie subiektywnych obserwacji operatora obrabiarki z danymi opartymi o zmierzone wskaźniki.

Zagadnienie diagnostyki i nadzoru narzędzia skrawającego w technologii obróbki wiórowej należy do ciągle aktualnych i niezwykle istotnych. Prowadzone badania naukowe są wciąż dalekie od satysfakcjonujących, a obecny stan wiedzy w tej dziedzinie należy uważać za niewystarczający. Konieczność ciągłego nadzoru nad stanem narzędzia wynika z dużej niepewności przewidywania zużycia. Nie istnieje jednoznaczna teoria wyjaśniająca w sposób wyczerpujący zależności: cechy sygnału wibroakustycznego – zużycie narzędzia.

Potwierdzeniem słuszności podjęcia tematyki badań jest brak pełnej analizy metod predykcji opisujących w sposób wyczerpujący zużycie frezów kulistych. Strategie opisywane w literaturze należy w większości przypadków traktować jako bazę do dalszych badań. Dominują badania oparte na konwencjonalnej obróbce płaskich przedmiotów frezem walcowym o ustalonej geometrii ze stałymi parametrami technologicznymi i geometrycznymi.

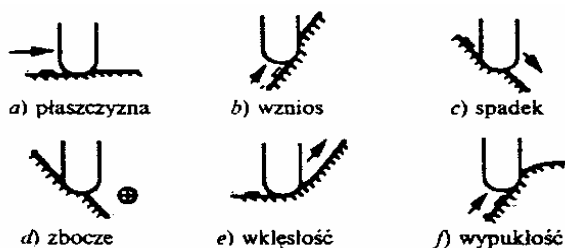
Ponadto brak jest odpowiednich norm technicznych dotyczących badań zużycia frezów kulistych z węgla spiekane. Na potrzeby badań, w oparciu o założenia wynikające z norm przeznaczonych dla frezów walcowych opracowano koncepcję wyznaczania wskaźników technologicznych zużycia frezów kulistych [12].

1. Systemy monitorujące w obróbce skrawaniem

Wpływ na ogólne koszty wytwarzania wyrobów mają koszty narzędziowe. Wiąże się to z ich zakupem, eksploatacją, ostrzeniem, itd. Okres ich użytkowania jest silnie uzależniony od parametrów skrawania. Wydłużenie okresu trwałości użytkowania narzędzia jest jednym z czynników zmniejszenia kosztów produkcji. Istnieje jednak problem w ocenie bieżącego stopnia zużycia narzędzia. Trudność ta polega na określeniu parametrów zużycia ostrzy narzędzia, która mogą pracować krawędzią skrawającą częściowo lub na całej długości łuku (rys. 1).

Praktyka potwierdza, że w przedsiębiorstwach produkcji małoseryjnej narzędzie jest używane do obróbki różnych elementów przy wykorzystaniu całkowicie różnych parametrów obróbki skrawaniem. W takim przypadku ocena przydatności narzędzia do dalszej obróbki, czy narzędzie jest ostre czy nie, jest trudna. Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie systemów monitorujących stan narzędzia. Kilka takich układów zostało zainstalowanych w praktyce przemysłowej. Okazało się, że większość zainstalowanych układów przestaje być wykorzystywana przed upływem roku [7]. Zaledwie 29% producentów obrabiarek i 38% ich użytkowników jest zadowolonych z proponowanych rozwiązań.

Szczególnie w obróbce szybkościowej HSM (High Speed Machining) pewnikiem działania jest konieczność stosowania o dużym stopniu pewności systemów diagnozujących stan narzędzia w trakcie pracy obrabiarki.



Rys. 1. Rodzaje lokalnych kształtów obrabianych przez frez o zakończeniu kulistym [4]

Wczesne wykrywanie uszkodzeń pozwala więc na uniknięcie dużych strat ekonomicznych związanych z przerywaną produkcją, zniszczenia urządzeń, ale przede wszystkim pozwala na zastosowanie metod i technik projektowania układów tolerujących uszkodzenia. Układy takie posiadają ogromne znaczenie, gdyż umożliwiają bezpieczne działanie obiektu nawet w warunkach występujących uszkodzeń, oczywiście przy obniżeniu jakości sterowania.

Powszechnie stosowane zliczanie czasu pracy narzędzia, zwłaszcza w warunkach produkcji jednostkowej i małoseryjnej, czyli w warunkach szerokich zmian parametrów skrawania, obarczone jest dużą niepewnością. Z jednej strony zbyt wczesna wymiana nie w pełni zużytego narzędzia jest ekonomicznie nieuzasadniona, natomiast zbyt późna skutkuje obniżeniem jakości wyrobu. Ocena stanu technicznego narzędzia skrawającego w trakcie trwania procesu skrawania jest niezwykle trudna [3].

Komputerowa diagnostyka techniczna może być, więc postrzegana jako procedura algorytmicznej klasyfikacji bieżącego stanu urządzeń do jednej z wyspecyfikowanych wcześniej klas sprawności reprezentujących wzorce diagnostyczne. Liczba takich klas zależy od stopnia zaawansowania systemu diagnostycznego, w tym od możliwości reagowania na generowane diagnozy. W najprostszym przypadku będą to klasy (sprawny-niesprawny), a w złożonych systemach – klasy odpowiadające różnym źródłom obserwowanej niesprawności układu technicznego, co umożliwia lokalizację uszkodzeń.

Wykrywanie początkowego uszkodzenia lokalnego w złożonych systemach obróbkowych, takich jak obróbka frezowaniem, jest zagadnieniem złożonym ze względu na zakłócenia pochodzące od wzajemnego dynamicznego oddziaływanie pochodzącego z różnych podzespołów układu. Zagadnienie to leży w zakresie analizy różnych czynników wpływających na postać sygnału diagnostycznego i są to czynniki konstrukcyjne, technologiczne, eksploatacyjne.

Podstawą diagnostyki są informacje procesowe zbierane automatycznie przez system pomiarowy, generowane przez odpowiednie procedury obliczeniowe

i urządzenia alarmowe oraz dane wpisywane przez operatorów. Zmienne kodujące te informacje tworzą przestrzeń sygnałów diagnostycznych. Symptomy sprawności/niesprawności, tj. relacje pomiędzy obserwowanymi sygnałami, a faktycznym stanem sprawności, mają charakter probabilistyczny, co wynika z obecności szumów pomiarowych i zakłóceń procesowych. Związana z tym niepewność diagnoz zależy od doboru sygnałów diagnostycznych oraz zastosowanej (jawnie lub niejawnie) parametryzacji wzorców diagnostycznych [9]. Sygnałami diagnostycznymi są najczęściej zmienne procesowe (ciągłe i dyskretne) lub ich proste transformacje (wartości względne, przyrosty, logarytmy zmiennych, wartości uśrednione). Niemniej, coraz częściej stosuje się bardziej zaawansowane przekształcenia (np.: transformacje widmowe, falkowe), a także klasyfikację bieżących zachowań poszczególnych szeregów czasowych [5].

Niezawodność diagnoz zależy od dokładności modelu procesu. Najbardziej uniwersalnym ujęciem formalnym dynamiki procesu jest jego nieliniowy model przyczynowo-skutkowy w przestrzeni stanu. Jednak dla większości procesów technologicznych pozyskanie takiego modelu wymaga kosztownych i czasochłonnych badań, a nieuniknione uproszczenia mogą znacząco obniżyć precyzję diagnozy [5]. W związku z tym w praktyce wykorzystuje się najczęściej uproszczone, nieliniowe modele stanów stacjonarnych (ustalonych) oraz liniowe modele odchyłowe typu wejścia-wyjścia (modele regresyjne) lub w przestrzeni stanu, których parametry wyznacza się metodami statystycznymi.

Najbardziej uproszczoną (a więc i najtańszą) metodą statystyczną pozyskiwania wzorców diagnostycznych stanu sprawności wielowymiarowych procesów jest ortogonalizacja przestrzeni cech procesu metodą transformacji Karhunen-Loevego (KL) [8].

W komputerowym monitorowaniu narzędzi skrawających, istotne znaczenie ma możliwość algorytmicznego pozyskiwania wzorców sprawności, przy pomocy taniego, standardowego oprogramowania. Stosowane dotąd systemy wykorzystywały różne metody: bezpośrednie i pośrednie, które okazywały się mniej lub bardziej efektywne.

Metody bezpośrednie są oparte na ocenie wskaźników związanych ze zmianą cech geometrycznych ostrza narzędzia lub zmianie w wymiarach przedmiotu obrabianego. Metody te są trudne w zastosowaniu z powodu niedostępności obszaru skrawania podczas obróbki, powolne w działaniu i mało dokładne. Metody bezdotykowe najczęściej stosowane są do wykrycia skutków katastroficznego zużycia narzędzia.

Metody pośrednie w odróżnieniu od bezpośrednich wymagają dwustopniowych działań: pomiaru określonej wielkości fizycznej i opracowania odpowiedniej zależności pozwalającej na wnioskowanie o stanie narzędzia na podstawie dokonanego pomiaru. Wykorzystują więc wtórne zjawiska spowodowane zużyciem ostrza. Opierają się na pomiarach skutków zużycia a nie samego zużycia. Cechuje je prostsza technicznie estymacja cech zużycia, ale wyniki są obarczone niepewnością wynikającą z nie do końca rozpoznanych zjawisk

zachodzących w strefie skrawania, szczególnie podczas frezowania profilowego. Najczęściej w metodach pośrednich, wykorzystuje się pomiar sił skrawania, emisję akustyczną, pobór prądu silnika oraz pomiar drgań i hałasu.

W obróbce frezowaniem, siła skrawania pulsuje, ponieważ ostrze skrawające okresowo wchodzi i wychodzi z przedmiotu obrabianego z każdym obrotem frezu co znacznie utrudnia proces monitorowania zużycia. Narzędzia pomiarowe mierzące siły skrawania są drogie, wrażliwe na przeładowania, kruche a systemy monitorowania wciąż są problematyczne w relacji wysoki koszt/efekty działania. Jest to przeszkodą, aby systemy mogły mieć szerokie zastosowanie w przemyśle. Ponadto, stosowanie czujników, które ingerują w obrabiarkę, zmniejszają sztywność układu prowadząc do niepożądanych drgań. Pomimo wielu wad są prowadzone dalsze prace nad praktycznym wykorzystaniem sił skrawania do predykcji zużycia w procesie frezowania. Należy stwierdzić, że metoda sił skrawania może skutecznie monitorować jedynie katastroficzne zużycie – złamanie narzędzia.

Innym sposobem określania stanu zużycia narzędzi i procesu skrawania jest metoda wykorzystująca sygnały emisji akustycznej. Użyteczny zakres częstotliwości wynosi od 50 kHz do 400 kHz. Podobnie jak w przypadku sił skrawania, emisja akustyczna wykorzystywana jest w większym stopniu do monitorowania złamania narzędzia. Wykazano [10], że emisja akustyczna jest zależna od parametrów technologicznych skrawania, rodzaju narzędzia, gatunku materiału obrabianego oraz wzajemnej geometrii. Udowodniono, że metoda monitorowania złamania narzędzia przy wykorzystaniu emisji akustycznej prowadzi do znacznej ilości fałszywych alarmów podczas frezowania. Za przyczynę należy uznać, tak jak w przypadku sił skrawania, charakter pracy narzędzia wielostrzowego, jego cykliczne zagłębianie się w materiał. Ograniczeniem w stosowaniu tej metody jest również brak pewności na detekcję wszystkich rodzajów uszkodzeń narzędzia, wrażliwość sygnału na warunki otoczenia (hałas z różnych źródeł w systemie obrabiarki) jak również istotne znaczenie ma miejsce zamontowania czujnika. Z tych powodów nie istnieje praktyczne zastosowanie emisji akustycznej do monitorowania stopniowego zużycia narzędzia.

Kolejną pośrednią metodą oceny stanu narzędzia jest pobór prądu silnika obrabiarki. Ten pośredni pomiar siły skrawania jest wykonywany tylko w niskiej częstotliwości sięgającej około 130 Hz. System monitorowania zużycia narzędzia on-line z wykorzystaniem poboru prądu silnika wrzeczona lub serwośilników posuwu uważany jest, jako jeden z potencjalnych systemów do zastosowań przemysłowych. Jest stosunkowo prosty a układ monitorowania, czyli układ prądowy silnika, jest integralną częścią obrabiarki i nie wymaga zmian konstrukcyjnych maszyny. Wadą takiego rozwiązania jest to, że sygnał uzyskany w czasie rzeczywistym nie jest adekwatny do aktualnego stanu narzędzia (opóźnienie w czasie), z powodu ograniczonej wrażliwości układu silnika na zużycie narzędzia. Tak jak w przypadku monitorowania za pomocą sił

skrawania czy emisji akustycznej, metoda poboru prądu silnika wykorzystywana jest do oceny zużycia katastroficznego narzędzia. Ponadto, czas reakcji układów na zużycie narzędzia jest niezadowalający w przypadku obróbki z dużymi prędkościami HSM.

Metoda oceny stanu narzędzia przy wykorzystaniu pomiaru drgań jest wartościową i stosowaną metodą monitorowania warunków skrawania narzędzia. Postępujący stan zużycia narzędzia w procesie obróbki skrawaniem powoduje wzrost drgań. Sygnał drganiowy zawiera informację o jego stanie i pozwala na skuteczną predykcję przyszłych warunków skrawania. Dużą zaletą tej metody jest brak konieczności zmian konstrukcyjnych obrabiarki celem instalacji czujników a także łatwość pomiarów, znaczne możliwości przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu lub częstotliwości.

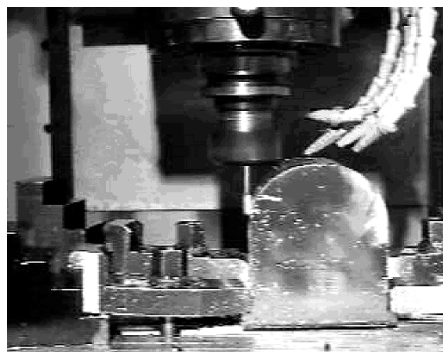
W kontekście procesu frezowania, monitorowanie narzędzia przy pomocy drgań jest ograniczone przez naturę tego procesu. Wykazano [np.: 6], że w momencie kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym ma miejsce wzrost częstości drgań. Tak, więc dynamiczne cechy drgań narzędzia w procesie obróbki frezowaniem zmieniają się wraz z rozwojem zużycia narzędzia. Przedstawioną zależność, z dużą dozą pewności, można wykorzystać jako miarę zużycia narzędzia w systemie monitorowania.

W literaturze, w uniwersalnych układach monitorowania stanu narzędzia podczas frezowania ortogonalnego, dane wzorcowe są otrzymywane z szeregu badań wstępnych. Duża liczba tych badań wynika z konieczności wykonania znacznej ilości prób przy możliwie wszystkich warunkach skrawania. Stan ten, powoduje nieefektywność i wzrost kosztów wdrożenia systemu monitorowania w warunkach przemysłowych. Również analiza uzyskanego podczas realizacji procesu skrawania sygnału wibroakustycznego, wykonywana jest za pomocą jednej lub dwóch metod estymacji jego cech. Ponieważ cechy sygnału wibroakustycznego silnie się zmieniają wraz ze zmiennymi warunkami technologicznymi i geometrycznymi skrawania należy podjąć próbę analizy wieloma metodami, celem otrzymania wiarygodnej informacji o stanie ostrza skrawającego. Dodatkowo, wykorzystując uzyskane w warunkach rzeczywistych wyniki badań doświadczalnych do uczenia sztucznych sieci neuronowych, możliwe jest zbudowanie użytecznego systemu nadzorującego (identyfikującego i prognozującego) zużycie narzędzi.

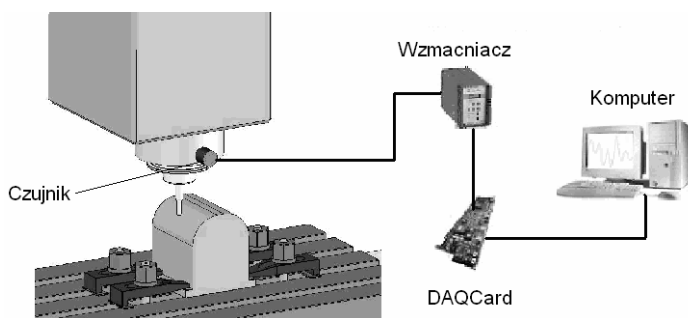
2. Przebieg badań eksperymentalnych

Interesujące wyniki pomiarów przy wykorzystaniu sygnału wibroakustycznego do monitorowania zużycia narzędzia uzyskano w wyniku pomiarów pośrednich przy wykorzystaniu stanowiska badawczego przedstawionego na rysunku 2.

a)



b)



Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) widok ogólny, b) schemat strukturalny [13]

Uwzględniając specyfikę prowadzonych badań, rejestrowano wartości sygnału wibroakustycznego pochodzące z procesu skrawania.

Obróbkę prowadzono na trzyosiowej frezarce o sterowaniu numerycznym dla różnych, ustalonych parametrów skrawania (głębokość $a_p=0,3; 0,7$ mm; szerokość $b=0,3$ mm, posuw $f=500; 1080; 1620$ mm/min; obroty $n=500; 1000, 1500, 3000$ obr/min). Program sterowania obrabiarką był wygenerowany za pomocą programu CAM. W programie uwzględniono specyfikę pracy narzędzia (rys. 1 f). Skrawaniu poddawano próbkę o ustalonych wymiarach ze stali ŁH 15 SG (rys. 4 [13]). Zastosowano frez monolityczny z węgla spiekanego typu F344X06D13 – 057C06U, bez pokrycia $\phi 6$ h10 o ustalonej geometrii ostrza.

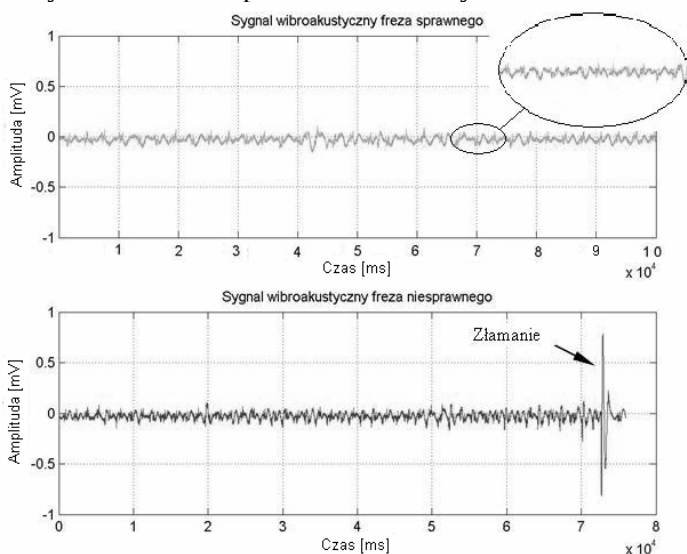
Składowe sygnału wibroakustycznego mierzono czujnikiem piezoelektrycznym. Do uzyskania porównywalnych wyników pomiarów należało zapewnić stałą odległość czujnika od strefy skrawania. Rozwiązano to w taki sposób, że czujnik został umieszczony na wrzecionie obrabiarki. Czujnik współpracował ze wzmacniaczem ładunku. Sygnał wibroakustyczny pochodzący ze wzmacniacza ładunku kierowano do przetwornika analogowo-cyfrowego DAQCard 700 firmy National Instrument. Ostatecznie sygnał został przesłany do komputera klasy PC, który archiwizował otrzymane wyniki na dysku

tworząc w postaci plików tekstowych (*.txt). Do budowy interfejsu układu pomiarowego zastosowano specjalistyczne oprogramowanie LabView.

Badania zostały podzielone na dwa etapy. W pierwszym etapie eksperyment polegał na rejestracji sygnału wibroakustycznego obróbki nowym narzędziem (ostрым) przy zadanych, stałych parametrach. Sygnał ten został uznany jako wzorzec sygnału. W celu zdiagnozowania zjawiska zostały wykonane kolejne pomiary (etap drugi). Narzędzie zostało poddane zużyciu podczas pracy przy zmiennych parametrach technologicznych. Cykl jednego przejścia narzędzia to okres 8 sekundowy, natomiast wycinek odpowiadający za zużycie został ustalony na 2 sekundy. Okres ten zawiera się w obróbce promienia R35 [13]. Umożliwiło to rejestrację wartości sygnału zawsze przy stałych, ustalonych parametrach. Drugi etap badań trwał do momentu katastroficznego zużycia freza.

3. Analiza i wyniki badań

W wyniku badań eksperymentalnych otrzymano szereg przebiegów sygnału wibroakustycznego w funkcji czasu. Przykładowe przebiegi czasowe zmian wartości mierzonych wielkości zaprezentowano na rysunek 3.



Rys. 3. Przykłady otrzymanych przebiegów amplitudowo – czasowych

Na podst. otrzymanych przebiegów amplitudowo-czasowych przeprowadzono wstępną analizę wrażliwości metody do oceny stopnia zużycia freza z wykorzyst. szybkiej transformaty Fouriera. Przeprowadzono obliczenie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych sygnału dla kolejnych faz zużycia.

Analiza wykazała w obszarze trwałości amplituda ta zmienia się w małym stopniu, jednakże w momencie zużycia katastroficznego daje się zaobserwować zmiany (rys. 3).

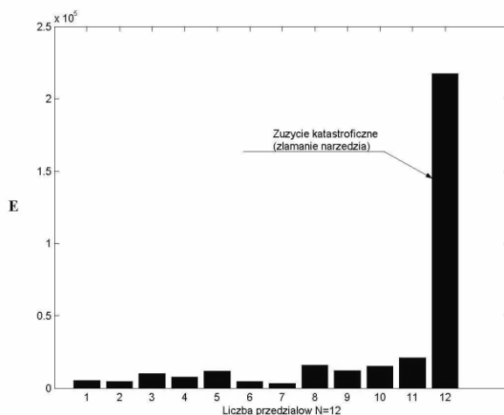
Porównanie kolejnych widm sygnałów otrzymanych w wyniku FFT było możliwe z wykorzystaniem odległości Euklidesowych dwóch wektorów:

$$odl(x, y) = [\sum_i (x_i - y_i)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

gdzie: *odl* – odległość Euklidesowa, *x* – wektor widma narzędzia ostrego, *y* – wektor widma sygnału bieżącego.

Podczas dalszego przebiegu procesu algorytm rejestrował i zapisywał kolejne odległości Euklidesowe. Parametr odległości *odl* stanowił wskaźnik stanu ostrza narzędzia skrawającego. Analizując dynamikę zmian tego parametru i porównując z narzuconymi przez technologa kryteriami dopuszczalnymi dla zużycia narzędzi algorytm generował sygnał zezwalający lub nie na dalszą obróbkę.

Na wykresie 1 pokazano praktyczne zastosowanie omawianego algorytmu. Cykl obróbkowy podzielony został na 12 przedziałów, z których w ostatnim nastąpiło zużycie katastroficzne. Analizując przebieg można zauważyć, że w przedziale 8 wartość parametru *odl* przekroczyła kilkakrotnie wartość parametru *odl* z przedziału 7. Ponieważ obróbka trwała dalej pomijając wzrost w przedziałach 10 i 11 (obróbka nie została przerwana), w przedziale 12 nastąpiło zużycie katastroficzne.

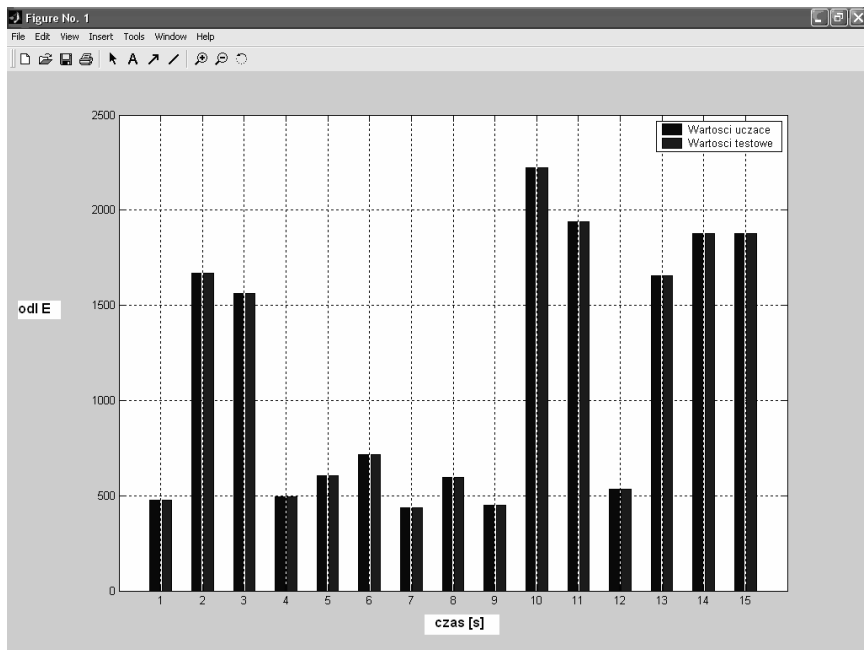


Wykres 1. Zmiany symptomów zużycia w funkcji liczby przedziałów N=12, E – odległość Euklidesowa

Zastosowanie algorytmów z zakresu sztucznej inteligencji pozwoliło na predykcję zużycia frezu. Wykorzystując sztuczną inteligencję wykorzystano metodą rozpoznawania wzorca, która polega na określeniu odwzorowania

przestrzeni pomiarowej w przestrzeń decyzyjną. Poprzez porównanie sygnału pomiarowego z wzorcowym następuje diagnoza i ocena zużycia. Wybór optymalnej liczby warstw ukrytych oraz liczby neuronów w poszczególnych warstwach polega na testowaniu zachowania sieci dla różnych parametrów (liczby warstw ukrytych i neuronów) pod względem szybkości uczenia sieci oraz wartości błędu. W rozważanym problemie zastosowano sieć neuronową typu wielowarstwowy perceptron MLP. Proponowaną sieć o strukturze trójwarstwowej z jedną warstwą ukrytą składającą się z 20 neuronów, uczono algorytmem propagacji wstecznej z liniową funkcją aktywacji.

Po nauczaniu sieci, to znaczy po osiągnięciu kryterium 5% błędu względnego dokonano testowania na zbiorach niebiorących udziału w procesie uczenia. W modelu na wejściu w fazie uczenia poddano kolejno wartości odległości Euklidesowe przesunięte w czasie o stałą wartość t a na wyjściu wartość wskaźnika zarejestrowany w czasie t_0+t . W kolejnym modelu informację uzupełniono o parametry technologiczne i geometryczne obróbki frezowaniem. Tak opracowane modele pozwoliły na generowanie sygnału ostrzegającego o istnieniu zagrożenia wykruszeniu narzędzia oraz na oszacowaniu czasu jaki pozostał do zakończenia eksploatacji narzędzia. Jeżeli liczony wskaźnik odległości z bieżącego sygnału wibroakustycznego przekroczył kilkakrotnie wartość poprzedniego pomiaru, układ natychmiast wygenerował sygnał przerwania obróbki. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wynik predykcji zużycia frezu.



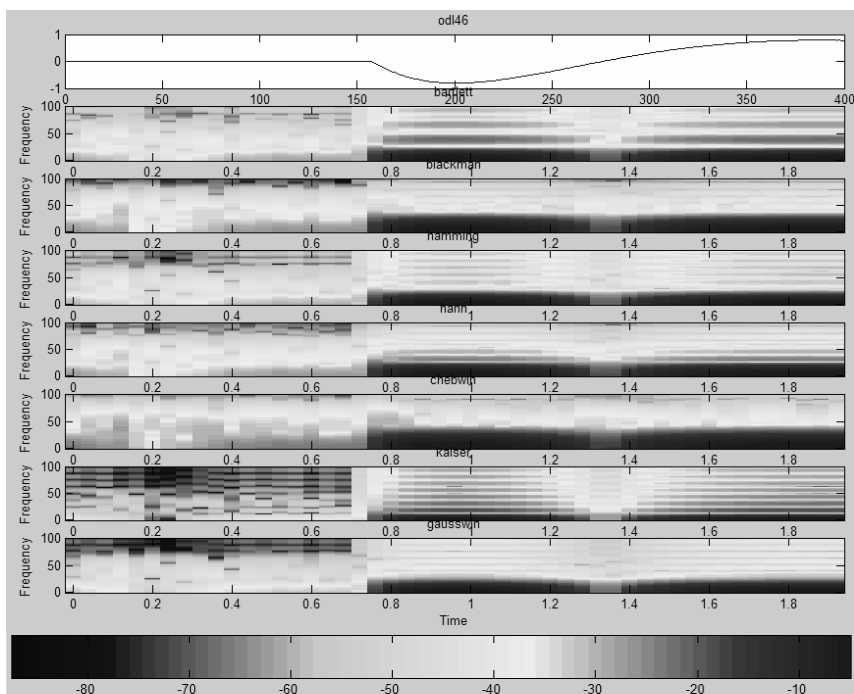
Rys. 4. Wynik predykcji zużycia frezu

Zamodelowanie wzorców reprezentujących zużycie wiąże się z zebraniem dużej ilości danych. Im jest ich więcej, tym diagnoza wykonana z zastosowaniem sieci neuronowej będzie bardziej wiarygodna. Aby zapewnić prawidłowe działanie systemu diagnostycznego dane te muszą być reprezentatywne dla wszystkich możliwych uszkodzeń narzędzia tzn. powinny pochodzić z możliwie jak najszerszego zakresu zmienności technologicznych wielkości wejściowych.

W celu uzyskania algorytmu efektywnej analizy i kompresji danych pomiarowych sygnału wibroakustycznego; tj. algorytmu, który pozwoliłby na rejestrację szerszej gamy zjawisk występujących podczas frezowania, a z drugiej strony nie powodowałby generowania nadmiaru informacji oraz gwałtownego wzrostu rozmiarów tworzonych baz tych sygnałów powstał pomysł połączenia różnych technik cyfrowego przetwarzania sygnałów.

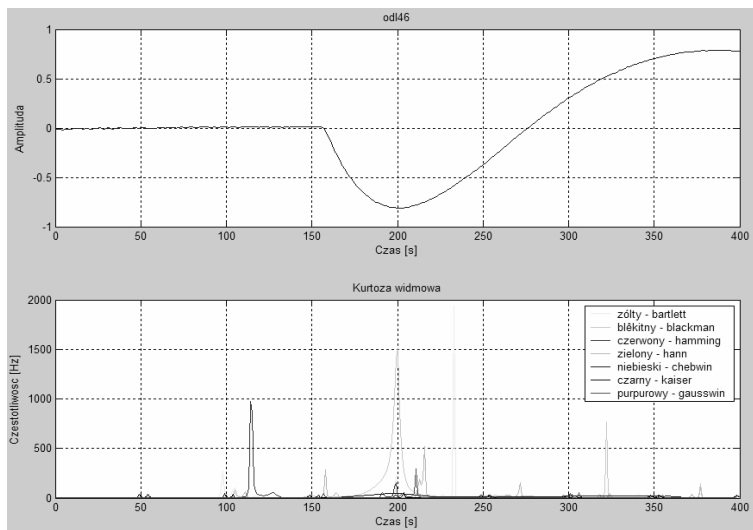
Połączenie metod statystycznych z technikami grupowania, pozwala nie tylko na wiarygodną detekcję uszkodzeń, ale również na ich bardziej precyzyjną klasyfikację. Wysoką wiarygodność klasyfikacji dają zaawansowane techniki przetwarzania sygnałów, tj. specgram, kurtoza widmowa [11], cepstrum, transformacje falkowe.

Na rysunkach 5 – 8 przedstawiono przykładowe wyniki estymacji cech sygnału wibroakustycznego próbki s7 (rys. 3 – złamanie narzędzia).

