

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 231

MECHANIKA 49

BYDGOSZCZ - 2000

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 231

MECHANIKA 49

BYDGOSZCZ - 2000

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
dr hab. inż. Janusz Prusiński, prof. nadzw. ATR

REDAKTOR NAUKOWY
prof. dr hab. inż. Maciej Woropay

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0208-6395

WYDAWNICTWA UCZELNIANE
AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ W BYDGOSZCZY

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 7,35. Ark. druk. 9,75. Papier druk. kl. III.
Oddano do druku i druk ukończono w grudniu 2000 r.
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20
Zamówienie nr 12/2000

Spis treści

1. Edmund Dulcet – Badania nad wielkością strat ciekłego benzoesu sodu aplikowanego do zielonki w siewkarni zbierającej	5
2. Eugeniusz Jarmocik – Agregaty rolnicze w różnych systemach uprawy roli Cz. I. Agregaty w uprawie tradycyjnej	15
3. Eugeniusz Jarmocik – Agregaty rolnicze w różnych systemach uprawy roli Cz. II. Agregaty kombinowane	31
4. Eugeniusz Jarmocik – Agregaty rolnicze w różnych systemach uprawy roli Cz. III. Agregaty do uprawy bezplużnej i siewu bezpośredniego	45
5. Zbigniew Kikiewicz, Adam Mroziński – Wpływ procesu mielenia masy makulaturowej w młynie tarczowym St300s na właściwości wytrzymałościowe papieru w układzie recykulacji	61
6. Tadeusz Mikołajczyk, Krzysztof Nowicki – Analiza zużycia ostrza i trwałości narzędzi z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych Cz. I. Analiza obrazów zużycia narzędzi skrawających	75
7. Tadeusz Mikołajczyk, Krzysztof Nowicki – Analiza zużycia ostrza i trwałości narzędzi z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych Cz. II. Ocena czasu życia ostrza	85
8. Tadeusz Mikołajczyk – Nóż tokarski uniwersalny	93
9. Eugeniusz Ranatowski – Analityczno–numeryczna ocena temperatur w procesie spawania przy wykorzystaniu przestrzennych modeli źródeł ciepła i nieliniowości procesu	101
10. Eugeniusz Ranatowski – Uwagi o modelowaniu procesu cieplnego w czasie spawania	117
11. Marian Szymański – Wymiana ciepła w podgrzewaczach werników o działaniu okresowym	125
12. Henryk Tylicki – Prognozowanie stanu maszyn	131

BADANIA NAD WIELKOŚCIĄ STRAT CIEKŁEGO BENZOESANU SODU APLIKOWANEGO DO ZIELONKI W SIECZKARNI ZBIERAJĄCEJ

Edmund Dulcet

Katedra Maszyn Rolniczych
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Przy aplikacji preparatów konserwujących (chemicznych, enzymatycznych i mikrobiologicznych) do zielonek w czasie ich zbioru siewczkarniami zbierającymi pewna ich ilość uchodzi do atmosfery, powodując jej zanieczyszczenie. Z obserwacji wynika, że straty mogą być znaczne, co prowadzi do uzyskania kiszonek gorszej jakości, a sam zabieg aplikacji może okazać się nierentowny. W pracy omówiono wyniki badań wpływu miejsca aplikacji ciekłego benzoesu sodu do zielonki, rzeczywistej długości siewczki, wydajności zbioru siewczkami i wilgotności zbieranej zielonki na wielkość strat ciekłego benzoesu sodu. Stwierdzono, że głównym czynnikiem decydującym o wielkości strat preparatu jest miejsce aplikacji preparatu do zielonki w siewczkarni zbierającej. Znaczenie również mają: długość siewczki i wydajność zbioru zielonki.

Słowa kluczowe: preparaty, kiszonka, technika dodawania preparatów

1. WSTĘP

Przy kiszeniu pasz zielonych zmniejszenie strat składników pokarmowych można osiągnąć m.in. poprzez sterowanie procesem mikrobiologicznym wywołane użyciem różnych preparatów: chemicznych, enzymatycznych, mikrobiologicznych [1, 6, 7, 8, 12, 13].

Według Colzaniego i in. [2], Tarnowa [13] jednym z najważniejszych czynników decydujących o uzyskaniu właściwych efektów zastosowania preparatów jest dodanie ich do zielonki w określonej ilości w zależności od gatunku (gatunków) roślin przeznaczonych do kiszenia.

Zdaniem Pirkelmana [11], Kuzmickiego [10] przy aplikacji preparatów do zielonek w czasie ich zbioru siewczkarniami zbierającymi pewna ich ilość uchodzi do otoczenia.

Z obserwacji wynika, że straty te mogą być znaczne i według szacunkowych danych mogą przekraczać 20 %. Wpływa to na mniejszą od założonej ilość preparatu pozostającego w zielonce, co może być przyczyną uzyskania kiszonek złej jakości, a sam zabieg aplikacji preparatów staje się wówczas nierentowny. W przypadku używania preparatów chemicznych powoduje to zanieczyszczenie środowiska.

Wielkość strat preparatu zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to: miejsce dodawania preparatu do zielonki w siewczkarni zbierającej, długość siewczki, wydajność zbioru (przepustowość), wilgotność zbieranych roślin [3, 4, 5, 9].

Brak szczegółowych wyników badań dotyczących wpływu wymienionych czynników na wielkość strat preparatu dodawanego do zielonki w sieczkarni zbierającej był powodem podjęcia badań.

2. METODYKA BADAŃ

W zaplanowanym eksperymencie wielkościami zmiennymi niezależnymi były: miejsce dodawania preparatu do zielonki w sieczkarni zbierającej (M), rzeczywista długość sieczki (l_r), wydajność zbioru sieczkarni (Q), wilgotność roślin (W). Poziomy i wartości zmiennych niezależnych zestawiono w tabeli 1. Badano kolejno wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na wielkość strat preparatu (S) – (zmienna zależna), ustalając chwilowo wartości pozostałych zmiennych niezależnych jako czynniki stałe (tabela 2). Na podstawie przyjętych założeń sformułowano funkcję celu do weryfikacji:

$$S = f(M, l_r, Q, W) \quad (1)$$

Miejsca dodawania preparatu do zielonki w sieczkarni określono z zależności:

$$z_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (2)$$

gdzie:

z_i – odległość miejsca aplikacji preparatu do zielonki od środka układu współrzędnych prostokątnych (x_i , y_i), przechodzących przez oś nożowego bębna sieczkarni.

Materiałem użytym w badaniach była koniczyna czerwona (*Trifolium pratense*) I. pokosu w fazie początku kwitnienia o średniej długości lodyg 541 mm. Pozostałe wielkości charakteryzujące koniczynę przedstawiono w tabeli 2. Zastosowano benzoosan sodu w stanie ciekłym (temperatura preparatu 20 °C, gęstość 1129 kg/m³, lepkość dynamiczna 8,3526 N·s/m², napięcie powierzchniowe 0,0204 N·s/m). Dodawano go do koniczyny w ilości 0,4 % (w stosunku do masy) przy użyciu dozownika ciśnieniowego, wyposażonego w rozpylacz szczelinowy (ciśnienie 0,05 MPa) – nabudowanego na przyczepianej sieczkarni zbierającej o przepustowości 30 Mg/h (rys. 1). W sieczkarni zbierającej w wyniku oddziaływania na strumień cieczy noży zespołu rozdrabniającego, a następnie mieszaniny rozdrobnionej zielonki i powietrza następuje rozbicie cieczy na krople, które przemieszczając się w mieszaninie, zwilżają zielonkę. Zatem nie ma potrzeby instalowania dysz rozpylających preparat pod większym ciśnieniem (co znacznie obniża koszt urządzenia dozującego). Wskaźnik nierównomierności dozowania preparatu nie przekraczał 2 %. Wielkość strat benzooesanu sodu oceniano metodą spektrofotometryczną (dokładność oznaczania 3 %) na podstawie oznaczenia ilościowego kwasu benzooesowego zawartego w próbkach zielonki pobranych z 5 różnych miejsc przyczepy (według schematu pojedynczej koperty). Wielkość strat benzooesanu sodu określano z zależności:

$$S = \frac{m_b - \bar{x}}{m_b} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

S – straty benzooesanu sodu, %

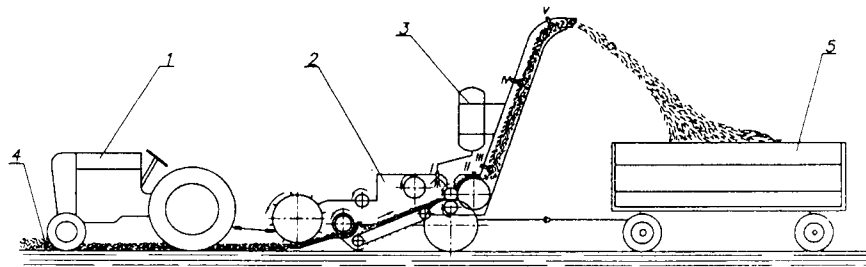
m_b – masa zadana benzooesanu sodu, g/kg zielonki,

\bar{x} – średnia arytmetyczna zawartość benzooesanu sodu w zielonce, g/kg zielonki.

Tabela 1. Poziomy i wartości zmiennych niezależnych

Zmienna niezależna	Wartości zmiennych niezależnych						Liczba poziomów
	Przed zespołem walców ugniatających	W zespole rozdrabniającym	W dolnej części kanału wylotowego	W środkowej części kanału wylotowego	W górnej części kanału wylotowego		
Miejsce dodawania konserwantu do koniczyny w siewczarni $M - z_i$ (mm)	602	340	617	1630	2550		5
Wydajność zbioru koniczyny Q (t/h)	5.93	11.86	17.79	23.72	29.65		5
Rzeczywista długość sieczki l_r (mm)	28.6		48.4	94.4	168		4
Wilgotność koniczyny W (%)	79.9	74.7	69,6	66,2	59.4		5

Na polu przed przystąpieniem do badań wyznaczono odcinki pomiarowe o długości 100 m, na których układano wałki koniczyny tak, aby charakteryzowały się równomiernym rozłożeniem masy na całej ich długości. Agregat (rys. 1) poruszał się ze stałą prędkością 1,65 m/s (5,94 km/godz.) przy poślizgu < 3%. Różne wydajności zbioru koniczyny uzyskano przez zmiany masy koniczyny na 1 m bieżącym wałka. Badania przeprowadzono trzykrotnie. Wyniki pomiarów poddano obliczeniom w arkuszu kalkulacyjnym Quatro-Pro. Obliczono współczynniki korelacji i wyznaczono równania regresji. Oceniono istotności współczynników korelacji.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: ciągnik (1), siewczarka zbierająca (2), dozownik (3), pokos (4), przyczepa (5), I, II, III, IV, V – miejsca zamocowania dyszy wylotowej dozownika, I - przed zespołem walców ugniatających, II – w zespole rozdrabniającego, III, IV, V – w dolnej, środkowej i górnej części kanału wylotowego siewczarki

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

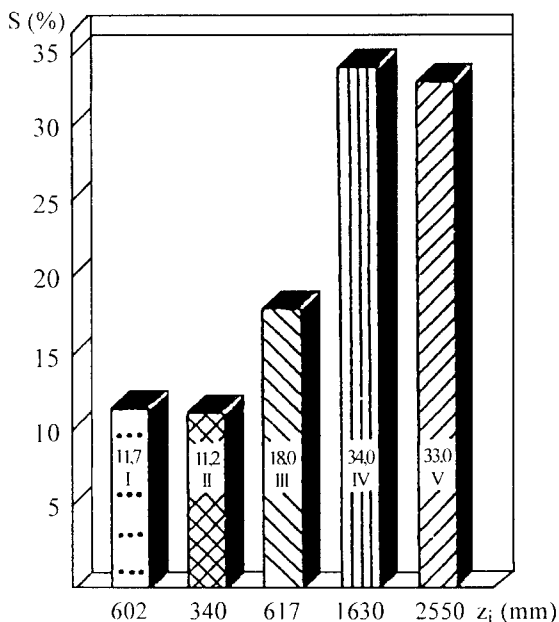
Miejsce dodawania preparatu do zielonki w siewczarki zbierającej

Z przeprowadzonych badań wynika, że największe straty benzoenu sodu wystąpiły w przypadku dodawania go do zielonki w środkowej i górnej części kanału wylotowego siewczarki – odpowiednio 34 % i 33 %. Natomiast dodanie preparatu do zielonki przed zespołem walców ugniatających, do zespołu rozdrabniającego i dolnej części kanału wylotowego spowodowało dużo mniejsze straty: 11,7 %, 11,2 % i 18 % (rys. 2). Obliczenia wykazały, że funkcja $S = f(M)$ jest istotna na poziomie $\alpha = 0.001$ przyjmując następującą postać:

$$S(M) = 0,01992 M + 8,956 \quad (4)$$

Wartość współczynnika korelacji dla równania (4) wynosi $r = 0,949$. Tak znaczne różnice w wielkościach strat preparatu wynikają z faktu, że preparat w postaci cienkiej strugi cieczy dodawany do zielonki w kanale wylotowym siewczarki, podlega intensywnemu zawirowaniu i rozbiciu na krople o różnej średnicy. Proces tworzenia się kropeł z pewnym uproszczeniem zgodny jest z teorią tworzenia się kropeł w rozpylaczach pneumatycznych. W badanym kanale ciecz rozbijana jest na krople w wyniku zderzeń z mieszaniną rozdrobnionej zielonki i powietrza. Część rozbitego w kanale preparatu, szczególnie krople o mniejszej średnicy, zawieszona w strumieniu powietrza uchodzą na zewnątrz, poza przyczepę. Natomiast wprowadzenie preparatu do zielonki przed zespołem walców ugniatających lub do zespołu rozdrabniającego powoduje, że preparat

zanim przedostanie się do kanału wylotowego wcześniej zwilża i miesza się z zielonką (mniejsza prędkość przesuwu zielonki). Potwierdzają się więc przypuszczenia Pirkelmana [11], Kuzmickiego [10], iż miejsce dodawania preparatu do zielonki wpływa na wielkość jęgo strat.



Rys. 2. Histogram rozkładu wielkości strat benzoianu sodu S w zależności od miejsca dodawania go do zielonki w sieczkarni zbierającej z_i

Długość sieczki

Analiza wyników badań wykazała, że w stosunku do ilości zadanej najmniejsze straty benzoianu sodu $S = 12,6\%$ wystąpiły przy najkrótszej sieczce $l_r = 28,6$ mm. Natomiast największe straty w ilości $19,6\%$ uzyskano przy $l_r = 94,4$ mm (rys. 3).

Funkcja $S(l_r)$ – jest istotna statystycznie na poziomie $\alpha = 0,001$, przyjmując następującą postać:

$$S(l_r) = -0,004 l_r^2 + 0,43 l_r + 8,1 \quad (5)$$

Wartość współczynnika korelacji dla równania (5) wynosi $r = 0,866$. Uzyskanie mniejszych strat preparatu przy mniejszych długościach sieczki wynika stąd, że krótsza sieczka daje większą powierzchnię styku materiału roślinnego z preparatem. Wpływ długości sieczki na absorpcję SO_2 stwierdzili Knodt i in. cyt. za Harrisonem [9].

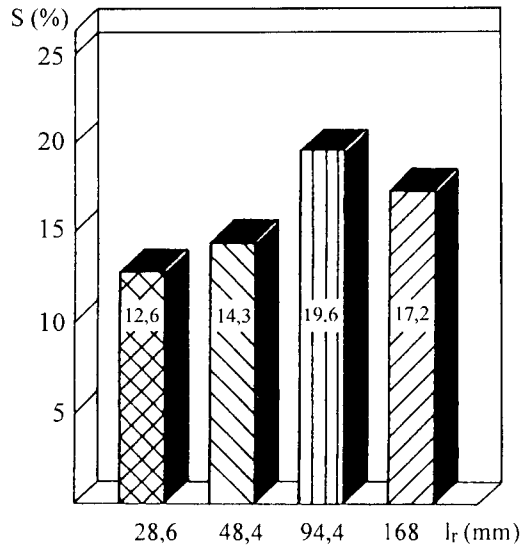
Wydajność zbioru zielonki

Najmniejsze straty preparatu w ilości $S = 17,1\%$ (rys. 4) wystąpiły przy największej wydajności zbioru zielonki zastosowanej w badaniach $Q = 29,65$ t/h, osiągając wartość największą $S = 21,4\%$ przy $Q = 11,86$ t/h. Funkcja $S(Q)$ – jest istotna statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0,001$, przyjmując następującą postać:

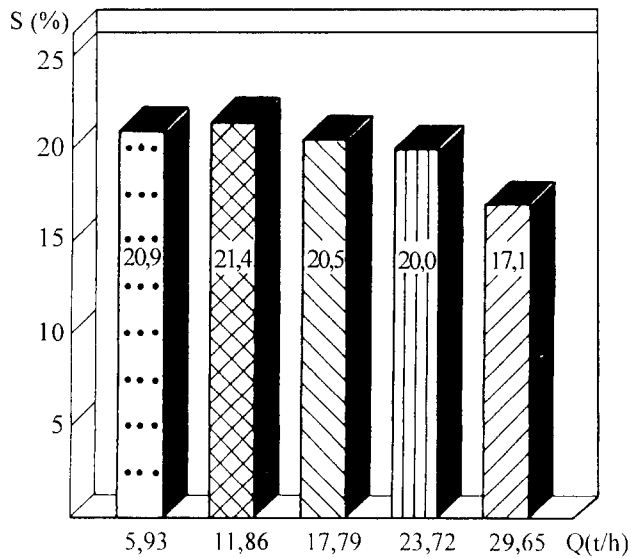
$$S(Q) = -0,1577 Q + 22,78$$

(6)

Wartość współczynnika korelacji dla równania (6) wynosi $r = 0,758$.



Rys. 3. Histogram rozkładu wielkości strat benzoianu sodu S w zależności od długości cieczy l_r

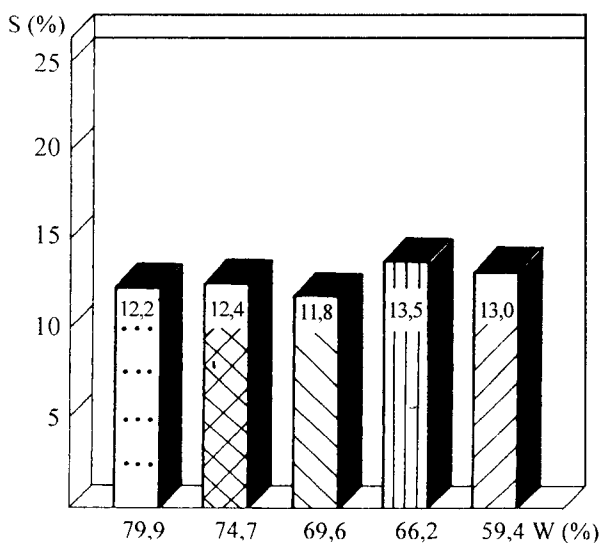


Rys. 4. Histogram rozkładu wielkości strat benzoianu sodu S w zależności od wydajności zbioru koniczyny Q

Mniejsze straty preparatu – przy większych wydajnościach zbioru – wynikają z faktu, iż kanał wylotowy siewkarni jest bardziej wypełniony rozdrobnionym materiałem roślinnym przy większej wydajności zbioru (większe wartości współczynnika koncentracji), co zapewnia lepszy kontakt i wymieszanie rozdrobnionej zielonki z preparatem.

Wilgotność zielonki

Najmniejsze straty benzoesu sodu w ilości $S = 11,8\%$ uzyskano przy wilgotności koniczyny $W = 69,6\%$. W pozostałych przypadkach wielkości strat były zbliżone (rys. 5). Analiza matematyczna wykazała, że funkcja $S(W)$ jest nieistotna statystycznie. Nieistotny statystycznie wpływ wilgotności na absorpcję SO_2 stwierdził również Harrison [9].



Rys. 5. Histogram rozkładu wielkości strat benzoesu sodu S w zależności od wilgotności koniczyny W

4. PODSUMOWANIE

Głównym czynnikiem decydującym o wielkości strat preparatu było miejsce zainstalowania dyszy doprowadzającej preparat. W badanych pięciu kombinacjach wielkość strat wahała się od $11,2\%$ przy dyszy zainstalowanej w zespole rozdrabniającym, aż do 34% w przypadku umieszczenia jej w środkowej części kanału wylotowego.

Długość siewki wywierała istotny wpływ na wielkość strat preparatu, przy czym najmniejsze jego straty uzyskano przy najkrótszej siewce (tzn. wielkość strat malała wraz ze zmniejszaniem się długości siewki).

Wydajność zbioru siewkarni (przepustowość) była czynnikiem wpływającym również na wielkość strat preparatu. W badanym zakresie wzrost wydajności zbioru zmniejszał straty preparatu.

W badanych warunkach wilgotność zbieranej rośliny nie miała istotnego wpływu na wielkość strat ciekłego benzoesu sodu.