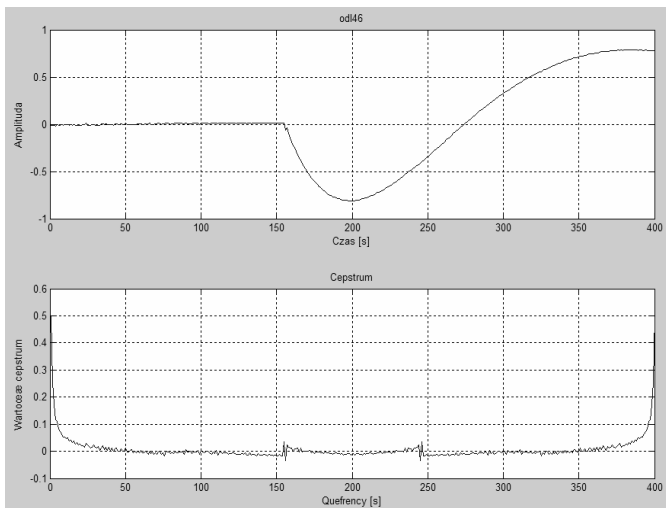


Rys. 5. Analiza spektralna okresu odl46 sygnału wibroakustycznego próbki s7

Okienkowanie ma bardzo dobry wpływ na przetwarzane próbki sygnałów. Nie można jednak w niektórych przypadkach zastosować tej metody do sygnałów o niewielkiej różnicy częstotliwości. Okna potrafią tą różnicę "uproszczyć" do jednej składowej – co może mieć znaczenie. Wykazano, że okno należy dobrać doświadczalnie, konkretnie do zaistniałej potrzeby oraz wymagań. Określono optymalne okna do rozpoznania naturalnego stępienia ostrza to okno Hamminga, wykruszenia ostrza – okno Blackmanna, złamania frezu – okno Czebyszewa.



Rys. 6. Kurtoza widmowa okresu odl46 sygnału wibroakustycznego próbki s7

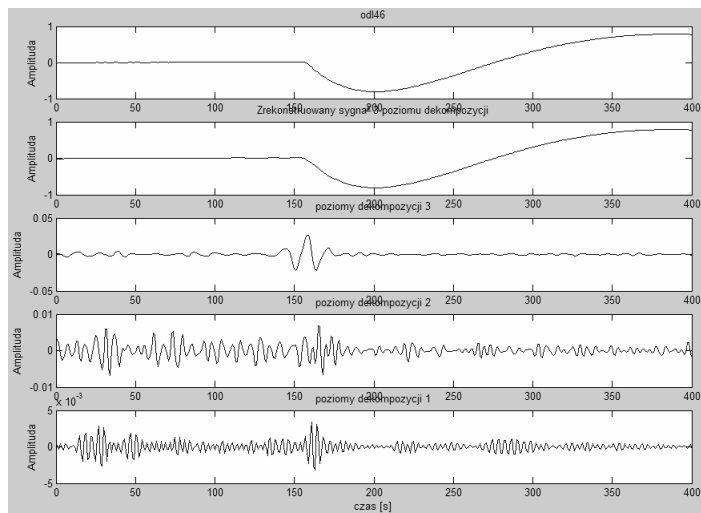


Rys. 7. Cepstrum rzeczywiste okresu odl46 sygnału wibroakustycznego próbki s7

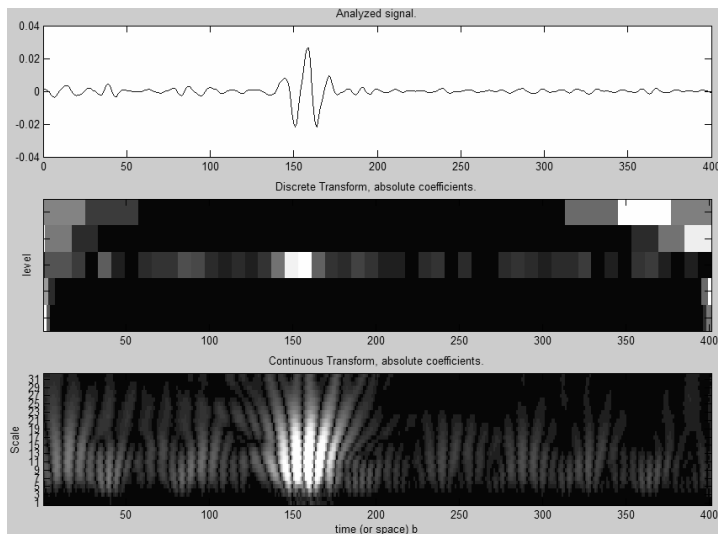
Zastosowanie kurtozy widmowej dało bardzo zbliżone do siebie wyniki. Zastosowanie tej techniki w praktyce wiąże się z koniecznością zaimplementowania dość skomplikowanej procedury liczącej kurtozę powodując metodę nieefektywną do zastosowań przemysłowych.

Przeprowadzona analiza wykazała, że metoda cepstralna ma możliwości praktycznego wykorzystania do predykcji zużycia frezu kulistego. Ustalenie progu pozwoli na przerwanie obróbki i wymianę zużytego narzędzia.

a)



b)



Rys. 8. Dekompozycja odcinka sygnału odl46 falką Symlets (a) oraz jego mapa czasowo – częstotliwościowa (b)

Badania prowadzone z wykorzystaniem analizy falkowej wykazały, że na poziomie 3 dekompozycji próbek sygnału wibroakustycznego, widać obraz, na którym wyraźnie zauważalny jest sygnał pochodzący od wykruszenia i złamania frezu. Natomiast poziom 1 wskazuje na zużycie naturalne – ścierne. Również na mapach czasowo-częstotliwościowych widać miejsca, w których następuje uszkodzenie narzędzia.

Wyniki analizy falkowej zakłóceń, są zgodne z wynikami analizy częstotliwościowej. Ponadto analiza ta ujawniła przedziały czasowe, w których energia sygnału jest największa; możliwa jest więc również analiza struktur częstotliwościowych badanych zakłóceń.

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza dowodzi, że można opracować system diagnostyczny w oparciu o prostą sieć neuronową za pomocą, której – po wstępnym dostrojeniu – może osiągnąć wiarygodne informacje o stanie obiektu technicznego, w tym przypadku freza kulistego.

Opracowany algorytm przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w sposób poprawny identyfikował zużycie frezu kulistego. Podstawą algorytmu identyfikacji zużycia były wartości odległości Euklidesowych. Zastosowanie algorytmów z zakresu sztucznej inteligencji pozwoliło na zwiększenie skuteczności predykcji zużycia frezu. Wykorzystując sztuczną inteligencję zastosowano metodą rozpoznawania wzorca. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że w niektórych przypadkach frezowania kształtowego, wartości progu szukanych wskaźników zużycia mogą przyjmować różne wartości. Zdaniem autorów, wartość progu powinna być ustalana i odpowiednio aktualizowana do warunków skrawania w czasie rzeczywistym. W ustaleniu progu należałoby uwzględnić bieżące parametry technologiczne i geometryczne oraz stopień zużycia narzędzia ekstrahowany z sygnału wibroakustycznego.

Określenie związków między wybranymi parametrami sygnału wibroakustycznego generowanego w procesie frezowania a stanem ostrzy frezu kulistego jest niezmiernie trudne. Próbę określenia tych związków dokonano za pomocą cyfrowej analizy sygnału.

Analiza specgram umożliwiła rozpoznanie całościowego stanu zużycia frezu lecz przy zastosowaniu trzech okien: naturalnego stopienia ostrza – okno Hamminga, wykruszenia ostrza – okno Blackmanna, złamania frezu – okno Czebyszewa. Metody analizy cepstrum i kurtozy widmowej mają potencjalne możliwości wykorzystania do określania stanu narzędzia skrawającego lecz złożoność i duży algorytm obliczeniowy ogranicza ich powszechne zastosowanie. Zastosowanie analizy falkowej umożliwia rozwiązanie tego problemu. Badania prowadzone z wykorzystaniem tej metody wykazały, że dzięki nie obcinaniu pasma sygnału, umożliwia pełną identyfikację zużycia. Proponowany układ przyczyni się do większego wykorzystania potencjału technologicznego przedsiębiorstwa, ale

przede wszystkim do minimalizacji nakładów finansowych finalnego wyrobu. Optymalne wykorzystanie własności narzędzia, ich racjonalne zarządzanie spowoduje, że przedsiębiorstwo wyposażone w proponowany układ zwiększy swoją konkurencję na rynku półwyrobów i wyrobów o złożonych kształtach.

LITERATURA

1. Antoni J, Randall R. B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines MSSP 2005.
2. Bartelmus W., Computer aided multistage gearbox diagnostic inference by computer simulation, Scientific papers of the Institute of Mining of the Wrocław University of Technology 2002.
3. Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., König, W., Teti, R., Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application, Annals of the CIRP, 44/2: 541 – 567, 1995.
4. Chu C. N., Kim S. Y., Lee J. M., Kim B. H.: Feed – Rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features, Annals of the CIRP, 46/1, 1997.
5. Duda J. T., Modele matematyczne, struktury i algorytmy nadrzędnego sterowania komputerowego. UWND AGH, Kraków, 2003.
6. Hashimoto M., Marui E., Kato S., Experimental research on cutting force variation during primary chatter vibration occurring in plain milling operation, International Journal Mach. Tools Manufacturing, vol. 36, no. 2, pp. 183 – 201, 1996.
7. Jemielniak K., Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawaniem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
8. Jolliffe, I. T., Principal Component Analysis; Springer, 2002.
9. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.) Diagnostyka procesów – modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania – praca zbiorowa. WNT, Warszawa, 2002.
10. Li X., A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. Int J Mach Tool Manuf. 42:157 – 165, 2002.
11. Wiercigroch M., Budak E., Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 359 (A), 663 – 693, 2001.
12. Wittbrodt P.: Life and Wear of Monolithic Carbide Mills. Eksploatacja i Niezawodność Nr 3/2005.
13. Wittbrodt P. Proces naturalnego zużycia kulistych frezów węglkowych podczas frezowania. Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 6/2007.

THE SELF-LEARNING ALGORITHMS IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR PROGNOSING THE MILLING PROCESSING

Abstract

The results of research on prediction of wear of monolithic, spherical, carbide mills using the vibro-acoustic signal were introduced in the paper. The artificial, one-way MLP type neural network was used to prognose the wear. The potential possibilities of application of this method to effective systems for prognosing tool wear in milling process were presented.

Keywords: mills durability and wear, neural networks, MLP

ALGORYTMY SAMOUCZĄCE W ZASTOSOWANIU DO TECHNOLOGICZNYCH SYSTEMÓW PROGNOZUJĄCYCH PROCES OBRÓBKI FREZOWANIEM

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań predykcji zużycia kulistych frezów monolitycznych węglkowych przy wykorzystaniu sygnału wibroakustycznego. Do prognozy zużycia wykorzystano sztuczną, jednokierunkową sieć neuronową typu MLP. Wykazano potencjalne możliwości zastosowania tej metody do skutecznych systemów prognozujących zużycia narzędzia w procesie obróbki frezowaniem.

Słowa kluczowe: trwałość i zużycie frezów, sieci neuronowe, MLP.

Dr inż. Piotr WITTBRODT
Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38D
e-mail: p.wittbrodt@po.opole.pl

Dr inż. Alfred PASZEK
Katedra Inżynierii Wiedzy
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
e-mail: a.paszek@po.opole.pl

BADANIA MOMENTU SKRAWANIA I SIŁY BIERNEJ W PROCESIE FREZOWANIA KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH WZMACNIANYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI I ARAMIDOWYMI

Wstęp

Kompozyt polimerowy jest to materiał utworzony z co najmniej dwóch komponentów. W przypadku kompozytów węglowych włókna mogą być: węglowe typ HT (np. Zigrafil-HM), węglowe typ HM, T-300, T-1000, GY-70, AS-4, JM-2, Amoco P-25, Amoco P-100, Nippon NT-60, Ural -24, Carbolon-L, M-30, Madmor-1 lub Regilor AG [1], [2], [3]. Na wzmocnienia kompozytów aramidowych mogą być stosowane: Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149, Twaron HM, Spectra 1000 czy Dyneema SK 60 [1], [2], [3]. Są to tylko przykłady kilku z kilkuset różnych włókien stosowanych na wzmocnienia kompozytów polimerowych. Osnowę kompozytów polimerowych stanowią polimery, które dzielą się na duroplasty, termoplasty i elastomery. Pełnią one funkcję utrzymania wzmocnienia w odpowiednim miejscu w kompozycie. Ich zadaniem jest przenoszenie obciążeń na fazę zbrojącą w postaci włókien. Nadają wyrobom polimerowym określony kształt i wywierają decydujący wpływ na metodę wytwarzania kompozytów.

Wykorzystanie polimerów wzmocnionych włóknami węglowymi (CFRP) w przemyśle stale rośnie ze względu na korzystne właściwości tych materiałów, takie jak duża wytrzymałość, niska masa właściwa, wysoka odporność na korozję i mały współczynnik rozszerzalności cieplnej. Do zalet tych kompozytów należy też zaliczyć możliwość uzyskania półfabrykatów z małymi naddatkami obróbkowymi. Jednak operacje takie jak wiercenie, frezowanie i dłutowanie nadal są konieczne, aby nadać częściom ich dokładny, ostateczny kształt. Większość badań dotyczących obróbki laminatów CFRP jest na temat wiercenia, a dostęp do wyników badań dotyczących frezowania jest dość ograniczony.

Szeroki zakres wiedzy na temat kompozytów przedstawiony został w przeglądowej pracy R. Teti [4]. Dokonano ogólnej charakterystyki kompozytów z osnową polimerową, metalową i ceramiczną. Opisano obróbkę toczeniem, cięciem, wierceniem i frezowaniem każdego z tych materiałów.

W artykule [5] przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów obróbki kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami węglowymi na siły skrawania. Podczas badań zmieniano prędkość skrawania, posuw i głębokość skrawania. Użyto narzędzi z trzema rodzajami płytek skrawających. Zauważono podczas obróbki CFRP, że jest to materiał bardzo kruchy. Jedną z prac poświęconych kompozytom polimerowym i analizie sił występujących podczas obróbki frezowaniem jest praca [6], autorstwa D. Kalla, J. Sheikh-Ahmad i J. Twomey, w której opracowano metodę prognozowania wartości sił skrawania podczas frezowania kompozytów o wielokierunkowym i jednokierunkowym ułożeniu włókien. Następnie dokonano porównania wartości sił prognozowanych i wyników badań sił zmierzonych w czasie obróbki, po czym wykazano, że za pomocą zastosowanej przez autorów metody możliwe jest prognozowanie wartości sił występujących w czasie obróbki frezowaniem kompozytów polimerowych. W pracy [7] autorzy artykułu badali siły skrawania podczas frezowania rowków w kompozycie węglowym przy użyciu dwóch rodzajów frezów diamentowych. Na podstawie badań stwierdzono, że najlepsze warunki do skrawania kompozytów warstwowych uzyskano przy ułożeniu włókien pod kątem $45^{\circ}/135^{\circ}$, co skutkowało najniższymi wartościami sił skrawania. W pracach [1] i [2] opisano metody wytwarzania kompozytów oraz sposób ich formowania. W pracy [3] scharakteryzowano dokładnie polimery, wzmocnienia i napelniacze stosowane do wytwarzania kompozytów polimerowych. Oprócz tego opisano metody technologiczne wytwarzania wyrobów kompozytowych.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wpływu parametrów skrawania, takich jak prędkość skrawania i posuw, na siłę bierną i moment skrawania podczas frezowania walcowo-czołowego kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami węglowymi i aramidowymi.

1. Stanowisko badawcze

Proces skrawania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi i aramidowymi został przeprowadzony na pionowym centrum obróbkowym Avila – VMC 800 HS. Na stole montowano próbki z kompozytów wewnątrz przestrzeni roboczej obrabiarki podczas obróbki frezowaniem. Do pomiaru siły biernej i momentu skrawania we wrzecionie obrabiarki zamontowano siłomierz Kistler typ 9125A11A2. Siłomierz złożony jest z części ruchomej rotora oraz statora. W połączeniu z systemem kondycjonowania sygnału umożliwia pomiar sił w kierunku pionowym oraz momentu skrawania. Widok ogólny stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

Narzędziem do przeprowadzenia badań był frez z płytkami diamentowymi (PCD), produkcji firmy Iscar o symbolu APKW 100304 PDR ID5 i promieniu zaokrąglenia naroża 0,4 mm.

2. Przygotowanie próbek

Próbki kompozytowe o wymiarach 200x200x10 mm przygotowano przez przesycenie włókien żywicą. Włókna węglowe przesycano żywicą epoksydową o nazwie handlowej GR/EP 985-GF-3070, a włókna naturalne typu kevlar przesycano żywicą epoksydową o nazwie handlowej KV/EP 985-K285-1270. Temperaturę, wilgotność powietrza i ilość zanieczyszczeń w pomieszczeniu kontrolowanym utrzymywano na zalecanym poziomie (temperatura 18 – 30°C, wilgotność do 60% i ilość zanieczyszczeń nie większa niż 10000 cząstek stałych na 1m³). Po przesyceniu jednej warstwy tkaniny żywicą układano kolejne warstwy tkanin, ale obrócone o 90° w stosunku do poprzedniej warstwy tkaniny, które również przesycano. Następnie próbki wkładano do pieca na 120 minut w temperaturze 177°C pod ciśnieniem 0,3 MPa. Po wyjęciu z pieca próbki pozostawiane były do wystygnięcia, a następnie poddawane obróbce odcięcia wpływem żywicy.

3. Metodyka badań

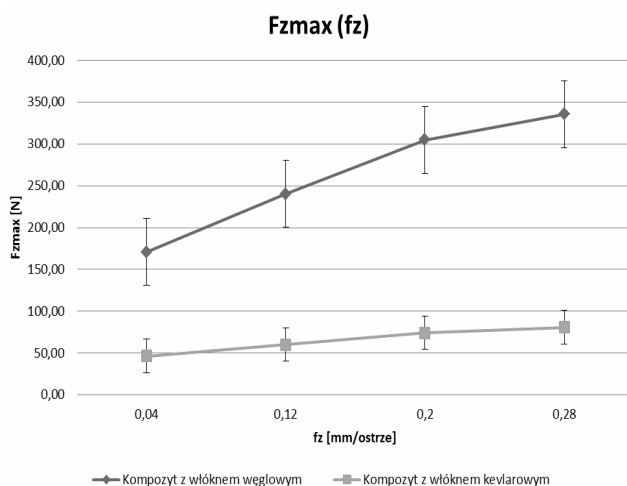
Wykonano badania na kompozytach polimerowych z włóknami węglowymi i kevlarowymi przesycanymi żywicą epoksydową. Badania przeprowadzono w celu oceny wpływu prędkości skrawania i posuwu na moment skrawania i siłę bierną podczas frezowania czołowego. Prędkość skrawania zmieniano w zakresie od 100 m/min do 340 m/min, a posuw na ostrze z zakresu od 0,04 mm/ostrze do 0,28 mm/ostrze. Głębokość skrawania była stała i wynosiła 1 mm.

Określono wartości maksymalne oraz amplitudy momentu skrawania i siły biernej. Wartości maksymalne wyznaczono jako średnie arytmetyczne z dziesięciu największych wartości otrzymanych podczas danego przejścia, a amplitudy jako różnice między wartością maksymalną i minimalną.

Każda próba została powtórzona pięciokrotnie. Obliczono wartości średnie oraz odchylenia standardowe.

4. Wyniki badań

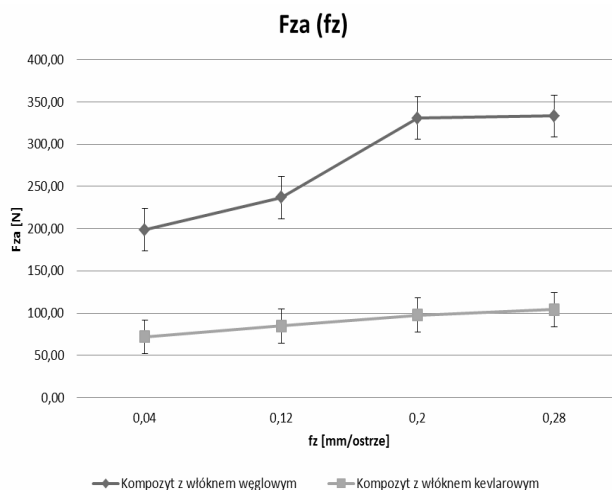
Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć wzrost wartości maksymalnej siły biernej wraz ze wzrostem posuwu przy stałej prędkości skrawania. Wykres 1 pokazuje wzrost sił biernych zarówno dla kompozytu z włóknami węglowymi w zakresie od 170 do 330 N jak i kompozytu z włóknami kevlarowymi w zakresie od 45 do 85 N. Odchylenie standardowe dla maksymalnych sił biernych zawiera się w granicach od 25 N do 50 N dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi, a odchylenie standardowe dla kompozytów polimerowych z włóknem kevlarowym waha się w granicach od 5 N do 20 N. Wartości sił biernych dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi są około 4-krotnie większe niż dla kompozytu polimerowego z włóknami kevlarowymi.



Wykres 1. Zależność wartości sił biernych od posuwu

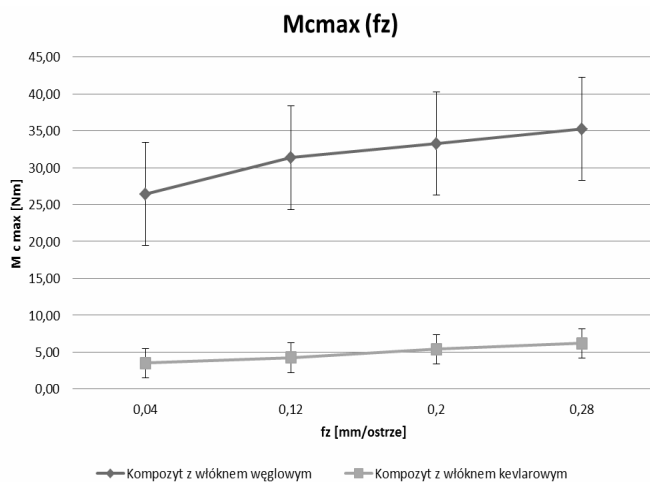
Na wykresie 2 pokazano zależność amplitudy sił biernych dla kompozytu polimerowego z włóknem węglowym i kevlarowym od posuwu. Można zauważyć tendencję wzrostową dla obu rodzajów materiałów. Wartości amplitudy sił biernych zawierają się w granicach od 200 do 340 N dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi oraz od 70 do 110 N dla kompozytu polimerowego z włóknami kevlarowymi.

Odchylenia standardowa dla kompozytów polimerowych z włóknem węglowym i kevlarowym wynoszą odpowiednio 20–40N i 4–15N.

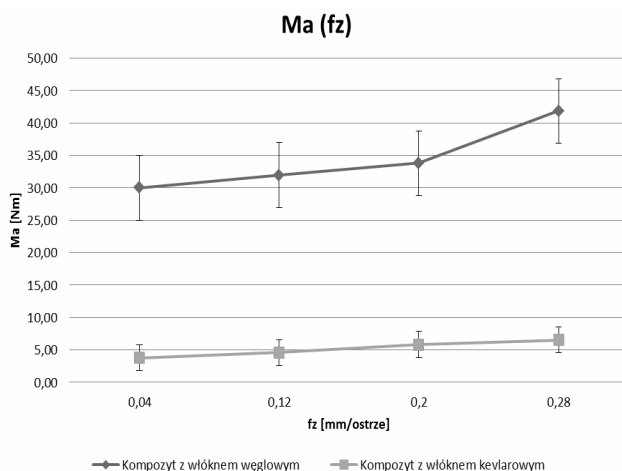


Wykres 2. Zależność amplitudy sił biernych od posuwu

Zależność wartości maksymalnych momentu skrawania od posuwu pokazuje wykres 3. Można zauważyć stosunkowo większy wzrost momentu dla kompozytu z włóknami węglowymi niż dla kompozytu z włóknami kevlarowymi. Wartości dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi zawierają się w granicach od 26 Nm do 36 Nm, wartości dla kompozytu polimerowego z włóknami kevlarowymi zawierają się w granicach od 3Nm do 8 Nm. Odchylenia standardowe dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi zawierają się w granicach od 2 Nm do 5 Nm oraz od 1 Nm do 3 Nm dla kompozytu polimerowego z włóknami kevlarowymi. Wykres 4 pokazuje zależność amplitudy momentu skrawania od posuwu przy stałej prędkości skrawania i stałej głębokości skrawania. Na podstawie wykresu 4 można stwierdzić tendencję wzrostową dla obu materiałów, z czego wzrost dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi jest dużo bardziej widoczny.

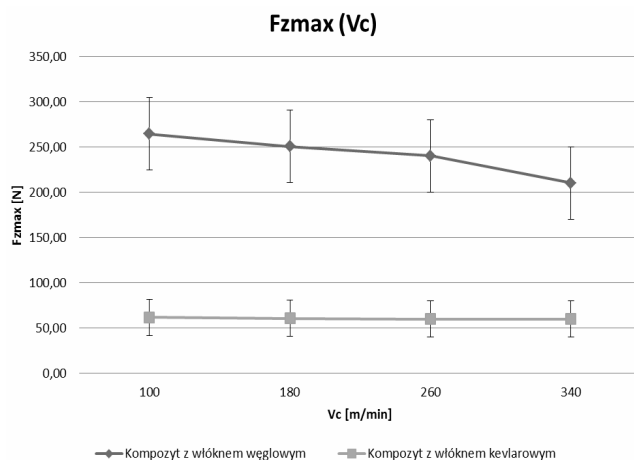


Wykres 3. Zależność wartości maksymalnego momentu skrawania od posuwu



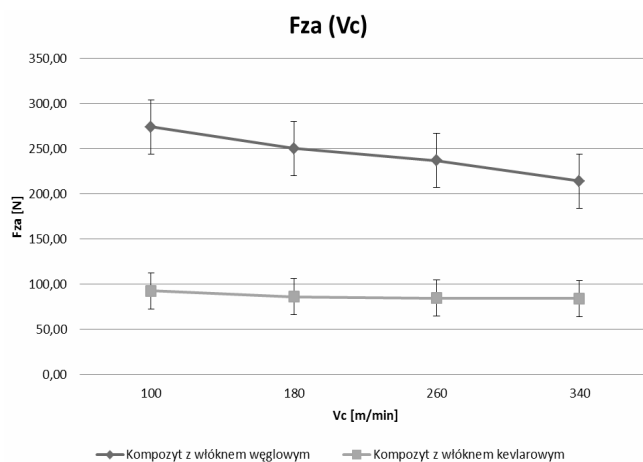
Wykres 4. Zależność amplitudy momentu skrawania od posuwu

Wykres 5 pokazuje zależność wartości sił biernych od prędkości skrawania przy stałej wartości posuwu i stałej głębokości skrawania. Widać spadek wartości sił biernych dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi oraz brak wpływu prędkości skrawania na wartości sił biernych dla kompozytu polimerowego z włóknami kevlarowymi.



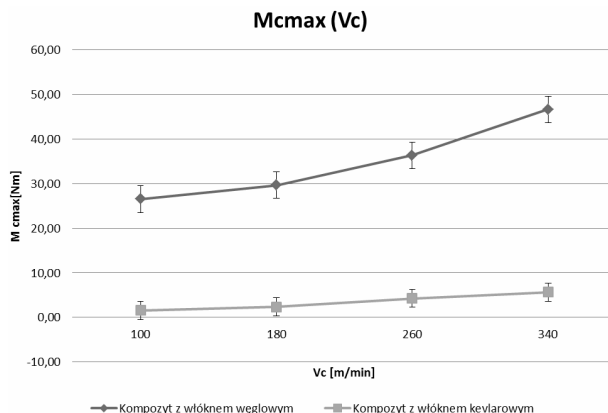
Wykres 5. Zależność wartości sił biernych od prędkości skrawania

Zależność wartości amplitudy sił biernych od prędkości skrawania dla obu rodzajów materiałów przy stałym posuwie i stałej głębokości skrawania przedstawiono na wykresie 6. Widoczny jest niewielki spadek amplitudy siły biernej ze wzrostem prędkości skrawania.

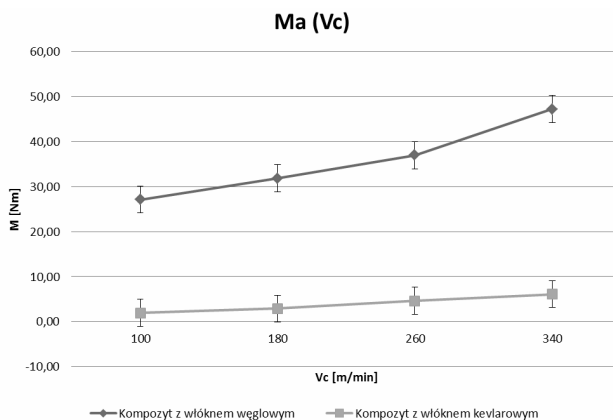


Wykres 6. Zależność wartości amplitudy sił biernych od prędkości skrawania

Następne zależności wartości momentu skrawania i amplitudy wartości momentu skrawania od prędkości skrawania (wykresy 7 i 8) pokazują niewielki wzrost tych wartości.



Wykres 7. Zależność wartości maksymalnego momentu skrawania od prędkości skrawania



Wykres 8. Zależność amplitudy wartości momentu skrawania od prędkości skrawania

6. Wnioski

Podsumowując otrzymane wyniki można stwierdzić, że wraz ze wzrostem posuwu przy stałej prędkości skrawania zwiększają się wartości sił biernych i ich amplitudy dla kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi jak i aramidowymi. Wartości momentu skrawania i amplitudy momentu także rosną wraz ze wzrostem posuwu. Wartości sił biernych i momentu skrawania dla kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi są dużo większe niż w przypadku kompozytu polimerowego z włóknami aramidowymi. W przypadku badania zależności sił biernych od prędkości skrawania (przy stałym posuwie) można zauważyć spadek wartości sił biernych i ich amplitud. Natomiast stwierdzono nietypowy przebieg zależności momentu skrawania od prędkości skrawania. Wzrost wartości momentu skrawania towarzyszący

zwiększaniu prędkości skrawania świadczyć może o innym niż dla materiałów metalowych charakterze oddziaływania ostrza na złożony materiał, jakim jest kompozyt polimerowy.

LITERATURA

1. Boczkowska A., Kapuściński K., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
2. Ochelski S.: Metody doświadczalne mechaniki kompozytów polimerowych, WNT Warszawa 2004.
3. Królikowski W.: Polimerowe kompozyty konstrukcyjne, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
4. Teti R.: Machining of Composite Materials, University of Naples Federico II, Annals of the CIRP Vol. 51/2/2002, Itlay 2002, str. 611-634.
5. Rahman M., Ramakrishna S., Prakash J.R.S., Tan D.C.G. : Machinability study of carbon fiber reinforced composite, National University of Singapore, Department of Mechanical and Production engineering, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore 0511, Singapore, Journal of Materials Processing Technology 89–90 (1999) pp 292–297.
6. Kalla D., Sheikh-Ahmad J., Twomey J.: Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers, Int. J. Mach. Tools and Mfg., 50 (2010), pp. 882–891.
7. Karpata Y., Bahtiyar O., Değer B.: Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 56, May 2012, pp 79–93.

RESEARCH OF CUTTING TORQUE AND PASSIVE FORCE IN THE MILLING PROCESS OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS AND ARAMID FIBER REINFORCED PLASTICS

Abstract

The paper presents the results of research of passive force and cutting torque during milling of carbon fiber reinforced plastics and aramid fiber reinforced plastics epoxy resin saturated by using cutter with diamond inserts. Milling operation was carried out on a vertical machining center Avila – VMC800HS. For each material, the parameters varied in the same range, allowing to compare the machinability ratings for each material. Based on the survey were determined according to the form of graphs showing the effect of changing process parameters on cutting torque and passive force. This paper describes the type of materials used in the study, the type of tools, how to perform sampling and perform machining.

Keywords: passive force, cutting torque, carbon fiber reinforced plastics, aramid fiber reinforced plastics

BADANIA MOMENTU SKRAWANIA I SIŁY BIERNEJ W PROCESIE FREZOWANIA KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH WZMACNIANYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI I ARAMIDOWYMI

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów siły biernej oraz momentu skrawania podczas frezowania kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi i aramidowymi przesyconych żywicą epoksydową przy użyciu frezów z płytkami diamentowymi. Obróbka frezowaniem przeprowadzona została na pionowym centrum obróbkowym Avila – VMC800HS. Dla każdego materiału zmieniano parametry w tym samym zakresie, co pozwoliło porównać wskaźniki skrawalności dla każdego materiału. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczone zostały zależności w postaci wykresów pokazujących wpływ zmieniających się parametrów obróbki na moment skrawania i siłę bierną. W pracy opisano rodzaj użytych do badań materiałów, rodzaj narzędzi, sposób wykonania próbek i przeprowadzenia obróbki skrawaniem.

Słowa kluczowe: siła bierna, moment skrawania, kompozyt polimerowy z włóknami węglowymi, kompozyt polimerowy z włóknami aramidowymi

Dr hab. inż. Kazimierz ZALESKI Prof. PL
Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Politechnika Lubelska,
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36,
Tel. 81-5384238
e-mail: k.zaleski@pollub.pl

Mgr inż. Krzysztof CIECIELĄG
doktorant, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Politechnika Lubelska.

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 (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

BADANIA PORÓWNAWCZE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI STALI, STOPU ALUMINIUM I STOPU TYTANU PO CIĘCIU STRUMIENIEM WODNO-ŚCIERNYM

Wstęp

Cięcie strumieniem wodno-ściernym jest technologią, która pozwala na obróbkę wielu rodzajów materiałów, także o znacznej grubości. Technologia ta najczęściej przeznaczona jest do obróbki takich materiałów jak stopy tytanu, stal, brąz, stopy aluminium, granit, inconel oraz różnego rodzaju szkła i kompozyty. Obróbka strugą wodno-ścierną polega na kształtowaniu materiałów silnie skoncentrowaną strugą wodną domieszkowaną ziarnami ściernymi. Doprowadzona miejscowo struga o skumulowanej mocy (w postaci rozpędzonych ziaren ściernych) prowadzi do erozji materiału obrabianego. Następuje odrywanie mikrocząsteczek od podstawowej masy materiału przecinanego. Podczas procesu cięcia energia kinetyczna ziaren ściernych zamieniana jest na energię odkształcenia materiału w strefie obróbki. Do zalet tego sposobu obróbki należy zaliczyć: brak termicznego oddziaływania strugi na materiał przecinany, brak obecności naprężeń własnych i odkształceń w materiale podczas cięcia i po cięciu, małe naciski, szerokie spektrum zastosowania). Do słabych stron technologii cięcia strumieniem wodno-ściernym należy zaliczyć: obecność śladów poobróbkowych na powierzchniach, odchylenie zarysu przecięcia od zarysu idealnego oraz problemy z utylizacją produktów erozji materiału ciętego wraz z zużytym ścierniwem[1–4].

Podstawowymi parametrami technologicznymi, które wpływają na jakość przecinanej powierzchni oraz wydajność procesu, są:

- ciśnienie wody (stosowane w zakresie od 100 MPa do 400 MPa),
- wydatek ścierniwa (od 0,1 kg/min do 1,5 kg/min),
- średnica otworu kryzy dyszy wodnej (od 0,08 mm do 1,0 mm),
- średnica otworu dyszy mieszającej (od 0,5 mm do 1,5 mm),
- prędkość cięcia (zależy od rodzaju materiału ciętego, jego grubości i wartości pozostałych czynników) [1, 5].

Do oceny jakości technologicznej elementów wyciętych strugą wodno-ścierną można posłużyć się wskaźnikami jakości kształtu szczeliny przecięcia [6], parametrami chropowatości powierzchni rozpatrywanymi w układzie 3D [7] oraz falistością i chropowatością powierzchni w układzie 2D.

Chropowatość powierzchni jest głównym czynnikiem charakteryzującym obróbkę strumieniem wodno-ściernym. Powierzchnia materiału po cięciu strugą ma charakterystyczny dla obróbki ściernej matowy, satynowy wygląd, posiada ona także dwie strefy jakości. Strefa pierwsza, zwana strefą zużycia poślizgowego, kształtowana jest w procesie mikroskrawania ziarnami ściernymi. Charakteryzuje się ona najmniejszymi i stabilnymi wartościami chropowatości powierzchni. Mikrogeometria tego obszaru powierzchni zależy w dużym stopniu od wielkości zastosowanych ziaren ściernych. Drugi obszar, zwany strefą zużycia udarowego, kształtowany jest w wyniku procesu zużycia ściernego (erozji mechanicznej) i związanego z tym ubytku materiału. W strefie tej następuje znaczne pogorszenie jakości powierzchni [1, za 3, za 5].

Holka i inni [8] w swojej pracy analizowali wpływ parametrów cięcia na strukturę geometryczną przecinanych elementów wykonanych ze stali stopowej o numerze 1.2080 i symbolu wg EN X210Cr12 (stare oznaczenie NC11) o zróżnicowanej twardości. Przeprowadzone badania pozwoliły zauważyć, że wzrost twardości próbek powoduje zmniejszenie wartości parametru R_a , natomiast zwiększenie ciśnienia skutkuje większą chropowatością powierzchni, wzrost chropowatości zaobserwowano również w przypadku zwiększenia prędkości posuwu.

Autorzy pracy [9] analizowali chropowatość powierzchni stopu tytanu ASTM B265-99 po cięciu laserem CO_2 oraz strugą wodno-ścierną przy zmiennych wartościach posuwu. Zauważono, że wzrost chropowatości powierzchni następuje wraz ze zwiększeniem się prędkości posuwu. Otrzymano również pięciokrotnie mniejszą wartość parametru chropowatości R_a dla powierzchni po cięciu strumieniem wodno-ściernym w porównaniu do powierzchni po cięciu laserem. Takie same zależności zauważyli autorzy pracy [10], w której analizie został poddany stop tytanu Ti6Al4V.

Praca [11] poświęcona jest wpływowi prędkości posuwu podczas cięcia strumieniem wodno-ściernym na chropowatość powierzchni czystego aluminium oraz stopu aluminium 6061. Zostało zauważone, że obniżenie wartości prędkości posuwu nie przekłada się na znaczną poprawę chropowatości powierzchni. Wraz ze wzrostem grubości przecinanego elementu następuje niewielkie pogorszenie jakości powierzchni. Porównując jakość po cięciu czystego aluminium i stopu 6061 lepsze efekty osiągnięto dla stopu, jest to najprawdopodobniej spowodowane obecnością dodatków stopowych.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury można zauważyć, że jest sporo publikacji poświęconych jakości powierzchni po cięciu strumieniem wodno-ściernym. W artykułach prezentowana jest bardzo często analiza wpływu parametrów technologicznych procesu cięcia na stan powierzchni ale najczęściej

dla jednej grupy materiałów. Brak jest opracowań naukowych, które prezentowałyby wyniki badań chropowatości powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną dla szerszej grupy materiałów w celu porównania obrabialności różnych materiałów tą metodą. W związku z tym, wydaje się zasadne podjęcie badań, które będą dotyczyły stanu powierzchni po cięciu strumieniem wodno-ściernym dla następujących materiałów: stopów tytanu i aluminium, stali niestopowej oraz stali stopowej. Wybór powyższej grupy materiałów wiąże się z szerokim zastosowaniem ich przemysłu lotniczym.

1. Metodyka badań

W badaniach wykorzystano próbki o wymiarach 100 x 5 x 8 mm wykonane z następujących materiałów: stal niestopowa C45, stop aluminium 7175T7351, stop tytanu Ti6Al4V oraz stal stopowa 30HGSA. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości poszczególnych materiałów przedstawiono w tabeli nr 1.

Do wykonania próbek użyto wycinarki wodnej WMC Flow 4000x2000 wyposażonej w głowicę tnącą z materiałem ściernym Flow Paser oraz sterowanie PC Flow Master.

Proces cięcia został przeprowadzony przy następujących stałych parametrach: ciśnienie robocze $p=350$ MPa; odległość dyszy od przedmiotu obrabianego – 3mm; wydatek masowy ścierniwa $m_a=0,27$ kg/min; rodzaj ścierniwa-JetGarnet #80; średnica dyszy 10/0,254 (średnica zewnętrzna 10 mm, średnica otworu dyszy 0,25 mm). JetGranet #80 jest to granet almandynowy, w postaci ścierniwa niemetalowego, wielokrotnego użytku, pochodzenia niemetalowego. Do obróbki wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym używa się odmiany $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$, której twardość według skali Mosha wynosi 8, masa właściwa 4,1 g/cm³, masa nasypowa średnio 2,4 g/cm³. Ścierniwo JetGranet #80 nie reaguje z wodą, nie chłonie wilgoci, praktycznie nie zawiera wolnej krzemionki i jest wolne od węglanów.

Tab. 1. Procentowy skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe badanych materiałów

Tab. 2.1. Procentowy skład chemiczny i właściwości fizyczne stopów lekkich

Stal niestopowa C45								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0,48	0,74	0,36	0,011	0,01	0,09	0,02	0,002	reszta
Granica plastyczności					R _e = 430 MPa			
Granica wytrzymałości na rozciąganie					R _m = 740 MPa			
Twardość					250 HB			
Stop tytanu Ti6Al4V								
Al	V	Fe	C	N ₂	O ₂	Ti		
5,9	4,3	0,25	0,06	0,02	0,1	reszta		
Granica plastyczności					R _e = 850 MPa			
Granica wytrzymałości na rozciąganie					R _m = 920 MPa			
Twardość					327HB			

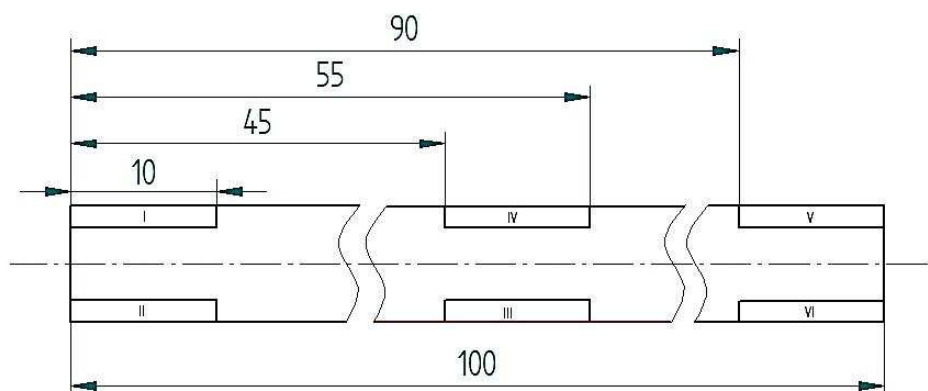
Stop aluminium 7175T7351							
Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Cr	Al
1,5	0,16	2,3	0,07	0,09	0,02	0,19	reszta
Granica plastyczności					R _e = 446 MPa		
Granica wytrzymałości na rozciąganie					R _m = 518 MPa		
Twardość					135 HB		
Stal stopowa 30HGSA							
C	P	Si	S	Ni	Mn	Cr	Fe
0,3	0,01	1,3	0,01	0,2	0,9	1,1	reszta
Granica plastyczności					R _e = 745 MPa		
Granica wytrzymałości na rozciąganie					R _m = 1035 MPa		
Twardość					229 HB		

Zmiennym parametrem technologicznym procesu była prędkość cięcia, która była dopasowywana do każdego materiału w sposób indywidualny, tak aby mogła przynieść pożądany efekt w postaci przecięcia materiału. W tabeli 2 przedstawiono wartości prędkości dla każdego materiału zastosowane podczas procesu cięcia.

Tab. 2. Prędkości zastosowane podczas procesu cięcia

Materiał	Prędkość cięcia [mm/min]
Stal C45	65 ÷ 180
Stop tytanu Ti6Al4V	84 ÷ 242
Stop aluminium 7175T7351	146 ÷ 577
Stal 30HGSA	63 ÷ 199

Pomiar chropowatości powierzchni po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym został przeprowadzony przy pomocy profilografometru Surtronic 3+ firmy Taylor Hobson. W związku z wystąpieniem dwóch charakterystycznych stref, pomiaru dokonano w strefie „wejścia” (pomiar w strefie I, IV oraz V) strugi wodno-ściernej w przedmiot przecinany oraz w strefie „wyjścia” (pomiar w strefie II, III oraz VI). Na rysunku 1 przedstawiono strefy oraz miejsca, w których dokonano pomiarów.

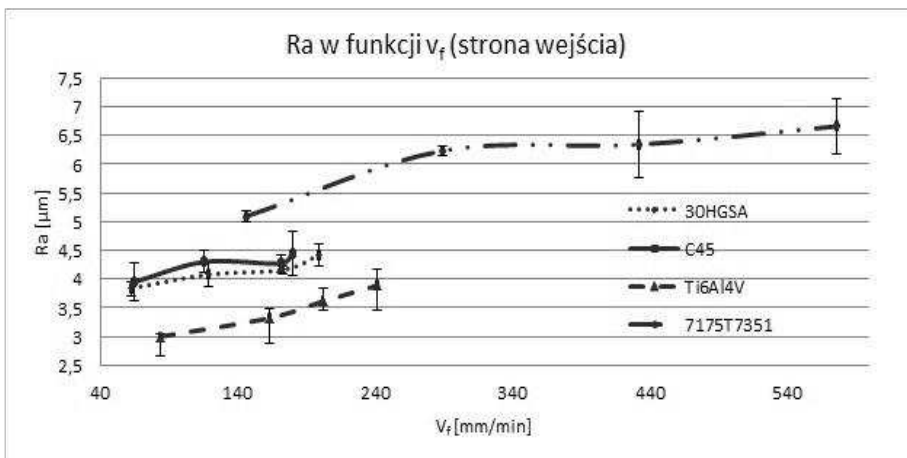


Rys. 1. Podział miejsc i stref pomiarowych

2. Wyniki badań

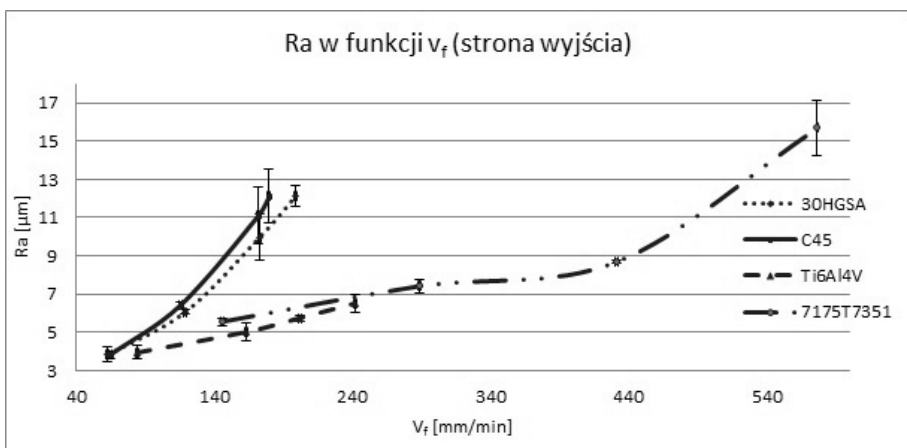
Po przeprowadzonych próbach cięcia oraz pomiarach chropowatości powierzchni przystąpiono do analizy otrzymanych wyników w funkcji zastosowanych parametrów.

Na wykresie 1 przedstawiono wykres chropowatości powierzchni w funkcji prędkości posuwu dla strony wejścia. Zgodnie z przypuszczeniami wraz ze wzrostem v_f następuje wzrost parametru chropowatości powierzchni. Zależność ta zachowana jest dla wszystkich rodzajów materiałów, które były poddane analizie. Najmniejszą zmianę chropowatości powierzchni w funkcji zastosowanej prędkości cięcia zauważono dla stali C45 oraz stali 30HGSA. Parametr R_a wzrósł odpowiednio o 14,8% dla stali 30HGSA oraz o 12,4% dla C45 dla największej wartości v_f w odniesieniu do minimalnej wartości prędkości posuwu. Największy wpływ prędkości cięcia w strefie wejścia zaobserwowano dla stopu aluminium 7175T7351 gdzie zmiana chropowatości powierzchni wynosi 30%. W przypadku stopu tytanu Ti6Al4V odnotowano zmianę na poziomie ok 29%. Porównując wartość parametru R_a przy zbliżonej prędkości cięcia, można zauważyć, że dla materiału charakteryzującego się wyższą twardością oraz większą wytrzymałością otrzymano powierzchnie o lepszej jakości. Może być to związane z wytworzeniem w strefie cięcia większej siły, która łączy strugę wodno-ścierną z przecinanym materiałem w bardziej spójny układ. Twardszy materiał podawany jest także mniejszemu zużyciu erozyjnemu wytworzonemu w strefie cięcia przez ścierniwo.



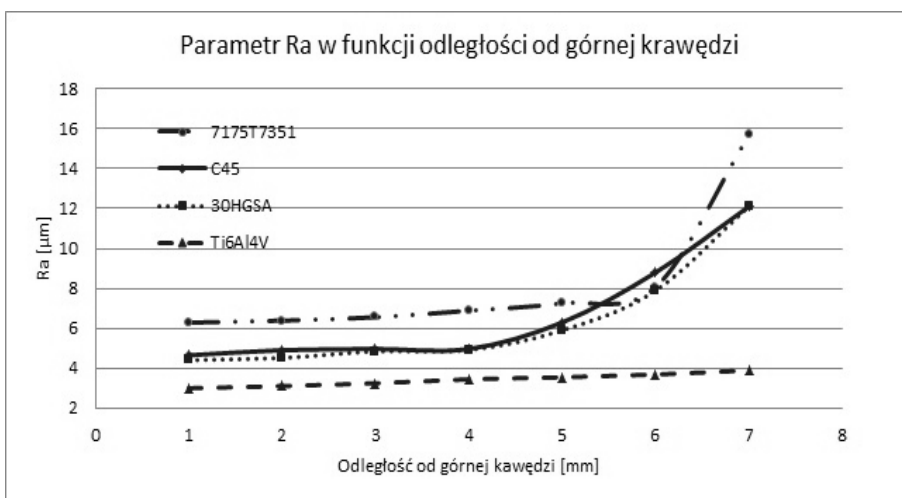
Wykres 1. Wpływ prędkości cięcia na chropowość powierzchni (strefa wejścia)

Analizując chropowość powierzchni w funkcji prędkości cięcia (wykres 2) dla strefy wyjścia strugi wodno-ściernej z przedmiotu przecinanego, widoczny jest także wzrost parametru R_a wraz ze wzrostem v_f . Wzrost prędkości posuwu powoduje zmniejszenie czasu uderzania cząstek ściernych o obrabianą powierzchnię, co skutkuje bardziej chropowatą powierzchnią. Wartości parametru R_a otrzymane dla strefy wyjścia są wyższe niż w strefie wejścia. Wraz ze wzrostem głębokości wnikania strugi wodno-ściernej w materiał przecinany maleje energia kinetyczna poszczególnych ziaren ściernych, co prowadzi do powstania w tym obszarze wyraźnych śladów obróbkowych. W dolnej strefie przecinanych materiałów największe różnice zaobserwowano dla stali 30HGSA oraz C45 zmiana wynosiła 215%, w przypadku stopu tytanu Ti6Al4V- 76%, dla stopu aluminium 7175T7351- 182%.



Wykres 2. Wpływ prędkości cięcia na chropowość powierzchni (strefa wyjścia)

Analizując chropowość powierzchni na przekroju poprzecznym (wykres 3) widoczne jest występowanie 2 charakterystycznych stref: strefy gładkiej powierzchni, występującej przy wejściu strugi wodno-ścierniej oraz strefy chropowatej powierzchni przy wyjściu strugi z przecinanego elementu. Dolny obszar charakteryzuje się obecnością śladów obróbkowych, które są efektem strat energii wywołanych przez pozostanie wyerodowanego materiału w szczelinie cięcia. Ślady obróbkowe na powierzchni przecinanej mogą być także spowodowane występowaniem zjawiska wyprzedzenia, które wiąże się z nieodpowiednią wartością prędkości cięcia w stosunku do wartości ciśnienia strumienia wodno-ściernego. Strefa wejścia charakteryzuje się mniejszymi wartościami parametru R_a w stosunku do strefy wyjścia. Analizując wykres chropowości powierzchni na przekroju poprzecznym przy maksymalnej wartości v_f dla stali niestopowej C45, stopu aluminium 7175T735, stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali stopowej 30HGSA można zauważyć, że dla materiału posiadającego mniejszą twardość uzyskano większą wartość parametru R_a . Miękki stop aluminium, oraz stal C45 i 30HGSA poddawane są bardziej intensywnemu zużyciu erozyjnemu przez ścierniwo. Dla wszystkich materiałów zaobserwowano taki sam charakter krzywych.



Wykres 3. Zależność chropowości powierzchni R_a w funkcji odległości od górnej krawędzi

4. Podsumowanie

W pracy analizowano chropowość powierzchni stali niestopowej C45, stopu tytanu Ti6Al4V, stopu aluminium 7175T7351 oraz stali stopowej 30HGSA po cięciu strumieniem wodno-ściernym. Następujące wnioski podsumowują rezultaty przeprowadzonych badań porównawczych jakości powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną dla różnych grup materiałów:

- wzrost prędkości cięcia powoduje wzrost chropowości powierzchni,

- na powierzchni po cięciu strumieniem wodno-ściernym występują 2 strefy, „strefa wejścia” charakteryzująca się mniejszą chropowatością powierzchni oraz „strefa wyjścia”, w której występują ślady obróbkowe, co przekłada się na większe wartości parametru R_a ,
- w przypadku cięcia z małymi wartościami prędkości różnice chropowatości powierzchni w strefie „wejścia” i „wyjścia” są bardzo małe, wraz ze wzrostem prędkości różnice te rosną,
- na chropowatość powierzchni przecinanego materiału wpływa jego twardość oraz skład chemiczny,
- wraz ze wzrostem głębokości wnikania strugi wodno-ścierniej następuje wzrost chropowatości powierzchni.

LITERATURA

1. Ferenc K.: Cięcie strumieniem wody. Przegląd Spawalnictwa, 2006, nr 7, str. 10-15.
2. Borkowski J., Benkowska M.: Wpływ głównych parametrów obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na jakość powierzchni przecięcia. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2006, Vol. 26 nr 2 str.11-18.
3. Sutowska M.: Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną. Pomiar Automatyka Kontrola, 2011, vol. 57 nr 5, str. 535-537.
4. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
5. Mazurkiewicz A.: Czynniki wpływające na błąd kształtu i chropowatość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodnościernym. Inżynieria Materiałowa, 2008, vol.29 nr 6 str. 686-689.
6. Sutowska M.: Problematyka krzywoliniowego przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną uwzględniając kryteria jakości powierzchni. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2009.
7. Borkowski J., Sutowska M.: Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na parametry SGP. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2007, Vol.27 nr 2, str. 43-51.
8. Holka H., Jarzyna T., Matuszewski M., Musiał J.: Wpływ stanu kwalifikacyjnego stali na efekt cięcia strugą wodno-ścierną. Inżynieria Maszyn, 2011, R.16 z.4, str. 85-91.
9. Zelenák M., Valíček J., Harničárová M., Hloch S., Hlaváček P.: The measurement and analysis of titanium surface roughness, created by abrasive waterjet and CO₂ laser beam cutting. Pomiar Automatyka Kontrola, 2011, vol.57 nr 6 str. 615-619.
10. Hascalik A., Çaydaş U., Gürün H.: Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy. Materials and Design, 2007, 28, str. 1953-1957.
11. Akkurt A., Kulekci M. K., Seker U., Ercan F.: Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147, str. 389-396.

THE COMPERATIVE RESEACH OF SURFACE ROUGHNESS STEEL, ALUMINIUM ALLOY AND TITANIUM ALLOY AFTER ABRASIVE WARET JET CUTTING

Abstract

The article presents the results of comperative roughness testing of C45 steel, 30HGSA steel, 7175T7351 aluminum alloy and Ti6Al4V titanium alloy surface after abrasive water jet cutting. It was concluded that surface roughness is dependent on treatment parameters and also cutting material properties. Important influence on the quality of cutted surface has material hardness.

Keywords: abrasive water jet cutting, surface roughness, steel, aluminum alloy, titanium alloy

BADANIA PORÓWNAWCZE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI STALI, STOPU ALUMINIUM I STOPU TYTANU PO CIĘCIU STRUMIENIEM WODNO- ŚCIERNYM

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych chropowatości powierzchni stali C45, stali 30HGSA, stopu aluminium 7175T7351 i stopu tytanu Ti6Al4V po cięciu strumieniem wodno- ściernym. Stwierdzono, że chropowatość powierzchni zależy nie tylko od prędkości cięcia ale także właściwości przecinanego materiału. Istotny wpływ na jakość powierzchni ma twardość przecinanego materiału.

Słowa kluczowe: cięcie strumieniem wodno- ściernym, chropowatość powierzchni, stal, stop aluminium, stop tytanu

Mgr inż. Agnieszka SKOCZYLAS
Dr hab. inż. Kazimierz ZALESKI, prof. PL
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel. 81 538 47 07/ 81 538 42 38
e-mail: a.skoczylas@pollub.pl
k.zaleski@pollub.pl

Inż. Hubert KOWALCZYK
SIGMA SA
21-002 Jastków (k/ Lublina), Barak 6

CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STOPU ALUMINIUM PO FREZOWANIU Z MINIMALNYM SMAROWANIEM

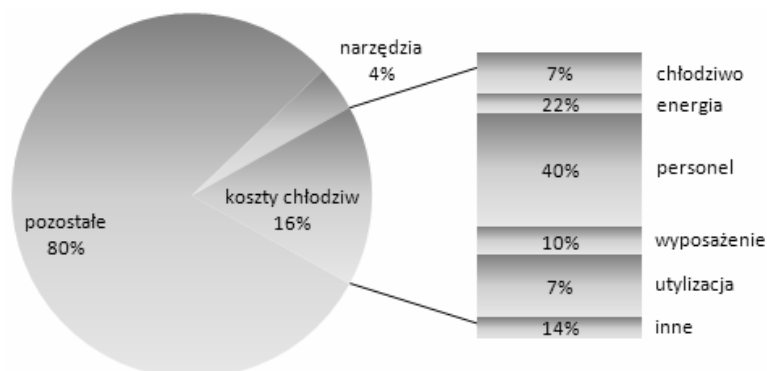
Wstęp

Pomimo ciągłego rozwoju różnych technologii chłodzenia i smarowania w trakcie obróbki skrawaniem, nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, która z metod daje lepszy efekt. Skuteczne chłodzenie i smarowanie korzystnie wpływa na parametry technologiczne procesu a co za tym idzie wydajność, korzystnie wpływa na zużycie ostrza, wydłużając jego trwałość, stabilizuje proces termicznie, wpływając ostatecznie na dokładność wymiarowo-kształtową i jakość powierzchni produktu. Chłodziwa w procesie skrawania, szczególnie stopów aluminium, pozwalają na zmniejszenie efektu adhezyjnego przywierania materiału do powierzchni natarcia, zmniejszając w ten sposób skutki powstawania narostu. Do głównych zadań cieczy chłodząco-smarujących podczas procesu skrawania należy: odbiór ciepła ze strefy skrawania, minimalizowanie skutków oddziaływań tribologicznych na styku wiór ostrze, łamanie i usuwanie wiórów ze strefy skrawania, zmniejszenie skutków oddziaływań adhezyjnych na powierzchni natarcia i przyłożenia a także zabezpieczenie antykorozyjne powierzchni obrabianego materiału. Należy pamiętać jednak, że cieczy chłodząco-smarujące generują znaczne koszty, które mogą stanowić 16% kosztów produkcji całkowitej (rys.1) [1]. Stąd ciągle dążenie do minimalizowania ich udziału lub lepsze i bardziej wydajne wykorzystanie. Pod koniec ubiegłego wieku ze względu na znaczne koszty chłodziw podjęto próby całkowitego ich wyeliminowania. Niestety w przypadku obróbki stopów aluminium nie powiodło się to ze względu na duże problemy z narostem oraz właściwościami szybkiego uplastyczniania materiału. Obróbkę na sucho całkowicie wykluczyły zabiegi gwintowania i głębokiego wiercenia. W ówczesnym czasie również MQL (*Minimum Quantity Lubricant*) przy tradycyjnym dostarczaniu oleju przez dyszę nie zapewniało stabilności procesu. Dopiero zastosowanie narzędzi z kanałami wewnętrznymi pozwoliło na wiercenie głębokich otworów i gwintowanie [2]. W krótkim czasie powstały również konstrukcje elektowrzecion, które umożliwiały wykorzystanie tradycyjnej emulsji i dostarczanie jej pod zwiększonym ciśnieniem przez kanały umie-

szczone tak, aby medium dostawało się bezpośrednio w strefę skrawania. O ile zastosowanie tego sposobu dostarczania cieczy wydaje się być bardzo dobrym rozwiązaniem przy wierceniu głębokich otworów lub obróbce ciągłej, gdzie kontrola wióra jest utrudniona, o tyle przy tradycyjnym frezowaniu powierzchni wydaje się, że CTS (*Coolant Through of Spindle*) nie musi być rozwiązaniem konkurencyjnym w stosunku do MQL. Biorąc pod uwagę większy koszt elektrowrzeciona CTS, droższe narzędzia, koszt zakupu i utylizacji chłodziwa, może się okazać, że aspekt ekonomiczno-ekologiczny będzie decydujący. Niedogodnością dla obu tych sposobów jest wytwarzanie się w trakcie procesu mgły, która powinna być szybko usunięta z przestrzeni roboczej frezarki. Wymusza to zastosowanie wyciągu i zwiększa znacznie straty chłodziwa. Dla MQL jest to naturalne zjawisko, dla chłodzenia przez wrzeciono CTS bardzo niekorzystne ze względu na dodatkowe straty cieczy chłodzącej. Biorąc pod uwagę wszystkie za i przeciw wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem będzie układ smarowania małą ilością oleju, który mógłby być wykorzystany wcześniej do smarowania wrzeciona a po odessaniu ze strefy obróbki i oczyszczeniu wykorzystany ponownie [3]. Obecnie w najnowszych układach MQL stosuje się jeszcze mniejszą ilość cieczy smarującej, która dostarczana jest kanałami w narzędziu w postaci kropel bezpośrednio do strefy skrawania pod ciśnieniem 20 bar i więcej. Eliminuje to problem wytwarzania dużej ilości mgły. Chłodzenie realizowane jest przez równoczesne podawanie zimnego powietrza.

Zanim jednak przemysł będzie w posiadaniu kompletnego stanowiska chłodziwo-smarującego, które potrafi sprostać względom ekonomicznym, ekologicznym, zwiększy efektywność wytwarzania i wpłynie pozytywnie na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego, porównamy dostępne sposoby chłodzenia i smarowania. MQL, popularnie nazywane minimalnym smarowaniem, zawdzięcza swoją nazwę małej ilości zużywanego podczas procesu obróbki oleju lub innego środka smarującego. Wydatek ten w najczęściej spotykanych rozwiązaniach oscyluje w granicach (30-50) ml/h i jest w głównej mierze uzależniony od sposobu generowania mgły i materiału obrabianego. Dotyczy to podawania aerozolu w strefę skrawania dyszą. W przypadku gdy olej podawany jest kanałami przez narzędzie wydatek ten może być mniejszy nawet o 50% [2]. W przypadku zastosowania tej techniki smarowania dodatkowy jednorazowy koszt stanowi instalacja MQL i wyciąg. Obecnie koszt profesjonalnej instalacji nie przekracza kwoty miesięcznego zużycia emulsji stosowanej do tradycyjnego chłodzenia. CTS, inaczej chłodzenie przez wrzeciono, wiąże się z koniecznością zastosowania droższego wrzeciona, wyciągu do mgły, która powstaje w wyniku uderzenia wirujących strumieni cieczy o przedmiot obrabiany, oraz wyższymi kosztami narzędzi dedykowanych do CTS. Należy zauważyć, że przez rozpraszanie cieczy zwiększamy również jej straty, co przekłada się na zwiększenie kosztów zakupu emulsji i zużycia wody. Gdyby pokusić się o przeanalizowanie konkretnego przypadku mogłoby się okazać, że w ciągu jednej zmiany wyparuje więcej

emulsji niż zużyjemy oleju w instalacji MQL. COOLANT – jest to tradycyjne chłodzenie emulsją podawaną w strefę obróbki za pomocą kilku dysz pod niewielkim ciśnieniem (6–7) bar. W przypadku chłodzenia konwencjonalnego chłodziwo ma najmniejsze szanse na dotarcie bezpośrednio w strefę skrawania a ciepło odbierane jest z wiórów, przedmiotu obrabianego i narzędzia. Wydajność procesu uzależniona jest od wydatku podawanego chłodziwa i może on wynosić (20–50) l/min [7]. Generalnie ten rodzaj chłodzenia ma najmniejszy wpływ na możliwość zmniejszenia skutków tribologicznych a raczej usuwa jego efekt w postaci odbierania ciepła z otoczenia.