LITERATURA

- [1] Bolsen K.K.: The basic principles of silage - with emphasis on fermentation and additives. Proceedings of the 6 th International Symposium Forage Conservations, Pohorelice, Czech Republic 1993, s. 51-58.
- [2] Colzani G., Santorio G., Martillotti F., Verna M.: Studia e prove sperimentali su vari sistemi per distribuzione di integrativi e conservativi nei tricianti. Istituto Sperimentale per la Meccanizzazione. Agricola, Roma 1978, s. 221-268.
- [3] Dulcet E.: Wo Sielierzusätze Zugeben? Zur Plazierung der Düsen im Feldhäcksler. Landtechnik 5, 1992, s. 222.
- [4] Dulcet E.: Influence of the method of adding the preservative to the green forage on the uniformity of mixing and losses. XII CIGR World Congress and Ag Eng. 94 Conference on Agricultural Engineering, Milano 1994, s. 804-805.
- [5] Dulcet E.: The influence of green fodders fineness degree of quantity of preservative losses. Annual Review of Agricultural Engineering 1(1). Polish Academy of Sciences: Warsaw 1996, s. 167-171.
- [6] Dulcet E.: Wie flüssige Präparate im Aufsammlhäcksler zudosieren? Landtechnik 4, 1998, s. 272.
- [7] Dulcet E., Chalamoński M., Woropay M.: Quality assessment for the mixing process of vegetable matter additives during harvesting for silage with gathering cutter. Ag. Eng. 98. International Conference On Agricultural Engineering. Oslo 1998, s. 385-386.
- [8] Haigh P.M.: Effect of Additives on Grass Silage Fermentation and Effluent Production and on Intake and liveweight Change of Young Cattle. Journal of Agricultural Engineering Research 69, 1998, s. 141-148.
- [9] Harrison H.P.: Treatment of Forage with Sulphur Dioxide in a Forage Harvester. Transactions of the ASAE 28 (3), 1985, s. 356-359.
- [10] Kuzmickij A.W.: The process of green fodders anasilaging with addition of chemical preservatives. Sbornik Naucznych Trudow 131, Mińsk 1985, s. 9-12.
- [11] Pirkelmann H.: Flüssige Sillermittel gleich mässig verteilen. Verbesserung der Garbedingungen. DLG - Mitteilungen 11, 1976, s. 628-630.
- [12] Pitt R.E.: Modeling the effects of propionic acid bacteria in silage. Transaction of the ASAE 40 (2), 1997, s. 405-411.
- [13] Tarnow M.T.: Chemiczeskoje Konserwirownije Kormow. Kolos, Moskwa 1964.
- [14] Rotz C.A., Sprott D.J. Davis R.J., Thomas I.W. : Anhydrous Ammonia Injection into Baled Forage. Transactions of the ASAE 2 (2), 1986, s. 64-69.
- [15] Wartenberg G.: Genaue dosieren - Dosierfehler bei der Varteilung Flüssiger Sillermittel. Landtechnik 6, 1991, s. 271-272.

INVESTIGATION ON LIQUID ADDITIVES LOSS WHEN APPLYING TO GREEN FORAGE IN A FORAGE HARVESTER

Summary

When applying additives (chemical, enzymatic, microbiological) to green forage during harvesting with a forage harvester, some part of them escapes into the environment. From the observation, it is evident that the loss can be considerable, which leads to a worse quality of silage, and then, to an unprofitable application procedure. Findings of the research into the effect of the place of applying liquid sodium benzoate to green forage, the length of chaff, and the moisture content in the harvested crop on the value of liquid sodium benzoate loss has been discussed in the paper. It was found that the main factor affecting the sodium benzoate loss is the place of its application to green forage in the forage harvester. The length of chaff and the feed rate of the forage harvester also affect the amount of additive loss.

Key words: additives, silage, additive application method

AGREGATY ROLNICZE W RÓŻNYCH SYSTEMACH UPRAWY ROLI. CZ. I. AGREGATY W UPRAWIE TRADYCYJNEJ

Eugeniusz Jarmocik

Katedra Maszyn Rolniczych
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Praca zawiera przegląd agregatów do uprawy: podstawowej, późniejszej, przedwiosennej oraz wszechstronnej uprawy roli z analizą ich cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Wskazano na efektywne sposoby zmniejszenia zużycia energii w tradycyjnej uprawie roli przy poprawnym jej wykonaniu.

Słowa kluczowe: agregaty, budowa, eksploatacja, energochłonność.

1. WSTĘP

Tradycyjna uprawa roli, najstarszy system uprawy, jest wykonywana przy pomocy pługa i narzędzi doprawiających. Charakteryzuje ją duża liczba wykonywanych zabiegów uprawowych, wykonywanych najczęściej oddzielnymi (specjalistycznymi) narzędziami.

W świetle aktualnej wiedzy o uprawie roli, można i należy zrezygnować z niektórych narzędzi uprawowych celem zmniejszenia energochłonności uprawy bez obawy obniżki plonu.

Podobne efekty uprawowe można również uzyskać poprzez doskonalenie maszyn i sposobów uprawy roli.

Główne kierunki w konstrukcji maszyn i narzędzi uprawowych to:

- budowa agregatów uprawowych (zestawów wieloczynnościowych),
- dostosowanie agregatów i pojedynczych narzędzi lub maszyn do różnorodnych warunków glebowych,
- obniżenie oporów roboczych głównych zespołów maszyn (narzędzi).

Działania te zmierzają do budowy maszyn, które umożliwiają zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa, wzrost wydajności pracy i wykonanie uprawy zgodnej z wymaganiami agrotechnicznymi, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów uprawy.

Celem pracy jest próba oceny przydatności agregatów do wykonania poszczególnych upraw w tradycyjnym systemie uprawy roli w aspekcie zmniejszenia energochłonności oraz poprawności wykonanych zabiegów.

2. ZAKRES PRACY I METODA OPRACOWANIA

Zakres pracy obejmuje próbę oceny następujących wskaźników:

- cech konstrukcyjno-funkcjonalnych agregatów do uprawy roli,
- poprawności wykonania uprawy roli,
- energochłonności agregatów,
- wpływu głęboszowania na wielkość plonu.

Cechy konstrukcyjno-funkcjonalne agregatów do uprawy roli opisano na podstawie ich przeglądu i analizy oraz porównania określonych danych.

Ocenę poprawności (jakości) wykonania pracy dokonano przez porównanie efektów uprawy rozpatrywanego narzędzia (maszyny) z wymaganiami agrotechnicznymi określonymi w celach i zadaniach uprawy [5], według których właściwie wykonana uprawa powinna:

- warunkować osiągnięcie optymalnego zagęszczenia poszczególnych warstw gleby z płynnym przejściem warstwy ornej w podglebie i wyrównać powierzchnię pola,
- poprawić strukturę gleby i jej trwałość oraz zwiększyć biologiczną aktywność gleby,
- sprzyjać nagromadzeniu wody w glebie i ograniczać jej bezproduktywne straty,
- ograniczać konkurencję dla uprawianej rośliny w przypadku chwastów i samosiewów rośliny przedplonowej,
- umożliwiać odpowiednie wymieszanie z glebą resztek poźniwnych rośliny przedplonowej oraz nawozów organicznych i mineralnych, a w szczególności wapniowych,
- stwarzać warunki do uzyskania szybkich i wyrównanych wschodów wysiewanej rośliny,
- ograniczać nasilenie erozji wodnej i wietrznej.

Energochłonność agregatów oraz wpływ głęboszowania na wielkość plonu oceniono na podstawie analizy wyników badań.

3. PRZEGLĄD I ANALIZA AGREGATÓW DO UPRAWY ROLI

Z uwagi na bardzo dużą podaż agregatów do uprawy roli, przegląd ograniczono do agregatów wyróżniających się oryginalnością konstrukcji, jakością pracy i szerokim zakresem wykonywanych prac.

W tradycyjnym systemie uprawy są zakładane i częściowo realizowane dwa cele: duża wydajność pracy i duży plon. Efektem tym towarzyszy duże zużycie energii (tab. 2) oraz tylko częściowe spełnienie celów i zadań uprawowych [5]. Orka stwarza dużą podatność gleby na erozję wodną i wietrzną, nie warunkuje osiągnięcia optymalnego zagęszczenia poszczególnych warstw gleby oraz jej biologicznej aktywności.

3.1. Agregaty do uprawy podstawowej

Uprawa podstawowa (orka) jest wykonywana przy pomocy pługów, których funkcjonalność i konstrukcja są mocno zróżnicowane. W przypadku konieczności przyspieszenia osiadania roli do uprawy podstawowej są stosowane następujące agregaty:

- pług z wałem ugniatającym wgłębnie,
- pług z broną obrotową kółczatką.

Celem podniesienia wydajności pracy tych agregatów w ich składzie są stosowane pługi obracalne wielokorpusowe (5-7 korpusów) bądź pługi wahadłowe. Ponadto pługi te lepiej niż zagonowe spełniają zadania uprawowe, gdyż pozostawiają wyrównane pole bez grzbietów i bruzd.

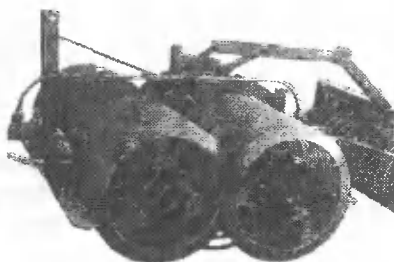
Do ugniatania wglębnej gleby, oprócz wałów Campbella, stosowane są wały Variopack (rys. 1), które występują w kilku wersjach (rys. 2):

- jednorzędowe lub dwurzędowe,
- z pierścieniami o średnicy 700 lub 900 mm,
- o profilu pierścieni pod kątem 30 lub 45°.

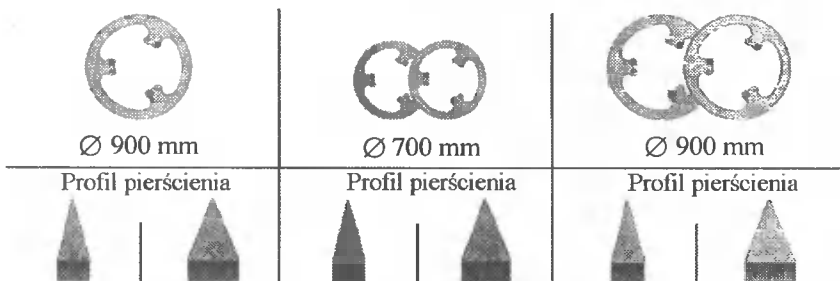
a)



b)



Rys. 1. Variopack – wał ugniatający wglębnie w zestawie z wałem Croskill: a) jednorzędowy, b) dwurzędowy



Rys. 2. Wersje wału uprawowego Variopack

Zróżnicowana budowa tych wałów pozwala na ich efektywne stosowanie na gleby o dowolnym stopniu zwięzłości (lekkie, średnie i ciężkie). Funkcjonalność wałów Variopack polega też na możliwości dostosowania ich szerokości roboczej do szerokości pługa (poprzez odłączanie lub dołączanie pierścieni). Kolejną zaletą jest samooczyszczanie się pierścieni.

3.2. Agregaty do uprawy późniejszej

Do uprawy późniejszej jest stosowany następujący zestaw narzędzi:

- pług podorywkowy,

- brona talerzowa,
- kultywator ścierniskowy.

Pracę pługa podorywkowego i brony talerzowej charakteryzuje wolne tempo rozkładu resztek poźniwnych (tab. 1). Podorywka wykonana pługiem jest zabiegiem pracochłonnym. Poprawnie wykonana uprawa poźniwna pługiem podorywkowym i broną talerzową spełnia następujące zadania:

- powoduje wymieszanie resztek poźniwnych z glebą, co przyspiesza ich początkowy rozkład,
- pobudza do szybkiego kiełkowania nasiona chwastów i osypanych nasion rośliny przedplonowej,
- początkuje zwalczanie perzu i innych chwastów wieloletnich,
- ogranicza nasilenie występowania niektórych chorób i szkodników.

Tabela 1. Tempo rozkładu słomy przyoranej (%) zależnie od sposobu uprawy poźniwniej [1]

Zastosowane narzędzia	1985 r.	1986 r.	1987 r.	Średnio
	po 70 dniach	po 77 dniach	po 57 dniach	
Pług	18	24	21	21
Brona talerzowa	32	24	27	29
Kultywator ścierniskowy	44	38	29	37

Kultywator ścierniskowy jest nowoczesnym narzędziem do uprawy poźniwniej.

W skład jego wchodzi sztywne zęby zakończone gęsiostopką, wał strunowy i sekcja brony talerzowej. Pracę kultywatora ścierniskowego w porównaniu z pługiem podorywkowym charakteryzują następujące zalety [5]:

- lepsze wymieszanie z glebą ścierniska i słomy, co zmniejsza nasilenie erozji, poprawia wsiąkalność wody opadowej itp.,
- mniejsze zużycie paliwa o 30-50 %,
- większa wydajność pracy o przynajmniej 50 % (kultywatory ścierniskowe najlepiej pracują przy prędkości roboczej 8-12 km/h),
- mniejszy koszt narzędzia,
- przygotowanie pola do wysiewu poplonów w jednym przejściu roboczym.

3.3. Agregaty do przedsięwzięcia poprawiania roli

Do przedsięwzięcia poprawiania roli stosowane są agregaty: bierne, czynne i mieszane.

Agregaty bierne

Elementami roboczymi agregatów biernych są: belki wyrównujące (listwy, szyny), zęby bron sprężystych, zęby kultywatorów i wały. Oprócz wałów strunowych, które są stosowane najczęściej, w agregatach występują wały pierścieniowe ugniatające wgłębnie, wały kruszące i wały ugniatające powierzchniowo.

Zasadniczym narzędziem agregatu jest brona (kultywator) umieszczona między dwoma wałami strunowymi: przednim i tylnym bądź między belką wyrównującą z przodu a wałem umieszczonym z tyłu. Zapewnia to jednakową głębokość poprawiania roli.

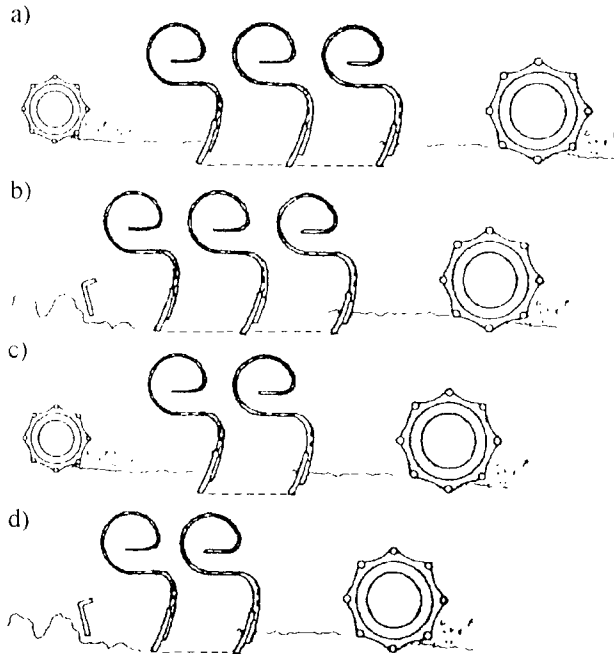
Zęby bron (kultywatorów) mogą być sztywne bądź sprężyste. Najbardziej wymagania uprawowe spełniają zęby sztywne, zakończone szerokimi gęsiostopkami (jednakowa

głębokość spulchniania). Jednakże większość firm stosuje w agregatach biernych zęby sprężyste zakończone dwustronną redliczką, ze zmiennym kątem wzniosu.

W rozwiązaniach tradycyjnych wartość kąta wzniosu redliczki wynosi około 20° , a w nowoczesnych konstrukcjach zębów wartość tego kąta waha się od 75° do 90° . Taka konstrukcja zębów zapobiega wydobywaniu na powierzchnię pola wilgotnej gleby, co występuje przy małym kącie wzniosu redliczki. Druga wada zębów sprężystych – nierówność głębokości pracy – jest zminimalizowana poprzez zagęszczenie liczby zębów sprężystych (odstęp pomiędzy śladami zębów wynosi 50-60 mm).

Prędkość robocza agregatów biernych jest wysoka (10-12 km/h), co zapewnia dużą wydajność pracy, a przy tym najlepszą jakość uprawy.

Przykłady najczęściej spotykanych w kraju agregatów biernych do przedsięwziętej uprawy roli ilustrują rysunki 3 (agregat uprawowy U 781 produkcji Pomimex Mogilno) i rysunek 4 (agregat uprawowy AU produkcji Unia Grudziądz). Głębokość robocza tych agregatów w zestawie z broną zębatą może dochodzić do 8 cm, a z kultywatorem do 13 cm. Średnie zapotrzebowanie mocy tych agregatów wynosi 15-20 kW/m szerokości roboczej.



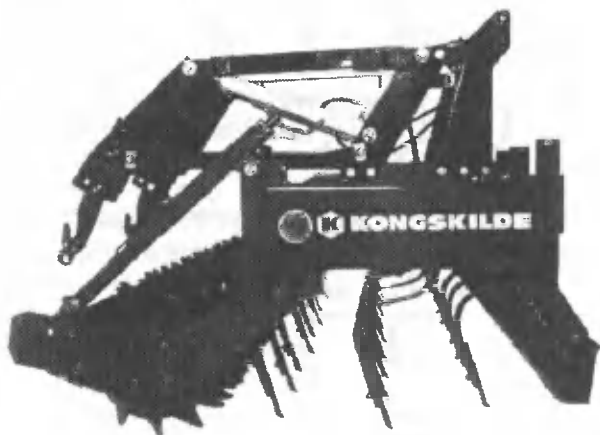
Rys. 3. Schemat agregatów uprawowych zbudowanych z tradycyjnych narzędzi doprawiających: a, b, c, d – kombinacje ustawienia narzędzi w agregacie



Rys. 4. Agregat uprawowy bierny z wymiennymi zębami brony sprężynowej

Innym rodzajem agregatu biernego do przedsięwzięcia doprawiania roli jest brona zespolona typu KHa (rys. 5). W skład tej brony wchodzi:

- belka wyrównująca z regulowanymi parametrami pracy: kątem ustawienia i głębokości pracy,
- zęby sprężyste „SQ” umieszczone w trzech rzędach,
- wał zębaty lub strunowy (do wyboru),
- sprzęg do siewnika.

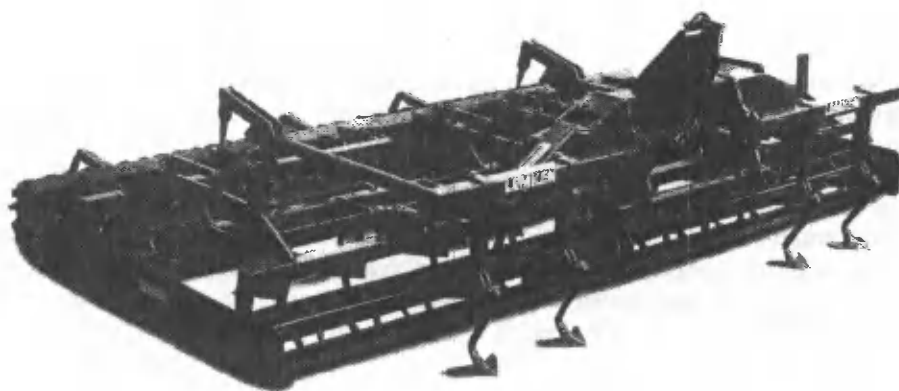


Rys. 5. Brona zespolona KHa

Zęby typu „SQ” charakteryzuje duża wartość kąta natarcia (około 75°). W związku z tym zęby te dobrze kruszą glebę przy małych prędkościach roboczych, nie wyciągają resztek roślinnych i wilgotnej gleby na powierzchnię. Cechuje je ponadto duża odporność na ścieranie i odkształcenia. Zapotrzebowanie mocy agregatu KHa jest zbliżone do agregatów uprawowych U 781 i AU, przy nieco mniejszej masie (o około 10 %).

Agregat uprawowy o nazwie Kompaktor (rys. 6) jest najbardziej złożonym zestawem spośród agregatów biernych do przedsięwzięcia doprawiania roli. W skład jego wchodzi:

- wał strunowy przedni z nastawną belką wyrównującą,
- dwa rzędy sztywnych zębów zakończonych gęsiostojkami,
- wał strunowy tylny z nastawną belką wyrównującą,
- wał Croskill.



Rys. 6. Kompaktor – bierny agregat do przedsiewnej uprawy roli

Sztywne zęby, zaopatrzone w gęsiostopki, zapewniają spulchnienie gleby na jednakowej głębokości. Pozostałe narzędzia powodują wyrównanie i zagęszczenie gleby oraz uzyskanie struktury gruzełkowej.

Kompaktor można wyposażyć – na gleby ciężkie i wilgotne – w zęby sprężynowe przeznaczone do pracy:

- na głębokość roboczą 12 cm przy rozstawie 11 cm,
- na głębokość roboczą 2-8 cm przy rozstawie 5 cm.

Zęby te ustawione są względem powierzchni pola pod kątem zbliżonym do kąta prostego.

Do pracy na glebach zakamienionych stosowane są zęby sztywne wyposażone w bezpieczniki sprężynowe.

Kompaktory przeznaczone są do współpracy z ciągnikami ciężkimi. Zapotrzebowanie mocy wynosi około 25 kW/m szerokości roboczej, która waha się od 3 do 6 m, przy masie od 1,5 do 3,5 tony.

Kombinator, agregat uprawowy firmy Kverneland posiada, podobnie jak Kompaktor, dużą liczbę narzędzi roboczych:

- belkę wyrównującą,
- cztery rzędy zębów sprężystych,
- wał strunowy gładki,
- dwa rzędy wałów strunowych zębatych.

Masa Kombinatorów jest nieco mniejsza od masy Kompaktorów przy tej samej szerokości roboczej (3-6 m) i wynosi od 1,0 do 2,3 t. Mniejsze zapotrzebowanie mocy – 16 kW/m szerokości roboczej wynika także z małej głębokości roboczej wynoszącej do 8 cm.

W agregatach uprawowych firmy Kverneland oraz Lemken stosowane są wały czołowe ogumione, służące do zagęszczania wierzchniej warstwy gleby.

Agregaty czynne i mieszane do przedsiewnej uprawy roli

Agregaty te mieszczą się w grupie nadrzędnej – agregaty do wszechstronnej uprawy roli (p. 3.4).