Rys.1. Udział kosztów chłodziw w obróbce skrawaniem [3]

Różnorodność stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym generuje ciągle nowe potrzeby w zakresie ich badań. Także w stosunku do tak sprzyjającego obróbce skrawaniem materiału, jakim są stopy aluminium o zawartości krzemu poniżej 10%. Zwiększenie produktywności i stabilności procesu skrawania tzw. durali ma istotne znaczenie dla konstrukcji lotniczych. Ubytek materiału w stosunku do objętości materiału wejściowego sięga blisko 95%, w takim przypadku możliwość zwiększenia wydajności obróbki z jednoczesnym zachowaniem dokładności wymiarowo-kształtowej i utrzymania jakości powierzchni ma bardzo duże znaczenie.

1. Metodyka badań

Podstawowym zadaniem przeprowadzonego eksperymentu było zbadanie wpływu minimalnego smarowania MQL i chłodzenia przez wrzeciono CTS na stan powierzchni po frezowaniu oraz porównanie wyników mierzonych parametrów chropowatości do konwencjonalnego chłodzenia emulsją (COOLANT) i obróbki na sucho (DRY). Do badań wybrano reprezentatywny stop aluminium 7075. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono jego skład chemiczny oraz wybrane własności fizyko-chemiczne:

- twardość 190 HB,
- gęstość $2,81 \text{ g/cm}^3$,
- temperatura płynięcia 635°C ,
- moduł Younga $E=72 \text{ GPa}$.

Tabela.1. Skład chemiczny stopu aluminium 7075 [7]

Znak			Znak		Znak			Cecha	
wg. PN-EN 573-3			wg. ASTM		wg. PN-76/88026				
EN AW-AlZn5,5MgCu			7075		AlZn6Mg2Cu			PA9	
Stężenie pierwiastków, %									
Si	Fe	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr	inne	Al.
≤0,4	≤0,5	2,5	1,6	≤0,3	5,6	≤0,2	0,23	Zr+Ti	reszta

Prowadzone badania pozwolą ocenić, który ze sposobów jest najkorzystniejszy z punktu widzenia badanych wskaźników chropowatości. Biorąc pod uwagę ekonomię i ekologię procesu, czyli czynniki, które wpływają na korzyść procesów z zastosowaniem minimalnego smarowania, można będzie odpowiedzieć na uytylitarne pytanie odnośnie sensu rozwijania tychże sposobów wspomagania obróbki. Jasnym jest, że koszty zakupu i utylizacji chłodziw, stanowiące nawet 16% całego kosztu wytworzenia, są istotnym argumentem dla rozwoju MQL i technik wykorzystujących możliwość smarowania przez narzędzie, co może jeszcze zmniejszyć wydatek medium nawet do 10 ml/h. Obecnie firmy produkujące wrzeciona, oprawki i narzędzia posiadają już w swoich zasobach propozycje rozwiązań dla MQL. Przykładem może być specjalna oprawka GUHRING, będąca jednocześnie dyszą do wytwarzania aerozolu [8].

Badania przeprowadzono na pionowej frezarce CNC AVIA 800HS, wyposażonej w elektrowrzeciono o mocy 24 kW i maksymalnej liczbie obrotów 24.000 obr/min. Do badań wykorzystano frez SECO R217.21-1820.0-LP06.2A, o średnicy $D=20 \text{ mm}$, liczbie ostrzy $z=2$, geometrią dedykowaną do obróbki stopów lekkich, wyposażone w dwa kanały wykorzystujące system CTS do chłodzenia przez elektrowrzeciono. Szerokość frezowania ustalono na $a_e=16 \text{ mm}$ a głębokość skrawania $a_p=0,6 \text{ mm}$. Mała głębokość skrawania wynika z faktu, iż porównywany jest wpływ rodzaju chłodzenia na wartość wskaźników chropowatości. W badanym przypadku głębokość skrawania nie ma istotnego wpływu na chropowatość. Frezarka wyposażona jest w system smarowania mgłą olejową MQL CHIBA. Układ smarowania zbudowany jest ze stacji przygotowania powietrza, które pod ciśnieniem 6 bar dostarczane jest do mieszalnika. Olej wtryskiwany jest ze stałą częstotliwością i podawany dyszą w strefę skrawania w postaci aerozolu. Wydajność MQL ustalono na 50 ml/h. Wartość tę określono na podstawie danych literaturowych i wcześniej prowadzonych badań własnych [3]. Do wytworzenia mgły użyto oleju dedykowanego do tego rodzaju

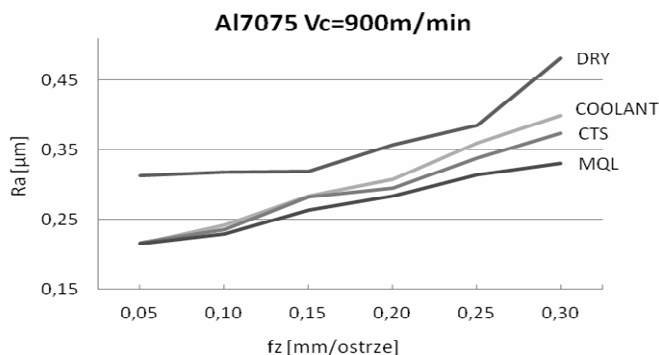
systemów smarujących. Dysza usytuowana była pod kątem 45° i przeciwnie do kierunku ruchu posuwowego, co również zostało zweryfikowane wcześniej prowadzonym eksperymentem. Parametry powierzchni mierzono profilografometrem Hommel Tester T1000. Każdy pomiar wykonano pięciokrotnie na grupie pięciu próbek. Badania przeprowadzono dla stałej prędkości skrawania $v_c=900$ m/min w zakresie posuwów na ostrze $f_z=(0,05-0,3)$ mm/ostrze oraz dla stałego posuwu na ostrze dla wartości $f_z=0,2$ mm/ostrze. Szczegółowe wartości badanych parametrów zamieszczono w tabeli.2.

Tabela.2. Parametry technologiczne prowadzonych badań

Nr próby	vc [m/min]	Sposób chłodzenia	Nr próby	fz[mm/ostrze]	Sposób chłodzenia
1.	700	Na sucho	25.	0,05	Na sucho
2.		Emulsja	26.		Emulsja
3.		CTS	27.		CTS
4.		MQL	28.		MQL
5.	800	Na sucho	29.	0,1	Na sucho
6.		Emulsja	30.		Emulsja
7.		CTS	31.		CTS
8.		MQL	32.		MQL
9.	900	Na sucho	33.	0,15	Na sucho
10.		Emulsja	34.		Emulsja
11.		CTS	35.		CTS
12.		MQL	36.		MQL
13.	1000	Na sucho	37.	0,2	Na sucho
14.		Emulsja	38.		Emulsja
15.		CTS	39.		CTS
16.		MQL	40.		MQL
17.	1100	Na sucho	41.	0,25	Na sucho
18.		Emulsja	42.		Emulsja
19.		CTS	43.		CTS
20.		MQL	44.		MQL
21.	1200	Na sucho	45.	0,3	Na sucho
22.		Emulsja	46.		Emulsja
23.		CTS	47.		CTS
24.		MQL	48.		MQL

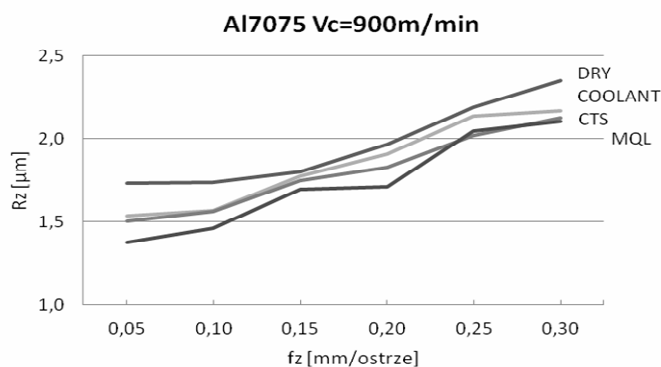
2. Wyniki badań

Wyniki prowadzonego eksperymentu jednoznacznie pokazały, że dla badanych parametrów technologicznych, zarówno prędkości skrawania v_c jak i posuwu na ostrze f_z , obróbka bez użycia medium chodząco-smarującego daje największe wartości badanych wskaźników chropowatości powierzchni.



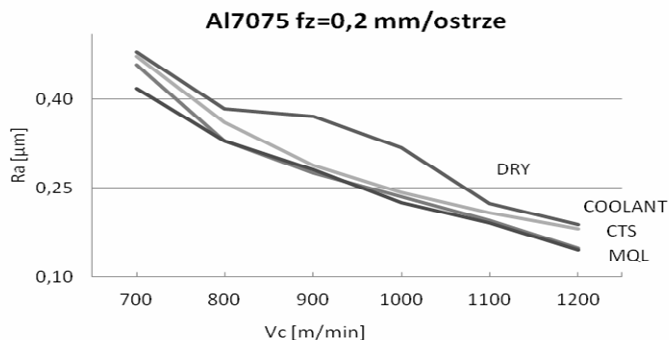
Wykres 1. Porównanie wartości parametru R_a dla badanych sposobów chłodzenia przy stałej prędkości skrawania $v_c=900\text{ m/min}$

Dodatkowo, w przypadku obróbki stopów aluminium istnieje zagrożenie powstania katastroficznego narostu skutkującego przerwaniem procesu skrawania poprzez trwałe uszkodzenie narzędzia. Zauważono, że w przypadku całkowitego zaklejenia powierzchni natarcia i jej dokładnego oczyszczenia nie posiada ona już pierwotnych właściwości i narost pojawia się co raz częściej, eliminując w ten sposób narzędzie. Wyniki dla badanego zakresu posuwów f_z pokazano na wykresach 1 i 2.



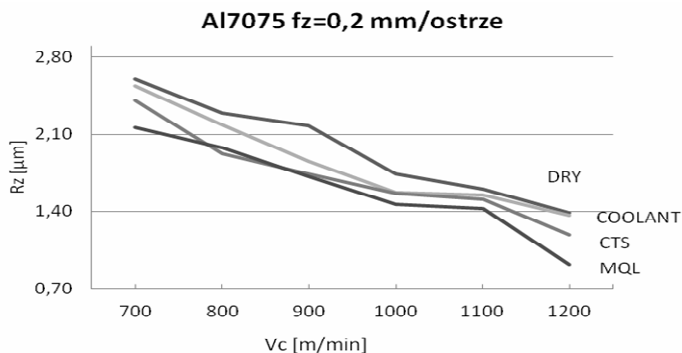
Wykres 2. Porównanie wartości parametru R_z dla badanych sposobów chłodzenia przy stałej prędkości skrawania $v_c=900\text{ m/min}$

Jak widać na przedstawionych wykresach MQL jak i CTS stanowią dla obróbki z tradycyjnym chłodzeniem alternatywę pod względem osiąganych efektów. Być może niewielka różnica wartości badanych parametrów może być podstawą do kwestionowania potrzeb stosowania instalacji tego typu. Bezspornie jednak w kwestii technicznej i ekologicznej są lepsze.



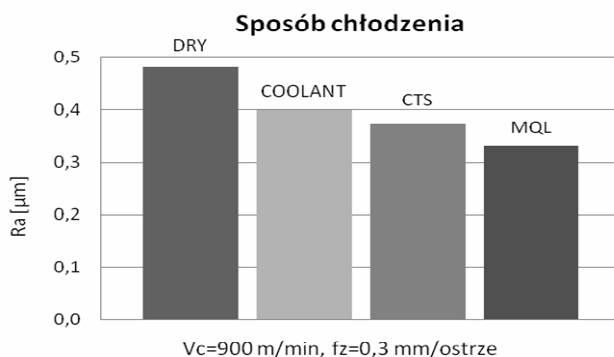
Wykres 3. Porównanie wartości parametru Ra dla badanych sposobów chłodzenia przy stałej wartości posuwu na ostrze $f_z=0,2$ mm/ostrze

Ważnym parametrem technologicznym dla stopów aluminium jest prędkość skrawania v_c , szczególnie w przypadku obróbki szybkościowej HSC i wydajnościowej HPC stopów lekkich.



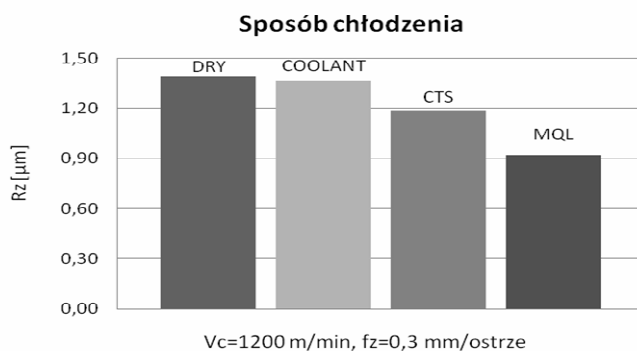
Wykres 4. Porównanie wartości parametru Rz dla badanych sposobów chłodzenia przy stałej wartości posuwu na ostrze $f_z=0,2$ mm/ostrze

Prowadzone badania (wykres 3 i 4) wykazały, że niezależnie od prędkości v_c , najlepszym rozwiązaniem pozostaje MQL oraz CTS, natomiast chłodzenie konwencjonalne i obróbka na sucho dają gorsze wartości parametrów chropowatości powierzchni.



Wykres 5. Porównanie wartości parametru Ra dla badanych sposobów chłodzenia

Na wykresach 5 i 6 przedstawiono wartości parametrów chropowatości dla maksymalnych wartości badanych parametrów technologicznych, najbardziej istotnych z punktu widzenia ekonomicznego.



Wykres 6. Porównanie wartości parametru Rz dla badanych sposobów chłodzenia

3. Podsumowanie

Rozwój sposobów smarowania i chłodzenia związany jest głównie z potrzebą zwiększania produktywności, zmniejszania kosztów produkcji oraz dbałością o środowisko naturalne. Oczywistym jest, że rozwój ten będzie kierowany w stronę stosowania czynników biodegradowalnych i minimalnej ich ilości w procesie obróbki. Problemy związane z odprowadzaniem wiórów ze strefy skrawania można rozwiązać stosując sprężone powietrze, a wprowadzając niewielką ilość oleju (w postaci mgły lub kropel) można zmniejszyć tarcie w obszarze skrawania. Wydaje się, że połączenie tych dwóch metod wraz z możliwością zastosowania wysokiego ciśnienia, nawet 50 bar, przy obecnie stosowanych 6 barach, będzie kluczem do sukcesu przyszłych systemów chłodząco-smarujących [2]. Analizując otrzymane wyniki można jednoznacznie

stwierdzić, że zarówno obróbka na sucho jak i ze standardowym chłodzeniem dają gorsze wyniki jakościowe w porównaniu do zastosowanych systemów CTS i MQL. Biorąc jednak pod uwagę aspekt ekonomiczno-ekologiczny nie sposób wywnioskować, że CTS również będzie wypierany na korzyść technik z mniejszą ilością medium chłodząco-smarującego. Można to również zauważyć analizując ilość narzędzi z kanałami CTS, które zostają wprowadzane na rynek. Jest ich niewiele i są to narzędzia głównie do obróbki zgrubnej lub do operacji głębokiego wiercenia. Pojawiają się natomiast rozwiązania dedykowane do wysokich ciśnień. W przypadku zastosowania systemów CTS i MQL uzyskuje się nieco lepsze wartości parametrów chropowatości. Należy pamiętać, że głównym celem jest obniżenie kosztów produkcji, co można osiągnąć przez zmniejszenie ilości zużywanych chłodziw. Uzyskanie lepszej powierzchni będzie wiązać się z zastosowaniem narzędzi, które poprawią skuteczność MQL przez podanie medium kanałami, bezpośrednio w strefę obróbki. Problemem w obecnych zastosowaniach jest duża ilość mgły pozostającej w przestrzeni obróbczej maszyny technologicznej. Stanowi ona realne niebezpieczeństwo dla ludzi, bowiem małe cząstki dostają się do układu oddechowego. W przyszłości ilość czynnika będzie zmniejszana a wielkość kropli nie będzie tak mała jak współcześnie. Pojawiają się pierwsze opracowania, w których dąży się do podawania strumienia kropeł o wielkości niezagrożającej człowiekowi, a które nie będą w stanie tworzyć powietrznej zawiesiny. Wówczas problem odsysania mgły zniknie. Podawana ilość środka smarnego będzie wykorzystana maksymalnie, czynniki będą w dużym stopniu biodegradowalne lub mniej szkodliwe dla środowiska niż współczesne emulsje. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania można stwierdzić, że rozwój technik chłodzenia i smarowania CTS i MQL stanowi podstawę do powstania skutecznego, ekonomicznego i ekologicznego systemu chłodząco-smarującego w przyszłości.

LITERATURA

1. Diniz A.E., Ferreira J.R., Gilho F.T., (2003), „Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds”; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43/317-326.
2. Kelly J.F., Cotterell M.G., (2002), „Minimal lubrication machining of aluminium alloys”; *Journal of Materials Processing Technology*, 120/327-334.
3. Weinert K., Inasaki I., Sutherland W., Wakabayashi T., (2004), „Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication”; *Annals of the CIRP*, 53/2:511-37.
4. Grzesik W.: „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”, WNT Warszawa 2010.
5. Feld M.: „Obróbka skrawaniem stopów aluminium” WNT 1984.
6. Dobrzański L. A.,: „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, WNT, Warszawa 2007.
7. PN-EN 573-3 Aluminium i stopy aluminium.
8. www.guhring.com, producent narzędzi skrawających.

SURFACE ROUGHNESS OF ALUMINIUM ALLOYS AFTER MILLING WITH MQL

Abstract

The purpose of the article is to present comparative studies of traditional cooling and lubrication techniques used in machining. Currently, the aim is to reduce the quantity of coolant due to the economical and the ecological reasons. Dry machining tests do not give satisfactory results. Therefore, it is necessary to develop minimal quantity lubrication techniques. Through this it is possible to increase the machining efficiency of aluminum alloys in aerospace industry. Meeting these needs requires the exploration of modern economic and ecological MQL systems.

Keywords: Minimum quantity lubrication, aluminum alloys, milling

CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STOPU ALUMINIUM PO FREZOWANIU Z MINIMALNYM SMAROWANIEM

Streszczenie

W artykule podjęto próbę porównania technik chłodzenia i smarowania wykorzystywanych w obróbce skrawaniem. Obecnie dąży się do zmniejszenia ilości stosowanych chłodziw ze względu na ekonomię procesu oraz aspekt ekologiczny. Podjęte próby obróbki na sucho nie dają zadowalających rezultatów, dlatego konieczne jest rozwijanie technik minimalnego smarowania. Przemysł lotniczy staje przed nowymi wyzwaniami zwiększania wydajności obróbki lotniczych stopów aluminium. Systemy chłodzenia muszą sprostać tym potrzebom, dlatego konieczna jest odpowiedź na pytanie, jak powinien wyglądać nowoczesny ekonomiczny i ekologiczny system MQL.

Słowa kluczowe: Minimalne smarowanie, stopy aluminium, frezowanie

mgr inż. Tomasz PAŁKA
dr hab. inż. Kazimierz ZALESKI, prof. PL
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel.:(0-81) 5384238
e-mail: k.zaleski@pollub.pl
t.palka@pollub.pl

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 (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

WPŁYW ZUŻYCIA NOŻY GRANULATORA NA WŁAŚCIWOŚCI OTRZYMANYCH PRODUKTÓW

Wstęp

Produkcja przemysłowa powoduje powstanie znacznych ilości odpadów poużytkowych oraz poprodukcyjnych. Korzystną metodą ograniczenia ilości odpadów jest stosowanie recyklingu na etapie wytwarzania maszyn i urządzeń, eksploatacji i po wycofaniu z eksploatacji. Zgodnie z ustawą o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji z dnia 20.01.2005(Dz.U. Nr 256, poz. 202) oraz Dyrektywą Komisji Europejskiej 2000/53/EC [1] odpad w postaci samochodu wycofanego z eksploatacji powinien być zagospodarowany w sposób zapewniający maksymalne wykorzystanie w przemyśle oraz w eksploatacji elementów i materiałów pochodzących z wycofanych samochodów. Odzysk energetyczny polegający na wykorzystaniu materiałów w energetyce jest postrzegany jako mało korzystny. Podstawowym procesem odzysku jest recykling produktowy (umożliwiający ponowne wykorzystanie w eksploatacji) i recykling materiałowy. Zakładany poziom recyklingu wynosi 80%, a z dniem 1 stycznia 2015 r. będzie podniesiony do wartości 85%. Analiza sprawozdań za 2007 r. złożonych przez państwa członkowskie EU wykazała problemy z osiągnięciem zakładanych celów [2].

Materiał stosowany na opony musi charakteryzować się wystarczającą sztywnością, aby utrzymać ciężar pojazdu, a także odpowiednią odpornością na zużycie podczas jazdy po drogach utwardzonych oraz nieutwardzonych. Materiał opony musi być odporny na działanie podwyższonej temperatury podczas pracy opony, pochłaniać uderzenia i wibracje oraz wykazywać szczelność niezbędną do utrzymania poduszki powietrznej pomiędzy felgą i bieżnikiem. Ponadto materiał opony powinien zapewniać odpowiednią wartość współczynnika tarcia, także na nawierzchniach oblodzonych i pokrytych wodą, oraz zapewniać niską wartość oporów toczenia. Spełnienie podanych wymagań jest możliwe przy zastosowaniu różnych materiałów w poszczególnych strefach opony w tym materiałów o strukturze kompozytów. W skład opony wchodzi naturalna guma 14% mas., guma syntetyczna 27% mas., sadza 28% mas., stal (14–15)% mas., oraz tkanina, wypełniacze, przyspieszacze itd. co stanowi pozostałe (16–17)%

mas. [3]. Konieczną równowagę pomiędzy sztywnością i zdolnością do odkształceń osiąga się przez zbrojenie gumy włóknami. Moduł Younga gumy butadienowo-styrenowej wynosi 1,5 GPa, natomiast stali gatunku ASTM 1070 wynosi 205 GPa. Wzrost twardości gumy do twardości Shore'a 75 oraz skojarzonej z tym odporności na zużycie uzyskuje się przez dodatek sadzy. Zawartość siarki w oponie wynosi w granicach 1-5% mas. Włókno stalowe używane na drutówkę, ewentualnie kord, jest pokryte brązem lub mosiądzem w celu polepszenia przyczepności do mieszanki gumowej. Typowo masa opony samochodu ciężarowego wynosi około 80 kg, opona zawiera 30% m/m stali, 45% m/m gumy naturalnej i 25% m/m sztucznej gumy. Niekiedy do zbrojenia opon samochodów ciężarowych zamiast drutów stalowych używa się włókien nylonowych lub poliestrowych.

Recycling opon samochodowych może polegać na ich przetworstwie w granulat i oddzieleniu od niego drutu stalowego stanowiącego materiał kordu z wykorzystaniem maszyn do cięcia opon.

1. Cel badań

Stosowane do recyklingu opon metodą rozdrabniania urządzenia są produkowane między innymi przez firmy Komei (Padwa, Włochy) oraz MeWa (Gechingen, Niemcy). Stosowana w firmie Novo Recycling linia do rozdrabniania opon składa się z dwóch rozdrabniaczy, granulatora oraz separatora magnetycznego. Przetwarzany materiał jest przemieszczany pomiędzy urządzeniami linii za pomocą przenośników taśmowych. Prędkość obrotowa wirnika rozdrabniacza stopnia I z osadzonymi nożami tnącymi wynosi 9 obr/min. Rozdrabniacz stopnia I produkuje strzępy o długości około 350 mm. Rozdrabniacz stopnia II produkuje chipsy o wymiarach 100x100 mm, wydajność maszyny wynosi 8 t/h. Wydajność granulatora zależy od zastosowanego sita i dla sita o oczku $\Phi 35$ mm wynosi około 3,5 t/h. Układ odzyskiwania włókien stalowych jest zbudowany na bazie magnesu stałego o kształcie prostopadłościanu ustawionego pod kątem prostym do powierzchni taśmy przenośnika transportującej granulaty. Linia eksploatowana w firmie Novo Recycling stanowi własne rozwiązanie techniczne. Produktami recyklingu opon jest granulaty gumowy oraz cięty kord stalowy. Określono dwa cele badań:

- zbadanie właściwości produkowanego granulatu w celu określenia możliwości zastosowania granulatu oraz ciętego kordu,
- określenie wpływu stopnia zużycia noży tnących granulatora na właściwości otrzymywanych produktów.

2. Metodyka badań

Badania wykonano na trzech próbkach ciętego kordu stalowego oraz granulatu. Próbkę produktów pobrano bezpośrednio po zamontowaniu noży tnących w granulatorze, po upływie około 50% czasu eksploatacji noży oraz bezpośrednio przed wymianą noży tnących. Decyzję o wymianie noży podjęto ze względu na spadek wydajności granulatora i wzrost hałaśliwości pracy. Wykonano analizę sitową próbek granulatu oraz pomiar masy pojedynczych cząstek. Wykonano również pomiary masy, średnicy oraz długości cząstek ciętego kordu stalowego. Pomiary masy wykonano za pomocą wagi o dokładności pomiaru 0,2 mg, pomiar średnicy kordu śrubą mikrometryczną a długości kordu suwmiarką z odczytem cyfrowym. Cząstki kordu stalowego nie są prostoliniowe co jest spowodowane sposobem ich odzysku. Długość cząstki kordu określano jako odległość pomiędzy jej końcami. Dodatkowo w oparciu o pomiar masy cząstki wyznaczono jej rzeczywistą długość i wprowadzono współczynnik kształtu określony jako stosunek rzeczywistej długości cząstki do odległości pomiędzy jej końcami. Uzyskane wyniki przeanalizowano za pomocą programu Statistica v. 10. Cząstki kordu poddano również badaniom na mikroskopie skaningowym Zeiss Ultra Plus.

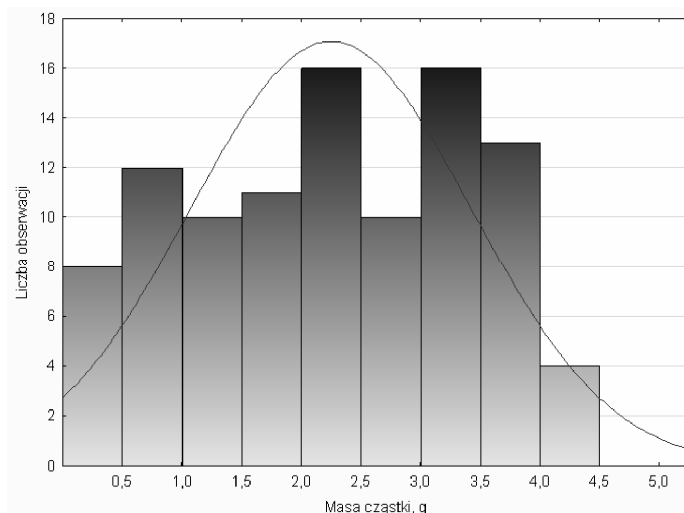
3. Wyniki badań

Wyniki badań masy próbek cząstek granulatu są przedstawione na wykresie 1 i 2 oraz w tabeli 1. Stopień zużycia układu nożowego granulatora nie ma wpływu na masę otrzymywanych cząstek granulatu.

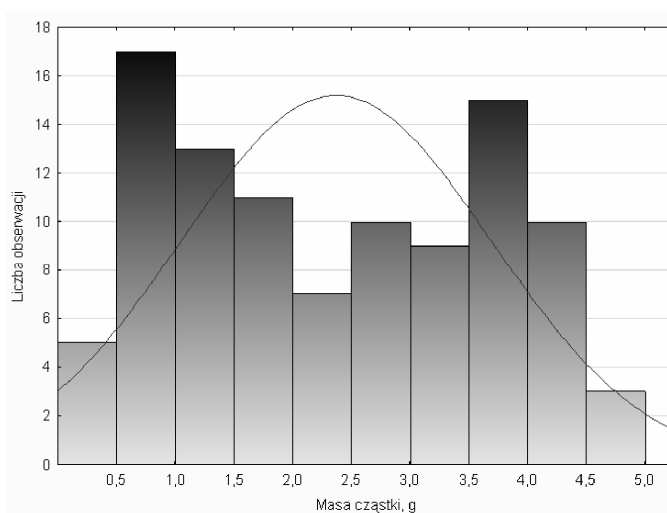
Tab. 1 Charakterystyka cząstek gumy

	Masa cząstki, g	
	Średnia	Zakres
Próbka 1	2,378	0,094÷4,297
Próbka 2	2,526	0,339÷4,474
Próbka3	2,3604	0,332÷4,575

Wyniki analizy sitowej są przedstawione w tabeli 2. Stopień zużycia układu nożowego granulatora nie ma wyraźnego wpływu na skład ziarnowy granulatu. Uzyskanie stałych parametrów charakteryzujących granulaty gumowy, niezależnych od stopnia zużycia układu nożowego jest korzystne. Wymiana noży tnących może być dokonywana tak jak dotychczas, to znaczy w przypadku stwierdzenia obniżenia wydajności. Histogramy masy cząstek gumy nie zależą od stopnia zużycia układu nożowego.



Wykres 1. Rozkład masy cząstki gumy, próbka 1



Wykres 2. Rozkład wielkości cząstek gumy, próbka 3

Granulat pozyskany w procesie recyklingu opon może być stosowany jako domieszka do asfaltu. Stosuje się dwa procesy wprowadzania granulatu do asfaltu, pierwszy z nich to tzw. “wet process”, w którym wykorzystuje się granulat o wielkości $0,15 \div 0,6 \text{ mm}$ i miesza się go z bitumenem w temperaturze podwyższonej przez minimum 45 minut [4]. Zawartość gumy zwykle stanowi (18–22)% mas. bitumenu. Lekkie frakcje bitumenu przenikają do granulatu powodując rozrost jego cząstek i umocnienie. Badania wykazały spadek hałaśliwości opon samochodowych toczących się po zmodyfikowanym asfalcie. Możliwe jest także obniżenie grubości warstwy asfaltu oraz wydłużenie jego

trwałości. W tzw. „dry process” granulatu o wielkości ziaren (0,85–6,4) mm zastępuje drobne kruszywo, zawartość granulatu wynosi (1–3)%. Ze względu na skład ziarnowy produkowany granulatu może zastępować drobne kruszywo.

Tab.2. Wyniki analizy sitowej granulatu

Otwór oczka sita, mm	Pozostałość na sicie, %		
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3
1,6	92,61	92,64	93,11
0,8	3,50	3,65	3,91
0,6	1,34	1,14	0,65
0,4	0,72	0,78	0,79
0,32	0,69	0,49	0,25
0,25	0,48	0,33	0,25
0,2	0,27	0,50	0,49
0,1	0,35	0,43	0,38
0,071	0,35	0,04	0,09
0,056	0,013	0,015	0,012
0,04	0,005	0,003	0,002

W pracy [5] przedstawiono możliwość otrzymywania kompozytów polietylenowo-gumowych. Najlepszą metodą przetwórstwa było prasowanie, które było lepsze od wtryskiwania. Najlepsze właściwości miały kompozyty zawierające frakcje gumy o małej wielkości ziaren 0,2 oraz 0,4 mm, jednak udział tej frakcji w pozyskiwanym granulacie jest zbyt niski.

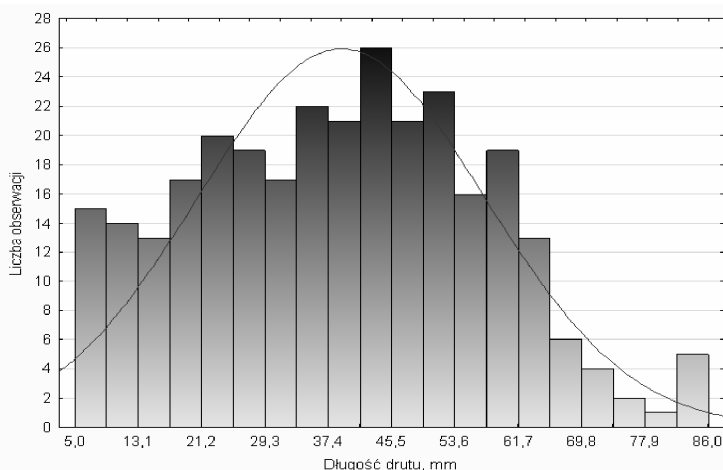
Autorzy pracy [6] zbadali możliwość częściowego zastąpienia w betonie kruszywa cząstkami gumy pozyskanymi podczas recyklingu opon. Maksymalna wielkość cząstek gumy wynosiła 12,7 mm. Stwierdzono obniżenie wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie ze zwiększającym się udziałem gumy oraz wzrost cech plastycznych. Albano i in. [7] badali kompozyt cementowy zawierający drobną frakcję gumy o wielkości cząstek $0,29 \div 0,59$ mm. Udział masowy gumy wynosił $5 \div 10\%$. Stwierdzono znaczne obniżenie wytrzymałości na ściskanie wynoszące 60% dla udziału gumy 5%. Wykazano brak segregacji gumy. Słabe wiązanie gumy z betonem tłumaczono niskim skurczem kompozytu podczas wiązania betonu co obniżało powierzchnię kontaktu gumy z betonem. W pracy [8] przedstawiono wyniki badań właściwości kompozytu cementowego zawierającego drobne cząstki gumy o wielkości $\leq 0,5$ mm. Guma zwiększała wytrzymałość na zginanie i wartość pracy zniszczenia oraz obniżała absorpcję wody przez beton. Stwierdzono istotny wpływ sposobu przygotowania powierzchni cząstek gumy.

W badanym granulacie cząstki o wielkości przekraczającej 1,6 mm stanowiły ponad 90% masy badanych próbek produktu. Cząstki o wielkości $\leq 0,6$ mm stanowiły poniżej 3% masy próbki. Na podstawie wyników prac [6–8] można stwierdzić, że zastosowanie badanego granulatu w betonie jest celowe, przewidywanymi efektami są: obniżenie wytrzymałości na ściskanie oraz na zginanie

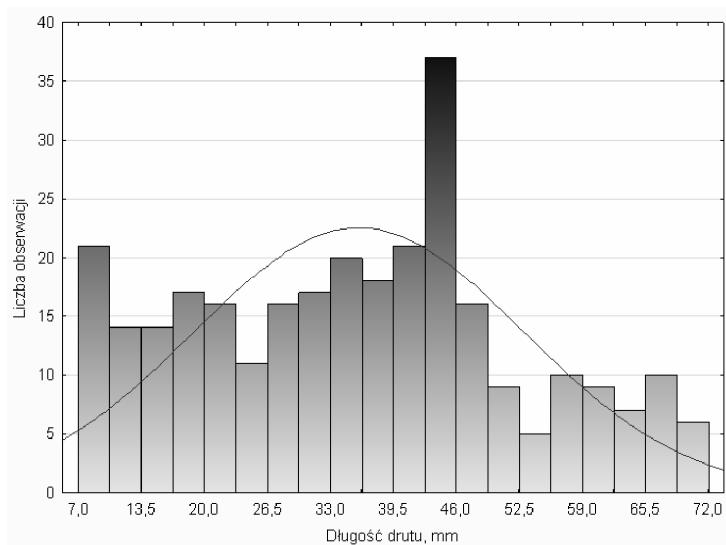
przy jednoczesnym wzroście cech plastycznych. Modyfikowany beton nie powinien być wykorzystywany do produkcji elementów konstrukcyjnych.

Włókna stalowe, jeśli ich udział w kompozycie cementowym przekracza pewną wartość krytyczną powodują, że otrzymany materiał wykazuje cechy quasi-plastyczne. Pęknięty element kompozytowy nie rozpada się i do całkowitego rozdzielenia jest potrzebna dodatkowa praca oraz odkształcenie. Właściwości betonu zbrojonego włóknami stalowymi zależą w dużym stopniu od jakości połączenia włókna i osnowy. Problematyka zbrojenia kompozytu cementowego ciętymi włóknami stalowymi została przedstawiona w pracy [11]. Udział objętościowy włókien stalowych nie może przekraczać 3% objętościowych ze względu na trudności w przygotowaniu mieszanki, ale powinien przekraczać 0,5% aby jego wpływ na właściwości kompozytu cementowego był zauważalny. Wartość dodatku włókien stalowych zależy od wielkości ziaren kruszywa i korzystne są drobne kruszywa. Najkorzystniejsze właściwości można uzyskać dla kruszywa o średnicy $d_{\max} \leq 5$ mm i włókien stalowych o smukłości, rozumianej jako stosunek długości włókna do jego średnicy, ≤ 75 . Przyjmuje się, że długość włókna nie może być większa od 60 mm, średnica powinna być większa od 0,2 mm, smukłość włókien powinna zawierać się w zakresie 50÷150 [11]. Wyniki badań cząstek kordu stalowego przedstawiono na wykresie 3 i 4 oraz w tabeli 3. Średnia masa cząstek kordu jest najmniejsza dla nowego układu nożowego, który efektywnie rozrywa i przecina kord.

Na podstawie pracy [11] można stwierdzić, że krytyczna długość włókna, powyżej której zniszczenie kompozytu wymaga rozrywania włókien jest osiągana przez 72% cząstek kordu o średnicach $\leq 0,26$ mm, włókna o większych średnicach są zbyt krótkie. Warunek smukłości, która powinna mieścić się w zakresie 50÷150 spełnia 30,6% wszystkich włókien w badanych próbkach kordu.



Wykres 3. Histogram długości cząstek kordu, próbka 1



Wykres 4. Histogram długości cząstek kordu, próbka 3

Cząstki ciętego kordu wskutek procesu odzyskiwania są odkształcone i istotnie różnią się kształtem od włókien ciętych. Zastosowanie ciętego kordu odzyskanego ze zużytych opon do wytworzenia betonu zbrojonego było rozważane w pracach [9,10]. W pracy [9] wykazano, że średnica włókien była zawarta w zakresie $(0,17 \div 2,0)$ mm przy czym najczęściej występująca średnica to $(0,24 \div 0,26)$ mm. Średnia długość włókna, przyjęta jako odległość pomiędzy końcami, wynosiła 26 mm. Wykazano, że wytrzymałość na rozciąganie odzyskanych włókien stalowych była w zakresie wartości wyznaczanych dla włókien nowych. Stwierdzono, że odzyskane włókno jest równie efektywne w umacnianiu betonu jak włókno przemysłowe. Maksymalny udział objętościowy odzyskanych włókien możliwy do zastosowania w betonie był w zakresie $(0,26-0,46)\%$ mas.

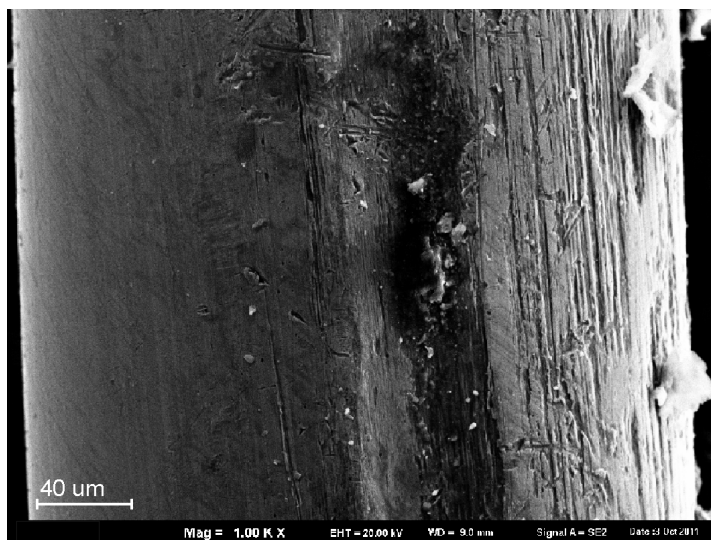
Tab. 3 Charakterystyka cząstek kordu

	Masa cząstki, g		Długość cząstki, mm		Współczynnik kształtu	
	średnia	zakres	średnia	zakres	średnia	zakres
Próbka 1	0,1932	0,01÷1,6007	38,9	5,0÷86	3,66	1,04÷45,05
Próbka 2	0,238	0,013÷1,8485	41,1	7,0÷86	3,554	1,002÷18,43
Próbka 3	0,2164	0,0122÷1,3166	35,8	7,0÷72	4,15	1,059÷21,56

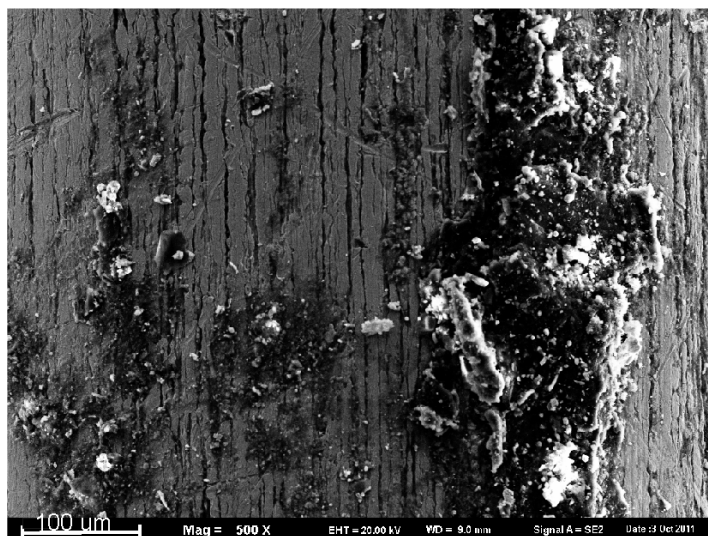
Badania próbek cząstek kordu wykazały, że eksploatowana w firmie Novo Recykling linia wytwarza cząstki kordu o większej długości w porównaniu do pracy [9], co jest korzystne bo zwiększy pracę niszczenia kompozytu cementowego. Zużywanie układu nożowego powodowało systematyczny wzrost rzeczywistej długości cząstki kordu, które wynosiły w kolejnych próbkach 142,3 mm;

146,1 mm oraz 148,6 mm, co jest korzystne podobnie jak duża wartość współczynnika kształtu cząstek kordu dla zużytego układu nożowego. Odkształcone cząstki kordu są lepiej zakotwione w kompozycie. Cząstki kordu o średnicy $\Phi 1,56$ mm stanowiły 4,5% ogólnej liczby, cząstki o średnicy $\Phi 1,3$ mm- 12%, cząstki o średnicy $\Phi 0,85$ mm- 30%, a cząstki o średnicy w przedziale $\Phi 0,24$ - $0,26$ mm- 53,5%. W oparciu o wyniki pracy [9] można stwierdzić, że odzyskiwany kord może być rozważany do zastosowania jako włókno zbrojące w kompozycie betonowym.

Wykonano badania za pomocą mikroskopu skaningowego cząstek ciętego kordu. Obserwacje wykonano dla drutówki oraz włókna kordu pobranych z próbki 1. Powierzchnia drutówki zawiera rysę powstałą w trakcie cięcia opony. Analiza składu chemicznego metodą EDS wykazała następujący skład chemiczny na powierzchni w %mas.: Fe=51,95%; C=19,38%; Cu=11,02%; Zn=7,35%; O=5,89%; Mn=2,02%; Na=1,38%; Si=0,52%; Al=0,29%; S=0,22%. Powierzchnia drutówki, rys. 5, była w procesie produkcji opony pokryta warstwą mosiądzu w celu zwiększenia przyczepności gumy. Interesująca jest niska zawartość siarki wskazująca na efektywne oddzielanie gumy od kordu. Rysunek 6 przedstawia powierzchnię kordu stalowego, widoczne nalepienie gumy, nie zauważa się głębokich rys.

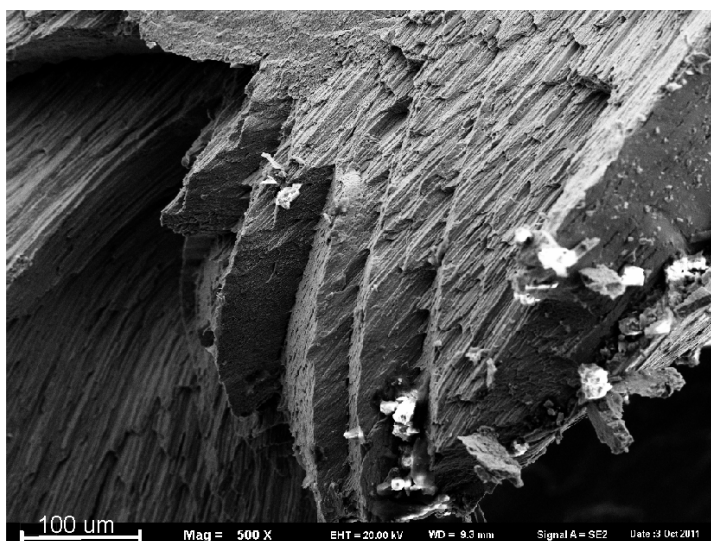


Rys. 5 Powierzchnia drutówki, SEM

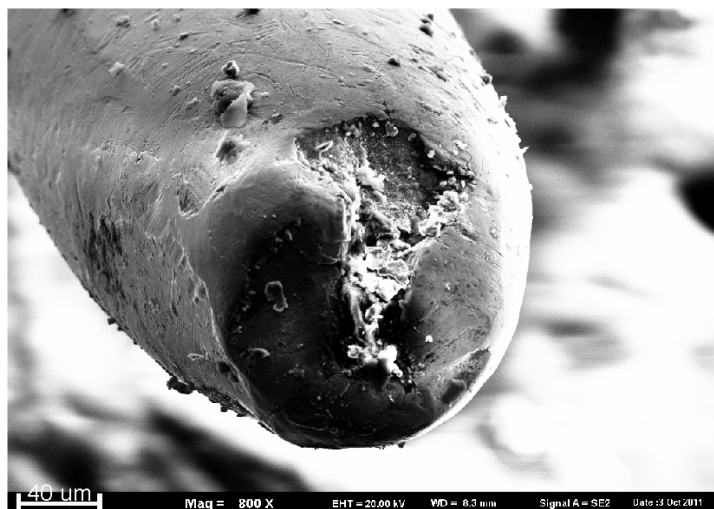


Rys. 6 Powierzchnia kordu, SEM

Powierzchnia przeciętej drutówki widać na rysunku 7. Rysunek 8 pokazuje, że drut kordu uległ zerwaniu wskutek rozciągania. Powierzchnia kordu była w procesie produkcji również pokryta miedzią.



Rys.7 Powierzchnia przeciętej drutówki, SEM



Rys. 8 Powierzchnia kordu, SEM

4. Wnioski

Zużycie układu nożowego granulatora nie powoduje obniżenia właściwości produkowanego granulatu i kordu stalowego. Dotychczas stosowane kryterium uzależniające wymianę noży od spadku wydajności jest właściwe. Granulat może być stosowany jako domieszka do asfaltu i zastępować drobne kruszywo. Częstki kordu ze względu na swoją długość i kształt mogą być rozważane do zbrojenia kompozytów betonowych. Po procesie recyklingu pozostają na powierzchni kordu nalepienia mieszanki gumowej.

LITERATURA

1. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles. Journal of the EU, L269, 21.10.2000.
2. Chamier-Gliszczyński N.: Środowiskowe aspekty transportu. Recykling w cyklu życia pojazdów. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, vol. 49, nr 5, 2010, str. 26-27.
3. Schwartz D.: A survey of advancements in tire technology. Grand Valley State University, USA.
4. Huang Y., Bird R.N., Heidrich O.: A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, 2007, str. 58-73.
5. Sadowski B., Zimniak J.: Badanie wpływu klas ziarnowych proszku gumowego na wybrane właściwości kompozytów polimerowych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna vol. 49, nr 5, 2010, str. 101-102.
6. Toutanji H.A.: The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. Cement and Concrete Composites, vol. 18, 1996, str. 135-139.
7. Albano C., Camacho N., Reyes J., Feliu J.L., Hernandez M.: Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. Composite Structures, vol. 71, 2005, str. 439-446.
8. Segre N., Joekes I.: Use of tire rubber particles as addition to paste cement. Cement and Concrete Research, vol. 30, 2000, str. 1421-1425.

9. Aiello M.A., Leuzzi F., Centoze G., Maffezzoli A.: Use of steel fibres recovered from waste tires as reinforcement in concrete: Pull out behaviour, compressive and flexural strength. Waste Management, vol. 29, 2009, str. 1960-1970.
10. del Rio Marino M., Astorqui J.S.C., Cortina M.G.: Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar). Construction and Building Materials, vol. 21, 2007, str. 1785-1791.
11. Katzer J.: Wpływ włókien stalowych na właściwości wybranych kompozytów cementowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.

EFFECT OF GRANULATOR KNIFE WEAR ON THE PROPERTIES OF PRODUCTS OBTAINED

Abstract

The paper presents results of investigations of properties of rubber granulate and steel cord obtained in the process of used tire recycling. It was found that the degree of granulator knife system wear has no effect on the properties of the products obtained. The rubber granulate can be applied as an admixture to asphalt. Steel cord can be considered as the reinforcement of cement composites.

Keywords: recycling, rubber granulate, steel cord

WPŁYW ZUŻYCIA NOŻY GRANULATORA NA WŁAŚCIWOŚCI OTRZYMANYCH PRODUKTÓW

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości granulatu gumowego i kordu stalowego otrzymywanych w procesie recyklingu opon. Stwierdzono, że stopień zużycia układu nożowego granulatora nie ma wpływu na właściwości otrzymywanych produktów. Granulat gumowy może być stosowany jako domieszka do asfaltu. Kord stalowy może być rozważany do zbrojenia kompozytów betonowych.

Słowa kluczowe: recykling, granulat gumowy, kord stalowy

Mgr inż. Janusz DĄBSKI
Novo Recykling
21-013 Puchaczów, ul. Górnicza 50
e-mail: jdabski@gmail.com

Dr hab. Tadeusz HEJWOWSKI, prof. PL
Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
Tel. 081 5384219
e-mail: t.hejwowski@pollub.pl

PROBLEMATYKA ZUŻYCIA NAPAWANYCH NOŻY GRANULATORA

Wstęp

Rozwój motoryzacji spowodował powstanie dużych ilości odpadów gumowych: dętek, opon, uszczeltek, pasków klinowych, dywaników wykładzin, izolacji gumowej. Największym problemem ekologicznym są opony samochodów osobowych i ciężarowych. Ocenia się, że rocznie powstaje około miliarda zużytych opon rocznie. Zgodnie z Ustawą o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 oraz dyrektywą środowiskową opony nie mogą być składowane na składowiskach odpadów. Duża trwałość opony w warunkach eksploatacji czyni zużytą oponę trudną do recyklingu., czas mineralizacji opony jest długi i szacowany na nawet 100 lat. Znaczna część problemów środowiskowych jest związana z obecnością w gumie dodatków takich jak: środki wulkanizujące, przyspieszacze wulkanizacji, aktywatory, napelniacze, plastyfikatory, substancje przeciwstarzeniowe [1].

Opona samochodu pracuje w trudnych i złożonych warunkach, wymaga to zastosowania różnych materiałów w poszczególnych strefach opony w tym materiałów o strukturze kompozytów. W skład opony wchodzi naturalna guma 14%, guma syntetyczna 27%, sadza 28%, stal 14-15%, oraz tkanina, wypełniacze, przyspieszacze itd. co stanowi pozostałe 16-17%. Konieczną równowagę pomiędzy sztywnością opony i zdolnością do odkształceń osiąga się przez zbrojenie gumy włóknami. Moduł Younga gumy butadienowo-styrenowej wynosi 1,5 GPa, natomiast stali gatunku ASTM 1070 wynosi 205 GPa. Wzrost twardości gumy uzyskuje się przez dodatek sadzy. Włókno stalowe używane na drutówkę, ewentualnie kord, jest pokryte brązem lub mosiądzem w celu polepszenia przyczepności do mieszanki gumowej.

Stosuje się następujące metody wykorzystania zużytych opon:

- bieżnikowanie, jednak w Polsce tylko 2% opon jest bieżnikowanych,
- spalanie, ale ilość energii cieplnej otrzymywanej podczas spalania zużytych opon jest ponad 3-krotnie mniejsza od energii potrzebnej do ich produkcji, spalanie realizowane jest w przemyśle cementowym,
- rozdrabnianie mechaniczne, niekiedy prowadzone w obniżonych temperaturach, prowadzące do otrzymania granulatu o odpowiedniej wielkości ziaren,
- wytwarzanie regeneratu,

- piroliza,
- wykorzystanie opon w całości do budowy placów zabaw, murów oporowych w budownictwie.

Regenerat jest otrzymywany w procesach termochemicznych lub termiczno-mechanicznych prowadzonych w zakresie temperatur 190-290°C. Regenerat jest wykorzystywany w produkcji między innymi nowych opon.

Piroliza jest procesem rozkładu wielkocząsteczkowych związków organicznych na produkty lżejsze prowadzonym bez dostępu tlenu. Produkty pirolizy są zbyt niskiej jakości aby ten proces był atrakcyjny z ekonomicznego punktu widzenia. Najlepszymi metodami ze względu na ochronę środowiska jest bieżnikowanie, rozdrabnianie, piroliza lub kriogeniczne mielenie.

Można rozważać zastosowanie cząstek gumy oraz włókien stalowych pozyskiwanych ze zużytych opon w budownictwie. Zastosowanie gumy do betonu ogranicza zjawisko pęknięcia betonu, zwiększa zdolność do tłumienia drgań, obniża jednak wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie betonu. Dużym zagrożeniem mogą być szkodliwe substancje emitowane ze zmodyfikowanego betonu w przypadku pożaru.

W użyciu gumy z opon w asfalcie są ogólnie rzecz biorąc dwa podejścia, pierwsze z nich to tzw. „wet process”, w którym wykorzystuje się granulát o wielkości 0,15÷0,6 mm i miesza się go z bitumenem w temperaturze podwyższonej, zawartość granulatu stanowi 18÷22% mas. bitumenu. W tak zwanym „dry process” granulát o wielkości ziaren 0,85-6,4 mm zastępuje drobne kruszywo, zawartość granulatu wynosi 1-3%. [2] Badania wykazały spadek hałaśliwości opon samochodowych toczących się po zmodyfikowanym asfalcie.

Możliwe jest także obniżenie grubości warstwy asfaltu oraz wydłużenie jego trwałości. Granulat gumowy można także wykorzystywać na nawierzchnie obiektów lekkoatletycznych.

Włókna stalowe odzyskane ze zużytych opon mogą być użyte do wytworzenia betonu zbrojonego. Włókna te różnią się średnicą, długością i kształtem. Wskutek specyfiki procesu odzyskiwania, włókna są odkształcone i istotnie różnią się kształtem od włókien ciętych. Wytrzymałość na rozciąganie odzyskanych włókien stalowych była w zakresie wartości wyznaczanych dla włókien nowych. Opublikowane w literaturze dane wskazują, że odzyskane włókno jest równie efektywne w umacnianiu betonu jak włókno przemysłowe [3].

1. Cel pracy

Elementy maszyn i urządzeń stosowanych do recyklingu opon charakteryzują się ograniczoną trwałością, co jest związane z ich trudnymi warunkami pracy. Zastosowanie powłok wytworzonych metodami spawalniczymi może znacznie zwiększyć trwałość elementów przemysłowych [4,5].

Stosowane do recyklingu opon metodą rozdrabniania urządzenia są produkowane między innymi przez firmy Komei (Padwa, Włochy) oraz MeWa

(Gechingen, Niemcy). Noże obrotowe i tnące maszyn ulegają szybkiemu zużyciu i muszą być napawane prewencyjnie oraz regenerowane. Wymiana noża jest związana z dłuższym przestojem maszyny i dlatego istotny jest dobór materiałów i technologii napawania zwiększających ich trwałość. Problemem podjętym w pracy jest zbadanie odporności na zużycie napawanych noży granuladora stosowanego w linii do recyklingu opon. W ofercie materiałów spawalniczych liczba materiałów do regeneracji, które mogą być stosowane na ostrza noży nie jest duża. Warunki pracy noży można określić jako: zużycie cierne (podczas cięcia kordu i drutówki) i zużycie ściernie powodowane przez zanieczyszczenia mineralne i gumę. Prawdopodobnie występują również triboreakcje modyfikujące skład chemiczny i właściwości warstwy wierzchniej. Szczególnie destrukcyjny wpływ mają występujące udarowe obciążenia krańdźwi tnącej powodujące pękanie napoiny a nawet wyłamywanie zębów noży.

2. Metodyka pracy

Stosowana w firmie Novo Recycling linia do rozdrabniania opon składa się z dwóch rozdrabniaczy, granuladora oraz separatora magnetycznego. Produkt jest przemieszczany pomiędzy urządzeniami linii za pomocą przenośników taśmowych. Rozdrabniacz stopnia I jest napędzany silnikiem elektrycznym o mocy 90 kW przez przekładnię ślimakową. Rozdrabniacz jest wyposażony w dwa wirniki obracające się przeciwbieżnie, w których są osadzone noże tnące w liczbie 7 oraz 8 sztuk. Prędkość obrotowa wirników z osadzonymi nożami tnącymi wynosi 9 obr./min. Rozdrabniacz wstępny stopnia I produkuje strzępy (chipsy) o długości około 350 mm. Wydajność rozdrabniacza wynosi: 12 t/h dla opon samochodów osobowych oraz 8 t/h dla opon samochodów ciężarowych.

Rozdrabniacz stopnia II tnie strzępy na mniejsze cząstki. Noże tnące są osadzone na dwóch wałach obracających się przeciwbieżnie. Prędkość obrotowa wałów jest około 3 razy wyższa od prędkości obrotowej wirników rozdrabniacza wstępnego, moc silników elektrycznych wynosi 150kW.

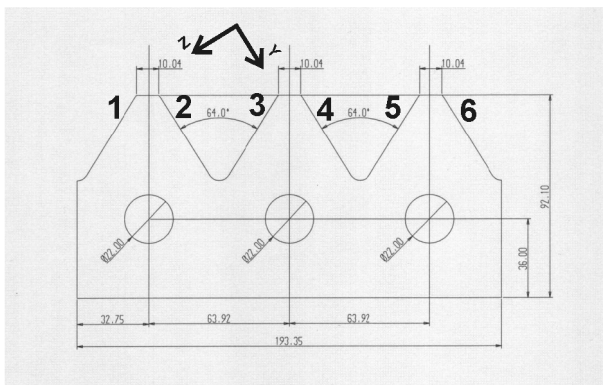
Zadaniem granuladora jest otrzymanie cząstek gumy o żądanej granulacji. W granulatorze występują noże nieruchome związane z korpusem urządzenia oraz noże obrotowe osadzone na obracającym się wale. Prędkość obwodowa noży obrotowych wynosi około 10 m/s. W górnej części korpusu granuladora jest usytuowany kosz zasypowy, natomiast pod wałem urządzenia znajduje się sito zapobiegające przedostawaniu się nierozdrobnionych cząstek produktu na taśmę przenośnika końcowego.

Wykonano badania mechanizmu zużywania noży stałych granuladora. Badania odporności na zużycie wykonano w warunkach eksploatacyjnych. Określano zużycie wagowe i liniowe noży napawanych. Powierzchnie zużytych noży zbadano z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Zeiss Ultra Plus. Wykonano również badania metalograficzne i pomiary twardości warstw napawanych. Dodatkowo zbadano twardość kordu i drutówki.

Badaniom poddano trzy noże granulatora wykonane z ulepszonej cieplnie stali Brinar 500 ($C=0,28\%$, $Si\sim 0,7\%$, $Mn\sim 1,0\%$, $Cr\sim 0,9\%$, $Mo_{\max}=0,3\%$, $P_{\max}=0,015\%$, $S_{\max}=0,005$) różniące się materiałem powłoki napawanej. Płyty ze stali Brinar 500 są dostarczane w stanie zahartowanym w wodzie i odpuszczonym. Powłoki wytwarzano metodą TIG Stellite Grade 6 oraz metodą łukową elektrodą otuloną OK 85.65 i OK 83.65. Grubość noży wynosiła 40 mm. Rys. 1 przedstawia wirnik granulatora z zamontowanymi nożami obrotowymi. Noże stałe są zamocowane do korpusu granulatora. Rys. 2 przedstawia nóż stały granulatora oraz układ współrzędnych przyjęty w badaniach ubytku liniowego, oś X była prostopadła do płaszczyzny noża i jej początek był na krawędzi tnącej.



Rys. 1 Widok wirnika granulatora



Rys. 2 Nóż stały granulatora

Składy chemiczne stopów zawiera Tabela 1. Stellite Grade 6 jest najczęściej stosowanym stopem na osnowie kobaltu odpornym na zużycie. Jest traktowany za materiał standardowy w przemyśle. Wykazuje odporność na zużycie cierne, ścierne, zacieranie oraz korozję i utrzymuje swoje właściwości w wysokich temperaturach co jest związane z obecnością węglików w osnowie roztworu stałego kobaltu.

Elektroda OK. 85.65 wytwarza stopiwo z szybko tnącej stali molibdenowej. Jest stosowana do napawania narzędzi do cięcia metali, przebijania, wykrawania i tłoczenia. Ze względu na skład chemiczny stopiwa niezbędne jest podgrzewanie wstępne napawanego elementu. Elektroda OK. 83.65 służy do napawania części maszyn narażonych na zużycie przez ścieranie węglem, kamieniem, piaskiem, itp. w kruszarkach, pogłębiarkach, podajnikach ślimakowych, ładowarkach.

Tabela 1. Skład chemiczny materiałów do napawania

Elektroda	Skład chemiczny stopiwa (% wagowych)	Twardość
Stellit grade 6	Cr=27-32%, W=4-6%, C=0,9-1,4%, Co-reszta	450HV
OK. 85.65	C = 0,85%, Si = 1,5%, Mn = 1,3%, Cr = 4,5%, Mo = 7,5%, V = 1,5%, W = 1,75%	59-61
OK. 83.65	C=0,75%, Si=4%, Mn=0,6%, Cr=2%	58-63 HRC

3. Wyniki pomiarów i dyskusja

Wykonano pomiary mikrotwardości powłok, wykorzystano mikroskop Neophot 2 wyposażony w mikrotwardościomierz Hanemanna. Tabela 2 przedstawia uzyskane wyniki. Średnie twardości HV30 powłok są zbliżone do siebie.

Tabela 2. Wyniki pomiarów twardości powłok

Powłoka	Mikrotwardość, HV0,04		Twardość, HV30	
	Średnia	Zakres	Średnia	Zakres
Stellite Grade 6	736,2	715,5÷756,9	486,2	431÷537
OK 85.65	820,1	756,9÷915	468,7	357÷537
OK 83.65	474,7	444,6÷579,6	448	357÷491
Brinar 500	574,7	551,7÷642,15	464	458÷467

W strefie wpływu ciepła mikrotwardość napawanej stali Brinar500 wynosiła 321,9÷464,9 HV, średnio 405HV. Pomiary mikrotwardości wykonano także na zglądach poprzecznych kordu i drutówki zainkludowanych w lucie na osnowie cyny. W tabeli 3 przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów mikrotwardości. Mikrotwardość kordu i drutówki jest taka sama. Średnia mikrotwardość powłoki OK 85.65 jest wyższa od mikrotwardości drutu co tłumaczy niską wartość ubytku masy obserwowanego w badaniach eksploatacyjnych. Wyniki pomiarów ubytku masy są podane w tabeli 4. Maksymalny ubytek masy określony po zakończeniu eksploatacji stanowi około 4,7% masy noża nowego. Szlifowanie noży po napawaniu zostało wykonane z wykorzystaniem własnego stanowiska typu szlifierko-kopiarki.