3.4. Agregaty do wszechstronnej uprawy roli

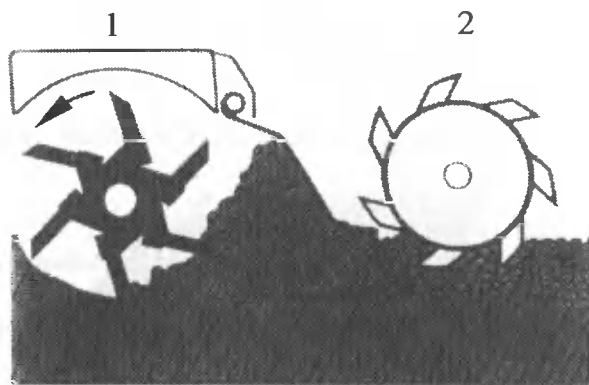
Wśród agregatów przeznaczonych do wszechstronnej uprawy roli na szczególną uwagę zasługują:

- uniwersalny agregat uprawowy Rototiller,
- agregat uprawowy Rau Cyclotiller,
- agregat uprawowy Centurion,
- brona rotacyjna Zirkon.

Uniwersalny agregat uprawowy Rototiller składa się z podstawowego zespołu i z dodatkowych zespołów roboczych dołączanych w zależności od przeznaczenia.

Podstawowy zespół roboczy (rys. 7) stanowią:

- wirnik z zębami klinowymi,
- wał zębaty samooczyszczający się.



Rys. 7. Schemat podstawowego zespołu roboczego agregatu Rototiller: 1 – wirnik z zębami klinowymi (rotor), 2 – wał zębaty

Styczne ustawienie zębów wirnika i wału umożliwiło optymalizację wartości ich kąta natarcia, przy których zęby łatwo zagłębiają się w glebę nawet w trudnych warunkach. Styczne ustawienie zębów w agregacie Rototiller jest jego cechą charakterystyczną.

O uniwersalności agregatu uprawowego Rototiller stanowią jego dodatkowe zespoły robocze:

- zespół spulchniający, wyposażony w sztywne zęby zakończone gęsiostopkami o szerokości roboczej 20 cm lub 40 cm,
- wymienne zęby rozdrabniająco-mieszające mocowane w miejsce zębów seryjnych rotora, przeznaczone do przyorania słomy kukurydzy i słonecznika,
- teleskopowy układ zabezpieczający rotor przed uszkodzeniem na glebach zakamienionych,
- tarcze niwelujące powierzchnię roli po pracy pługa z regulacją położenia w płaszczyźnie pionowej i poziomej.

Przedstawione wyżej dodatkowe wyposażenie agregatu pozwala na wykonanie szerokiego zakresu prac, takich jak:

- bezpłuzna uprawa roli,
- przygotowanie roli pod siew,

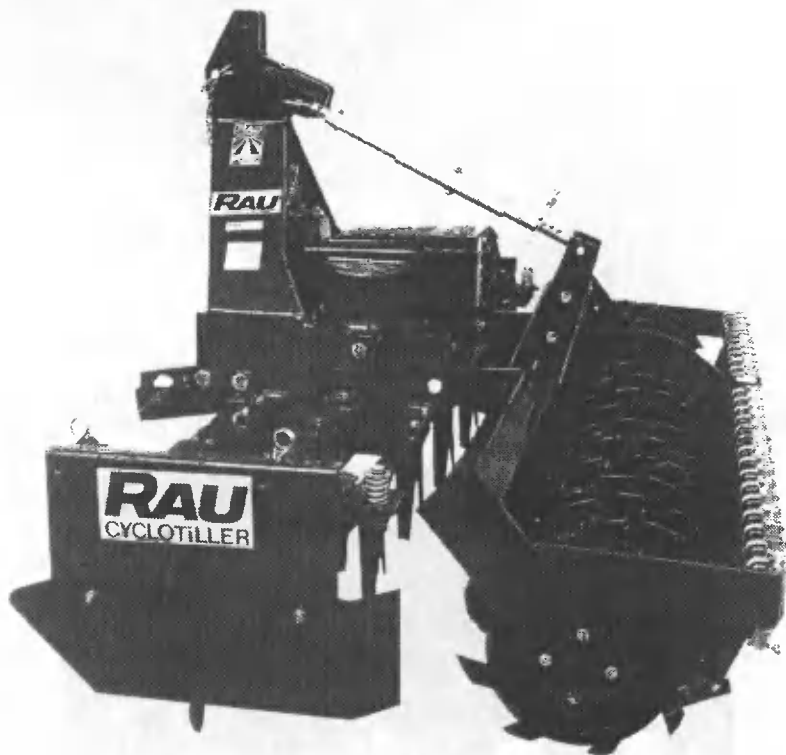
- podorywka ściernisk,
- podorywka roślin wysokich (słonecznik, kukurydza),
- uprawa gleb zakamienionych.

Zapotrzebowanie mocy agregatu Rototiller wynosi średnio 30 kW/m szerokości roboczej.

Praca wału zębatego pozwala na uzyskanie struktury gruzelkowej gleby. Z tego właśnie powodu wał zębata zastosowany po raz pierwszy w agregacie Rototiller został powielony w agregatach uprawowych wielu firm, zarówno krajowych jak i zagranicznych.

Agregat uprawowy Rau Cyclotiller (rys. 8) zbudowany jest z brony wirnikowej (maszyna podstawowa) i następujących wymiennych wałów uprawowych do wyboru:

- wał zębata (jak w Rototillerze),
- wał strunowy,
- wał ugniatający wgłębnie.

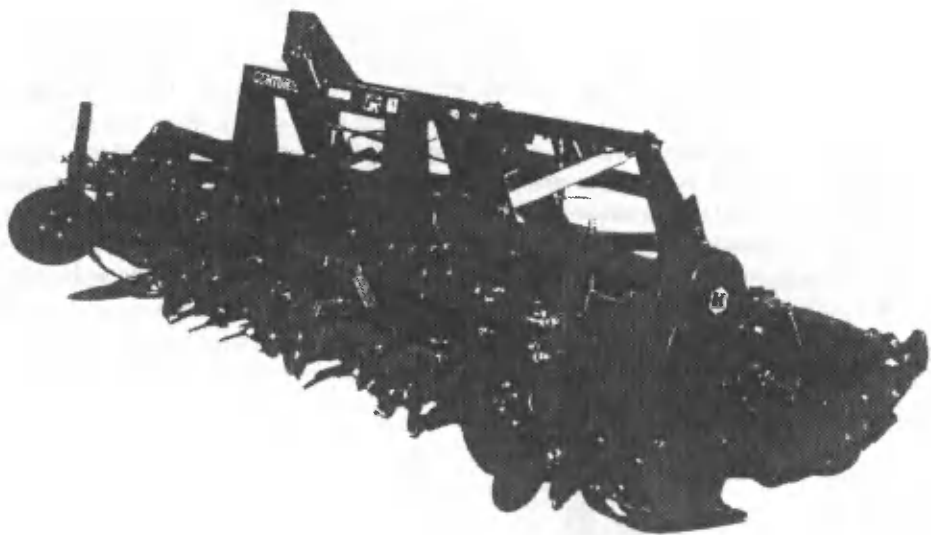


Rys. 8. Agregat uprawowy Rau Cyclotiller

Zapotrzebowanie mocy agregatu waha się od 30 do 40 kW/m szerokości roboczej agregatu (zależnie od rodzaju zastosowanego wału).

Agregat uprawowy Centurion (rys. 9) składa się z brony obrotowej ZR-300 o poziomej osi obrotu i wałów wymiennych, którymi są:

- wał strunowy,
- wały zębata ugniatające o średnicach 475 i 520 mm,
- wał typu Flexi-coil (wał z rolkami rozdrabniającymi).

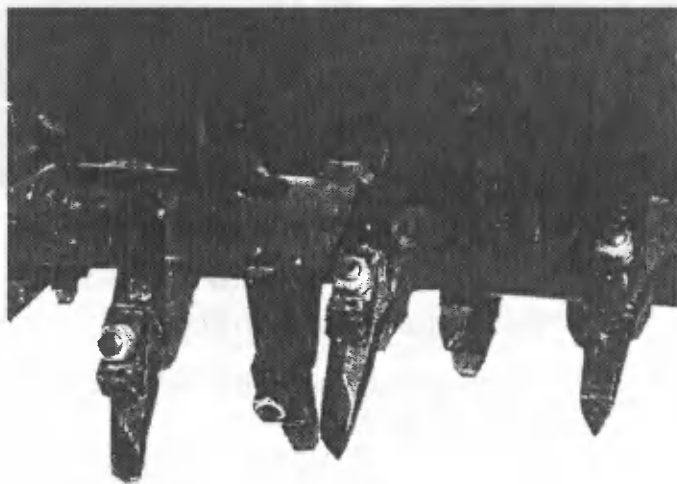


Rys. 9. Agregat uprawowy Centurion

Dodatkowe wyposażenie agregatu uprawowego Centurion stanowią:

- zespolony zestaw sztywnych zębów spalniających,
- zęby spalniające ślady kół ciągnika,
- skrobaki oczyszczające wał nożowy.

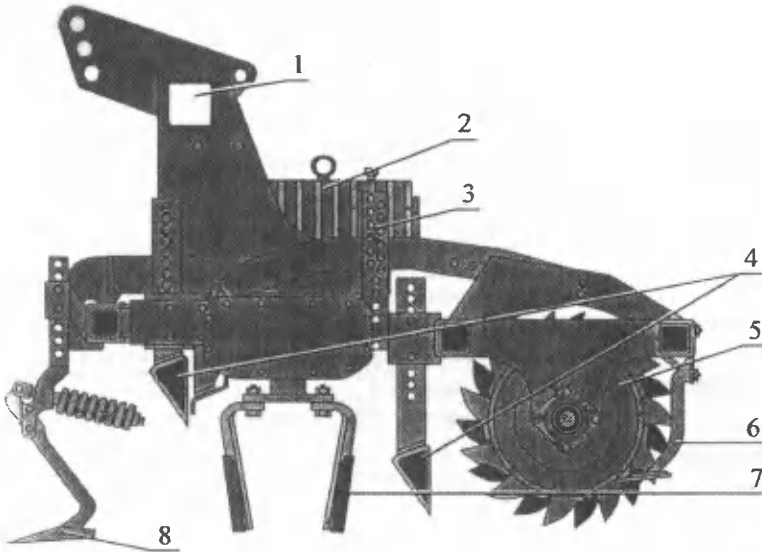
Bronę agregatu Centurion wyróżnia, spośród innych bron agregatów uprawowych, możliwość odwracania zębów (rys. 10), co pozwala na podwojenie okresu ich eksploatacji. Zapotrzebowanie mocy wynosi około 23 kW/m szerokości roboczej agregatu.



Rys. 10. Wał z zębami odwracalnymi agregatu uprawowego Centurion

Brona rotacyjna Zirkon (rys. 11) posiada następujące narzędzia (elementy) robocze:

- listwy wyrównujące o regulowanej głębokości pracy umieszczone przed i za wirnikiem nożowym,
- wirnik nożowy,
- wał ugniatający zębaty,
- zęby spalniające ślady kół ciągnika.



Rys. 11. Brona rotacyjna Zirkon: 1 – skrzynka narzędziowa, 2 – skrzynia przekładniowa, 3 – listwa nastawna, 4 – włóki, 5 – wał ugniatający o stycznym ustawieniu zębów, 6 – zgarniacze zanieczyszczeń, 7 – noże obrotowe, 8 – spalniacz

Narzędzia robocze, poza wirnikami nożowymi, mają regulowaną głębokość pracy. Wał ugniatający jest zaopatrzony w zgarniacz zanieczyszczeń.

Do dodatkowego wyposażenia brony Zirkon należą wały: zębate o średnicach 420 i 500 mm, spiralne oraz strunowe.

Wybrane dane techniczne: zapotrzebowanie mocy wynosi ok. 30 kW/m szerokości roboczej, która waha się od 2,5 do 6,0 m, przy masie od 670 do 2350 kg.

4. EFEKTYWNE SPOSOBY ZMNIEJSZANIA ZUŻYCIA ENERGII W TRADYCYJNEJ UPRAWIE ROLI

4.1. Nakłady energetyczne na uprawę roli

Nakłady energetyczne na orkę i inne zbiegi uprawowe przedstawiono w tabelach 2 i 3.

W tradycyjnym systemie uprawy roli możliwości zaoszczędzenia energii są już w znacznej mierze wyczerpane i jednocześnie ograniczone. Tradycyjna uprawa roli, jako najstarszy system uprawy roli, podlegała intensywnym i wieloletnim badaniom,

w wyniku których na miarę aktualnej wiedzy została zoptymalizowana. Natomiast ograniczenie możliwości znaczącego zaoszczędzenia energii wynika z faktu, że orka jest zabiegiem energochłonnym. Najnowsze usprawnienia konstrukcyjno-materiałowe pozwalają na zaoszczędzenie kilkunastu procent energii [6], podczas gdy nakłady energetyczne na orkę stanowią 200-300 % nakładów na kultywatorowanie, czy też talerzowanie (tab. 2 i tab. 3).

Tabela 2. Nakłady energetyczne na orkę [3]

Rodzaj gleby	% części spławalnych	Zużycie paliwa l/ha			Zużycie energii MJ/ha		
		Rodzaj orki					
		płytko < 15 cm	średnia 16-25 cm	głęboka > 25 cm	płytko < 15 cm	średnia 16-25 cm	głęboka > 25 cm
Bardzo lekkie	< 10	7,7	13,3	15,2	285	488	558
Lekkie	11-20	7,5	14,0	15,0	279	513	552
Średnie	21-35	10,8	14,3	18,1	395	626	665
Ciężkie	> 35	14,8	22,0	25,7	543	807	835

Tabela 3. Energochłonność różnych zabiegów uprawowych [2]

Zabieg uprawowy	Wydajność ha/rbh	Zużycie paliwa l/ha	Energochłonność MJ/ha
Talerzowanie	0,9	6,7	318
Kultywatorowanie	0,8	6,0	285
Bronowanie	0,5	3,7	175
Wałowanie	0,5	2,8	138
Siew	0,8	2,9	157
Agregaty do przedsięwzięcia doprawiania roli	0,5-0,6	4,8-6,0	200-258
Głęboszowanie (na głębokość 40 cm w rozstawie 40 cm)	0,4-0,5	33-42	1420-1680
Głęboszowanie (na głębokość 60 cm w rozstawie 60 cm)	0,3-0,4	48-53	2040-2220

Kolejną, poważną przyczyną ograniczenia możliwości zaoszczędzenia energii jest stosunkowo duża liczba wykonywanych zabiegów uprawowych. Również duży koszt nowoczesnych pługów zachęca do stosowania tańszych narzędzi alternatywnych.

Wyniki zawarte w tabelach 2 i 3 oraz duży koszt pługa stanowią podstawę do stosowania uproszczeń i modyfikacji w tradycyjnym systemie uprawy roli, do których należą:

- spłylenie głębokości orki,
- zastępowanie orki innymi zabiegami uprawowymi,
- wykonywanie uprawy przy optymalnej wilgotności gleby,
- ograniczenie głęboszowania,
- agregatowanie narzędzi uprawowych.

Są to jednocześnie najpoważniejsze sposoby zmniejszenia nakładów energetycznych w uprawie tradycyjnej.

4.2. Spłylenie głębokości orki

Na glebach utrzymanych w wysokiej kulturze można spłylić orkę, stosując przemianą głębokość orki w zmianowaniu.

Tabela 4 zawiera wyniki badań niemieckich – potwierdzonych również w Polsce, z których wynika, że spłylenie orki o 5 cm w wybranych ogniwach zmianowania powoduje korzystne zmniejszenie zużycia paliwa bez ryzyka spadku plonu [5].

Tablica 4. Optymalna głębokość uprawy roli w różnych ogniwach zmianowania [5]

Przedplon	Roślina następcza	Głębokość w cm
Okopowe	zboża	15-20
Zboża	zboża	20-25
Okopowe	okopowe	20-25
Zboża	okopowe	25-30
Motylkowe	okopowe	25-30

Zysk energetyczny ze stosowania przemiennej głębokości orki w zmianowaniu może być oszacowany jak niżej.

Według IUNG Puławy spłylenie orki o 1 cm powoduje zmniejszenie zużycia paliwa o 0,5-1,0 l/ha (zależnie od zwięzłości i wilgotności gleby), zatem oszczędność paliwa przy spłyleniu orki o 5 cm wynosi: $5 \text{ cm} \times 1 \text{ l/ha} = 5 \text{ l/ha}$.

Obliczenia i spostrzeżenia wynikające z tabeli 4 pozwalają na następujące wnioski:

- zysk energetyczny ze spłylenia orki o 5 cm wynosi 10-20 % oszczędności w zużyciu paliwa (zależnie od warunków pracy),
- spłylenie orki bez ryzyka spadku plonu, jako sposób zmniejszenia zużycia paliwa, jest ograniczone do ściśle określonych ogniw zmianowania i ma charakter przemienny.

4.3. Zastępowanie orki innymi zabiegami uprawowymi

Zastępowanie orki, podobnie jak jej spłylenie, może być stosowane tylko na glebach kulturalnych i w wybranych ogniwach zmianowania, np. okopowe-zboża lub strączkowe-zboża. Wówczas pług jest zastąpiony kultywatorem o sztywnych zębach lub agregatem czynnym do przedsięwnej uprawy roli. Z dostępnych danych wynika, że zastąpienie orki kultywatorowaniem w podanych ogniwach zmianowania zmniejsza zużycie paliwa o około 40 % [5].

4.4. Wykonywanie uprawy przy optymalnej wilgotności gleby

Według szacunków IUNG przy uprawie gleb ciężkich orka gleby zbyt wilgotnej lub suchej zwiększa zużycie paliwa o 30-60 %, niż w warunkach optymalnych [5].

4.5. Ograniczenie głęboszowania

Wyniki badań plonowania roślin zależnego od głębokości uprawy na glebach, ciężkich, średnich i lekkich przedstawia tabela 5.

Tabela 5. Wpływ głęboszowania na plonowanie roślin (suma plonów w jednostkach zbożowych w cyklu zmianowania)* [5]

Sposób uprawy	Czarna ziemia (gleba ciężka)	Czarnoziem (gleba średnia)	Gleba płowa (gleba lekka)
Typowy	262	330	281
Z głęboszowaniem do 40-45 cm	284	336	291
Z głęboszowaniem do 60-65 cm	273	331	289

* zmianowanie: burak cukrowy – jęczmień jary – rzepak ozimy – pszenica ozima

Wyniki badań zawarte w tabelach 5 i 3 (w zakresie głęboszowania) pozwalają na ustalenie następujących zależności:

- największy przyrost plonów uzyskano na glebie ciężkiej,
- na glebach: lekkiej i średniej przyrost plonów nie był znaczący,
- przyrost plonów przy głęboszowaniu głębokim (60-65 cm) jest mniejszy niż przy głęboszowaniu umiarkowanym (40-45 cm),
- głęboszowanie głębokie charakteryzuje gwałtowny przyrost zużycia paliwa – wzrost o około 40 % w stosunku do głęboszowania umiarkowanego (tab. 3).

Oznacza to, że głęboszowanie powinno podlegać ograniczeniu w zakresie głębokości uprawy i stopnia zwięzłości gleby. Stąd wniosek końcowy brzmi: racjonalne jest głęboszowanie na umiarkowanej głębokości i tylko na glebach nadmiernie zagęszczonych, co na ogół dotyczy gleb ciężkich.

4.6. Agregatowanie narzędzi uprawowych

Jest to najnowszy kierunek zmierzający do uzyskania pożądanych efektów uprawy agrotechnicznych i ekonomicznych. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że agregatowanie jest przydatne w każdym systemie uprawy. W przypadku uprawy tradycyjnej agregatowanie rozumiane jest jako łączenie (sprzęganie) dwu lub więcej maszyn (narzędzi), wykonujących jednakową pracę – czyli tworzenie agregatów złożonych.

Agregaty kombinowane, które są również stosowane w tradycyjnym systemie uprawy, opisano w II części pracy pt. Agregaty kombinowane.

Agregaty złożone umożliwiają zmniejszenie liczby przejazdów ciągnika po polu, co pozwala na [4, 5, 7]:

- zmniejszenie zużycia paliwa,
- wzrost wydajności pracy,
- skrócenie czasu wykonania zabiegu, co ułatwia terminowe wykonanie pracy,
- zmniejszenie niepożądanego ugniatania i niszczenia struktury gleby,
- pełniejsze wykorzystanie mocy i siły uciągu ciągnika,
- zmniejszenie strat parowania wody zawartej w glebie,
- uzyskanie lepszego doprawiania roli pod siew nasion (jednakowa głębokość i równomierność spulchniania itp.).

Powyższe zalety potwierdza praktyka rolnicza.

5. PODSUMOWANIE

Przegląd agregatów oraz wyniki dostępnych badań pozwalają na następujące uogólnienia:

- uprawa tradycyjna roli podlega ciągłemu doskonaleniu, głównie poprzez uproszczenia i modyfikacje,
- w uprawie tradycyjnej istnieje wiele sposobów zmniejszenia jej energochłonności przy spełnieniu wymagań agrotechnicznych uprawy, aczkolwiek zróżnicowanie ich jest znaczne,
- agregatowanie narzędzi uprawowych umożliwi uzyskanie największych korzyści agrotechnicznych i ekonomicznych.

LITERATURA

- [1] Bosse A. i inni: Forschungszentrum fur Bodenfruchtbarkeit Munchenberg. Raport. 1990.
- [2] Gonet Z.: Metoda i niektóre wyniki badań energochłonności systemów uprawy roli. *Fragn. Agron.* 2, 1991.
- [3] Gonet Z., Zaorski T.: Energochłonność orki w różnych warunkach glebowych. *Pam. Puł.* 9, 1988.
- [4] Jarmocik E.: Agregaty uprawowo-siewne. ODR Minikowo, 1999.
- [5] Kuś J.: Optymalizacja uprawy roli. Materiały szkoleniowe 67/98. IUNG Puławy, 1998.
- [6] Ptaszyński S. i inni.: Energooszczędne wykładziny na odkładnice pługów. *Technika Rolnicza* 2/98.
- [7] Przybył J.: Przygotowanie gleby do siewu. *Rolniczy Przegląd Techniczny* 2, 1999.
- [8] Katalogi producentów maszyn rolniczych.