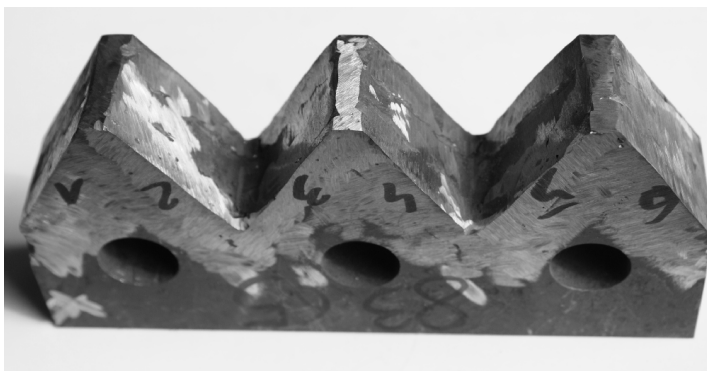
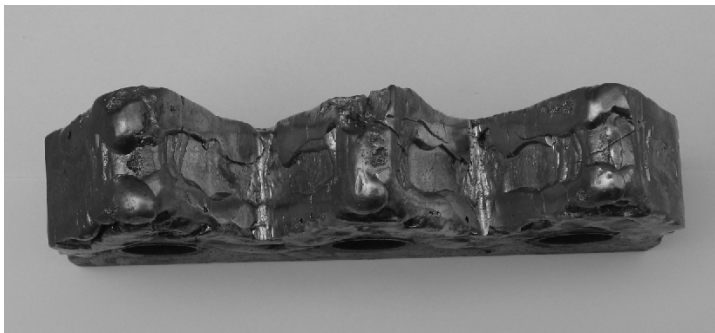
Tabela 3. Właściwości kordu i drutówki

	Mikrotwardość, HV0,04	
	wartość średnia	zakres
kord	792,6	609,8÷851,4
drutówka	774,3	642,2÷851,4

Tabela 4. Ubytki masy noży

Powłoka	Masa noża, g		Ubytek masy, g
	Napawany	Zużyty	
Stellite Grade 6	3530	3400	130
OK 85.65	3470	3345	125
OK 83.65	3470	3305	165

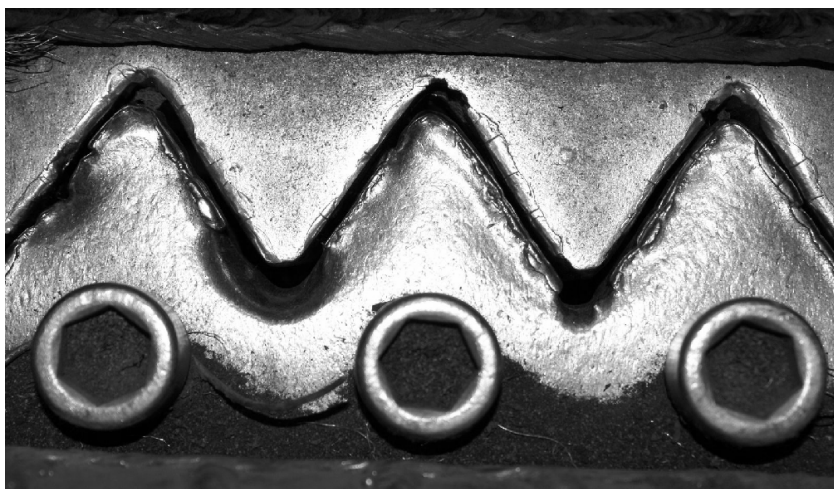
Rysunki 3÷5 pokazują nóż stały po napawaniu elektrodą OK 83.65, po okresie eksploatacji równym ½ trwałości noża oraz nóż złomowany, odpowiednio. Położono napoinę na obu krawędziach noża na głębokości 8mm od jego powierzchni. Warstwa stali pomiędzy warstwami napoiny ulega intensywnemu zużyciu. Podobny oraz zużycia obserwowano dla każdego napawanego noża.

**Rys. 3 Nóż stały granulatora napawany elektrodą OK 83.65 i szlifowany****Rys. 4 Nóż stały granulatora napawany elektrodą OK 83.65 po badaniach eksploatacyjnych**



Rys. 5. Złomowany nóż stały granulatora napawany elektrodą OK 83.65

Zużycie noża obrotowego oraz stałego powoduje zmianę prześwitu pomiędzy nożami co zmienia warunki pracy maszyny i powoduje obniżenie sprawności procesu cięcia, rysunek 6. W procesie zużywania obserwuje się także niekorzystne zjawisko jakim jest stopniowe zaokrąglanie krawędzi tnącej noża.



Rys.6. Wielkość zużycia układu nożowego, koniec okresu eksploatacji

Ubytek liniowy noży stałych został zmierzony za pomocą specjalnie skonstruowanego i wykonanego przyrządu będącego przedmiotem zgłoszenia patentowego [6]. Tabela 5 zawiera średnie ubytki liniowe i zakresy ubytku liniowego określone dla każdej płaszczyzny zęba. Przyjęty układ współrzędnych i numerację zębów przedstawia rys. 2.

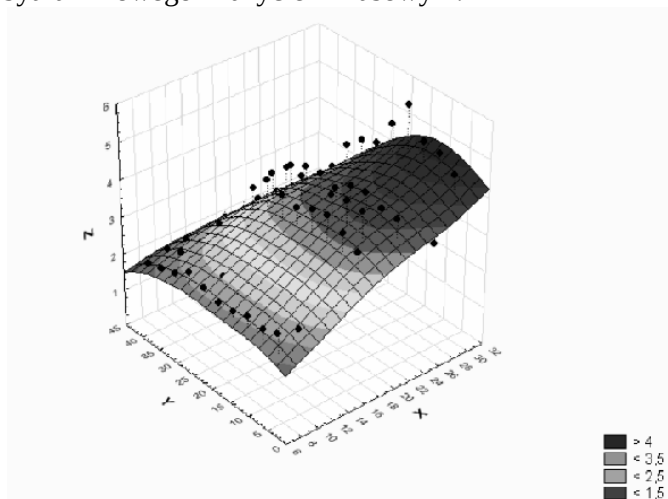
Tabela 5 Wyniki pomiarów zużycia liniowego

Powłoka	Powierzchnia			
	Ubytek liniowy, mm	1	2	3
Stellite Grade 6	Średni	0,67	1,264	3,093
	Zakres	0÷1,67	0÷2,23	0,97÷5,71
OK 85.65	Średni	1,715	2,44	2,56
	Zakres	0,98÷2,33	0,94÷3,65	1,54÷3,7
OK 83.65	Średni	1,553	2,556	2,581
	Zakres	1,16÷1,84	0÷4,88	1,95÷3,13

Tabela 5 cd.

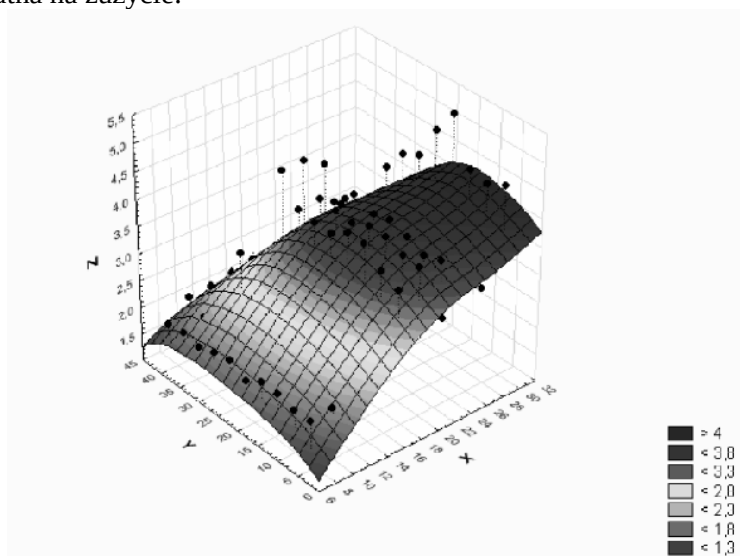
Powłoka	Powierzchnia				Średni ubytek liniowy, mm
	Ubytek liniowy, mm	4	5	6	
Stellite Grade 6	Średni	2,967	2,613	2,907	2,25
	Zakres	1,74÷5,3	1,54÷5,47	0,32÷5,08	
OK 85.65	Średni	2,56	2,02	2,333	2,271
	Zakres	1,35÷3,51	1,06÷2,7	1,14÷4,34	
OK 83.65	Średni	2,627	1,551	1,462	2,055
	Zakres	0,6÷5,09	0÷3,2	0÷2,49	

Wyniki pomiarów ubytków liniowych na powierzchniach 3 i 4 noży są przedstawione na rys.7–12. Największe nierówności powierzchni występują na powierzchni 4 noża napawanego elektrodą OK 83.65 i powierzchniach 3–6 noża napawanego Stellitem Grade 6. Nie stwierdzono korelacji pomiędzy wartościami średniego ubytku liniowego i zużyciem masowym.

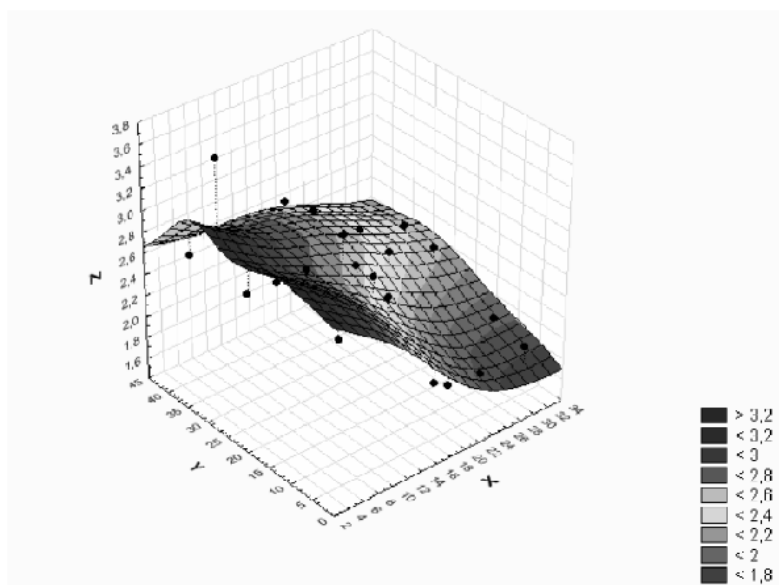
**Rys. 7. Ubytek liniowy na powierzchni 3 noża napawanego Stellite Grade 6**

Zużycie liniowe jest nasilone w pewnym obszarze, zwykle pomiędzy napoinami, natomiast miejsca pomiaru ubytku masy są na całej bocznej powierzchni noża. Pomiar ubytku masowego podaje także informacje na temat zużycia powierzchni czoła noża. Obie metody pomiaru należy traktować za komplementarne. Ubytek liniowy noża zależy od ilości materiału ciętego i przemieszczanego wzdłuż rozważanej płaszczyzny zęba noża. Ilość materiału zależy od położenia noża stałego w granulatorze oraz od odległości zęba od korpusu urządzenia. Porównanie topografii powierzchni zużycia tych samych zębów noży napawanych różnymi materiałami wskazuje na znaczne różnice.

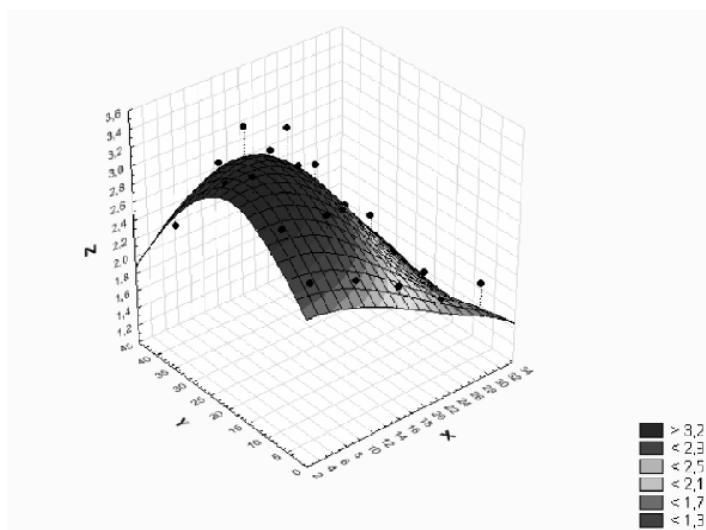
Rysunek 13A przedstawia zgląd poprzeczny próbki pobranej z krawędzi tnącej nr 5 noża napawanego Stellite Grade 6. Mikrostruktura ma charakter dendrytyczny co wpływa na przebieg pęknięcia. Rys. 13 B przedstawia zużytą powierzchnię napoiny, widać nieliczne wgłębienia i płytkie rysy. Rysunek 14A przedstawia pęknięcia zaobserwowane na krawędzi nr 3 noża. Produkty cięcia powodują rozklinowanie powierzchni pęknięcia. Rysunek 14 B pokazuje strefę przejściową pomiędzy napoiną i podłożem na powierzchni nr 6 noża napawanego elektrodą OK 85.95. Strefa wpływu ciepła ze względu na niską twardość jest podatna na zużycie.



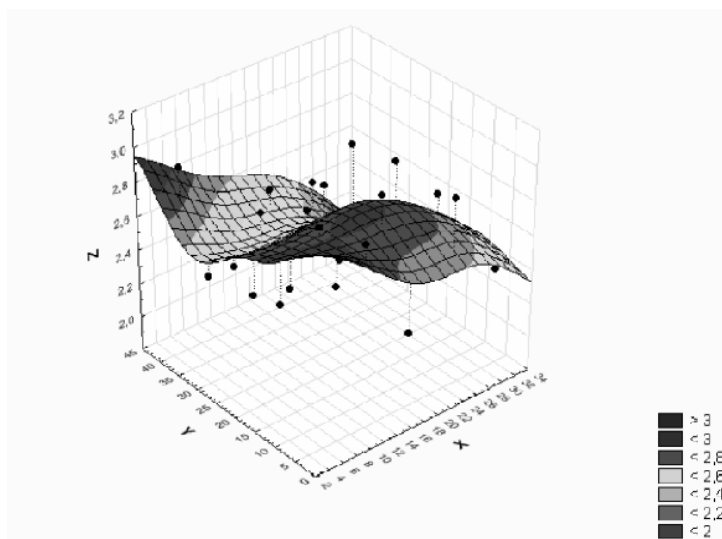
Rys. 8. Ubytek liniowy na powierzchni 4 noża napawanego Stellite Grade 6



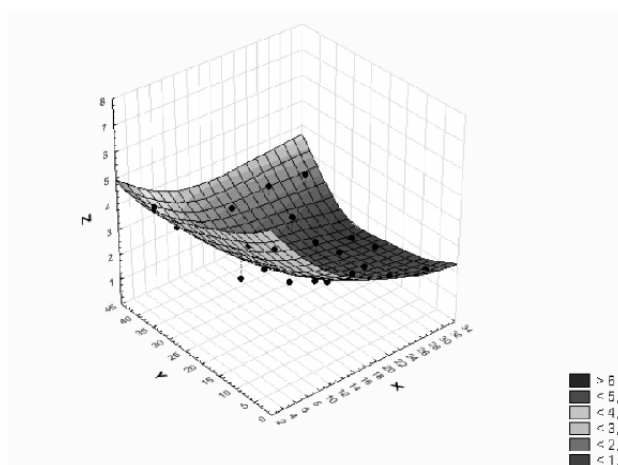
Rys. 9. Ubytek liniowy na powierzchni 3 noża napawanego OK 85.65



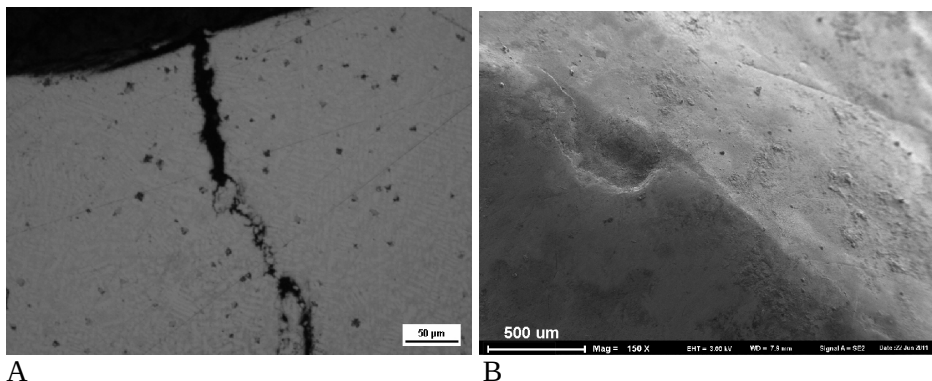
Rys. 10. Ubytek liniowy na powierzchni 4 noża napawanego OK 85.65



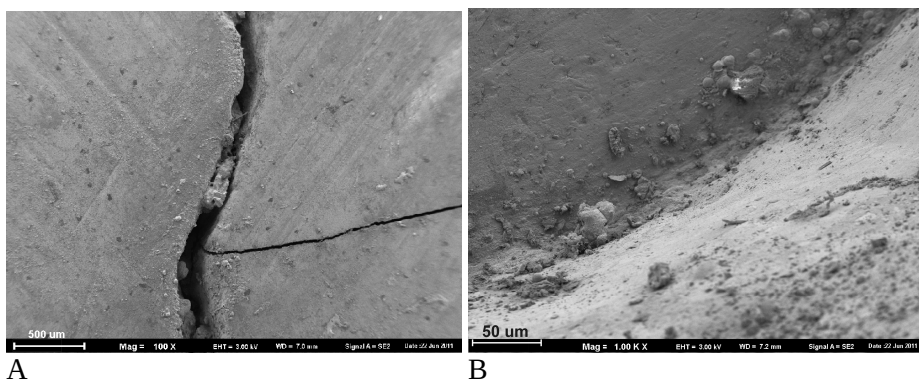
Rys. 11. Ubytek liniowy na powierzchni 3 noża napawanego OK 83.65



Rys. 12. Ubytek liniowy na powierzchni 4 noża napawanego OK 83.65



Rys. 13. Nóż napawany Stellite Grade 6, A- zgląd poprzeczny trawiono HCl-HNO₃ mikroskop świetlny, B- powierzchnia powłoki, SEM



Rys. 14. Powierzchnia zęba napawanego: A Stellite Grade 6, SEM; B OK 85.65

Noże stałe granulatora w liczbie 5 sztuk są umieszczone w rzędzie wzdłuż tworzącej korpusu granulatora. Najwyższy ubytek masy stwierdza się dla noża środkowego, a najmniejsze dla noży skrajnych montowanych przy ścianach korpusu. Nóż z powłoką nr 2 był zamocowany centralnie, a noże 1 oraz 3 obok niego. W badaniach eksploatacyjnych stwierdzono, że trwałość noży napawanych jest około 4-krotnie wyższa od trwałości noży wykonanych ze stali trudnościeralnej.

5. Wnioski

Noże stałe granulatora mogą być napawane prewencyjne i regenerowane metodą TIG Stellite Grade 6 oraz elektrodą otuloną OK 85.65. Należy rozważyć do zastosowania powłoki zawierające masywne wydzielienia węglików w plastycznej osnowie oraz obróbkę cieplną noża po napawaniu.. Mikrotwardość kordu i drutówki znacznie przekraczała mikrotwardość stali Brinar 500, szczególnie w strefie wpływu ciepła. Odporności na zużycie powłok napawanych Stellite

Grade 6 oraz elektrodą OK 85.65 były wyraźnie wyższe od odporności napoiwy wykonanej elektrodą OK 83.65 ze względu na mikrotwardość zbliżone do mikrotwardości drutu. Wytworzone napoiwy były wolne od pęknięć, występujące w zużytych powłokach pęknięcia i były spowodowane trudnymi warunkami pracy noża.. Topografia powierzchni zużycia zależała od materiału stosowanego do napawania oraz od umiejscowienia rozważanej powierzchni. Opracowana własna metoda pomiaru ubytku liniowego noży może być stosowana przy doborze materiałów do napawania noży.

LITERATURA

1. Kozłowska B.: Postępowanie z odpadami gumowymi głównie zużytymi oponami. www.gumowysurowiec.pl.
2. Huang Y., Bird R.N., Heidrich O.: A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements: Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, 2007, str. 58-73.
3. Aiello M.A., Leuzzi F., Centoze G., Maffezzoli: "Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull out behaviour, compressive and flexural strength" Waste Management, vol. 29, 2009, str. 1960-1970.
4. Klimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne. Technologie. WNT, Warszawa 2000.
5. Hejwowski T., Weroński A.: Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2000.
6. Hejwowski T., Dąbski J.: Sposób i urządzenie do pomiaru stopnia zużycia noży do cięcia, zwłaszcza opon. Zgłoszenie patentowe nr P.401841 z dnia 10.12.2012 r.

PROBLEMS OF WEAR OF HARDFACED GRANULATOR KNIVES

Abstract

Cutting knives used in granulators in scrapped tire recycling line reveal low durability. It is necessary to hardface new knives and regenerate them by hardfacing. The paper presents results of investigations into the wear resistance of knives made of Brinar 500 steel coated with Stellite Grade 6 by means of TIG method and hardfaced with OK 85.65 and OK 83.64 shielded electrodes. Mass losses of knives and linear losses on knife surface were measured. The recommended welding materials are Stellite Grade 6 and OK 85.65 whose microhardness is close to that of steel cord. The wear scar topography depends on the welding material and knife location in the machine. The developed method of linear wear measurement is effective and provides data complementary to mass loss measurements.

Keywords: recykling, hardfacing, wear, TIG, SMAW

PROBLEMATYKA ZUŻYCIA NAPAWANYCH NOŻY GRANULATORA

Streszczenie

Noże tnące stosowane w granulatorach w liniach do recyklingu opon wykazują niską trwałość. Jest niezbędne napawać noże i regenerować metodą napawania. Praca przedstawia wyniki badań odporności na zużycie noży wykonanych ze stali Brinar 500 napawanej metodą TIG Stellite Grade 6 oraz napawanych elektrodami otulonymi OK 85.65 i OK 83.65. Zmierzono ubytki masowe oraz liniowe na powierzchni noża. Zalecanymi materiałami są Stellite Grade 6 i elektroda otulona OK 85.65, których mikrotwardość stopiw jest zbliżona do mikrotwardości kordu stalowego. Topografia powierzchni zużycia zależy od materiału powłoki oraz lokalizacji noża w maszynie. Opracowana metoda pomiaru zużycia liniowego jest efektywna i dostarcza danych komplementarnych w stosunku do pomiarów ubytku masy.

Słowa kluczowe: recykling, napawanie, zużycie, TIG, MMA

Dr hab. Tadeusz HEJWOWSKI., prof. PL
Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel. 081 5384219
e-mail: t.hejwowski@pollub.pl

Mgr inż. Janusz DĄBSKI
Novo Recykling
21-013 Puchaczów, ul. Górnicza 50
e-mail: jdabski@gmail.com

MODEL DYSTRYBUCJI PRZESYŁEK DROBNYCH NA KOLEI

Wstęp

W przewozach ładunków kolej, a zwłaszcza zasadniczy przewoźnik, jakim jest PKP Cargo S.A., uzyskuje bardzo dobre wyniki w zakresie przewozów całopociągowych, w tym przewozów międzynarodowych. Tymczasem przewozy ładunków w pojedynczych wagonach lub niewielkich ich grupach, zmalały ogółem z około 80% w 1980 r. do ok. 40% w obecnie.

Naganne, z punktu widzenia racjonalności obsługi transportowej kraju, skoncentrowanie działalności PKP Cargo S.A. na przewozach całopociągowych wynika z faktu, że są one efektywne ekonomicznie i mało skomplikowane technologicznie, podczas gdy przewozy wagonowe są mniej efektywne ekonomicznie, bardziej pracochłonne i dość skomplikowane technologicznie.

Przewozy wagonowe w obecnej ich formie, ze względu na wątpliwą atrakcyjność, odgrywają w obsłudze transportowej kraju rolę mniejszą od uzasadnionej i możliwej. Konieczność racjonalizacji procesów przewozowych, przeciwdziałających marginalizacji transportu kolejowego w obsłudze tego segmentu rynku, jest oczywista.

W warunkach rynkowych i dominującej roli transportu samochodowego zapotrzebowanie na przewozy wagonowe będzie wtedy, kiedy system organizacji potoków wagonów będzie optymalny. Tymczasem stosowane dotychczas metody tej organizacji są praktycznie heurystyczne i nie gwarantują rozwiązań optymalnych. Mowa tu o metodzie klasycznej Pietrowa A.P. [1,2] i o chociażby zupełnie nieznannej w Polsce metodzie komputerowej Duwaliana S.W. [4]. Obie te metody nie uwzględniają ograniczeń, związanych z liczbą torów kierunkowych i zdolnością przeróbczą stacji. Ponadto komputerowa metoda Duwaliana wymaga bardzo pracochłonnej ręcznej korekty operatywnej.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę podziału i ograniczeń [3], która eliminuje wady metod przedstawionych wyżej.

Idea tej metody polega na wykorzystaniu skończoności zbioru wariantów (rozwiązań dopuszczalnych) i przejściu od pełnego do ograniczonego ich przeglądu. Ważną rolę odgrywa w niej ocena i odrzucanie nieperspektywicznych (nie zawierających optimum) podzbiorów wariantów.

W odróżnieniu od metod, w których kolejno łączy się relacje najbardziej opłacalne, w metodzie podziału i ograniczeń buduje się strukturalną współzależność relacji. Gwarantuje to uzyskanie optymalnego planu zestawiania pociągów, przy ograniczonych zasobach (torów kierunkowych lub zdolności przerobczej stacji).

1. Model matematyczny wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów przez stacje rozrządowe

Rozważmy sieć transportową zadaną grafem $G(\{i\}, \{i,j\})$ składającym się ze zbioru węzłów (stacji rozrządowych) $\{i\}$ i zbioru łuków $\{(i,j)\}$ ($i,j=1-n$, gdzie n – ogólna liczba stacji rozrządowych na sieci). Łuk (i,j) prowadzi od węzła i do węzła j i ma wagę d_{ij}^G , gdzie d_{ij}^G – odległość pomiędzy sąsiednimi stacjami [3].

Drogą zorientowaną lub łańcuchem od węzła i do węzła j będziemy nazywać ciąg węzłów i łuków sieci: $i=i_1(i_1,i_2), i_2, \dots, i_{r-1}, (i_{r-1}, i_r), i_r=j$. Długością łańcucha będzie suma wag d_{ij}^G wszystkich łuków należących do niego. Najkrótszy łańcuch pomiędzy węzłami i i j oznaczymy przez S_{ij}^G . Znałe są dobowe strugi wagonów $N_{ij} \geq 0$ ($i,j=1-n$, gdzie i – stacja początkowa, a j – stacja końcowa strugi). Zakłada się najkrótszą długość łańcucha S_{ij}^G dla przebiegu strug N_{ij} .

Każdej parze stacji (i,j) można przypisać wielkość t_{ij} – oszczędności wynikające z przypuszczenia bez przeróbki jednego wagonu przez stację j , rozpoczynającego bieg na stacji i . Wielkość t_{ij} określona jest jedynie dla stacji poprzedzającej stację j , tj. $t_{ij} = t_{pj}$, gdzie (p,j) – ostatni łuk łańcucha S_{ij}^G . Przyjmujemy, że $t_{ii} = 0$. Wiadomo, że $(cm)_{ij}$ są wagonogodzinami akumulacji niezbędnymi do zestawiania na stacji i pociągów relacji j .

Wiadomo również, że $(cm)_{ij} = (cm)_{ip}$, gdzie (i,p) – pierwszy łuk łańcucha S_{ij}^G . Wyznamy macierz relacji $X = \|x_{ij}\|$ i graf relacji $H(\{i\}, \{i,j\})$, ($i,j=1-n$).

Jeżeli w planie zestawiania pociągów istnieje relacja (r,l) to $x_{rl} = 1$ i w grafie zorientowanym $H(\{i\}, \{i,j\})$ pojawia się łuk (r,l) ($r,l=1-n$). Zakłada się, że wszystkie relacje pomiędzy stacjami sąsiadnymi są obowiązkowe, tj. $G \leq H$. Oszczędności T_{ij} przypadające na jeden wagon relacji (i,j) wynoszą:

$$T_{ij} = \sum_{i \in S_{ij}^G} t_{ii} \quad (1)$$

przy czym suma ta dotyczy wszystkich stacji leżących na najkrótszej drodze pomiędzy stacjami i i j .

Rozważmy sieć zadaną grafem H z wagami łuków $d_{ij}^H = T_{ij}$.

Wprowadźmy zmienne

$$Z_{ij}^1 = T_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

Zakładamy, że w planie zestawiania pociągów jest relacja przechodząca co najmniej przez jedną stację bez przeróbki (r,l) , wtedy $Z_{rl}^1 = T_{rl}$, jeżeli jej nie ma – to $Z_{rl}^1 = 0$. Wprowadźmy również zmienne Z_{ij} wyznaczone rekurencyjnie następującym wzorem:

$$Z_{ij} = \max_{r \in S_{ij}^G} (Z_{ir}^1, Z_{ir} + Z_{rj}) \quad (3)$$

przy czym $\max$ dotyczy wszystkich stacji leżących na najkrótszej drodze S_{ij}^G od i do j . Tak więc, wielkość Z_{ij} jest największą oszczędnością czasu dla jednego wagonu biegnącego od stacji i do stacji j ze zbioru relacji $\{(r,l)\}$.

Algorytm wyznaczania wielkości Z_{ij} i najbardziej oszczędnej drogi w grafie H z wagonami Z_{ij}^1 jest analogiczny do algorytmu wyznaczania najkrótszej drogi w grafie zorientowanym [3]. Różnica polega tylko na tym, że maksimum we wzorze (3) dotyczy nie wszystkich stacji, lecz jedynie stacji należących do najkrótszej drogi od i do j .

Funkcja celu F^1 , charakteryzująca zbiór relacji $\{(i,j)\}$, które skracają obrót wagonów określana jest poprzez porównanie wagonogodzin akumulacji $\sum_{i,j} (cm)_{ij} X_{ij}$ z wagonogodzinami oszczędności $\sum_{i,j} N_{ij} Z_{ij}$, wynikającymi z przebiegu wagonów bez przeróbki, tj.:

$$F^1 = F^1(x_{ij}) = \sum_{i,j} (N_{ij} Z_{ij} - (cm)_{ij} X_{ij}) \rightarrow \max_{\{X_{ij}\}} \quad (4)$$

Wyrażenia (2) ÷ (4) są podstawą modelu matematycznego wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów.

W optymalnym planie zestawiania każdy potok wagonów N_{ij} powinien być włączony do tych pociągów, które dają największe oszczędności czasu pomiędzy stacjami i i j $(i,j = 1 \div n)$. Zgodnie ze wzorem (3), przy znanym zbiorze relacji $\{(i,j)\}$ wyznacza się optymalny sposób włączania do każdej relacji poszczególnych potoków wagonów N_{ij} . Wielkość Z_{ij} jest oszczędnością wynikającą z relacji bezpośredniej (i,j) lub sumą oszczędności relacji o najdłuższej drodze S_{ij}^H w grafie relacji H . Zaznaczmy w grafie relacji H najkorzystniejszą drogę S_{ij}^H .

Wtedy

$$Z_{ij} = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} Z_{rl}^1 = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} T_{rl} \quad (5)$$

Uwzględniając (1) otrzymamy:

$$Z_{ij} = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} \sum_{p \in S_{rl}^G} t_{rp} - \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} t_{rl} \quad (6)$$

Oznaczając pierwszy składnik w tym wyrażeniu przez $\ddot{T}_{ij}$, a drugi przez y_{ij} otrzymamy:

$$Z_{ij} = \ddot{T}_{ij} - y_{ij} \quad (7)$$

Wielkość $\ddot{T}_{ij} = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} \sum_{p \in S_{rl}^G} t_{rp} = \sum_{l \in S_{ij}^G} tl = T_{ij} + t_{ij}$ jest sumą oszczędności czasu, wynikającą z przepuszczenia bez przeróbki jednego wagonu przez stację, leżące na najkrótszej drodze S_{ij}^G , łącznie ze stacją j . Wielkość ta nie zależy od zbioru relacji H i jest stała dla danej sieci G .

Wielkość y_{ij} jest sumą czasu przeróbki jednego wagonu na najbardziej oszczędnej drodze S_{ij}^H . Wtedy ze wzoru (7) wynika, że przy zadanym zbiorze relacji H najbardziej oszczędna droga S_{ij}^H w sieci relacji z wagami T_{ij} jest drogą minimalną w sieci relacji z wagami t_{ij} .

Wprowadźmy zmienne

$$y_{ij}^1 = \frac{t_{ij}}{x_{ij}} \quad (8)$$

Przyjmijmy, że w planie zestawiania jest relacja (r,l) , wtedy $y_{ij}^1 = t_{rl}$, jeżeli jej nie ma – to $y_{rl}^1 = \infty$. Wykorzystując wyrażenie (8), wielkość y_{ij} można określić wzorem:

$$y_{ij} = \min_{r \in S_{ij}^G} (y_{ij}^1 y_{ir} + y_{rj}) \quad (9)$$

przy czym, minimum dotyczy wszystkich stacji, leżących na najkrótszej drodze S_{ij}^G .