AGRICULTURAL UNITS IN VARIOUS SYSTEMS OF SOIL CULTIVATION PART I. AGRICULTURAL UNITS IN TRADITIONAL SOIL CULTIVATION

Summary

This paper provides a review of soil cultivation units designed for many purposes such as: basic cultivation, stubble tillage, pre-sowing soil tillage and versatile cultivation. Both design and functional features of those units are brought to analysis. Energy-saving methods improving traditional soil cultivation were of special interest.

Key words: agricultural units, structure, operation and energy consumption

AGREGATY ROLNICZE W RÓŻNYCH SYSTEMACH UPRAWY ROLI. CZ. II. AGREGATY KOMBINOWANE

Eugeniusz Jarmocik

Katedra Maszyn Rolniczych
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Praca zawiera przegląd agregatów uprawowo-siewnych i nawozowo-siewnych z analizą ich głównych cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Wskazano na korzystne efekty agrotechniczne i ekonomiczne, jakie można uzyskać podczas pracy tymi agregatami w tradycyjnym systemie uprawy roli.

Słowa kluczowe: agregaty, budowa, eksploatacja, energochłonność, ekonomia

1. WSTĘP

Agregat kombinowany jest to zestaw złożony ze źródła siły i co najmniej dwóch maszyn (narzędzi) wykonujących różne prace uzupełniające się wzajemnie, np. ciągnik z broną rotacyjną i siewnikiem.

Wprowadzenie agregatów kombinowanych do uprawy jest jednym ze sposobów ograniczenia liczby przejazdów po polu i ich negatywnych następstw. Do najbardziej rozpowszechnionych agregatów kombinowanych należą agregaty uprawowo-siewne i nawozowo-siewne.

Agregaty uprawowo-siewne zapewniają lepszą niż agregaty złożone jakość pracy na całej powierzchni pola, a w szczególności na uwrociach i w śladach kół ciągnika. W przypadku stosowania agregatów uprawowo-siewnych w uprawie tradycyjnej, wstępna uprawa przedsiewna powinna być maksymalnie uproszczona, a przy siewie poplonów całkowicie pominięta.

Oferta agregatów uprawowo-siewnych jest coraz większa: zawiera agregaty bierne i czynne oraz zawieszane, półzawieszane i nabudowane [6, 8]. Siewnik z maszyną (narzędziem) uprawową jest połączony specjalnym sprzęgiem lub nabudowany na jej ramie. Zaletą agregatów z nabudowanym siewnikiem jest ich duża zwrotność, natomiast wadą – brak możliwości indywidualnego wykorzystania maszyn składowych.

Duża różnorodność konstrukcji agregatów uprawowo-siewnych pozwala na ich efektywny dobór do warunków pracy i wymagań rośliny uprawnej.

Agregaty nawozowo-siewne mogą pracować w dwóch wersjach: głównej, jako zestaw wysiewający jednocześnie nawóz i nasiona rośliny uprawnej, bądź pomocniczej, jako zestaw wysiewający jednocześnie dwa rodzaje nasion.

Celem pracy jest próba oceny przydatności agregatów do wykonania określonych prac w tradycyjnym systemie uprawy roli. Ocena dotyczy efektów agrotechnicznych i ekonomicznych pracy agregatów kombinowanych.

2. ZAKRES PRACY I METODA OPRACOWANIA

Zakres pracy obejmuje próbę oceny następujących wskaźników:

- a) cech konstrukcyjno-funkcjonalnych agregatów,
- b) poprawności wykonania pracy,
- c) energochłonności pracy agregatów.

Cechy konstrukcyjno-funkcjonalne agregatów do uprawy roli opisano na podstawie ich przeglądu i analizy oraz porównania określonych danych.

Ocenę poprawności (jakości) wykonania pracy dokonano przez porównanie efektów uprawy rozpatrywanego narzędzia (maszyny) z wymaganiami agrotechnicznymi [5, 7].

Energochłonność pracy agregatów oceniono na podstawie analizy wyników badań.

3. PRZEGLĄD I ANALIZA AGREGATÓW UPRAWOWO-SIEWNYCH

Cechy charakterystyczne tej grupy agregatów:

- wykonanie dwóch różnych zabiegów równocześnie,
- lepsza jakość siewu niż przy rozłącznej pracy maszyn,
- duża liczba rozwiązań konstrukcyjnych agregatów uprawowo-siewnych,
- większość agregatów uprawowych, krajowych i zagranicznych, fabrycznie przystosowana jest do współpracy z określonymi siewnikami, np. agregaty uprawowe Unii Grudziądz z siewnikami Rolmasz Kutno.

3.1. Agregaty uprawowo-siewne bierne

Siewniki w agregatach biernych współpracują ze zróżnicowanym zestawem narzędzi doprawiających. Najczęściej występują: wały strunowe, wały zębate (kruszące), kultywatory i brony zębate w określonej konfiguracji. Narzędzia te mogą różnić się między sobą masą i głębokością pracy.

Różnorodność narzędzi doprawiających pozwala na ich racjonalny dobór do warunków pracy i wymagań roślin.

W Polsce do najbardziej znanych w tej grupie agregatów należą:

- a) agregaty Mazowsze S 103, firmy Rolmasz Kutno,
- b) agregaty Lotus firmy Pomimex Mogilno,
- c) agregaty Seedcom, firmy Fiona (Dania),
- d) agregaty firmy Kongskilde (Dania),
- e) agregaty Accord firmy Kverneland (Niemcy).

Agregaty uprawowo-siewne Mazowsze należą do najbardziej rozpowszechnionych w tej grupie maszyn produkcji krajowej. Zbudowane są z następujących narzędzi:

- dwóch wałów strunowych,
- wału zębatego ciężkiego,
- wału Croskill (lub kolczatki),
- siewnika Mazowsze S 103.

Różnice między agregatami uprawowo-siewnymi Mazowsze dotyczą szerokości roboczej (3 i 4 m) oraz sposobu połączenia narzędzi ze sobą – nabudowane lub połączone w układzie tandem.

Agregaty Lotus zbudowane są z następujących narzędzi:

- wału kruszącego śrubowego prawo- i lewoskrętnego,
- dwóch rzędów zębów sprężystych kultywatora,
- wału strunowego zębatego,
- siewnika przyczepianego do ramy zestawu uprawowego.

W grupie agregatów uprawowo-siewnych, agregaty Seedcom (rys. 1) firmy Fiona należą do najbardziej rozpowszechnionych maszyn z importu, ich dane techniczne zawiera tabela 1. Znane są cztery typy agregatu uprawowo-siewnego Seedcom: DR, SR, S.C., PC.



Rys. 1. Agregat uprawowo-siewny Seedcom firmy Fiona

Zasadnicze różnice między poszczególnymi typami agregatu dotyczą składu w zestawie uprawowym lub siewnym, pojemności zbiornika i masy własnej oraz budowy redlic.

Tabela 1. Dane techniczne agregatów uprawowo-siewnych Seedcom firmy Fiona [8]

Typ	Szerokość, m		Liczba		Pojemność zbiornika, l	Masa własna, kg
	robocza	transportowa	zębów	redlic		
DR	3,00	3,00	25	25	435	1700
	4,00	4,00	33	33	590	2210
SR	3,00	3,00	25	25	645	1730
	4,00	4,00	33	33	870	2250
S.C.	3,00	3,00	25	25	645	1650
	4,00	4,00	33	33	870	2150
PC	3,00	3,00	25	24	800	1625
	4,00	4,00	33	32	800	2115

Składy agregatów w poszczególnych typach są następujące:

typ DR

- kultywator
- wał strunowy
- siewnik do nasion
- przewody nasienne w postaci długich stalowych rur z szabłowymi obracalnymi redlicami

typ SC

- ciężka brona
- wał strunowy
- siewnik do nasion
- przewody nasienne zakończone są lejkami zamocowanymi na zębach kultywatora

typ SR

- ciężka brona
- wał strunowy
- siewnik do nasion mechaniczny

typ PC

- ciężka brona
- wał strunowy
- siewnik do nasion pneumatyczny

Agregaty uprawowo-siewne (bierne) Kongskilde zbudowane są z brony zespolonej KHa oraz:

- siewnika Demeter Classic CSA 3000 (nabudowane),
- siewnika Demeter Classic CS 3000 (przyczepiane).

Agregaty Accord budowane są w dwóch wersjach:

- siewnik Accord Pneumatic DA z kultywatorem,
- siewnik Accord Pneumatic DV z agregatem uprawowym Exakta.

3.2. Agregaty uprawowo-siewne czynne

W części uprawowej agregatu występują maszyny czynne i narzędzia bierne. Do maszyn czynnych należą brony obrotowe o poziomej osi obrotu, brony wirnikowe o pionowej osi obrotu, wirniki zębate itp. Natomiast siewniki i bierne narzędzia uprawowe są takie same, jak w agregatach uprawowo-siewnych biernych (opisanych

w p. 3.1). Możliwość powielenia zespołów roboczych w agregatach pozwala na elastyczne dostosowanie ich dla potrzeb rolnika.

Na rynku krajowym do najbardziej popularnych firm produkujących agregaty uprawowo-siewne czynne należą:

- a) Rolmasz Kutno,
- b) Famarol Słupsk,
- c) Kongskilde (Dania),
- d) Lemken (Niemcy),
- e) Rau (Niemcy),
- f) Kverneland (Niemcy).

Agregaty Rolmasz Kutno zbudowane są z następujących maszyn i narzędzi:

- brona obrotowa,
 - wał strunowy gładki,
 - wał zębaty ciężki,
- siewnik Mazowsze S 103.

Agregaty te występują jako nabudowane lub łączone w układzie tandem.

Budowa i działanie podstawowych zespołów roboczych agregatów produkcji Rolmasz Kutno są zbliżone do agregatów firm zachodnioeuropejskich. Odróżnia je natomiast skromne wyposażenie dodatkowe.

Agregat czynny produkcji Famarol Słupsk składa się z brony wimnikowej U332 i siewnika rzędowego S0741/1. Jest to najprostszy agregat w składzie podstawowym, jak i w wyposażeniu dodatkowym.

Agregaty czynne Kongskilde zbudowane są z brony rotacyjnej Centurion oraz:

- siewnika Demeter Classic CSA 3000 (nabudowane),
- siewnika Demeter Classic CS 3000 (przyczepiane).

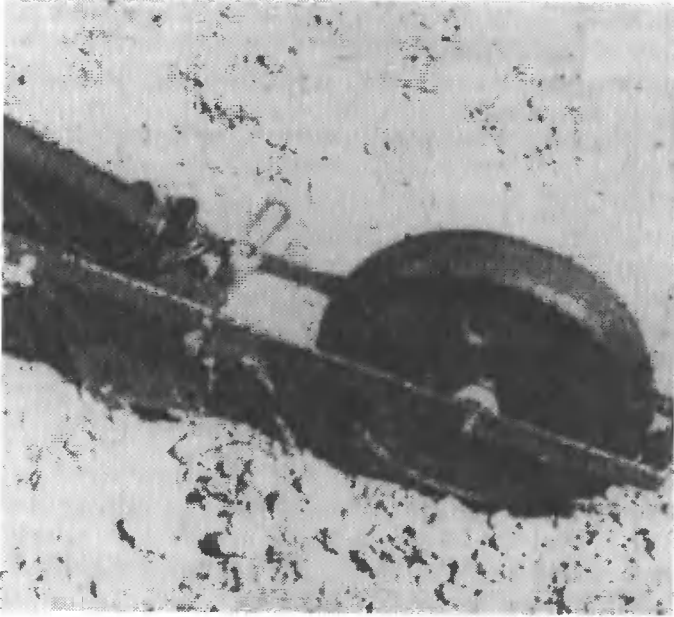
Agregaty czynne firmy Kongskilde, podobnie jak agregaty firmy Lemken, charakteryzuje bogate wyposażenie siewników, które ułatwia pracę agregatów, czyniąc ją bardziej wydajną i precyzyjnie wykonaną. Do wyposażenia dodatkowego należą: układ do wyznaczania ścieżek technologicznych, redlice tarczowe, znaczniki śladów, dzielony zagarniacz, licznik hektarów, siewnik do trawy oraz tablice ostrzegawcze z oświetleniem.

Agregat czynny Lemken stanowi brona rotacyjna Zirkon i zawieszany na niej siewnik Soltair. Hydrauliczny trójpunktowy sprzęg umożliwia wzdłużne i poprzeczne poziomowanie siewnika. Urządzeniem uzupełniającym pracę brony rotacyjnej jest wał z pierścieniami trapezowymi rozstawionymi w odstępach równych rozstawie redlic, tj. 12,5 cm. Umożliwia to dużą równomierność głębokości siewu i optymalne przykrycie nasion.

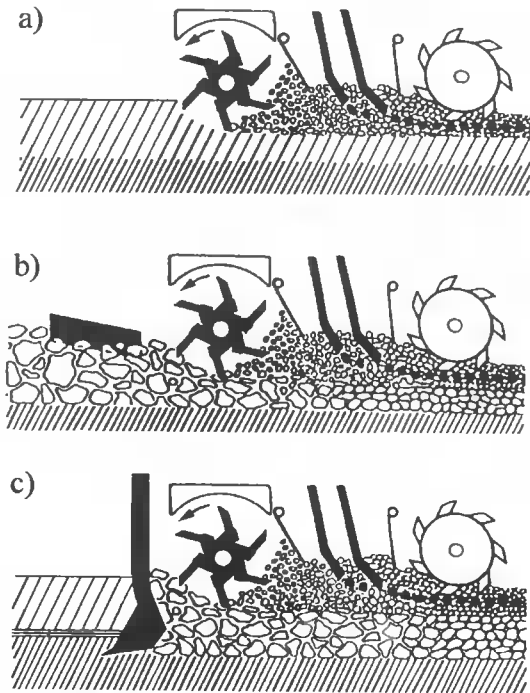
W innych agregatach firmy Lemken, np. siewniku DKA lub Eurodrill, nabudowanych na glebogryzarcie Granit, równomierność głębokości siewu drobnych nasion zapewniają rolki podporowe zamocowane przy redlicach (rys. 2).

Agregaty czynne Rau w dwóch wersjach:

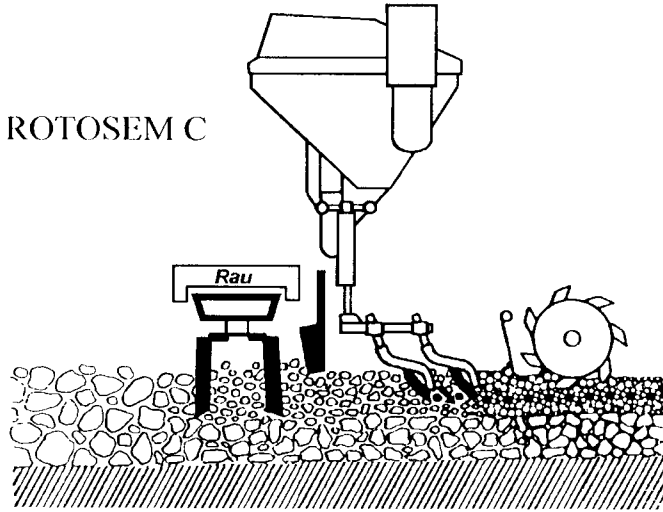
- zbudowane na bazie Rototillera (Rau – Rotosem) – rysunek 3,
- zbudowane na bazie Cyclotillera (Rotosem C) – rysunek 4.



Rys. 2. Rolka podporowa redlicy w siewnikach DKA i Eurodrill firmy Lemken



Rys. 3. Schemat agregatu uprawowo-siewnego Rau – Rotosem: a) zestaw podstawowy, b) zestaw podstawowy + listwa wyrównująca, c) zestaw podstawowy + pogłębiacz



Rys. 4. Schemat agregatu uprawowo-siewnego Rotosem C

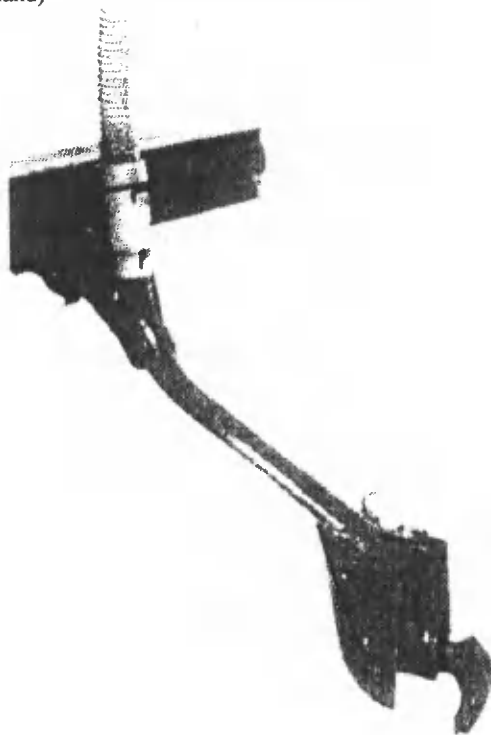
Cechą wyróżniającą system Rotosem jest wysiew nasion pod strumień lecącej gleby, w związku z czym nie występuje zapychanie redlic. Prędkość lotu ziemi regulowana jest prędkością obrotową rotora i położeniem jego osłony. Takie rozwiązanie umożliwia wysiew nasion na dowolną głębokość oraz gęstość.

Agregaty czynne Kverneland stanowią połączenie siewnika Accord Pneumatic DA z broną rotacyjną lub wirnikiem zębatym. W agregatach Accord równomierną głębokość siewu umożliwiło wprowadzenie następujących rozwiązań konstrukcyjnych:

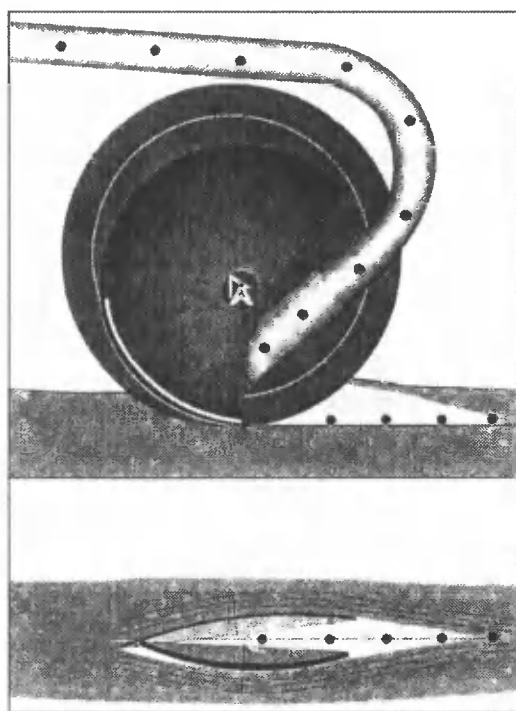
- zastosowano płozy regulujące zagłębienie redlic stopkowych (rys. 5), co jest przydatne na glebach sypkich i płytkim siewie,
- uproszczono budowę przewodów nasiennych (rys. 6),
- wprowadzono wymienne redlice tarczowe typu CX (rys. 7), przydatne w trudnych warunkach glebowych,
- zastosowano koła dociskowe (rys. 8) współpracujące z redlicami CX.



Rys. 5. Płoza regulująca zagłębienie redlicy w siewniku Accord Pneumatic DA (Kverneland)



Rys. 6. Redlica bez teleskopowego przewodu nasiennego



Rys. 7. Redlica tarczowa typu CX



Rys. 8. Koła dociskowe współpracujące z redlicą CX

O energochłonności agregatów uprawowo-siewnych decydują przede wszystkim narzędzia uprawowe, których zapotrzebowanie na moc podano w tablicy 2 (dane dotyczą pracy na glebach o średniej zwężłości).

Tabela 2. Energochłonność różnych zabiegów uprawowych [4]

Zabieg uprawowy	Zużycie paliwa l/ha	Energochłonność MJ/ha
Talerzowanie	6,7	318
Kultywatorowanie	6,0	285
Bronowanie	3,7	175
Wałowanie	2,8	138
Siew	2,9	157
Agregaty do przedsiewnego doprawiania roli	4,8-6,0	200-258
Orka płytka	10,8	395
Orka średnia	14,3	626
Orka głęboka	18,1	665

Z tabeli 1 wynikają następujące spostrzeżenia:

- w uprawie tradycyjnej orka pochłania największą energię; stanowi ona 200-400 % energii jednego z pozostałych zabiegów uprawowych,
- zużycie energii przy agregatowaniu narzędzi jest mniejsze niż suma energii zużytej przez pojedyncze narzędzia.

4. PRZEGLĄD I ANALIZA AGREGATÓW NAWOZOWO-SIEWNYCH

Agregaty nawozowo-siewne służą do jednoczesnego wysiewu nawozu i nasion. Niektóre z nich mogą również wysiewać jednocześnie dwa rodzaje nasion. Z obserwacji rynku wynika, że liczba agregatów nawozowo-siewnych w porównaniu z poprzednimi agregatami jest mniejsza. Podstawową ideę budowy i działania agregatów nawozowo-siewnych ilustrują rysunki 9 i 10.

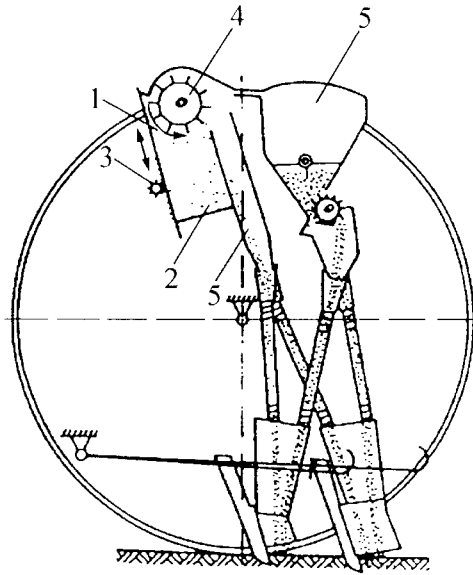
Zasadnicze różnice między przedstawionymi agregatami dotyczą zbiorników i redlic:

- dwa zbiorniki i wspólne redlice wysiewające (rys. 9),
- jeden zbiornik i oddzielne redlice wysiewające (rys. 10).

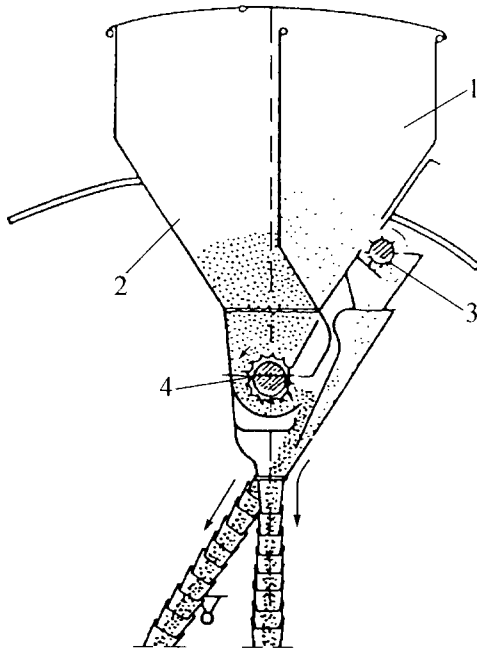
Do bardziej znanych agregatów nawozowo-siewnych należą:

- agregat Seedcom FC,
- agregat Accord Pneumatic DF2,
- agregat Rapid Combi,
- agregat Omega.

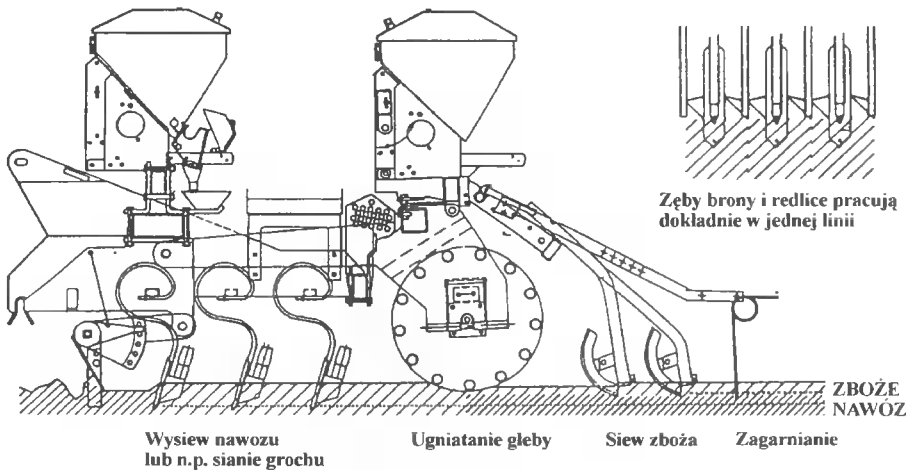
Schemat budowy i działania agregatu Seedcom FC ilustruje rysunek 11. Agregat ten zbudowany jest z sekcji brony, na której zamocowany jest zbiornik do nawozów granulowanych o dużej pojemności (645 l lub 870 l). Nad wałem strunowym osadzony jest siewnik do nasion ze zbiornikiem o pojemności 435 l lub 590 l.



Rys. 9. Schemat agregatu nawozowo-siewnego ze wspólnymi redlicami: 1 – skrzynia nawozowa, 2 – przesuwane dno skrzyni, 3 – napęd dna, 4 – zespół wygarniający nawóz, 5 – przegroda doprowadzająca nawóz, 6 – skrzynia nasienna



Rys. 10. Schemat agregatu nawozowo-siewnego ze wspólną skrzynią: 1 – przedział na granulowany nawóz, 2 – przedział na nasiona, 3 – zespół wygarniający nawóz, 4 – zespół wygarniający nasiona



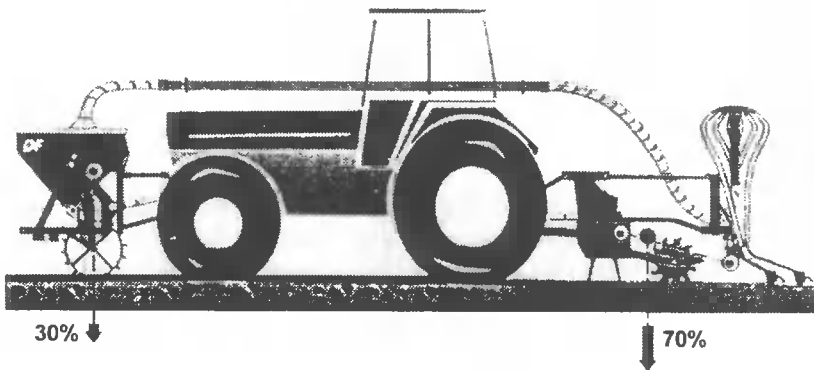
Rys. 11. Schemat budowy i działania agregatu nawozowo-siewnego Seedcom FC

Zalety agregatu Seedcom FC:

- jednoczesny wysiew nawozu i nasion,
- jednoczesny wysiew dwóch różnych nasion,
- oddzielna regulacja położenia redlic i zębów brony umożliwia optymalną głębokość siewu nasion i nawozu,
- umieszczenie nasion i granulek nawozu w jednej linii (wąskim rowku) ułatwia pobieranie składników pokarmowych, zwłaszcza w pierwszej fazie rozwoju.

Cechą charakterystyczną agregatu Accord Pneumatic DF2 jest umieszczenie siewnika nawozowego z przodu, a siewnika zbożowego z tyłu ciągnika (rys. 12). Efektem takiej konstrukcji agregatu jest proporcjonalny podział nacisku masy obciążającej na osie ciągnika, co pozwala na uzyskanie następujących korzyści:

- występuje obciążenie przedniej osi umożliwiające łatwe kierowanie,
- zmniejsza się nacisk maszyn na grunt,
- zapewniona jest bezpieczna praca na zboczach.



Rys. 12. Rozmieszczenie siewników agregatu Accord Pneumatic DF2 na ciągniku

Drugi agregat nawozowo-siewny firmy Kverneland Accord Pneumatic DC posiada dzielony zbiornik na nasiona i nawóz oraz wspólne redlice.

Agregat Rapid Combi posiada dzielony zbiornik na nasiona i nawóz. Korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie ścianki działowej, której zmiana położenia powoduje zmianę pojemności obu części zbiornika, zależnie od pożądanego stosunku materiału siewnego do nawozu. Siewnik Rapid – w przeciwieństwie do innych – posiada precyzyjny dozownik materiału siewnego z dokładnością do 2 kg/ha (odrębny do nasion drobnych) oraz komputer pokładowy.

Agregat Omega składa się z siewnika pneumatycznego punktowego S0 79 Omega i podsiewacza nawozów. Służy do wysiewu buraków cukrowych, a po zamontowaniu wyposażenia dodatkowego, również do siewu kukurydzy. Jest to dotychczas jedyny krajowy agregat nawozowo-siewny.

5. ZALETY AGREGATÓW KOMBINOWANYCH

Z uwagi na szerszy zakres wykonywanych prac przez agregaty kombinowane, ich stosowanie w porównaniu ze złożonymi agregatami przysparza większe korzyści [3, 5, 6] w postaci:

- niższych kosztów wykonania pracy,
- znacznych oszczędności energii,
- większej wydajności pracy,
- krótszego czasu wykonania pracy,
- lepszej jakości pracy.

W aktualnych warunkach barierą szybkiego upowszechnienia agregatów kombinowanych w rolnictwie krajowym jest ich wysoka cena oraz konieczność posiadania ciągników dużej mocy. Ograniczenia te nie występują (bądź nie są decydujące) w gospodarstwach wielkoobszarowych, o czym świadczy wzrastający popyt na agregaty kombinowane. Fakt ten potwierdza zalety tych agregatów.

6. PODSUMOWANIE

Zaprezentowany materiał w niniejszej pracy upoważnia do następujących wniosków:

- a) stosowanie agregatów kombinowanych jest kolejnym sposobem na poprawę jakości pracy i obniżkę kosztów jej wykonania,
- b) różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych zespołów podstawowych (mechanizmy wysiewające, redlice, przewody nasienne) oraz wyposażenia dodatkowego agregatów umożliwia efektywny ich dobór do rodzaju gleby, warunków uprawy i wymagań roślin,
- c) wzrastający popyt i nieustanne doskonalenie agregatów, świadczy o dużej dynamice i utrwaleniu agregatowania jako jednego z głównych kierunków rozwoju technologii uprawy.

LITERATURA

- [1] Gonet Z.: Metoda i niektóre wyniki badań energochłonności systemów uprawy roli. *Fragm. Agron.* 2, 1991.
- [2] Gonet Z., Zaorski T.: Energochłonność orki w różnych warunkach glebowych. *Pam. Puł.* 9, 1988.
- [3] Jarmocik E.: Analiza możliwości zmniejszenia nakładów energetycznych na uprawę roli. X Międzynarodowa Konf. Nauk. „Recykulacja w Budowie Maszyn”. ATR Bydgoszcz, 2000.
- [4] Karwowski T.: Energooszczędne technologie w produkcji roślinnej – oczekiwania i rezultaty. Cz. I i II. *Służba Rolna* 9 i 10, 1989.
- [5] Kuś J.: Optymalizacja uprawy roli. Materiały szkoleniowe 67/98. IUNG Puławy, 1998.
- [6] Przybył J.: Przygotowanie gleby do siewu. *Rolniczy Przegląd Techniczny* 2, 1999.
- [7] Opracowanie zbiorowe. Wymagania agrotechniczne uprawy, nawożenia i siewu. IBMER, Warszawa 1988.
- [8] Katalogi producentów maszyn rolniczych.

AGRICULTURAL UNITS IN VARIOUS SYSTEMS
OF SOIL CULTIVATION
PART II. MULTIFUNCTIONAL COMPLEX UNITS

Summary

This paper provides a review of cultivation-sowing and fertilising-sowing units. Main design and functional features of those units were analysed. Effectiveness of tillage and economic benefits gained with employment of the units in traditional cultivation were pointed out.

Key words: agricultural units, structure, operation, energy consumption, economy

AGREGATY ROLNICZE W RÓŻNYCH SYSTEMACH UPRAWY ROLI. CZ. III. AGREGATY DO UPRAWY BEZPŁUŻNEJ I SIEWU BEZPOŚREDNIEGO

Eugeniusz Jarmocik

Katedra Maszyn Rolniczych
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono przegląd agregatów do uprawy bezpłужnej i do siewu bezpośredniego z analizą ich głównych cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Ponadto zamieszczono analizę ekonomiczną eksploatacji agregatów w trzech systemach uprawy roli. W podsumowaniu wykazano związek agregatów rolniczych z postępiem w technologii uprawy roli.

Słowa kluczowe: agregaty, budowa, eksploatacja, energochłonność, koszty

1. WSTĘP

Koncepcja agregatów do uprawy bezpłужnej i siewu bezpośredniego jest efektem nieustannych poszukiwań doskonałszych sposobów uprawy roli, tj. charakteryzujących się mniejszym zapotrzebowaniem energii i uzyskaniem oczekiwanych efektów uprawowych. Przewiduje się, że uprawa bezpłужna będzie się rozwijała i w ciągu najbliższych 20 lat w rolnictwie europejskim powierzchnia gleb obrabianych tradycyjnym pługiem będzie w przybliżeniu taka jak agregatami bezpłужnymi [9]. W rolnictwie krajowym w uprawie późniwej dominuje już system bezorkowy. Wynika to z lepszej jakości pracy kultywatora i mniejszego kosztu jej wykonania w porównaniu z pługiem podorywkowym.

Narzędzia do uprawy bezorkowej charakteryzuje mniejsze zapotrzebowanie na energię i lepsze niż pług spełnienie wymagań agrotechnicznych uprawy. Wynika to z innego sposobu oddziaływania ich na glebę niż pług. Narzędzia te spulchniają glebę bez jej energochłonnego odwracania, oraz pozostawiają na powierzchni pola resztki organiczne (mulcz), które chronią glebę przed erozją, zapobiegają tworzeniu się skorupy, chronią wilgoć, zwiększają aktywność biologiczną gleby itp.

Agregaty do siewu bezpośredniego maksymalnie upraszczają uprawę – całość prac jest wykonana podczas jednego przejazdu agregatu bez uprawy gleby. Innymi słowy jest to siew w ściernisko. Zalety stosowania agregatów do siewu bezpośredniego przewyższają zalety pracy agregatów do bezorkowej uprawy roli. Należy jednak zauważyć, że oba te systemy uprawy mają również swoje wady, z których najważniejsze to: roz-

wój organizmów pasożytniczych, wysoki koszt agregatów oraz ograniczenia w stosowaniu. Zdecydowana przewaga zalet agregatów do uprawy bezpłужnej i siewu bezpośredniego nad ich wadami stanowi bodziec do dalszego ich rozwoju i doskonalenia.

Znajomość cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych agregatów oraz uwarunkowań racjonalnego stosowania, umożliwiała ich trafny dobór do określonych warunków gospodarowania.

Celem pracy jest próba oceny przydatności agregatów do wykonania określonych prac w bezpłужnej uprawie roli i siewie bezpośrednim. Ocena dotyczy efektów agrotechnicznych i ekonomicznych pracy tych agregatów, w porównaniu z narzędziami i agregatami stosowanymi w tradycyjnej uprawie roli.

2. ZAKRES PRACY I METODA OPRACOWANIA

Zakres pracy obejmuje próbę oceny następujących wskaźników:

- a) cech konstrukcyjno-funkcjonalnych agregatów,
- b) poprawności wykonania pracy,
- c) analizę ekonomiczną eksploatacji agregatów w trzech systemach uprawy.

Cechy konstrukcyjno-funkcjonalne rozpatrywanych agregatów opisano na podstawie ich przeglądu i analizy oraz porównania określonych danych.

Ocenę poprawności (jakości) wykonania pracy dokonano poprzez porównanie efektów uprawy rozpatrywanego agregatu z wymaganiami agrotechnicznymi [6, 9].

Analiza ekonomiczna eksploatacji agregatów w trzech systemach uprawy roli obejmuje: koszty produkcji, zużycie energii bezpośrednie oraz wielkość plonu i została dokonana na podstawie dostępnych wyników badań.

3. PRZEGLĄD I ANALIZA AGREGATÓW W UPRAWIE BEZPŁUŻNEJ

W porównaniu z uprawą tradycyjną (płужną) uprawa bezpłужna spełnia znacznie więcej celów i zadań uprawy roli:

- zmniejsza zużycie paliwa,
- powoduje wzrost aktywności biologicznej gleby,
- zmniejsza erozję gleby,
- poprawia strukturę gleby.

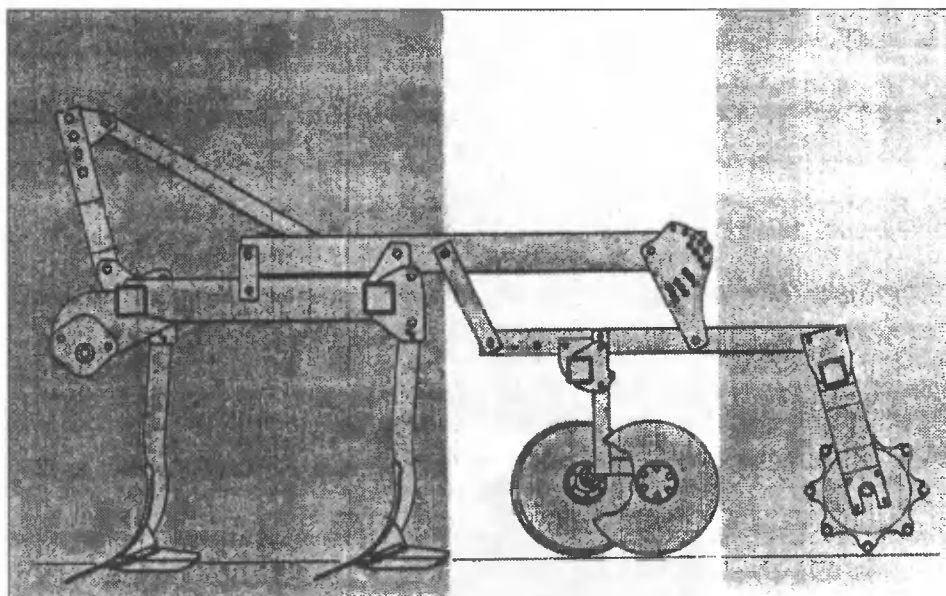
Najczęściej stosowanym narzędziem w uprawie bezpłужnej jest masywny kultywator (gruber), zbudowany przeważnie z następujących narzędzi:

- zębów sztywnych zakończonych gęsiostopkami ustawionych w dwóch rzędach,
- jednej sekcji talerzy,
- wału strunowego lub wymiennie wału zębatego.

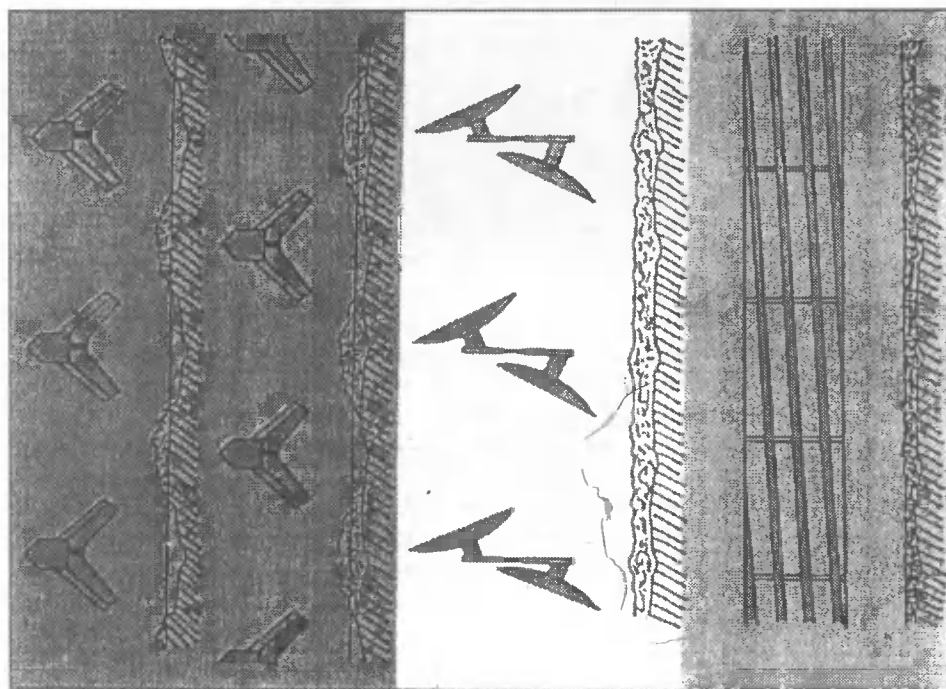
Do najbardziej typowych i znanych agregatów w uprawie bezpłужnej należą:

- a) agregat Smaragd,
- b) agregat Synkro,
- c) agregat Zefir.

Widok agregatu Smaragd przedstawia rysunek 1, a sposób jego pracy rysunek 2.



Rys. 1. Schemat agregatu Smaragd



Rys. 2. Schemat pracy agregatu Smaragd

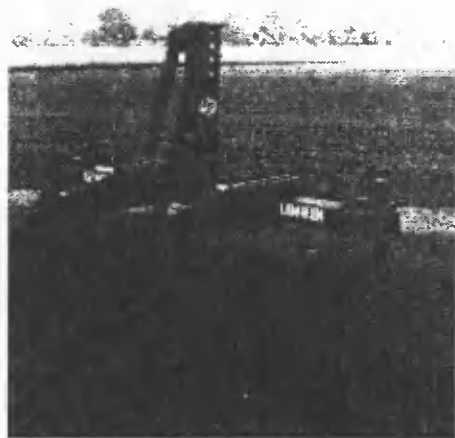
W strefie działania zębów sztywnych zachodzi: cięcie całej powierzchni roli, spulchnianie oraz intensywne mieszanie gleby. W drugiej strefie – działania ukośnic

ustawionych talerzy – następuje wyrównywanie, mieszanie i rozdrabnianie gleby wraz z masą organiczną. W strefie trzeciej wał strunowy powoduje zagęszczenie wierzchniej warstwy gleby i utrzymuje nastawioną głębokość pracy.

Agregat Smaragd może wykonać następujące prace:

- a) uprawę bezorkową (spulchnienie roli),
- b) uprawę poźniwą,
- c) przyoranie poplonów,
- d) bezpośrednie przyoranie gnojowicy,
- e) wysiew poplonów.

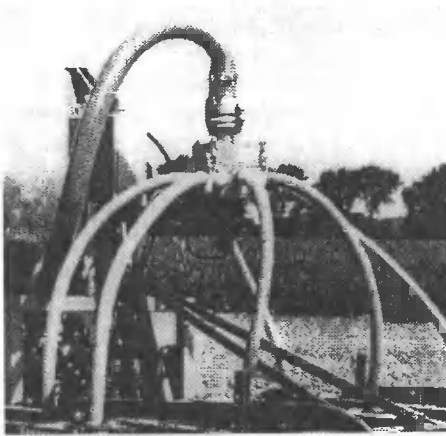
W przypadku wysokich roślin poplonowych agregat ma tendencję do zapychania. Wówczas zastosować można dodatkowo sekcję tarcz Lemken SLV (rys. 3), umieszczoną przed narzędziem głównym. Działanie tarcz, tj. cięcie i łamanie roślin zapobiega zapychaniu się talerzy i powoduje zmniejszenie oporów roboczych agregatu.