Korzystając z wyrażenia (7) funkcję celu (4) można przedstawić wzorem:

$$F^1 = \sum_{i,j} (N_{ij} Z_{ij} - (cm)_{ij} X_{ij}) = \sum_{i,j} N_{ij} \ddot{T}_{ij} - \left[\sum_{i,j} (N_{ij} y_{ij} + (cm)_{ij} X_{ij}) \right] \rightarrow \max_{\{X_{ij}\}} \quad (10)$$

Wielkości $\tilde{T}_{ij}$ i N_{ij} są stałe i nie zależą od planu zestawiania pociągów, dlatego funkcję celu można również wyznaczyć następująco:

$$F(X_{ij}) = \sum_{i,j} ((cm)_{ij}X_{ij} + N_{ij}y_{ij}) \rightarrow \min_{\{X_{ij}\}} \quad (11)$$

W odróżnieniu od funkcji F^1 funkcja celu F określa sumaryczne wagonogodziny akumulacji i przeróbki wagonów. Tak więc, od sformułowania problemu (2) ÷ (4) przeszliśmy do modelu (8) ÷ (11), który będzie wykorzystany dalej w budowie algorytmu wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów.

2. Algorytm budowy optymalnego planu zestawiania pociągów oparty na metodzie podziału i ograniczeń

Budowa planu zestawiania pociągów przez stacje rozrządowe należy do złożonych zadań programowania dyskretnego. Idea metody podziału i ograniczeń [3] zasadza się na budowie kryteriów a priori, za pomocą których z ogólnego drzewa rozwiązań odrzuca się gałęzie zawierające zbiór niekonkurencyjnych (nieperspektywicznych) dopuszczalnych wariantów planu. W wyniku tego postępowania stopniowo maleje zbiór wariantów konkurencyjnych, spośród których wybiera się wariant optymalny.

Rozważmy zadanie programowania dyskretnego w postaci ogólnej:

$$\min_{X \in Q} F(X) \quad (12)$$

gdzie Q – skończony zbiór elementów. Elementami zbioru Q są dopuszczalne plany zestawiania pociągów $X = \|x_{ij}\|, (x_{ij} \in \{0,1\})$.

Oto kilka modyfikacji dotyczących idei metody podziału i ograniczeń.

Etap zerowy – eliminacja. Niekiedy już na początku obliczeń można wyeliminować niektóre składowe x_{ij}^* rozwiązania optymalnego X^* . Składowym tym przypisuje się określone wartości 0 lub 1. Dalsze wyznaczanie planu optymalnego uwzględnia te składowe.

Etap pierwszy – określenie ocen a priori funkcji celu. Wprowadzenie do obliczeń tych ocen jest podstawą metody podziału i ograniczeń. Niekiedy udaje się znaleźć wymagane oceny a priori funkcji celu F w zbiorze planów dopuszczalnych Q lub w ich podzbiorze $Q_1 \subseteq Q$. Granicą dolną (oceną) będzie taka liczba $A(Q)(A(Q_1))$, że dla wszystkich $X \in Q(X \in Q_1)$ funkcja celu $F(X) \geq A(Q)$, $F(X) \geq A(Q_1)$ i $A(Q_1) \geq A(Q_2)$ jeżeli $Q_1 \subseteq Q_2 \subseteq Q$. Dalsze obliczenia prowadzone są z wykorzystaniem tylko dolnej granicy funkcji celu.

Określamy ocenę $A(Q)$. Jeżeli przy tym udaje się wyznaczyć X^* , dla którego $F(X^*) = A(Q)$, to X^* jest planem optymalnym. W przypadku przeciwnym przechodzimy do etapu drugiego.

Etap drugi – podział na podzbiory.

Wszystkie zbiory Q można przedstawić jako całość pewnych podzbiorów, wybraną według pewnego kryterium. Metoda podziału i ograniczeń polega na stopniowym podziale zbioru Q na podzbiory. W procesie podziału następuje stopniowe zawężanie obszaru rozwiązań optymalnych. Podział dokonuje się według następującego algorytmu.

Krok zerowy. Początkowy zbiór Q dzieli się na skończoną liczbę $n(l)$ (zazwyczaj nieprzecinających się) podzbiorów $\{Q_1^1, Q_2^1, \dots, Q_{n(l)}^1\}$, gdzie:

$$Q^0 = Q_0^0 = \bigcup_{v=1}^{n(l)} Q_v^1 \quad (13)$$

W procesie podziału niektóre z tych podzbiorów dzielą się na mniejsze podzbiory itd., dopóki nie otrzymamy rozwiązania X .

Krok k -ty ($k \geq 1$). Kontynuując proces podziału otrzymujemy w każdym k -tym kroku podzbiory $Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_{n(k)}^k$. Wykorzystując zasadę sformułowaną w etapie trzecim (patrz niżej) wśród podzbiorów $(Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_{n(k)}^k)$ wybiera się „najbardziej perspektywiczny” $Q_{V(k)}^k$, który ulega dalszemu podziałowi w k -tym kroku. Proces podziału zbioru Q może być graficznie przedstawiony w postaci drzewa rozwiązań, którego wierzchołkami są podzbiory Q_v^k . W dowolnym kroku podział dotyczy tylko jednego wierzchołka, stąd podzbiory uzyskane w kroku k -tym odnoszą się do różnych poziomów drzewa rozwiązań. Z tego wynikają następujące oznaczenia.

Podzbiory $\{Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_{i(k)-1}^k, Q_{i(k)+1}^k, \dots, Q_{n(k)}^k\}$ oraz podzbiory uzyskane w wyniku podziału podzbioru:

$$Q_{V(k)}^k(Q_{V(k)}^k) = \bigcup_{j=1}^{V(k)} Q_{V(k)ij}^k \quad (14)$$

oznaczamy przez $\{Q_1^{k+1}, Q_2^{k+1}, \dots, Q_{n(k+1)}^{k+1}\}$

gdzie: $Q^0 = \bigcup_{i=1}^{n(k+1)} Q_i^{k+1}$, $n(k+1) = n(k) + V(k) - 1$

Etap trzeci – wyznaczanie ocen i wybór „najbardziej perspektywicznego” podzbioru. Z określenia oceny wynika, że $A(Q^0) \leq \min_{X \in Q^0} F(X)$.

Dlatego też, po podziale zbioru Q^0 na n podzbiorów $Q^0 = \bigcup_{V=1}^n Q_V$ zawsze przyjmuje się, że ocena dowolnego podzbioru Q_V jest nie mniejsza niż ocena Q^0 , tj. $A(Q_V) \geq A(Q^0)$, gdzie $V = 1 + n$. W praktyce, często można uzyskać ocenę lepszą, jeżeli dla niektórych V $A(Q_V) > A(Q^0)$.

Zbiór $Q_{V(k)}^k$ jest „bardziej perspektywiczny” niż zbiory $Q_V^k (V \neq V(k))$ uzyskane w danym podziale zbioru Q^0 , jeżeli posiada ocenę najmniejszą, tj.

$$A(Q_{V(k)}^k) = \min_{1 \leq V \leq n(k)} A(Q_V^k) \quad (15)$$

W każdym kroku podział dotyczy tego wierzchołka drzewa, który posiada minimalną ocenę dolnej granicy funkcji celu.

Etap czwarty – określenie kryterium optymalności.

Niech $Q^0 = \bigcup_{V=1}^n Q_V$ i plan X^* należy do pewnego podzbioru Q_{X^*} .

Jeżeli $F(X^*) = A(Q_{X^*}) \leq A(Q_V)$, gdzie $V = 1 + n$, to X^* jest planem optymalnym (dowód wynika z określenia oceny zbioru). Tak więc, proces podziału przebiega do momentu, kiedy pojawi się plan X^* , dla którego wartość funkcji celu będzie najmniejszą oceną granic dolnych w danym kroku podziału.

Rozważmy zastosowanie metody podziału i ograniczeń do rozwiązania zadania (8) ÷ (11) wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów. Podział będzie przebiegać następująco.

Zbiór $Q = Q^0$ zawiera wszystkie dopuszczalne plany zestawiania $X = \|(x_{ij})\| (x_{ij} \in \{0,1\}; i, j = 1 + n)$.

Podstawą podziału zbioru Q^0 na podzbiory $\{Q_1^1, Q_2^1, \dots, Q_{n(2)}^1\}$ jest obecność relacji przelotowej (przepuszczonej co najmniej przez jedną stację bez przeróbki) $(x_{ij} = 1)$ we wszystkich planach zestawiania, należących do wydzielonego podzbioru planów Q_V^1 , $V = 1 + n(1)$. Tak więc, podzbiór $Q(x_{ij} = 1)$ zawiera wszystkie dopuszczalne plany zestawiania, w których wydzielono relację $(i, j) (Q(x_{ij} = 1) = \{X\} : x_{ij} = 1)$.

Poziom k -ty drzewa podziału zawiera podzbiory Q_V^k , przy czym każdy taki podzbiór posiada k relacji obowiązkowych. Oznaczmy przez H_V^k – zbiór relacji obowiązkowych, wydzielonych w podzbiorze $Q_V^k (V = 1 + n(k), k \geq 1)$. Relacje obowiązkowe to relacje pomiędzy sąsiednimi stacjami rozrządowymi. Tak więc, proces podziału można interpretować jako proces dopełnienia grafu G do optymalnego grafu relacji H^* , poprzez kolejne dołączanie relacji przelotowych do zbioru relacji sąsiednich H^S .

Oznaczmy przez $H^0 = H_0^0$ zbiory relacji wydzielonych (dopuszczalnych), a przez $\bar{H}^0 = \bar{H}_0^0$ – zbiór relacji zabronionych w danym etapie eliminacji.

Należy podkreślić, że zbiór relacji sąsiednich H^S powstaje w etapie eliminacji, dlatego też zachodzi następująca relacja: $H^S \leq H^0 \leq H_V^k (k \geq 1, V = 1 + n(k))$.

W procesie podziału „najbardziej perspektywiczny” podzbiór $Q_{V(k)}^k$ dzieli się na podzbiory $\{Q_{V(k),1}^k, Q_{V(k),2}^k, \dots, Q_{V(k),V(k)}^k\}$. Dowolny podzbiór $Q_{V(k),V}^k (V = 1 + \theta(k))$ powstaje poprzez dołączenie do zbioru relacji wydzielonych $H_{V(k)}^k$, zawierającego „najbardziej perspektywiczny” podzbiór $Q_{V(k)}^k$, dodatkowej relacji obowiązkowej (r, l) , tj. $x_{rl} = 1$.

Tak więc, $H_{V(k),V}^k = H_V^{k+1} = H_{V(k)}^k \cup (r, l)$. Wybór relacji (r, l) dołączonej do zbioru $H_{V(k)}^k$ dokonywany jest jedynie z odpowiedniego zbioru relacji perspektywicznych $\tilde{H}_{V(k)}^k$. Zbiór $\tilde{H}_{V(k)}^k$ powstaje następująco. Funkcja celu (11) dotyczy jedynie zbioru relacji wydzielonych. Można zatem przyjąć, że może ona dotyczyć również zbioru relacji obowiązkowych $H_{V(k)}^k$:

$$F_{V(k)}^k = F(H_{V(k)}^k) = \sum_{i,j} ((cm)_{ij} x_{ij}(H_{V(k)}^k) + N_{ij} y_{ij}(H_{V(k)}^k)) \quad (16)$$

Relacja (r, l) jest relacją perspektywiczną w zbiorze $H_{V(k)}^k$, jeżeli

$$F(H_{V(k)}^k) - F(H_{V(k)}^k \cup (r, l)) = \Delta F_{V(k)}^k(r, l) > 0 \quad (17)$$

tj. dowolna relacja ze zbioru relacji perspektywicznych $\tilde{H}_{V(k)}^k$ jest dopuszczalną w zbiorze relacji obowiązkowych $H_{V(k)}^k$.

Z wyrażenia (11) wynika, że relacja (r, l) jest perspektywiczna, jeżeli $(r, l) \in (H_{V(k)}^k \cup \bar{H}^0)$.

Formalnie zbiór relacji perspektywicznych spełnia zależność:

$$\tilde{H}_{V(k)}^k = \left(\{r, l\} : \Delta F_{V(k)}^k(r, l) > 0; (r, l) \in (H_{V(k)}^k \cup \bar{H}^0) \right) \quad (18)$$

W celu określenia granicy dolnej (oceny) $A(Q_V^k)$ funkcji celu F w podzbiorze $Q_V^k (k \geq 1, V = 1 + n(k), n(0) = 0)$ rozważmy dwa zbiory relacji H_V^k i $\tilde{H}_V^k = (H_V^k \cup \tilde{H}_V^k)$. Pierwszy zbiór relacji obowiązkowych H_V^k jest incydentny z grafem relacji $H_V^k(\{i\}, \{i, j\})$, zaś drugi $\tilde{H}_V^k$, powstały z dołączenia do zbioru relacji obowiązkowych H_V^k zbioru relacji perspektywicznych $\tilde{H}_V^k$, jest incydentny z grafem $H_V^k(\{i\}, \{i, j\})$, nazywanym grafem przeróbek perspektywicznych.

Macierz incydencji dla grafu relacji $H_V^k(\{i\}, \{i, j\})$ oznaczmy przez $X_V^k = \|X_V^k(i, j)\|$, przy czym

$$X_V^k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli relacja } (i, j) \in \tilde{H}_V^k; \\ 0, & \text{jeżeli relacja } (i, j) \notin \tilde{H}_V^k. \end{cases} \quad (19)$$

Macierz incydencji dla grafu przeróbek $\tilde{H}_V^k(\{i\}, \{i, j\})$ oznaczmy przez $\tilde{H}_V^k = \|\tilde{H}_V^k(i, j)\|$, przy czym

$$\tilde{X}_V^k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli relacja } (i, j) \in \tilde{H}_V^k; \\ 0, & \text{jeżeli relacja } (i, j) \notin \tilde{H}_V^k. \end{cases} \quad (20)$$

Dla planu zestawiania pociągów ocena funkcji celu F w podzbiorze Q_V^k wynosi:

$$A_V^k = A(Q_V^k) = \sum_{i,j} (cm)_{ij} x_{ij}(H_V^k) + \sum_{i,j} N_{ij} y_{ij}(\tilde{H}_V^k) \quad (21)$$

Pierwszą składową oceny, związaną z akumulacją wagonów oznaczamy przez:

$$\sum_{i,j} (cm)_{ij} x_{ij}(H_V^k) = \alpha_V^k \quad (22)$$

Druga składowa oceny, oznaczana przez:

$$\sum_{i,j} N_{ij} y_{ij}(\tilde{H}_V^k) = \tilde{\alpha}_V^k \quad (23)$$

określona jest pod warunkiem dołączenia do zbioru H_V^k wszystkich relacji perspektywicznych. Wtedy $A_V^k = \alpha_V^k + \tilde{\alpha}_V^k$.

Po dołączeniu relacji perspektywicznej $(r, l) \in \tilde{H}_V^k$ do H_V^k pierwsza składowa α_V^k zwiększy się o wartość $(cm)_{r,l}$, zaś druga składowa $\tilde{\alpha}_V^k$ w najlepszym przypadku nie zmieni się. Dlatego też, uzyskana wartość funkcji celu F dla $\tilde{H}_V^k \neq \emptyset$ zawsze będzie większa niż A_V^k . Jeżeli zbiór $\tilde{H}_V^k \neq \emptyset$ to wartość funkcji celu F będzie równa ocenie A_V^k . Tak więc, wyrażenie (13) spełnia wszelkie wymogi stawiane granicy dolnej (ocenie).

Ocenę A_V^k nie należy obliczać za każdym razem podziału. Wystarczy określić zmianę oceny $\Delta A_V^k(r, l)$ po dołączeniu do H_V^k relacji (r, l) . Metodyka obliczania tej zmiany jest następująca.

Niech do zbioru H_V^k dołączana jest relacja perspektywiczna (r, l) i $H_V^{k+1} = H_V^k \cup (r, l)$.

Wtedy α_V^k zwiększy się o $\Delta \alpha_V^k(r, l) = (cm)_{r,l}$. Dlatego też:

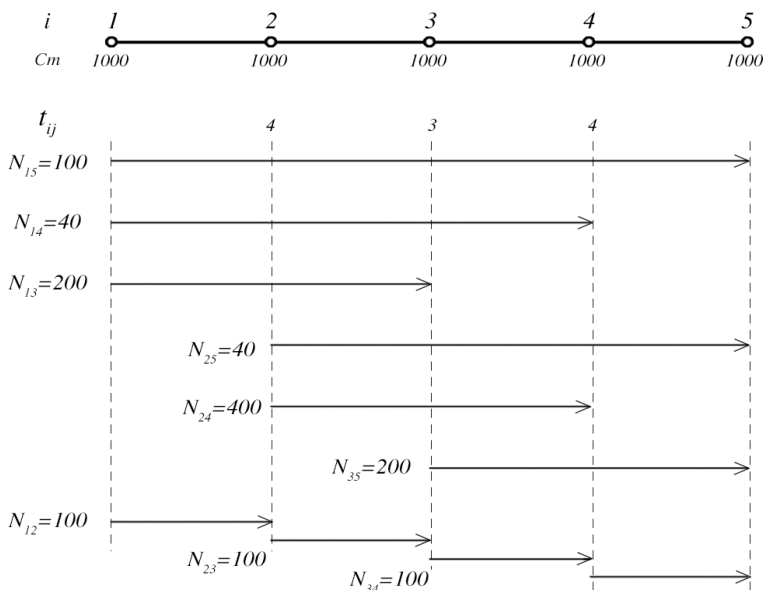
$$\alpha_V^{k+1} = \alpha_V^k + \Delta \alpha_V^k(r, l) = \alpha_V^k + (cm)_{r,l} \quad (24)$$

Po przyłączeniu relacji (r, l) , w zbiorze relacji perspektywicznych $\hat{H}_V^k$ pojawi się podzbiór relacji $\hat{H}_V^k \setminus \hat{H}_V^{k+1}$ nie spełniający warunku koniecznego. Ocena $\bar{\alpha}_V^{k+1}$ określona jest dla relacji $H_V^{k+1} = H_V^k \cup (r, l)$ i tych relacji ze zbioru $\hat{H}_V^k \cap \hat{H}_V^{k+1}$, które spełniają warunek konieczny. Zmiana oceny $\Delta \bar{\alpha}_V^k(r, l)$ po dołączeniu (r, l) wynosi

$$\begin{aligned} \Delta A_V^k(r, l) &= \Delta \alpha_V^k(r, l) + \Delta \bar{\alpha}_V^k(r, l) \\ i \quad A_V^{k+1} &= A_V^k + \Delta A_V^k(r, l) \end{aligned} \quad (25)$$

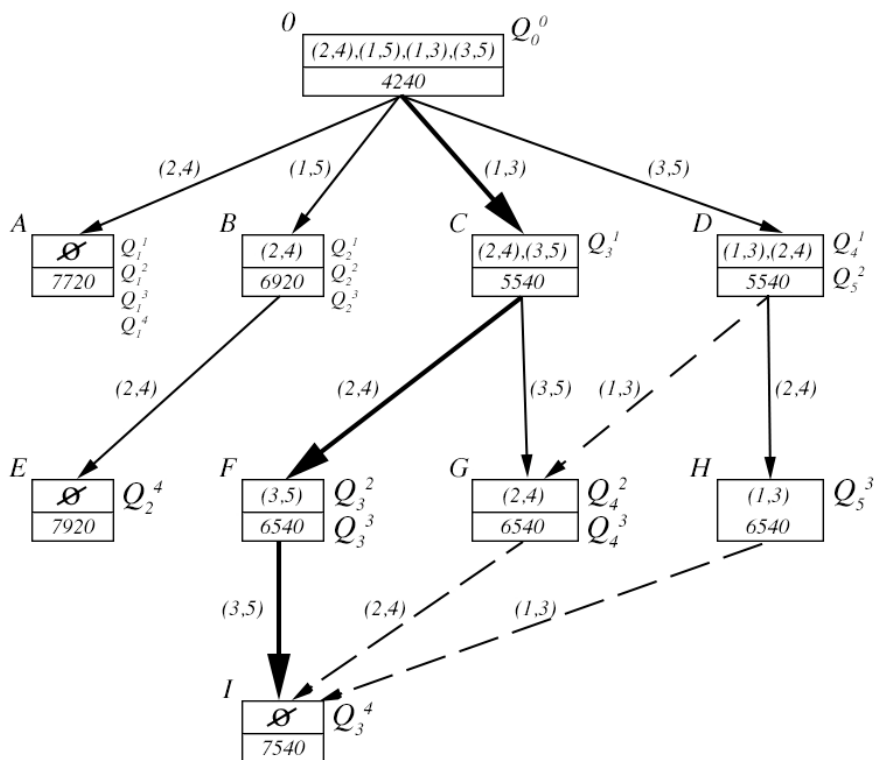
Przykład

Rozważmy przykład wyznaczania optymalnego planu zestawienia pociągów metodą podziału i ograniczeń dla potoków wagonów przedstawionych na rys. 1.



Rys. 7. Potoki wagonów

Drzewo rozwiązań (rys. 2) posiada strukturę tabelaryczną. Tabela każdego jej wierzchołka ma dwa wiersze. W wierszu górnym pokazane są wszystkie relacje perspektywiczne $\bar{H}_v^k$, a w wierszu dolnym ocena A_v^k . Na łuku wchodzącym do wierzchołka zapisuje się dołączoną relację perspektywiczną $(r, l) \in \bar{H}_v^{k-1}$. Wszystkie łuki, które wychodzą z wierzchołka początkowego i wchodzą do wierzchołka uzyskanego w k -tym kroku podziału opisane są relacjami. Dla wierzchołka uzyskanego w danym kroku podziału relacje te są obowiązkowe, gdyż były dołączone w poprzednich krokach podziału do zbioru relacji obowiązkowych H_0^0 , zbudowanym w etapie eliminacji.



Rys. 8. Drzewo rozwiązań

Krok zerowy. Zbiór relacji obowiązkowych składa się jedynie z relacji sąsiednich, zaś zbiór relacji zabronionych jest pusty, tj. $H_0^0 = H^S$, $\bar{H}_0^0 = \emptyset$. Tak więc, $\alpha_0^0 = \sum_{i,j} (cm)_{ij} x_{ij}(H^S) = 4000$.

Dla określenia zbioru relacji perspektywicznych $\bar{H}_0^0$ (tj. spełniających warunek konieczny) określmy $\Delta F_0^0(i, j) = F(H_0^0) - F(H_0^0 \cup (i, j))$, przy czym

relacje (i, j) wylicza się ze zbioru wszystkich możliwych przelotowych potoków wagonów $\{N_{ij}\}$. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zbiór relacji perspektywicznych

(i, j)	$\Delta F_0^0(i, j)$
(2,4)	$580 \cdot 3 - 10^3 = 740 > 0$
(1,5)	$100 \cdot 11 - 10^3 = 100 > 0$
(1,4)	$140 \cdot 7 - 10^3 = -20 < 0$
(1,3)	$340 \cdot 4 - 10^3 = 360 > 0$
(2,5)	$140 \cdot 7 - 10^3 = -20 < 0$
(3,5)	$350 \cdot 4 - 10^3 = 360 > 0$

Relacje (1,4) i (2,5) nie spełniają warunku koniecznego. Relacjami perspektywicznymi są: (2,4), (1,5), (1,3), (3,5). Potoki wagonów N_{14} i N_{25} w najlepszym przypadku będą przerobione na stacji 3.

Z tego wynika, że $\tilde{\alpha}_0^0 = \sum_{i,j} N_{ij} y_{ij} (H_0^0 \cup \tilde{H}_0^0) = 40 \cdot 2 \cdot 3 = 240$ i ocena $A_0^0 = \alpha_0^0 + \tilde{\alpha}_0^0 = 4000 + 240 + 4240$ (rys. 2, wierzchołek 0).

Krok pierwszy. Budujemy wszystkie możliwe podzbiory $H_1^1 = H_0^0 \cup (r, l)$, przy czym $(r, l) \in \tilde{H}_0^0$

Rozważmy $H_1^1 = H_0^0 \cup (2,4)$, wtedy $\Delta \alpha_0^0(2,4) = 1000$.

Wartości $\Delta F_1^1(i, j)$ przedstawiono w tabeli 2, z której wynika, że dołączenie do zbioru H_0^0 relacji (2,4) powoduje nieperspektywiczność wszystkich relacji pozostałych i $\tilde{H}_1^1 = \emptyset$.

Wartość $\tilde{\alpha}_1^1 = 100 \cdot 8 + 40 \cdot 4 + 200 \cdot 4 + 40 \cdot 4 + 200 \cdot 4 = 2720$, a $A_1^1 = 4000 + 1000 + 2720 = 7720$ (patrz rys. 2 wie-rzchołek A.

Tabela 2. Wartości $\Delta F_1^1(i, j)$

(i, j)	$\Delta F_1^1(i, j)$
(1,5)	$100 \cdot 8 - 10^3 = -200 < 0$
(1,3)	$940 - 10^3 = -60 < 0$
(3,5)	$940 - 10^3 = -60 < 0$

Dołączamy do zbioru H_0^0 relację perspektywiczną (1,5) ze zbioru $\tilde{H}_0^0$, tj. tworzymy zbiór $H_2^1 = H_0^0 \cup (1,5)$. Wtedy $\Delta \alpha_0^0(1,5) = (cm)_{15} = 1000$.

Aby wyznaczyć zbiór relacji perspektywicznych H_2^1 należy wyznaczyć $\Delta F_2^1(i, j)$, gdzie $(i, j) \in \tilde{H}_0^0$, $(i, j) \neq (1,5)$ (patrz tabela 3).

Tabela 3. Wartości $\Delta F_2^1(i, j)$

(i, j)	$\Delta F_2^1(i, j)$
(1,3)	$240 \cdot 4 - 10^3 = -40 < 0$
(2,4)	$480 - 10^3 = 440 > 0$
(3,5)	$240 \cdot 4 - 10^3 = -40 < 0$

Z tabeli 3 wynika, że dołączenie relacji (1,5) czyni relacje (1,3) i (3,5) nieperspektywicznymi.

I dalej $\hat{H}_2^1 = (2,4)$, wtedy $\hat{\alpha}_2^1 = 40 \cdot 4 + 200 \cdot 4 + 40 \cdot 4 + 200 \cdot 4 = 1920$, zaś $A_2^1 = 4000 + 1000 + 1920 = 6920$ (rys. 2, wierzchołek B).

Budujemy H_3^1 poprzez dołączenie relacji (1,3) do H_2^0 , tj. $H_3^1 = H_2^0 \cup (1,3)$, wtedy $\Delta\alpha_0^0(1,3) = 1000$. Obliczenia $\hat{H}_3^1$ przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości $\Delta F_3^1(i,j)$

(i,j)	$\Delta F_3^1(i,j)$
(2,4)	$440 \cdot 3 - 10^3 = 320 > 0$
(1,5)	$100 \cdot 7 - 10^3 = -300 < 0$
(3,5)	$340 \cdot 4 - 10^3 = 360 > 0$

$\Delta F_3^1(1,5) < 0$, zatem relacja (1,5), staje się nieperspektywiczną i zbiór $\hat{H}_3^1 = \{(2,4), (3,5)\}$, a $\alpha_3^1 = 100 \cdot 3 + 40 \cdot 3 + 40 \cdot 3 = 540$, zaś $A_3^1 = 4000 + 1000 + 540 = 5540$ (rys. 2, wierzchołek C).

Budujemy dalej H_4^1 poprzez dołączenie relacji (3,5) do H_3^0 , wtedy $\Delta\alpha_0^0(3,5) = 1000$, zaś wartość $\Delta F_4^1(i,j)$ przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości $\Delta F_4^1(i,j)$

(i,j)	$\Delta F_4^1(i,j)$
(1,5)	$100 \cdot 7 - 10^3 = -300 < 0$
(1,3)	$1360 - 10^3 = 360 > 0$
(2,4)	$1320 - 10^3 = 320 > 0$

Z tabeli 5 wynika, że $\hat{H}_4^1 = \{(1,3), (2,4)\}$

i $\alpha_4^1 = 100 \cdot 3 + 40 \cdot 3 + 40 \cdot 3 = 540$,

zaś $A_4^1 = 4000 + 1000 + 540 = 5540$ (rys. 2, wierzchołek D).

Krok drugi. Dokonujemy podziału zbioru $Q_3^1 = Q_3^2 \cup Q_4^2$, który ma najniższą ocenę. Obliczamy oceny podzbioru Q_3^2 : $H_3^2 = H_3^1 \cup (2,4)$,

zaś $\Delta\alpha_3^1(2,4) = (cm)_{2,4} = 1000$. Sprawdźmy, czy relacja (3,5) jest perspektywiczna: $\Delta F_3^2(3,5) = 1240 - 10^3 = 240 > 0$. A więc $\hat{H}_3^2 = (3,5)$.

Składowa oceny $\hat{\alpha}_3^2 = 100 \cdot 3 + 40 \cdot 3 + 40 \cdot 3 = 540$,

zaś ocena $A_3^2 = 5000 + 1000 + 540 = 6540$ (rys. 2, wierzchołek F).

Podobnie, dołączenie relacji (3,5) do H_3^1 pozostawia relację (2,4) perspektywiczną i ocena przeróbki się nie zmienia: $\hat{\alpha}_3^1 = \hat{\alpha}_3^2 = \hat{\alpha}_4^2 = 540$ (rys. 2, wierzchołek G).

Krok trzeci. Dołączając relację (1,3) do zbioru H_3^2 otrzymamy wierzchołek, dla którego zbiór relacji obowiązkowych jest identyczny ze zbiorem relacji obowiązkowych dla zbudowanego już wierzchołka G. Takie wierzchołki będziemy łączyć ze sobą (na rys. 2 linia przerywana pomiędzy wierzchołkami

D i G). dołączając relację (2,4) do zbioru relacji H_5^2 otrzymujemy wierzchołek F z oceną $A_5^3 = 6540$.

Krok czwarty. Budowa zbiorów Q_3^3 , Q_4^3 , Q_5^3 prowadzi do wierzchołka I z oceną $A_3^4 = 7540$. Dołączając jedyną relację perspektywiczną (2,4) do zbioru H_2^3 otrzymujemy wierzchołek E z oceną $A_2^4 = 7920$.

Ocena wierzchołka I jest minimalną oceną wszystkich wierzchołków. Optymalny plan zestawiania pociągów zawarty jest w zbiorze $H_3^4 = H^5 \cup \{(1,3), (2,4), (3,5)\}$ (na rys. 2 zaznaczono go łukami pogrubionymi).

Przedstawiony algorytm łączy również w sposób optymalny potoki wagonów z relacjami. Dla powyższego przykładu, potok N_{14} będzie włączony do relacji (1,3) i będzie przerabiany na stacji 3, gdzie $t_{ij} = 3$ godz.

Włączenie tego potoku do relacji (2,4) jest rozwiązaniem gorszym, gdyż powoduje przeróbkę na stacji 2, gdzie $t_{ij} = 4$ godz. Podobnie, potok N_{25} włącza się do relacji (3,5), a potok N_{15} do relacji (1,3) i (1,5). To pozwala obliczyć wagonogodziny przeróbki dla każdej stacji i całej sieci: $\bar{\alpha}_2^3 = \bar{\alpha}_3^3 = 540$. Uwzględniając akumulację pociągów 7 relacji (4 sąsiednich i 3 przelotowych), koszty ogólne wyniosą: $540 + 7 \cdot 10^3 = 7540$ wagonogodzin (wierzchołek I na rys. 2) i pokrywają się z jego oceną.

3. Wnioski

Metoda podziału i ograniczeń, stosowana w optymalizacji planu zestawienia pociągów, w odróżnieniu od metod opartych na kolejnym łączeniu relacji najbardziej opłacalnych, charakteryzuje się strukturalną zależnością relacji. Ogólna idea tej metody, oparta na stopniowym przejściu od pełnego przeglądu wariantów rozwiązań do przeglądu ograniczonego, w pełni uwzględnia specyfikę tego zadania. Momentem najtrudniejszym i decydującym o wyborze planu optymalnego jest określenie ocen granic funkcji celu i ograniczeń dodatkowych, związanych z zasobami. Zaprezentowany algorytm bazowy uwzględni ograniczenia dowolnego typu, przy czym jego zaletą jest to, że czym więcej ograniczeń tym szybciej uzyskuje się rozwiązanie optymalne. Jego praktyczna realizacja [3] na sieci kolejowej o różnej strukturze i wielkości stacji rozrządowych pokazała wysoką wydajność i uniwersalność.