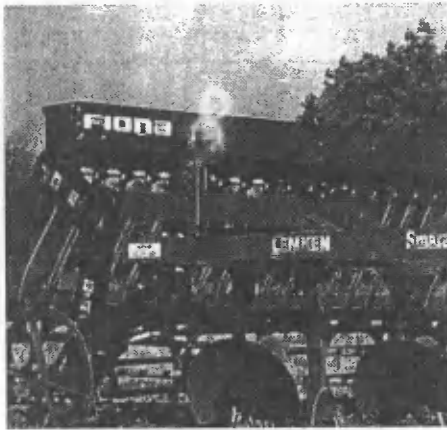
Rys. 3. Sekcja tarcz Lemken SLV

Rozlewacz do gnojowicy (rys. 4) osadzony jest na ramie agregatu Smaragd. Gnojowica jest rozlewana dyszami za poszczególnymi zębami kultywatora na pasie gleby o szerokości równej szerokości redlicy skrzydełkowej. Praca talerzy za redlicami powoduje natychmiastowe przykrycie nawozu glebą.

Do bezpośredniego wysiewu poplonów podczas uprawy można wykorzystać agregat Smaragd w kombinacji z siewnikiem poplonów (rys. 5). Nasiona w tym agregacie są wysiewane rzutowo za pomocą węży. Tylny wał strunowy, zagęszczając powierzchniowo glebę powoduje podsiąkanie wody i umożliwia wysiew na równej głębokości, a w efekcie szybkie i równoczesne kiełkowanie nasion.



Rys. 4. Rozlewacz gnojowicy



Rys. 5. Agregat Smaragd w zestawie z siewnikiem poplonów

Ważniejsze dane techniczne agregatów Smaragd przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Dane techniczne agregatów Smaragd [10]

Typ	Zapotrzebowanie mocy, kW	Liczba zębów/tarcz	Szerokość robocza, m	Masa, kg	Wysokość ramy, m
9/260	88	6/5	2,6	854	0,8
9/300	110	7/6	3,0	928	0,8
9/400	133	9/8	4,0	1328	0,8
9/260U	88	6/5	2,6	1066	0,8
9/300U	110	7/6	3,0	1174	0,8
9/400U	133	9/8	4,0	1653	0,8

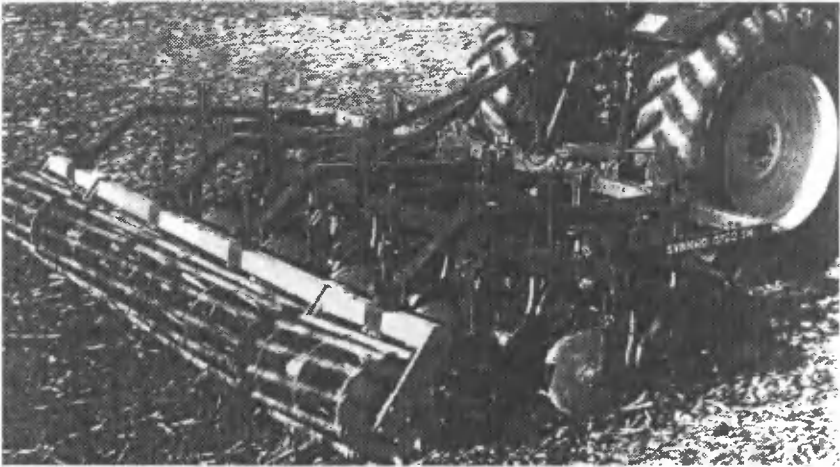
Wszystkie agregaty Smaragd posiadają zabezpieczenie zębów przed przeciążeniem w postaci kołka pracującego na ścinanie. Natomiast wersje agregatów przezna-

czony do pracy na glebach zakamienionych (oznaczone literą U) dodatkowo posiadają zabezpieczenie sprężynowe.

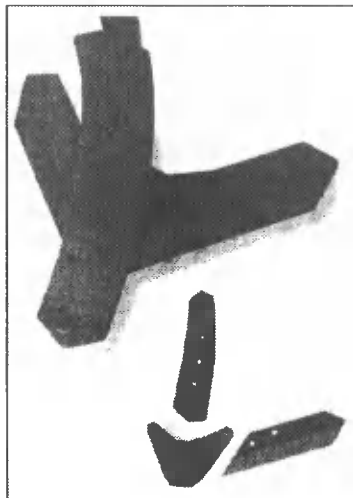
W agregacie Synkro (rys. 6) zamiast wału strunowego wymiennie może być zamocowany wał zębaty Rotopack, którego pracę charakteryzuje intensywne rozdrabnianie i mieszanie gleby. Ponadto wał Rotopack, podobnie jak wał strunowy, powoduje powierzchniowe zagęszczenie gleby i utrzymanie uprawy na jednakowej głębokości.

Agregat Synkro posiada zęby sztywne (rys. 7). Charakteryzują go:

- dzielone gęsiostopki,
- przestawialne, szerokie gęsiostopki dłutowe, umożliwiające trzykrotne wydłużenie czasu ich eksploatacji,
- zęby z regulacją kąta ustawienia.



Rys. 6. Agregat Synkro



Rys. 7. Budowa zęba sztywnego agregatu Synkro

Ponadto zęby skrajne kierują glebę do środka agregatu, a boczne kroje tarczowe spływają bruzdę i odcinają glebę od calizny. Zapobiega to powstawaniu bruzd.

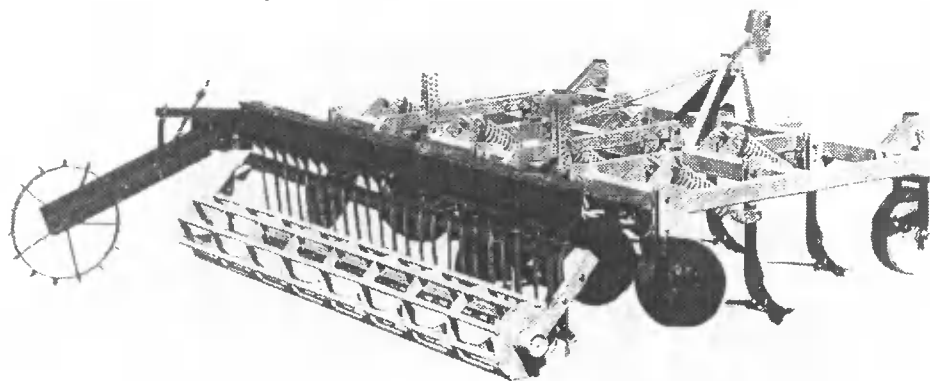
W wyposażeniu dodatkowym agregat Synkro posiada siewnik poplonów.

Podstawowe dane techniczne agregatów Synkro podaje tabela 2.

Tabela 2. Dane techniczne agregatów Synkro [10]

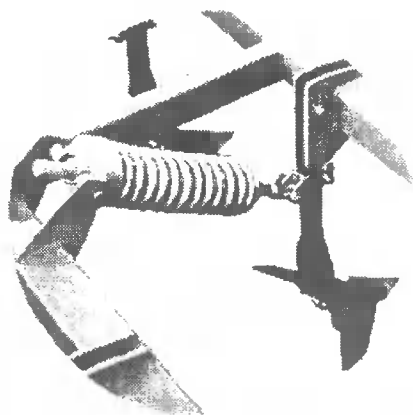
Wyszczególnienie	Typ				
	3000	3000S	3800S	3800SH	4700SH
Szerokość robocza, m	3,0	3,0	3,8	3,8	4,7
Liczba zębów	7	7	9	9	11
Liczba kroi	6	6	8	8	10
Wysokość ramy, m	0,75	0,82	0,82	0,82	0,82
Moc ciągnika, kW	66	88	103	103	132
Masa z wałem strunowym Ø 420	835	950	-	-	-
Masa z wałem strunowym Ø 540	845	960	1160	1650	1800
Masa z Rotopackiem	955	1070	-	1750	1920
Masa zabezpieczenia sprężynowego	217	217	279	279	341

Agregat krajowej produkcji Zefir (rys. 8) w części uprawowej ma budowę zbliżoną do agregatu Smaragd. W wyposażeniu dodatkowym posiada tylko siewnik poplonów. Wszystkie typy agregatów Synkro i agregatów Zefir posiadają zabezpieczenia sprężynowe zębów (rys. 9). Pozwala to na prawidłową pracę agregatów na glebach zwięzłych i zakamienionych.



Rys. 8. Agregat Zefir

W uprawie bezorkowej mogą być również stosowane agregaty do wszechstronnej uprawy roli, które są opisane w opracowaniu pt. Agregaty rolnicze w różnych systemach uprawy roli. Cz. I. Agregaty w uprawie tradycyjnej (p. 3.4). W uprawie bezorkowej do skutecznego zwalczania chwastów konieczne jest zwiększenie intensywności oprysków niż w przypadku uprawy tradycyjnej, gdzie orka w znacznej mierze niszczy chwasty bądź utrudnia ich rozwój [2, 3, 5, 6].



Rys. 9. Zabezpieczenie sprężynowe zębów kultywatora

4. PRZEGLĄD I ANALIZA AGREGATÓW DO SIEWU BEZPOŚREDNIEGO

4.1. Charakterystyka agregatów do siewu bezpośredniego

Są to agregaty, które dokonują wysiewu w glebę nie uprawioną (siew w ściernisko). Stosowanie agregatów do siewu bezpośredniego maksymalnie redukuje uprawę gleby i umożliwia uzyskanie pożądanych efektów uprawowych i eksploatacyjnych.

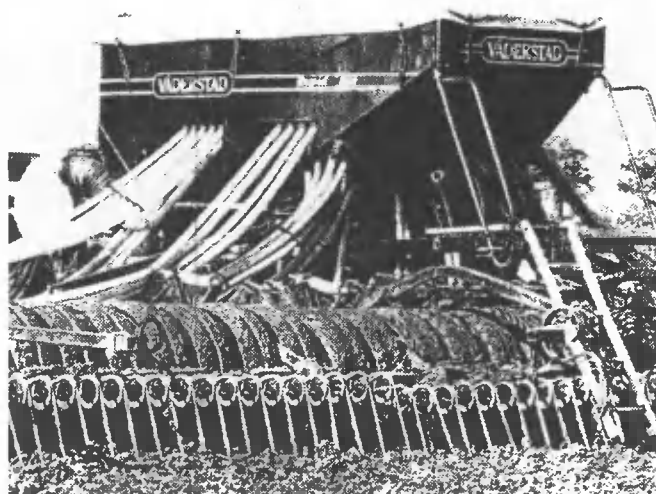
Konstrukcję tych agregatów wyróżniają:

- duże wymiary i duża masa, która ułatwia zagłębienie redlic,
- duża złożoność konstrukcji,
- masywne redlice, które mogą być talerzowe, radełkowe lub gęsiostopkowe,
- układy umożliwiające wywarcie dużej siły docisku redlic,
- koła ugniatające rolę w miejscu siewu,
- wyposażenie w mechanizmy wysiewające zarówno mechaniczne, jak i pneumatyczne (ostatnie pozwalają na większe prędkości robocze – około 15 km/h).

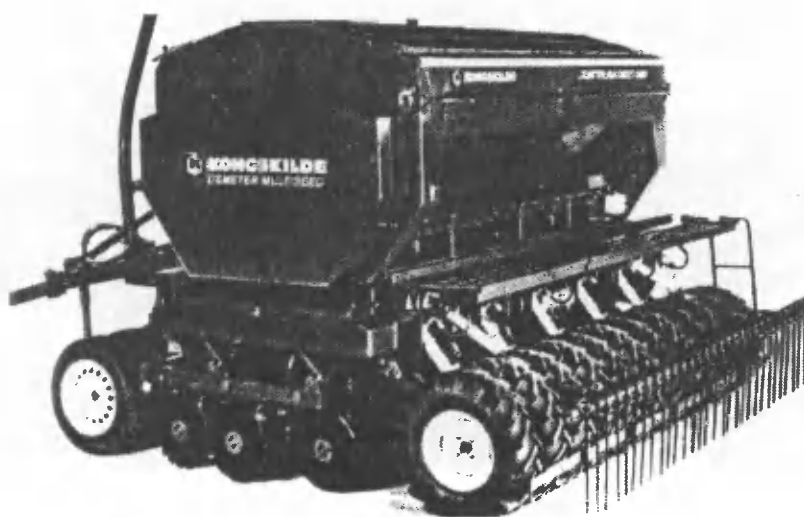
Na rynku krajowym znane są siewniki firm zachodnich, np. John Deere, Amazone, Kongskilde, Vaderstat, Horsch i inne.

Siewnik Rapid (rys. 10) może być stosowany do siewu bezpośredniego i konwencjonalnego. Siewnik Kongskilde (rys. 11) posiada dzieloną skrzynię, umożliwiającą równoczesny wysiew nasion i nawozów. Przy pracy siewnikiem John Deere (rys. 12) nasiona umieszczone są w wąskim pasie gleby – ok. 2 cm. W siewniku Great Plains (rys. 13) regulacja docisku redlic pozwala na siew nawet w ściernisko po kukurydzy. Przewody nasienne siewnika Horsch (rys. 14) są umieszczone za zębami kultywatora.

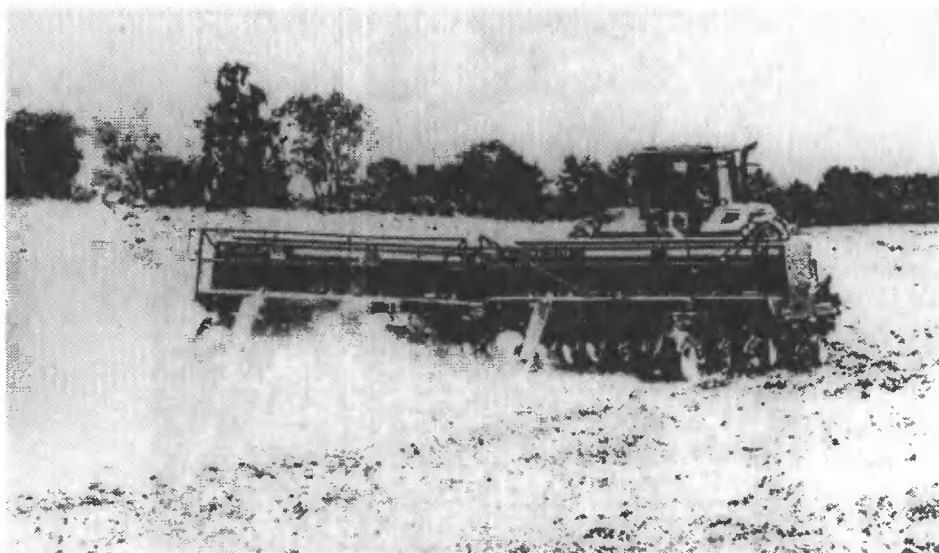
Dużym zestawem siewników do siewu bezpośredniego dysponuje firma Amazone. Są to siewniki oznaczone napisem DMC Primera o szerokości roboczej od 3 do 6 m.



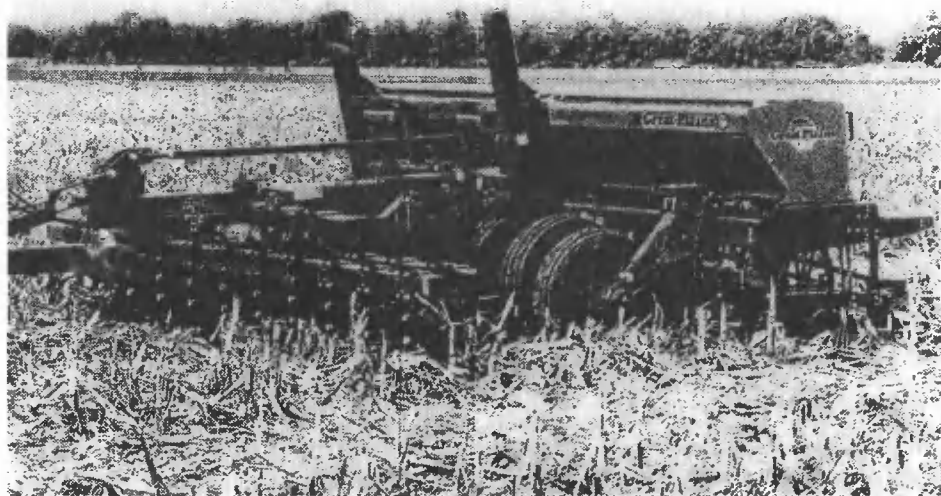
Rys. 10. Siewnik Rapid



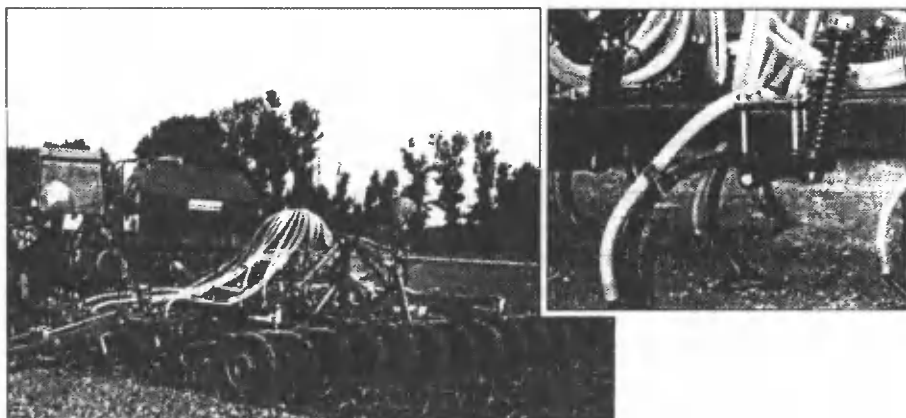
Rys. 11. Siewnik Kongskilde



Rys. 12. Siewnik John Deere



Rys. 13. Siewnik Great Plains



Rys. 14. Siewnik Horsch

4.2. Ograniczenia w stosowaniu agregatów do siewu bezpośredniego

Dobre efekty pracy tych agregatów można uzyskać na polach, które spełniają następujące warunki [5, 7, 8]:

- na polu nie mogą występować chwasty wieloletnie,
- gleba musi mieć właściwy odczyn pH,
- gleba musi mieć wysoką zawartość P i K,
- pole powinno być zmeliorowane,
- wyrównana powierzchnia pola,
- ewentualna słoma po kombajnie dobrze rozdrobniona i równomiernie rozrzucona (kombajn wyposażony w szarpacz słomy i rozdzielacz plew),
- nawożenie P i K stosować z wyprzedzeniem lub razem z siewem.

4.3. Zalety i wady agregatów do siewu bezpośredniego

Do zalet pracy agregatów do siewu bezpośredniego należą:

- ograniczenie erozji gleby wodnej i powietrznej,
- mniejsze wypłukiwanie azotu z gleby,
- spowolnienie mineralizacji, które powoduje wzrost zawartości humusu i polepsza strukturę gleby,
- umożliwienie siewu roślin, których uprawa często zależy od dotrzymania terminów agrotechnicznych, np. rzepaku po zbożach jarych,
- ograniczenie parowania wody,
- ogólne zalety agregatowania: mniejsze ugniatanie gleby, wzrost wydajności pracy i skrócenie czasu jej wykonania oraz mniejsze zużycie paliwa.

Do wad pracy agregatów do siewu bezpośredniego zaliczamy:

- wzrost zachwaszczenia gleby,
- rozwój organizmów pasożytniczych na resztkach poźniwnych,
- trudności wysiewu do gleby zwartej i nadmiernie przesuszonej,
- gorsze wschody, gdy resztki organiczne przykrywają pole,
- wysoki koszt agregatów.

5. ANALIZA EKONOMICZNA EKSPLOATACJI AGREGATÓW W TRZECH SYSTEMACH UPRAWY

5.1. Cel i zakres analizy

Celem analizy jest próba uzyskania odpowiedzi na pytanie, który z trzech podstawowych systemów uprawy roli – tradycyjny, bezpłuzny i siew bezpośredni – umożliwi osiągnięcie najlepszych efektów ekonomicznych.

Zakres analizy ekonomicznej agregatów dotyczy: kosztów produkcji, zużycia energii i wielkości plonu.

Mała liczba danych z badań eksploatacyjnych agregatów nie pozwala na dokonanie wyczerpującej analizy ekonomicznej.

5.2. Koszty produkcji

Wskaźnik ten w odniesieniu do systemów uprawy ilustruje tabela 3.

Tabela 3. Wpływ systemu uprawy roli na koszty produkcji kukurydzy [5]

Zabiegi	Koszty produkcji USD/ha				
	siew bezpośredni	uprawa tradycyjna	uprawa uproszczona	uprawa bezpłuzna	
			orka pługiem talerzowym	kultywatorowanie	uprawa glebogryzarką
Odchwaszczanie przedsięwne	18	-	-	-	-
Orka pługiem talerzowym	-	5	5	5	-
Bronowanie broną talerzową	-	4	-	-	-
Uprawa glebogryzarką	-	-	-	-	5
Kultywatorowanie	-	-	-	3	-
Siew i nawożenie	86	39	41	45	41
Odchwaszczanie posiewne	29	6	6	16	5
Nawóz, nasiona i inne nakłady	63	63	63	63	63
Koszt ogólny	196	117	115	127	114

Dane zawarte w tabeli 3 pozwalają na następujące sformułowania:

- koszty niższe od uprawy tradycyjnej wystąpiły w uprawie uproszczonej (orka pługiem talerzowym) i bezpłuznej wykonanej glebogryzarką,
- koszty maksymalne poniesiono przy siewie bezpośrednim.

Tabela 3 pozwala również na wyjaśnienie przyczyn wysokich kosztów siewu bezpośredniego, tj.:

- wysokich kosztów odchwaszczania przedsięwne i posiewnego,
- wysokich kosztów siewu i nawożenia (drogie maszyny i utrudnione zabiegi ze względu na wysokie opory redlic),

Tabela 3 ujmuje koszty ogólne, tj. bezpośrednio i pośrednio.

5.3. Wielkość plonu

Tabela 4. Wpływ systemu uprawy roli na wielkość plonów kukurydzy (5)

Metoda uprawy	Plon kukurydzy w danym roku, t/ha					
	1982	1983	1984	1985	1986	Srednio
Siew bezpośredni	0,53	3,06	1,78	0,65	0,49	1,30
Uprawa tradycyjna	2,43	3,61	5,62	4,35	3,63	3,93
Orka z pługiem talerzowym	2,32	3,51	7,15	4,34	3,33	4,13
Kultywatorowanie	2,54	3,17	2,44	1,28	2,87	2,46
Uprawa glebogryzarką	2,86	3,97	6,22	5,55	3,30	4,38

Z danych zawartych w tabeli 4 wynikają następujące spostrzeżenia:

- plony wyższe od plonów uzyskiwanych w uprawie tradycyjnej wystąpiły przy orce pługiem talerzowym i uprawie glebogryzarką, co dodatkowo potwierdza przydatność uprawy uproszczonej i bezorkowej; ponadto plon ten uzyskano bez przedsięwzięcia stosowania herbicydów,
- plony z siewu bezpośredniego są znacznie niższe od plonów z pozostałych systemów uprawy (poza jednym suchym rokiem).

5.4. Zużycie energii i wydajność sezonowa

Wybrane wskaźniki eksploatacyjne w uprawie tradycyjnej, bezpłużnej i siewie bezpośrednim podano w tabeli 5.

Tabela 5. Zużycie energii bezpośrednio na uprawę podstawową i siew w trzech systemach uprawy [4]

I.p.	Wyszczególnienie	Zużycie energii kW/ha %	Wydajność sezonowa w ha/25 dni
1	orka. doprawienie przedsięwzięcia roli broną rotacyjną, siew	100,0	126
2	kultywator o sztywnych zębach z broną rotacyjną, siew	61,3	241
	kultywator o sztywnych zębach z szerokimi gęsiostopkami. brona rotacyjna. siew	69,2	220
	siew w strumień ziemi glebogryzarki lub brony rotacyjnej	71,3	210
3	siew w głębę nieuprawioną	10,9	232

Wyniki zamieszczone w tabeli 5 wskazują, że:

- uprawa tradycyjna charakteryzuje się największym zużyciem energii i najmniejszą wydajnością sezonową,
- w każdym przypadku uprawy bezpłużnej zużycie energii było niższe niż w uprawie tradycyjnej o 29-39 %, a wydajność sezonowa wyższa o 66-91 %,
- przy siewie bezpośrednim występuje minimalne zużycie energii i wysoka wydajność sezonowa.

5.5. Wyniki analizy ekonomicznej eksploatacji agregatów

Analiza wyników badań agregatów [1, 4, 5], ich cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych [2, 3, 6] oraz obserwacje własne pozwalają na sformułowanie niżej podanych wniosków.

1. Uzyskaniu wysokiego plonu nie musi towarzyszyć wysokie zużycie energii, które występuje w uprawie tradycyjnej.
2. Uzasadnione jest stosowanie uproszczeń i modyfikacji w uprawie tradycyjnej, tj.:
 - a) spłylenie orki w wybranych ogniwach zmianowania,
 - b) zastępowanie pługa innymi narzędziami uprawowymi,
 - c) agregatowanie narzędzi uprawowych (agregaty złożone i kombinowane)
3. Stosowanie agregatów do uprawy bezpługowej przynosi pożądane efekty agrotechniczne i ekonomiczne.
4. Agregaty do siewu bezpośredniego pomimo wielu zalet agrotechnicznych i niskiego zużycia energii mają ograniczoną przydatność w warunkach krajowych z uwagi na:
 - a) wysoki koszt agregatów,
 - b) wysoki ogólny koszt uprawy roślin w tym systemie (ochrona roślin itp.).
5. Warunki racjonalnego stosowania agregatów do siewu bezpośredniego:
 - a) ekonomiczne duża powierzchnia uprawy (kilkaset ha rocznie),
 - b) przyrodnicze – gleby żyzne i strukturalne,
 – tereny zagrożone erozją,
 - c) organizacyjne deficyt siły roboczej.

6. PODSUMOWANIE

Dane literaturowe, oferta podaży i obserwacja zmian zachodzących w rolnictwie pozwalają na poniższe uogólnienia.

1. Agregaty mają znaczący udział w unowocześnieniu uprawy roli:
 - a) umożliwiły modyfikację i uproszczenia w uprawie tradycyjnej,
 - b) stanowią podstawę kolejnych systemów, tj. uprawy bezpługowej i siewu bezpośredniego.
2. Tworzenie złożonych i kombinowanych agregatów, przy ich racjonalnym stosowaniu przynosi pożądane efekty uprawowe i ekonomiczne w każdym systemie uprawy.
3. Racjonalny dobór agregatów do uprawy musi uwzględnić szereg czynników, m.in.:
 - a) wielkość powierzchni uprawnej,
 - b) strukturę zasiewów,
 - c) zwięzłość gleby i rzeźbę pola,
 - d) dostępność siły roboczej.
4. Rynek maszyn rolniczych dysponuje bogatą i zróżnicowaną ofertą agregatów, spełniających wymagania agrotechniczne i eksploatacyjne, które można dobrać do określonych warunków gospodarowania.
5. Agregatowanie, to dynamiczny kierunek rozwoju maszyn rolniczych, który w najbliższych latach dostarczy kolejne rozwiązania i udoskonalenia.

LITERATURA

- [1] Gonet Z.: Metoda i niektóre wyniki badań energochłonności systemów uprawy roli. *Fragm. Agron.* 2, 1991.
- [2] Jarmocik E.: Analiza możliwości zmniejszenia nakładów energetycznych na uprawę roli. X Międzynarodowa Konf. Nauk. „Recykulacja w Budowie Maszyn”. ATR Bydgoszcz, 2000.
- [3] Józefowicz J.: Można siać bez orki. *Top Agrar Polska*, 1998.
- [4] Karwowski T.: Energooszczędne technologie w produkcji roślinnej – oczekiwania i rezultaty. Cz. I i II. *Służba Rolna* 9 i 10, 1989.
- [5] Kobylarz J.: Tendencje rozwojowe bezskibowej uprawy gleby. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej* 8, 1994.
- [6] Kuś J.: Optymalizacja uprawy roli. Materiały szkoleniowe 67/98. IUNG Puławy, 1998.
- [7] Przybył J.: Przygotowanie gleby do siewu. *Rolniczy Przegląd Techniczny* 2, 1999.
- [8] Talarczyk W.: Uprawa bezorkowa i siew bezpośredni. *Magazyn targowy. Agrotech* 2000.
- [9] Opracowanie zbiorowe. Wymagania agrotechniczne uprawy, nawożenia i siewu. IBMER, Warszawa 1998.
- [10] Katalogi producentów maszyn rolniczych.

AGRICULTURAL UNITS IN VARIOUS SYSTEMS
OF SOIL CULTIVATION.
PART THREE. EXTENSIVE TILLAGE
AND DIRECT SOWING UNITS

Summary

The paper provides a review of extensive tillage and direct sowing units. The study on their design and functional aspects is shown as is the economic analysis of application of the units in three various systems of soil cultivation. Direct relationship between unit employment and progress in cultivation technology is indicated.

Key words: agricultural units, structure, operation, energy consumption, cost

WPLYW PROCESU MIELENIA MASY MAKULATUROWEJ W MŁYNIIE TARCZOWYM ST300S NA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE PAPIERU W UKŁADZIE RECYRKULACJI

Zbigniew Kikiewicz, Adam Mroziński

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w Bydgoskich Zakładach Papierniczych. Opisano w nim zmiany własności wytrzymałościowych papieru w zależności od ilości cykli i czasu mielenia. Wprowadzono nowy wskaźnik kryterialny, który umożliwia ocenę wykorzystania jednostkowego zużycia energii w zależności od wartości danego parametru. Przeprowadzono analizę i porównania otrzymanych wyników badań z danymi podawanymi w publikacjach zagranicznych.

Słowa kluczowe: młyn tarczowy, mielenie mas makulaturowych, recykulacja, własności papierotwórcze

1. WSTĘP

Czynniki ekonomiczne i ekologiczne sprawiają, że przemysł papierniczy jest zainteresowany wzrostem ilości wykorzystywanej makulatury, tzw. włókien wtórnych. Przyjmuje się, że w 2000 roku ilość makulatury odzyskiwanej dla produkcji papieru powinna ulec zwiększeniu nawet do 50 % i więcej.

Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż surowiec włóknisty w trakcie przerobu na papier poddawany zostaje wielu procesom, m.in. rozwłóknianiu, mieleniu, suszeniu, itp. Procesy te powodują nieodwracalne zmiany w strukturze włókien w postaci ich skracania czy rogowacenia. Wpływają one niekorzystnie na zdolność papierotwórczą mas makulaturowych. Zmiany te nasilają się w zależności od ilości cykli przerobu włókien na papier [1, 6].

Spadek zdolności papierotwórczej mas wtórnych wytwarzanych z makulatury przejawia się podwyższoną smarnością tych mas, obniżonymi własnościami wytrzymałościowymi, pogorszeniem białości lub zwiększoną zawartością zanieczyszczeń, tzw. cętek [6]. Konieczne wydaje się więc optymalizowanie procesów obróbki mas wtórnych oraz dobieranie takich parametrów pracy urządzeń, aby jakość uzyskanej masy włóknistej wykorzystywanej do produkcji papieru była jak najwyższa. W artykule tym skoncentrowano się na mieleniu – procesie, który wpływa na niemal wszystkie parametry gotowego wyrobu oraz charakteryzuje się wysoką energochłonnością.

2. METODYKA BADAŃ

Wyniki prezentowane w niniejszym artykule uzyskano w trakcie badań przeprowadzonych w skali technicznej w Bydgoskich Zakładach Papierniczych. Schemat systemu, w którym przeprowadzano proces technologiczny obróbki masy papierniczo-makulaturowej z umiejscowieniem badanego młyna przedstawiono na rysunku 1.

Opisana instalacja umożliwiała recyrkulacyjne mielenie masy papierniczo-makulaturowej przy założonych stałych parametrach. Były one następujące: natężenie przepływu $Q = 0,6 \text{ m}^3/\text{min}$, stężenie masy $SW = 2,5 \%$ oraz wielkość szczeliny między tarczami młyna $x = 0,12 \text{ mm}$. W trakcie badań poddano obróbce stałą ilość masy $V = 8,4 \text{ m}^3$, znajdującą się w kadzi magazynowej V-30 (5). Stąd pompą masową surowiec był podawany do młyna tarczowego St 300 S (6). Po przejściu przez młyn masa dostarczana była do kadki przelewowej (8). Z kadki przelewowej masa wracała do kadzi magazynowej V-30, zamykając w ten sposób obieg mielenia recyrkulacyjnego. Z niej, co 14 minut, pobierano próbki masy do wykonania arkusików papieru. Wartość czasowa wynika z nastawionego natężenia przepływu masy i jej objętości.

Materiałem poddawany obróbce była masa makulaturowa o następującym składzie:

- 60÷65 % makulatura odmiany 40 (karton, tektura falista),
- 35÷40 % makulatura odmiany 30 (worki celulozowe).

2.1. Metody określania wskaźników kryterialnych

W celu zbadania własności wytrzymałościowych masy papierniczo-makulaturowej uzyskanej po mieleniu sporządzano z niej, w sposób znormalizowany (PN-76/P-50060), arkusiki papieru. Czynności przygotowawcze obejmowały: rozcieńczanie i rozdzielanie, formowanie, suszenie, wycinanie arkusików i klimatyzowanie. Arkusiki formowano na aparacie Rapid-Kothen. Określone parametry otrzymanych arkusików wyznaczano w sposób następujący [5]:

1. Obciążenie zrywające i samozerwalność – parametry te oznaczono wg normy: PN-74/P-50133 za pomocą aparatu Schoppera. Obciążenie zrywające F określano w niutonach wg następującego wzoru:

$$F = \frac{F_1 + \dots + F_n}{n}, \text{ N} \quad (1)$$

gdzie:

- F_1, \dots, F_n – wielkości sił poszczególnych zerwań, N,
 n – liczba wykonanych oznaczeń.

Natomiast samozerwalność S określano w kilometrach, wykorzystując zależność:

$$S = \frac{F \cdot 10^6}{G_r \cdot b \cdot 9,81}, \text{ km} \quad (2)$$

gdzie:

- F – obciążenie zrywające, N,
 b – szerokość próbek równa 15 mm,
 G_r – gramatura, g/m^2 .

2. Bezwzględny opór przedarcia O_b . Wskaźnik ten mierzono wg normy PN-75/P-50131 za pomocą aparatu Elmendorfa. Określano go w miliniutonach wg wzoru:

$$O_b = \frac{a \cdot 16}{n}, \text{ mN} \quad (3)$$

gdzie:

- a – średnia wartość odczytanych wyników z pięciu pomiarów,
 n – liczba arkusików w jednej próbce równa 5.

3. Bezwzględne przepuklenie P_b . Wskaźnik ten mierzono za pomocą aparatu Mullena wg normy PN-75/N-50132. Określano go w kilopaskalach wg wzoru:

$$P_b = \frac{\sum P}{n}, \text{ kPa} \quad (4)$$

gdzie:

$\sum P$ – suma odczytów ze wszystkich n pomiarów. kPa.

4. Podwójne zginanie PZ mierzono na aparacie Schoppera wg PN-73/P-50134. Wyniki podano jako średnią arytmetyczną uzyskanych wartości z dokładnością do 1.

5. Jednostkowe zużycie energii JZE – wskaźnik ten określano wykorzystując zależność:

$$JZE = \frac{N}{Q \cdot SW}, \text{ kWh/Mg} \quad (5)$$

gdzie:

- N – pobór mocy młyna, kW,
 Q – natężenie przepływu równe 0,6, m³/h.
 SW – stężenie masy równe 2,5/100, %.

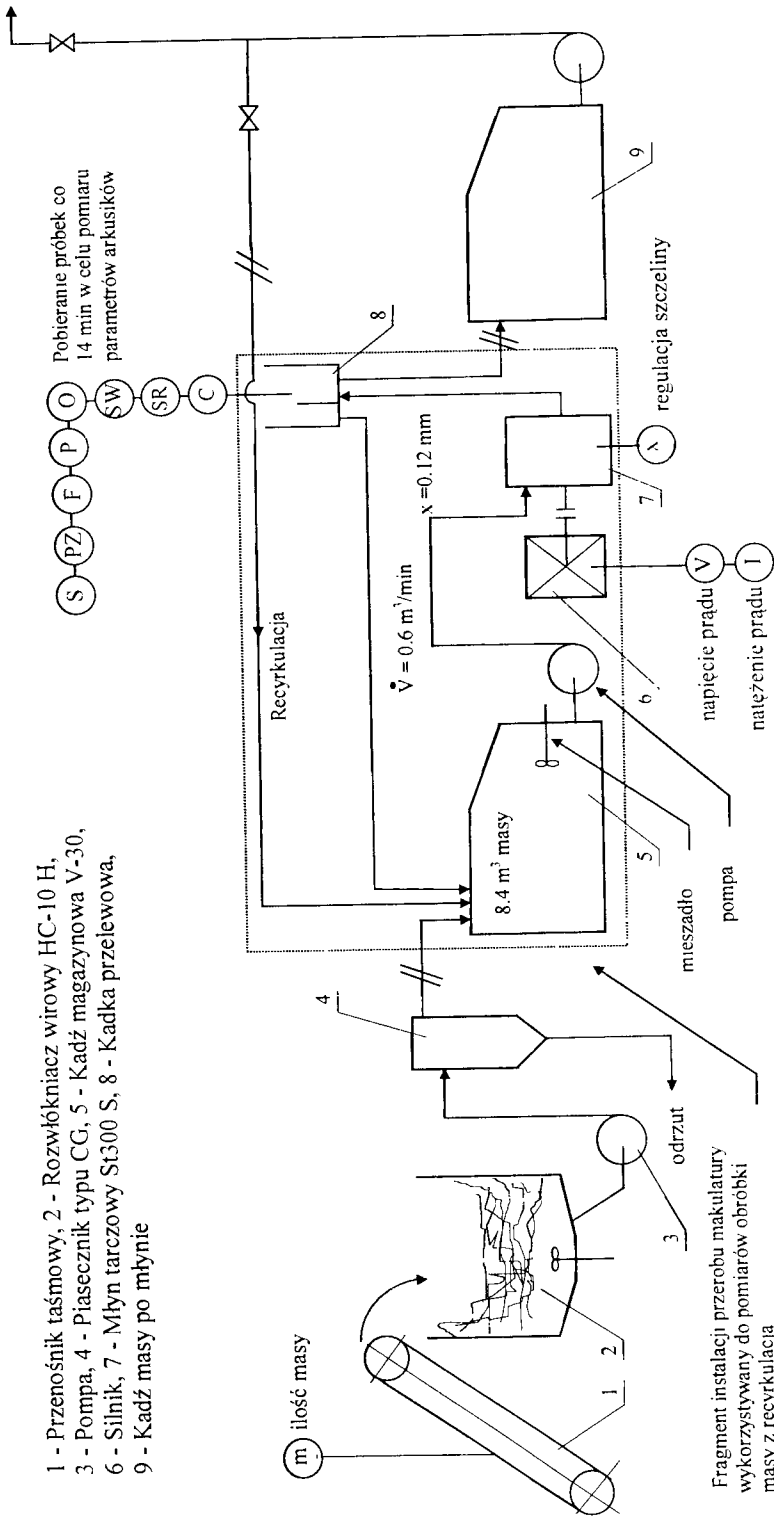
5. Cętkowość C – wskaźnik ten mierzono na znormalizowanym aparacie do oznaczania liczby cętek wg PN-72/P-50160. Liczono cętki o wielkościach określonych w normie przedmiotowej dla danej masy włóknistej, widoczne nieuzbrojonym okiem. Wielkości cętek określano, porównując je z rysunkami modeli cętek. Dokonano ogólnego podziału na cętki małe (0,05÷1,0 mm²) oraz duże (1,0÷4,0 mm²). Liczenie przeprowadzono dla trzech niesuszonych arkusików przygotowanych za pomocą aparatu Rapid-Kothen. Dodawano liczbę cętek po obu stronach arkusików. Cętkowość określano wg następującego wzoru:

$$C = \frac{L_C \cdot k \cdot 1000}{n \cdot G_r} \quad (6)$$

gdzie:

- L_C – liczba cętek (małe plus duże) przypadająca na daną ilość arkusików w stanie mokrym,
 n – liczba arkusików,
 k – stała równa 31,
 G_r – gramatura (g/m²).

6. Smarność SR – określano ją za pomocą aparatu Schoppera-Riegla.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru parametrów masy po młynie dla zmiennego czasu mielenia

7. Ekonomiczny wskaźnik jednostkowego zużycia energii przypadającej na zmianę wartości danego parametru K. Wskaźnik ten wprowadzono w celu określania ekonomiczności zużycia energii na mielenie i zmianę wartości danego parametru w odniesieniu do jego wielkości przed młynem. Określano go wzorem:

$$K = \frac{JZE}{x_1 - x_0} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{Mg} \cdot \text{jednostka danego parametru}} \right) \quad (7)$$

gdzie: x_1 – wartość danego parametru w rozpatrywanym okresie badań, jego jednostka,

x_0 – wartość tego parametru dla masy nie mielonej, jego jednostka.

3. WYNIKI BADAŃ ORAZ ICH ANALIZA

Wyniki pomiarów i obliczeń wyznaczanych parametrów przedstawiono w dwóch zbiorczych tabelach 1 i 2. Tabela 1 dotyczy wyników pomiarów właściwości arkusików uzyskanych podczas badań, natomiast tabela 2 zawiera wyniki obliczeń dla wskaźnika K ekonomicznego zużycia energii na przyrost danego parametru.

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany smarności i liczby podwójnych zgięć w zależności od liczby przerzutów. Na osi odciętych zaznaczono także czas mielenia mierzony od chwili początkowej dla każdego cyklu.

Smarność jest miarą zmielenia masy, dlatego często nazywa się ją stopniem zmielenia, który określa się na podstawie pomiaru szybkości odwadniania się badanej masy. Im krótsze są włókna oraz im bardziej spęczniałe, tym mniejsze będą pory w pilśni z nich utworzonej, a w konsekwencji trudniej będzie się ona odwadniać. Należy jednak stwierdzić, że ten sposób określania stopnia zmielenia nie charakteryzuje w pełni przydatności masy, gdyż smarność jest funkcją zarówno skrócenia włókien, jak i ich hydratacji oraz spęcznienia. Identycznie odwadniać się będzie masa krótkowłóknista („chuda” – o małej hydratacji) oraz smarna masa długowłóknista (silnie spęczniała).

Jak widać z otrzymanej krzywej smarności zwiększanie czasu obróbki mielenia powoduje zdecydowany wzrost tego parametru. Pięcioletni przerzut masy realizowany w zakresie mielenia właściwego – wielkość szczeliny 0,12 mm – spowodował blisko 100 % wzrost smarności (od 33 °SR do 57 °SR). Tak znaczny wzrost smarności jest związany ze zmianami pozostałych własności papieru, takimi jak:

- średnia długość włókien,
- moc wiązań między włóknami,
- przenikalność powietrza,
- skłonność do odkształceń,
- chłonność cieczy,
- objętość właściwa.

Na rysunku 2 zamieszczono także przebieg zmian odporności na zginanie badanych arkusików papieru. Wyniki pomiarów tego wskaźnika wykazywały duży rozrzut. w granicach ± 30 %. Wynika to z niedużej powierzchni (0,12 cm²), która bierze udział w bezpośrednim zginaniu.