LITERATURA

1. W. Wyrzykowski. Ruch kolejowy. Organizowanie ruchu kolejowego, t.2, WK i Ł, Warszawa 1967.
2. А. В. Кутыркин, Сотников Е. А., Левин Д. Ю., Василев В. И. Методика организации вагонопотоков, Ж-д Транспорт, 1982, № 4.
3. А. В. Кутыркин, Василев В. И. Расчет оптимального плана формирования однопутных поездов методом ветвей и границ, М. «Транспорт», «Вестник ВНИИЖТ», 1980, № 7.
4. Дувалян С. В. Методы и алгоритмы решения задач планирования и учета на ж-д транспорте, Труды МИИТа, вып. 229, 1966.

MODEL OF SMALL PARCEL RAILWAY DISTRIBUTION

Abstract

This paper presents a mathematical model determining the optimal plan of train assembly by marshalling yards. The conception consists in a branch and bound method and its application in an algorithm of the development of optimal plans of train assembly. An example is given showing the determination of an optimal plan for selected traffic of railway wagons.

Keywords: Mathematical model, marshalling yards, train assembly, railway wagon traffic

MODEL DYSTRYBUCJI PRZESYŁEK DROBNYCH NA KOLEI

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono model matematyczny wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów przez stacje rozrządowe. Zaprezentowano ideę metody podziału i ograniczeń i jej zastosowanie w algorytmie budowy optymalnego planu zestawiania pociągów. Pokazano przykład wyznaczania planu optymalnego dla wybranego potoku wagonów.

Słowa kluczowe: Model matematyczny, Stacje rozrządowe, zestawienia pociągów, potoki wagonów

Prof. dr hab. inż. Tadeusz CISOWSKI
Wydział Transportu i Informatyki
Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie
20-209 Lublin, ul. Mełgiewska 7-9
tel. 81 749 32 43
e-mail: tadeusz.cisowski@wsei.lublin.pl

Mgr inż. Łukasz WOJCIECHOWSKI
Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel. 81 5384585
e-mail: l.wojciechowski@pollub.pl

LOGISTYCZNE ZARZĄDZANIE POTOKAMI DROBNICY NA KOLEI W WARUNKACH OGRANICZEŃ

Wstęp

Jednym z najważniejszych problemów polskiego transportu jest konieczność oddziaływania na podział zadań przewozowych, z uwzględnieniem kosztów bezpośrednich i zewnętrznych, dla wpłynięcia na zmianę struktury gałęziowej polskiego transportu, w kierunku zrównoważenia udziału w przewozach transportu samochodowego (głównie ciężarowego) i kolejowego.

Kolej, a zwłaszcza zasadniczy przewoźnik, jakim jest PKP Cargo S.A., uzyskuje bardzo dobre wyniki w zakresie przewozów całopociągowych, w tym przewozów międzynarodowych, dzięki efektywnemu działaniu na rynku potrzeb przewozowych i wysokiemu poziomowi świadczonych usług, o czym świadczy przyznanie w 2003 r. certyfikatu ISO 9001. Jest to zgodne z postulowanymi kierunkami działań transportu kolejowego w „Polityce Transportowej na lata 2005–2025”. Jednak we wspomnianej „Polityce Transportowej...” nie ma informacji o bardzo złej sytuacji w przewozach dotyczących pojedynczych wagonów i niewielkich ich grup, głównie przewozów krajowych, oraz informacji o metodach i środkach, także finansowych, niezbędnych do zdecydowanej poprawy ich atrakcyjności, koniecznej dla zintensyfikowania tej grupy przewozów kolejowych, tak bardzo ważnych dla gospodarki narodowej, a także dla stanu dróg.

Konieczność racjonalizacji procesów przewozowych, przeciwdziałających marginalizacji transportu kolejowego w obsłudze tego segmentu rynku, jest oczywista. Poprzez wytworzenie silnej konkurencji pomiędzy operatorami kolejowymi Komisja Europejska chce doprowadzić do zmniejszenia stawek dofinansowania, a zatem wydatków publicznych przeznaczanych na dotowanie połączeń uruchamianych w ramach służby publicznej.

Tym bardziej, że do 2020 r. według założeń UE – rocznie do wydania będzie 6–7 mld zł na infrastrukturę kolejową. Aby nadrobić wieloletnie zaległości i poprawić konkurencyjność kolei priorytetem będzie poprawa jakości torów oraz sposobów zarządzania przewozami wagonowymi. Warunkiem jest, by unijne środki były wydawane lepiej niż w latach 2007–2013. W tym okresie polska kolej nie wykorzystała ok. 40 proc. dostępnych funduszy.

Przewozy wagonowe w obecnej ich formie, ze względu na wątpliwą atrakcyjność, odgrywają w obsłudze transportowej kraju rolę mniejszą od uzasadnionej i możliwej.

Jednakże w przypadku przewozów towarowych są już sukcesy w postaci spółki PKP Cargo, która po restrukturyzacji całkiem dobrze działa na rynku, choć na pewno byłoby lepiej, gdyby zmiany rozpoczęły się w niej jeszcze wcześniej. Wyzwań stojących przed polską koleją w najbliższych latach jest bardzo dużo. To m.in. uporządkowanie kwestii zarządzania infrastrukturą kolejową, uporządkowanie sytuacji w przewozach regionalnych i działalności spółek z Grupy PKP.

Z uwagi na powyższe należy nadmienić, iż stosowane dotychczas metody do zarządzania przewozami wagonowymi są praktycznie heurystyczne i nie gwarantują rozwiązań optymalnych. Mowa tu o metodzie klasycznej Pietrowa A.P. [1,2] i o chociażby zupełnie nieznannej w Polsce metodzie komputerowej Duwaliana S.W. [4].

Obie te metody nie uwzględniają ograniczeń systemowych, związanych z liczbą torów kierunkowych i zdolnością przeróbczą stacji.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę zarządzania przewozami wagonowymi, która uwzględnia te ograniczenia.

1. Model matematyczny wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów przez stacje rozrządowe

Rozważmy sieć transportową zadaną grafem $G(\{i\}, \{i,j\})$ składającym się ze zbioru węzłów (stacji rozrządowych) $\{i\}$ i zbioru łuków $\{(i,j)\}$ ($i,j=1-n$, gdzie n – ogólna liczba stacji rozrządowych na sieci). Łuk (i,j) prowadzi od węzła i do węzła j i ma wagę d_{ij}^G , gdzie d_{ij}^G – odległość pomiędzy sąsiednimi stacjami [3].

Drogą zorientowaną lub łańcuchem od węzła i do węzła j będziemy nazywać ciąg węzłów i łuków sieci: $i=i_1(i_1, i_2), i_2, \dots, i_{r-1}, (i_{r-1}, i_r), i_r=j$. Długością łańcucha będzie suma wag d_{ij}^G wszystkich łuków należących do niego. Najkrótszy łańcuch pomiędzy węzłami i i j oznaczymy przez S_{ij}^G . Znałe są dobowe strugi wagonów $N_{ij} \geq 0$ ($i,j=1-n$, gdzie i – stacja początkowa, a j – stacja końcowa strugi). Zakłada się najkrótszą długość łańcucha S_{ij}^G dla przebiegu strug N_{ij} .

Każdej parze stacji (i,j) można przypisać wielkość t_{ij} – oszczędności wynikające z przypuszczenia bez przeróbki jednego wagonu przez stację j , rozpoczynającego bieg na stacji i . Wielkość t_{ij} określona jest jedynie dla stacji poprzedzającej stację j , $t_{ij} = t_{pj}$, gdzie (p,j) – ostatni łuk łańcucha S_{ij}^G . Przyjmujemy, że $t_{ii} = 0$. Wiadomo, że $(cm)_{ij}$ są wagonogodzinami akumulacji niezbędnymi do zestawiania na stacji i pociągów relacji j .

Wiadomo również, że $(cm)_{ij} = (cm)_{ip}$, gdzie (i,p) – pierwszy łuk łańcucha S_{ij}^G . Wyznaczymy macierz relacji $X = \|x_{ij}\|$ i graf relacji $H(\{i\}, \{(i,j)\})$, ($i,j=1-n$).

Jeżeli w planie zestawiania pociągów istnieje relacja (r,l) to $x_{rl} = 1$ i w grafie zorientowanym $H(\{i\}, \{(i,j)\})$ pojawia się łuk $(r,l)(r,l=1 \div n)$. Zakłada się, że wszystkie relacje pomiędzy stacjami sąsiadnymi są obowiązkowe, tj. $G \leq H$. Oszczędności T_{ij} przypadające na jeden wagon relacji (i,j) wynoszą:

$$T_{ij} = \sum_{k \in S_{ij}^E} t_{ik} \quad (1)$$

przy czym suma ta dotyczy wszystkich stacji leżących na najkrótszej drodze pomiędzy stacjami i i j .

Rozważmy sieć zadaną grafem H z wagami łuków $d_{ij}^H = T_{ij}$.

Wprowadźmy zmienne

$$Z_{ij}^1 = T_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

Zakładamy, że w planie zestawiania pociągów jest relacja przechodząca co najmniej przez jedną stację bez przeróbki (r,l) , wtedy $Z_{rl}^1 = T_{rl}$, jeżeli jej nie ma – to $Z_{rl}^1 = 0$. Wprowadźmy również zmienne Z_{ij} wyznaczone rekurencyjnie następującym wzorem:

$$Z_{ij} = \max_{r \in S_{ij}^E} (Z_{ir}^1, Z_{ir} + Z_{rj}) \quad (3)$$

przy czym $\max$ dotyczy wszystkich stacji leżących na najkrótszej drodze S_{ij}^E od i do j . Tak więc, wielkość Z_{ij} jest największą oszczędnością czasu dla jednego wagonu biegnącego od stacji i do stacji j ze zbioru relacji $\{(r,l)\}$.

Algorytm wyznaczania wielkości Z_{ij} i najbardziej oszczędnej drogi w grafie H z wagonami Z_{ij}^1 jest analogiczny do algorytmu wyznaczania najkrótszej drogi w grafie zorientowanym [3]. Różnica polega tylko na tym, że maksimum we wzorze (3) dotyczy nie wszystkich stacji, lecz jedynie stacji należących do najkrótszej drogi od i do j .

Funkcja celu F^1 , charakteryzująca zbiór relacji $\{(i,j)\}$, które skracają obrót wagonów określana jest poprzez porównanie wagonogodzin akumulacji $\sum_{i,j} (cm)_{ij} X_{ij}$ z wagonogodzinami oszczędności $\sum_{i,j} N_{ij} Z_{ij}$, wynikającymi z przebiegu wagonów bez przeróbki, tj.:

$$F^1 = F^1(x_{ij}) = \sum_{i,j} (N_{ij} Z_{ij} - (cm)_{ij} X_{ij}) \rightarrow \max_{\{x_{ij}\}} \quad (4)$$

Wyrażenia (2) ÷ (4) są podstawą modelu matematycznego wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów.

W optymalnym planie zestawiania każdy potok wagonów N_{ij} powinien być włączony do tych pociągów, które dają największe oszczędności czasu pomiędzy stacjami i i j ($i, j = 1 + n$). Zgodnie ze wzorem (3), przy znanym zbiorze relacji $\{(i, j)\}$ wyznacza się optymalny sposób włączania do każdej relacji poszczególnych potoków wagonów N_{ij} . Wielkość Z_{ij} jest oszczędnością wynikającą z relacji bezpośredniej (i, j) lub sumą oszczędności relacji o najdłuższej drodze S_{ij}^H w grafie relacji H . Zaznaczmy w grafie relacji H najkorzystniejszą drogę S_{ij}^H .

Wtedy

$$Z_{ij} = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} Z_{rl}^1 = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} T_{rl} \quad (5)$$

Uwzględniając (1) otrzymamy:

$$Z_{ij} = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} \sum_{p \in S_{rl}^G} t_{rp} - \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} t_{rl} \quad (6)$$

Oznaczając pierwszy składnik w tym wyrażeniu przez $\ddot{T}_{ij}$, a drugi przez y_{ij} otrzymamy:

$$Z_{ij} = \ddot{T}_{ij} - y_{ij} \quad (7)$$

Wielkość $\ddot{T}_{ij} = \sum_{(r,l) \in S_{ij}^H} \sum_{p \in S_{rl}^G} t_{rp} = \sum_{i \in S_{ij}^G} i l = T_{ij} + t_{ij}$ jest sumą oszczędności czasu, wynikającą z przepuszczenia bez przeróbki jednego wagonu przez stacje, leżące na najkrótszej drodze S_{ij}^G , łącznie ze stacją j . Wielkość ta nie zależy od zbioru relacji H i jest stała dla danej sieci G .

Wielkość y_{ij} jest sumą czasu przeróbki jednego wagonu na najbardziej oszczędnej drodze S_{ij}^H . Wtedy ze wzoru (7) wynika, że przy zadanym zbiorze relacji H najbardziej oszczędna droga S_{ij}^H w sieci relacji z wagami T_{ij} jest drogą minimalną w sieci relacji z wagami t_{ij} .

Wprowadźmy zmienne

$$y_{ij}^1 = \frac{t_{ij}}{x_{ij}} \quad (8)$$

Przyjmijmy, że w planie zestawiania jest relacja (r,l) , wtedy $y_{ij}^1 = t_{rl}$, jeżeli jej nie ma – to $y_{rl}^1 = \infty$. Wykorzystując wyrażenie (8), wielkość y_{ij} można określić wzorem:

$$y_{ij} = \min_{r \in S_{ij}^C} (y_{ij}^1, y_{ir} + y_{rj}) \quad (9)$$

przy czym, minimum dotyczy wszystkich stacji, leżących na najkrótszej drodze S_{ij}^C .

Korzystając z wyrażenia (7) funkcję celu (4) można przedstawić wzorem:

$$F^1 = \sum_{i,j} (N_{ij}Z_{ij} - (cm)_{ij}X_{ij}) = \sum_{i,j} N_{ij}\tilde{T}_{ij} - \left[\sum_{i,j} (N_{ij}y_{ij} + (cm)_{ij}X_{ij}) \right] \rightarrow \max_{\{X_{ij}\}} \quad (10)$$

Wielkości $\tilde{T}_{ij}$ i N_{ij} są stałe i nie zależą od planu zestawiania pociągów, dlatego funkcję celu można również wyznaczyć następująco:

$$F(X_{ij}) = \sum_{i,j} ((cm)_{ij}X_{ij} + N_{ij}y_{ij}) \rightarrow \min_{\{X_{ij}\}} \quad (11)$$

W odróżnieniu od funkcji F^1 funkcja celu F określa sumaryczne wagonogodziny akumulacji i przeróbki wagonów. Tak więc, od sformułowania problemu (2) ÷ (4) przeszliśmy do modelu (8) ÷ (11), który będzie wykorzystany dalej w budowie algorytmu wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów.

2. Plan zestawiania pociągów, uwzględniający ograniczenia związane z obciążeniem stacji i liczbą torów

Dodatkowe ograniczenia w zadaniu wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów w sposób zasadniczy utrudniają jego rozwiązanie. Sieć kolejowa jest systemem wzajemnie powiązanych stacji i zazwyczaj niedociążenie jednych oznacza przeciążenie innych. Poprawne funkcjonowanie całej sieci wymaga równomiernego rozkładu pracy rozrządowej pomiędzy wszystkimi stacjami. W tym celu potrzebny jest mechanizm, uwzględniający różny stopień obciążenia stacji. Taki mechanizm może wynikać z nieliniowości powyższego zagadnienia. Wiadomym jest, że normatywna wielkość t_{ij} – oszczędności czasu przypadające na jeden wagon przepuszczany bez przeróbki, zależy od wielkości rozrządzanego potoku wagonów m_{ij} , a także od wielkości cyklu pracy górki rozrządowej, średniej wielkości rozrządzanych składów i liczby lokomotyw

manewrowych zestawiających pociągi. Ostatnie trzy wielkości są stałe dla danej stacji i nie zależą od planu zestawienia pociągów. Wielkość m_{ij} – obciążenie stacji rozrządowej zależy istotnie od planu zestawienia pociągów i dlatego przy jego określaniu należy uwzględnić formę nieliniową o postaci:

$$t_{ij} = f_j(m_{ij}) \quad (12)$$

która może być zadana tabelą. Przedział wielkości m_{ij} dla danej stacji j jest stosunkowo niewielki. Niech μ_{ij} i M_{ij} są odpowiednio górną i dolną granicą tego przedziału.

$$\mu_{ij} \leq m_{ij} \leq M_{ij} \quad (13)$$

W warunkach dużego obciążenia stacji rozrządowej, przy dowolnym planie zestawiania pociągów, wielkość m_{ij} dla każdej stacji nie może być mniejsza od wielkości optymalnej m_{ijopt} :

$$m_{ij} \geq m_{ijopt} \geq \mu_{ij} \quad (14)$$

W przypadku przeciwnym, każdy wzrost potoku wagonów o $\Delta m_{ij} = m'''_{ij} - m'_{ij}$ ($m'_{ij}; m'_{ij} \geq m_{ijopt}$) powoduje zwiększenie oszczędności czasu przeróbki t_{ij} jednego wagonu, przepuszczanego przez odcinek S_{ij}^G i stację j , bez przeróbki o wartość:

$$\Delta t_{ij} = f_j(m'_{ij} - m''_{ij}) - f_j(m''_{ij}) - f_j(m'_{ij}) \quad (15)$$

Istniejące metody wyznaczania optymalnego planu zastawiania pociągów nie mogą uwzględnić tej zależności, gdyż w początkowym etapie obliczeń można określić jedynie górną granicę m_{ij} i wielkości t_{ij} dla konkretnych wariantów zbiorów relacji. Dlatego też, jeżeli wprowadzimy do obliczeń zmieniające się wartości t_{ij} , to opłacalność wszystkich relacji będzie zawyżona i może się zdarzyć, że relacja spełniająca warunek konieczny stanie się nieopłacalną. Istniejące zatem metody wyznaczania planu zestawienia pociągów uwzględniają tylko stałe wartości t_{ij} . Algorytm wyznaczania planu zestawienia pociągów, uwzględniający obciążenie stacji rozrządowych funkcjonuje następująco: „Najbardziej efektywny” zbiór $Q_{v(k),u(k)}^K$ dzieli się na podzbiory $\{Q_{v(k),1}^K, \dots, Q_{v(k),u(k)}^K\}$ [7].

Dowolny podzbiór $Q^k_{v(k), \vartheta(k)}$ ($\vartheta = 1 \div \vartheta(k)$) powstaje poprzez dołączenia do zbioru relacji wydzielonych $H^K_{v(k)}$ dodatkowej obowiązkowej relacji (r, l) :

$$H^K_{v(k)} = H^{K+1}_v = H^K_{v(k)} \bigcup (r, l) \quad (16)$$

Zbiór relacji perspektywicznych $\tilde{H}^K_{v(k)}$, spełnia warunek konieczny w zbiorze relacji obowiązkowych $H^K_{v(k)}$. Warunek ten dla relacji (r, l) ma postać :

$$F(H^K_{v(k)}) - F(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l)) = \Delta F^K_{v(k)}(r, l) > 0 \quad (17)$$

Po uwzględnieniu, że

$$F(H^K_{v(k)}) = \sum_{i,j} ((cm)_{ij})x_{ij} + N_{ij}y_{ij} \quad (18)$$

otrzymamy

$$\begin{aligned} \Delta F^K_{v(k)}(r, l) &= - (cm)_{rl} + \sum_{i,j} N_{ij} \Delta y_{ij}(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l)) = \\ &= - (cm)_{rl} + \sum_{i,j} N_{ij} [y_{ij}(H^K_{v(k)}, t_{pg}(H^K_{v(k)})) \\ &\quad - y_{ij}(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l), t_{pg}(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l)))] \end{aligned} \quad (19)$$

Odległość pomiędzy wierzchołkami i i j w grafie relacji zależy nie tylko od zbioru relacji, ale i od wielkości t_{pg} . Wprowadzimy wielkość $y_{ij}[H^K_{v(k)} \bigcup (r, l), t_{pg}(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l))]$, będącą odległością pomiędzy wierzchołkami i i j w grafie G'' relacji $(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l))$, z wagami $t_{pg}(H^K_{v(k)} \bigcup (r, l))$ uzyskanymi w kroku poprzednim, do momentu dołączenia relacji (r, l) .

Wtedy

$$\begin{aligned}
 \Delta F_{v(k)}^k(r, l) = & \\
 - (cm)_{rl} + \{ & \sum_{i,j} N_{ij} [y_{ij}(H_{v(k)}^k, t_{pg}(H_{v(k)}^k)) \\
 & - y_{ij}(H_{v(k)}^k \bigcup (r, l), t_{pg}(H_{v(k)}^k))] \} + \\
 \{ & \sum_{i,j} N_{ij} [y_{ij}(H_{v(k)}^k \bigcup (r, l), t_{pg}(H_{v(k)}^k)) \\
 & - y_{ij}(H_{v(k)}^k \bigcup (r, l), t_{pg}(H_{v(k)}^k \bigcup (r, l)))] \}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Pierwsza składowa, w nawiasie sześciennym wyraża opłacalność relacji (r, l) przy stałych wartościach $t_{pg}(H_{v(k)}^k)$, zaś składowa druga charakteryzuje opłacalność relacji (r, l) przy zmianie obciążenia m_{pg} stacji g ($g = \overline{1, n}$) i tym samym zmianie wielkości t_{pg} . Druga składowa jest równa zero przy stałych wartościach t_{pg} .

Niech oceną funkcji celu będzie:

$$A_v^k = \alpha_v^k + \tilde{\alpha}_v^k = \sum_{i,j} (cm)_{ij} x_{ij}(H_v^k) + \sum_{i,j} N_{ij} y_{ij}(H_v^k) \tag{21}$$

Gdzie

$$\tilde{H}_v^k = H_v^k \bigcup \hat{H}_v^k \tag{22}$$

W toku całego procesu obliczeniowego określa się oceny $t_{ij}(H_{v(k)}^k)$ i $t_{ij}(\tilde{H}_{v(k)}^k)$ czasu t_{ij} , przy czym:

$$t_{ij}(\tilde{H}_v^k) \leq t_{ij} \leq t_{ij}(H_v^k) \tag{23}$$

W optymalnym planie zestawiania pociągów wielkość t_{ij} jest nieznaną i w celu sprawdzenia warunku dostatecznego należy wykorzystać dolną ocenę $t_{ij}(\tilde{H}_v^k)$ wielkości t_{ij} :

$$(cm)_{ij} \leq N_{ij} * \min_k \{ t_{ik}(\tilde{H}_v^k) / S_{ij} \in S_{ij}^G \} \tag{24}$$

Zależność $t_{ij} = f_j(m_{ij})$ może być przedstawiona w postaci tabeli, zaś wielkości m_{ij} , t_{ij} mają następujące ograniczenia:

$$\hat{m}_{ij} \leq m_{ij} \leq \bar{m}_{ij} ; \quad \hat{t}_{ij} \leq t_{ij} \leq \bar{t}_{ij} \quad (25)$$

Często metodami eksperckimi można te ograniczenia bardziej skonkretyzować i tym samym zmniejszyć zbiór wariantów rozwiązania. I tak, jeżeli $t_{ij}(\bar{H}_v^k) < \hat{t}_{ij}$ lub $t_{ij}(H_v^k) > \bar{t}_{ij}$, to w obliczeniach zamiast wielkości $t_{ij}(\bar{H}_v^k)$ lub $t_{ij}(H_v^k)$ można stosować wielkości $\hat{t}_{ij}$ lub $\bar{t}_{ij}$.

Dopuszczenie to pozwala dokładniej sprawdzić perspektywiczność relacji oraz spełnienie warunku dostatecznego.

Ponadto, jeżeli $t_{ij}(\bar{H}_v^k) > \bar{t}_{ij}$ lub $t_{ij}(H_v^k) < \hat{t}_{ij}$ dla co najmniej jednej stacji j , to cały zbiór wariantów relacji Q^k staje się nieperspektywnym i nie uczestniczy w dalszych obliczeniach.

Przykład

Rozważmy przykład wyznaczania optymalnego planu zestawienia pociągów metodą podziału i ograniczeń dla następujących potoków wagonów [7]:

$$\begin{aligned} N_{12} &= N_{23} = N_{34} = N_{45} = 150 \\ N_{13} &= 200, N_{25} = 400, N_{24} = 300 \\ (cm)_1 &= 850, (cm)_i = 1000 \quad (i = \underline{2,4}) \\ t_2(m_2) &= t_2(350) = 4, t_2(150) = 3,5 \\ t_3(350) &= 3, t_3(750) = 4 \\ t_4(450) &= 3, t_4(850) = 4 \end{aligned}$$

Relacje sąsiednie są obowiązkowe. Relacjami perspektywnymi są: (1,3),(2,5),(3,5). Relacja (1,3) spełnia warunek konieczny:

$$\begin{aligned} \Delta F_0^0(1,3) &= N_{13} * \{ t_2(N_{12} + N_{13}) \} + (m_2 - N_{13}) * \{ t_2(N_{12} + N_{13}) - t_2(N_{12}) \} - \\ &= (cm)_1 = \\ &= 200 * t_2(350) + 150 * (t_2(350) - t_2(150)) - (cm)_1 = 200 * 4 + 150 * 0,5 - 850 = \\ &= 25 > 0 \end{aligned}$$

Można zauważyć, że jeśli nie uwzględniać oszczędności wagonogodzin, wynikających z obniżenia obciążenia stacji 2, to relacja (1,3) nie spełnia warunku koniecznego. Relacja ta będzie jednak wchodzić do planu optymalnego, gdyż nie wpływa na perspektywiczność pozostałych relacji.

$$\begin{aligned} \hat{t}_3 &= t_3(N_{13} + N_{23} + N_{25}) = t_3(750) = 4 \\ \bar{t}_3 &= t_3(N_{13} + N_{23}) = t_3(350) = 3 \end{aligned}$$

Relacja (2,4) przy $t_3 = \bar{t}_3$ spełnia warunek dostateczny, ale nie wchodzi do planu optymalnego. Z tego wynika konieczność sprawdzenia warunku dostatecznego, przy minimalnych wartościach $\bar{t}_{ij}$ dla danego zbioru relacji obowiązkowych. Relacja (2,5) spełnia warunek dostateczny przy $\bar{t}_3 = t_3(350) = \bar{t}_4(450) = 3$. W związku z tym, potok wagonów N_{25} zostaje wykreślony z rozpatrywania perspektywiczności relacji (2,4), która okazuje się nieperspektywiczną i nie wchodzi do planu optymalnego. Plan optymalny zawiera relacje (1,3) i (2,5).

W metodzie podziału i ograniczeń uwzględnienie liczby torów na stacjach nie przynosi dodatkowych problemów w wyznaczaniu optymalnego planu zestawiania pociągów. Ograniczenia, związane z liczbą torów na stacjach mają postać:

$$\sum_{(i,j) \in \bar{H}_r^k} P(N^{ij}) n_i \quad ; \quad i = \overline{1, n} \quad (26)$$

gdzie:

$$\bar{H}_r^k = H_r^k \cup \hat{H}_r^k; \quad (27)$$

- H_r^k – zbiór relacji obowiązkowych;
- $\hat{H}_r^k$ – zbiór relacji perspektywicznych;
- N^{ij} – sumaryczny potok wagonów relacji (i,j);
- n_i – liczba torów na stacji i j ;
- $P(N^{ij})$ – funkcja określająca liczbę torów w zależności od wielkości relacji.

W procesie wyznaczania optymalnego planu zestawienia pociągów można stosować funkcje $P(N^{ij})$ o następującej postaci:

1. $0 < N^{ij} < 300$;
2. $300 \leq N^{ij} \leq 500$;
3. $500 \leq N^{ij}$

Konieczna liczba torów na r – tej stacji wynosi:

$$\bar{n}_r = \sum_{(r,j) \in \bar{H}_r^k} P(N^{rj}) \quad (28)$$

Jeżeli $\bar{n}_r < n_r$ to proces obliczeniowy jest kontynuowany, jeżeli $\bar{n}_r = n_r$ to ze zbioru relacji perspektywicznych H_r usuwa się wszystkie relacje (r,k) , rozpoczynające się na stacji r , co znacząco zmniejsza liczbę rozpatrywanych wariantów rozwiązań.

Ogólnie, metoda podziału i ograniczeń w wyznaczaniu optymalnego planu zestawienia pociągów ma tę zaletę, że czym więcej wprowadzimy ograniczeń tym szybciej osiągnemy rozwiązanie optymalne.

3. Wnioski

Metoda podziału i ograniczeń, stosowana w optymalizacji planu zestawienia pociągów, w odróżnieniu od metod opartych na kolejnym łączeniu relacji najbardziej opłacalnych, charakteryzuje się strukturalną zależnością relacji. Ogólna idea tej metody jest bardzo elastyczna i może być zastosowana bezpośrednio do grafu wejściowego rozwiązywanego zadania. Dzięki temu można uzyskać rozwiązanie optymalne również przy ograniczeniach dodatkowych, takich jak obciążenie stacji i liczba torów stacyjnych.

Zaletą przedstawionego algorytmu jest fakt, że uwzględnienie w nim większej liczby ograniczeń, redukuje liczbę rozpatrywanych wariantów i skraca drogę do rozwiązania optymalnego.

Jego praktyczna realizacja [5] na sieci kolejowej o różnej strukturze i wielkości stacji rozrządowych pokazała wysoką wydajność i uniwersalność.

LITERATURA

1. J. Drewniak, Liczby rozmyte, w: Zbiory rozmyte i ich zastosowania, J. Chojcan, J. Łęski (red.), Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001, J. Kacprzyk, Wieloetapowe sterowanie rozmyte, WNT, Warszawa 2001.
2. A. Łachwa, Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, regulacji i decyzji, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
3. J. Kacprzyk, Zbiory rozmyte w analizie systemowej, PWN, Warszawa 1986.
4. W. Wyrzykowski. Ruch kolejowy. Organizowanie ruchu kolejowego, t. 2, WK i Ł, Warszawa, 1967.
5. А. В. Кутыркин. Алгоритмы оперативной корректировки плана формирования поездов, М. «Транспорт», «Вестник ВНИИЖТ», 1983, № 8.
6. А. В. Кутыркин, Сотников Е. А., Левин Д. Ю., Василев В. И. Методика организации вагонопотоков, Ж-д Транспорт, 1982, № 4.
7. А. В. Кутыркин, Василев В. И. Расчет оптимального плана формирования односторонних поездов методом ветвей и границ, М. «Транспорт», «Вестник ВНИИЖТ», 1980, № 7.
8. Днобуя Я. З., Прад А. Теория возможностей: приложения к представлению знаний в информатике, М. «Радио и связь», 1990.
9. Дувалян С. В. Методы и алгоритмы решения задач планирования и учета на ж-д транспорте, Труды МИИТа, вып. 229, 1966.
10. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М. «Мир», 1976.

LOGISTICS MANAGEMENT WITH BOUNDING OF BREAK BULK CARGO IN RAILWAY TRAFFIC

Abstract

This paper presents a mathematical model determining the optimal plan of train assembly by marshalling yards. The conception consists in a branch and bound method. A plan of train assembly has been developed, taking into account the bounding related to the capacity of marshalling yards and the number of tracks.

Keywords: Mathematical model, train assembly plans, capacity of marshalling yards

LOGISTYCZNE ZARZĄDZANIE POTOKAMI DROBNICY NA KOLEI W WARUNKACH OGRANICZEŃ

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono model matematyczny wyznaczania optymalnego planu zestawiania pociągów przez stacje rozrządowe. Zaprezentowano ideę metody podziału i ograniczeń. Zbudowano plan zestawiania pociągów, uwzględniający ograniczenia związane z obciążeniem stacji i liczbą torów.

Słowa kluczowe: Model matematyczny, plan zestawiania pociągów, obciążenie stacji

Prof. dr hab. inż. Tadeusz CISOWSKI
Wydział Transportu i Informatyki
Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie
20-209 Lublin, ul. Mełgiewska 7-9
tel. 81 749 32 43
e-mail: tadeusz.cisowski@wsei.lublin.pl

Mgr inż. Łukasz WOJCIECHOWSKI
Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel. 81 5384585
e-mail: l.wojciechowski@pollub.pl