Przedstawiona krzywa liczby podwójnych zgięć obrazuje zmianę uzyskanych wartości średnich pomiarów. W czasie badań zarejestrowano wzrost tego parametru wraz ze zwiększaniem się liczby cykli (od 17 do 41). W przypadku badanej masy skrócenie włókien spowodowane mieleniem nie było na tyle duże, aby spowodować spadek tego wskaźnika. Należy przypuszczać, że w miarę dalszego wzrostu czasu mielenia nastąpiłoby nadmierne skracanie włókien, a tym samym zmniejszenie ich wytrzymałości na zginanie.

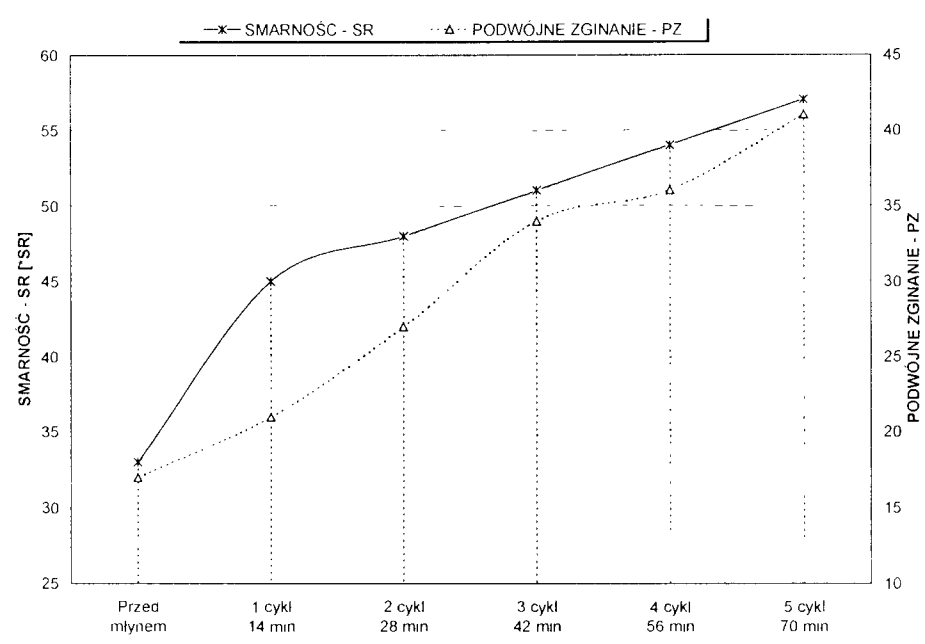
Tabela 1. Zbiorcza tablica wyników pomiarów

Lp.	Czas mielenia	Smarność	Jednostkowe zużycie energii	Stężenie	Własności arkusików						Cętkowość
					Gramatura	Obciążenie zrywające	Samozerwalność	Opór przedarcia	Przepuknienie	Podwójne zginanie	
t	SR	JZE	SW	G	F	S	O _b	P _b	PZ	C	
[min]	[°SR]	[kWh/Mg]	[%]	[g/m ²]	[N]	[km]	[mN]	[kPa]	-	-	
0	33	-	2.5	75	29.8	2.660	70.4	118	17	8542	
1	45	81.6	2.5	73	35.8	3.254	75.2	142	21	7643	
2	48	163.2	2.5	73	36.7	3.336	65.6	157	27	6511	
3	51	244.8	2.5	72	41.0	3.796	64.0	169	34	5740	
4	54	326.4	2.5	72	43.5	4.143	62.4	177	36	5453	
5	57	408.0	2.5	71	45.7	4.352	60.8	182	41	4938	

Tabela 2. Wartości wskaźnika ekonomiczności dla poszczególnych parametrów

Liczba cykli	Zmienne	Wartość wskaźnika ekonomicznego zużycia energii na jednostkowy przyrost danego parametru $K = JZE/(N_0 - N_0)$														
		ZJE		Bezwzględny opór przedarcia		Przepuknienie bezwzględne		Obciążenie zrywające		Smarność		Podwójne zginanie		Liczba cętek		
min.	min.	KWh/Mg	O _b	K _{Ob}	KWh/Mg ⁰ mN	P _b	K _{Pb}	F	N	K _F	SR	K _{SR}	PZ	K _{PZ}	C	K _C
N ₀	~	~	70.4	~	118	~	~	29.8	~	~	33	~	17	~	8542	~
1	14	81.6	75.2	17	142	3.4	35.8	35.8	13.6	45	45	6.8	21	20.4	7643	-0.0907
2	28	163.2	65.6	-34	157	4.184	36.7	36.7	23.652	48	48	10.88	27	16.32	6511	-0.0803
3	42	244.8	64.0	-38.25	169	4.8	41.0	41.0	21.857	51	51	13.6	34	14.4	5740	-0.0873
4	56	326.4	62.4	-40.8	177	5.532	43.5	43.5	23.824	54	54	15.542	36	17.17	5453	-0.1056
5	70	408	60.8	-42.5	182	6.375	45.7	45.7	25.660	57	57	17	41	17	4938	-0.1132

AN – zmiana wartości danego parametru w odniesieniu do jego wartości przed mlynem



Rys. 2. Zmiana smarności i liczby podwójnych zgięć w zależności od czasu mielenia

Na rysunku 3 zamieszczono zmiany bezwzględnego przepuklenia i obciążenia zrywającego w zależności od liczby przerzutów. Wskaźnik odporności wytworu papierniczego na przepuklenie daje możliwość oceny przydatności wytworu i jego zachowania się przy działaniu sił prostopadłych do powierzchni. Wartość przepuklenia zależy od elastyczności włókien znajdujących się w wytworze, długości włókien (jest proporcjonalna do długości) i stopnia powiązania włókien między sobą. Obciążenie zrywające określa siłę potrzebną do zerwania próbki papieru. Ponieważ siła ta zależna jest od gramatury wytworu oraz szerokości paska często w takim przypadku podaje się wskaźnik samozerwalności.

Według Carsona, zależność pomiędzy wytrzymałością na przepuklenie a siłą zrywającą można określić wzorem:

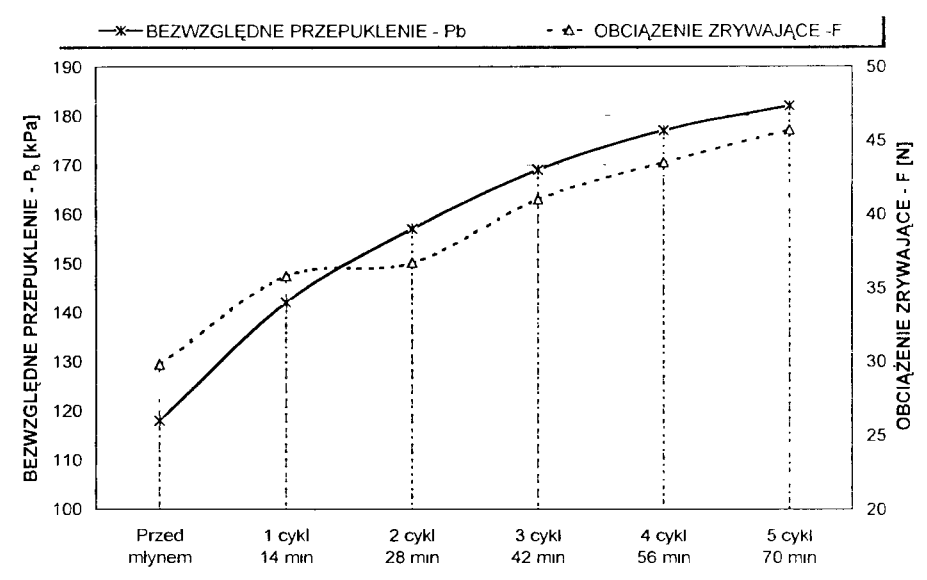
$$P \cdot r = 2 \cdot F \cdot k \quad (8)$$

gdzie:

- P przepuklenie, kPa,
- r promień krzywizny wytworu w momencie jego przzerwania, cm,
- F siła zrywająca w kierunku podłużnym na cm szerokości, N,
- k współczynnik rodzaju obrabianej masy.

Obie te własności osiągają tym wyższe wartości, im lepsze są warunki do wiązania się włókien. Na obciążenie zrywające (a zatem także i samozerwalność) największy wpływ mają długość włókien oraz ilość i moc wiązań pomiędzy nimi. W związku z tym duży wpływ ma tu fibrylacja wewnętrzna włókien, powodująca ich plastyfikację. Ważne jest także zwiększanie za pomocą mielenia powierzchni właściwej włókien, znajdującej się w optycznym styku. Przyjmuje się ją bowiem za miarę ilości wiązań. Wskutek

mielenia powierzchnia styku wzrasta od 30 do 75 % (w zależności od smerności masy), co daje zmianę samozerwalności wynoszącą niekiedy 100 %.

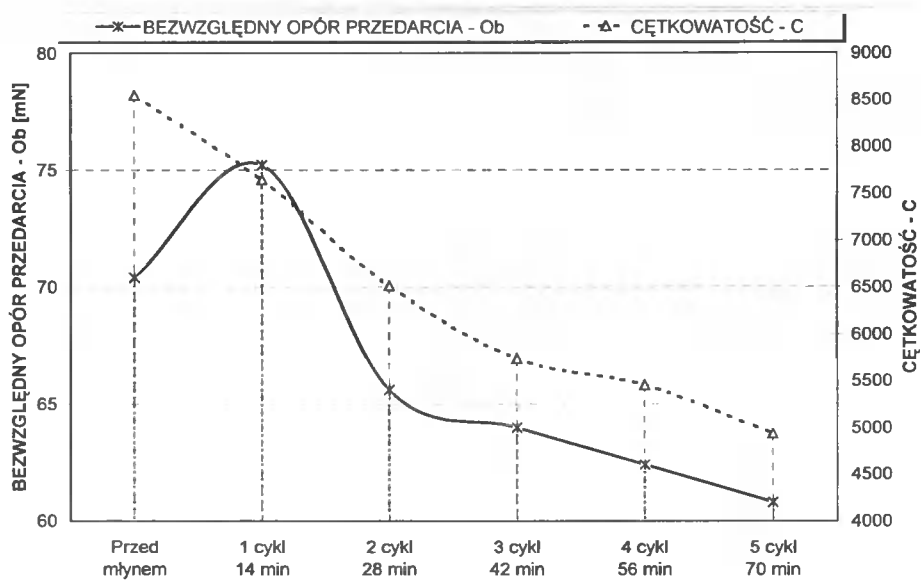


Rys. 3. Zmiana bezwzględnego przepuklenia i obciążenia zrywającego w zależności od czasu mielenia

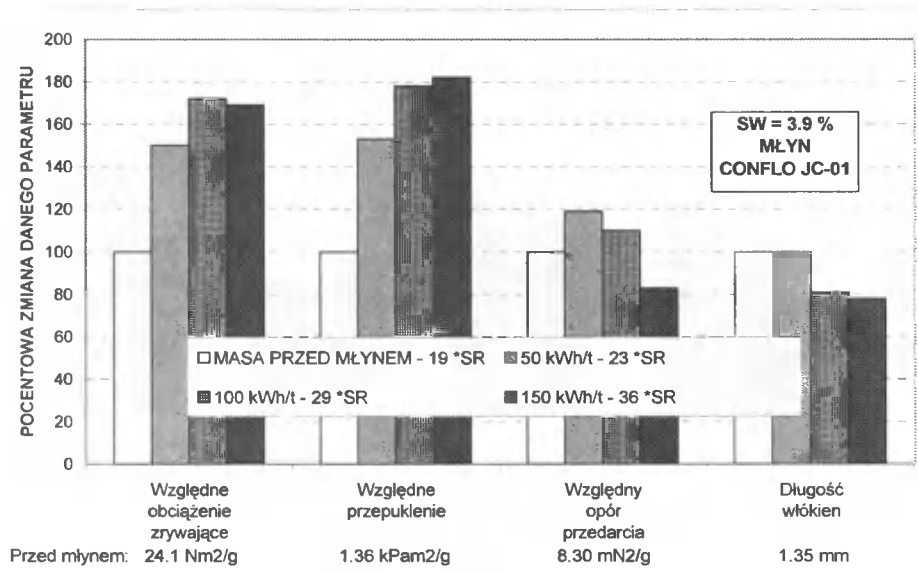
Otrzymane wyniki pomiarów potwierdzają powyższe prawidłowości i zależności. Przeprowadzone badania wykazały, że te dwie statyczne własności wytrzymałościowe wykazują wraz ze wzrostem czasu mielenia ten sam jakościowy kierunek zmian. Wskaźniki te rosły w kolejnych cyklach recyrkulacyjnych.

Należy jednak zaznaczyć, że intensywne skracanie włókien, do którego doszłoby po bardziej długotrwałym mieleniu i mniejszej szczelinie, wpłynęłoby ujemnie na oba parametry.

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę bezwzględnego oporu przedarcia i liczby cętek w zależności od liczby przerzutów mielonej masy. Opór przedarcia zależy w dużym stopniu od długości włókien, ich powiązania oraz pierwiastka kwadratowego z sześciastu ich długości. Podczas mielenia masy makulaturowej zaobserwowano – w początkowym okresie – duży wzrost wytrzymałości na przedarcie, spowodowany wzrostem powierzchni wiązania (fibrylacja zewnętrzna). Dalsze jednak mielenie powoduje szybki spadek tego wskaźnika spowodowany obniżeniem wytrzymałości włókien oraz ich skróceniem.



Rys. 4. Zmiana bezwzględnego oporu przedarcia i cętkowości w zależności od czasu mielenia



Rys. 5. Procentowe zmiany niektórych własności wytrzymałościowych papieru w zależności od jednostkowego zużycia energii i cykli mielenia [4]

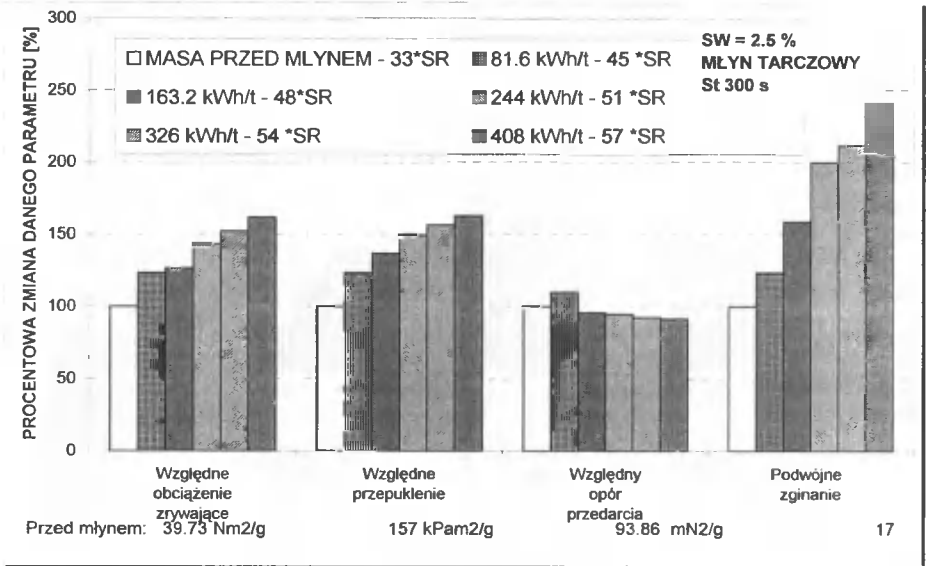
Otrzymane wyniki warto porównać z innymi badaniami dotyczącymi mielenia recykulacyjnego masy wtórnej. Wybrano podobny przebieg eksperymentu realizowanego także w skali przemysłowej przez Lumiaienena [4]. Obiektem badań był młyn Conflo JC-01.

Na rysunku 5 zaprezentowano uzyskane w tych badaniach wyniki. Przedstawiony wykres słupkowy ilustruje mielenie recyrkulacyjne masy o stężeniu 3.9 %. Wartość danego parametru dla masy przed młynem oznaczano jako 100 %. Dla każdego z trzech cykli określono jednostkowe zużycie energii (pomiar co 50 kWh/Mg) i smarność. Dla wszystkich parametrów podano wartość względną, a więc odniesioną do gramatury badanej masy włóknistej (wartość względna = wartość bezwzględna x 100/G_r).

W celu ułatwienia porównywania niektóre wyniki własne przedstawiono na rysunku 6 w identycznej formie, jak na rysunku 5. Jak widać, mimo różnych zakresów stężeń, smarności masy i różnych młynów w obu przypadkach uzyskano podobną charakterystykę zmiany wyróżnionych parametrów.

W obu badaniach zanotowano tendencję wzrostową względnego przepuklenia i obciążenia zrywającego wraz ze wzrostem stopnia zmielenia. Uzyskano także charakterystyczny początkowy wzrost względnego oporu przedarcia, a następnie jego spadek.

Ponieważ proces mielenia charakteryzuje się znaczną energochłonnością, zagadnienie ograniczania zużycia energii w trakcie tej obróbki jest niezmiernie istotne. Konieczne wydaje się określenie, w jakim stopniu zużyta na mielenie energia zmienia wartość danego parametru w odniesieniu do jego wartości przed młynem. Wprowadzony w tym celu wskaźnik energochłonności procesu mielenia K informuje nas o tym jaka wartość jednostkowego zużycia energii przypada na przyrost wartości danego parametru. Uzyskane wartości z obliczeń wskaźnika K przedstawiono w tabeli 2. Graficznie wyniki te zilustrowano na rysunku 7.



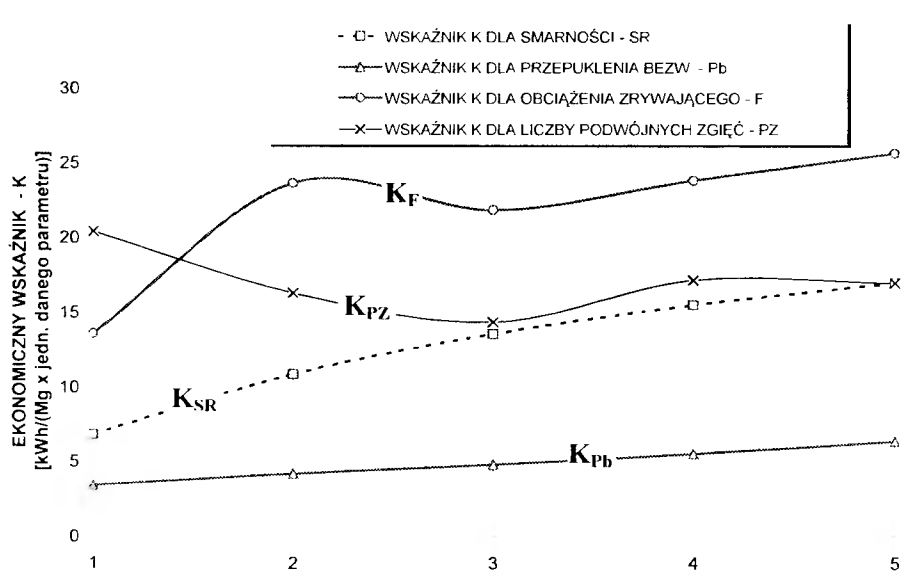
Rys. 6. Zmiany niektórych parametrów wytrzymałościowych w zależności od jednostkowego zużycia energii na każdy cykl mielenia uzyskane podczas badań własnych

Wprowadzony wskaźnik dotyczy bardzo złożonego zagadnienia, a mianowicie stosunku dwóch przyrostów: przyrostu JZE i przyrostu danego parametru. Interpretację zmian wprowadzonego przez autorów wskaźnika K dla określonego parametru ograni-

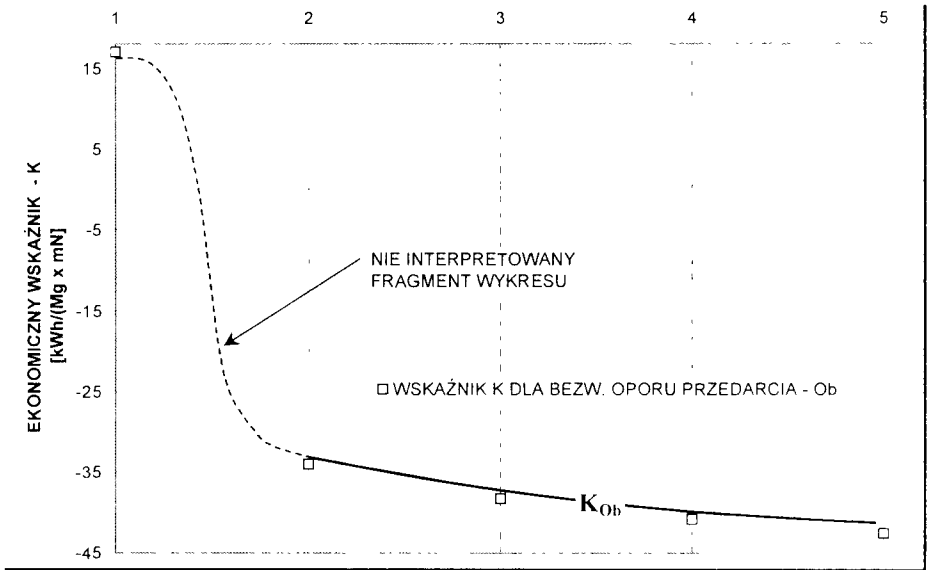
czono do następujących założeń. Może on przyjmować wartości dodatnie i ujemne. Jeżeli otrzymujemy wartości ujemne oznacza to, że dany parametr osiągał wartości mniejsze w porównaniu do masy przed młynem. Oczywiście dla większości parametrów ujemna wartość wskaźnika K jest zdecydowanie niepożądana – zachodzi pogarszanie się jakości masy. Wyjątkiem jest, np. liczba cętek, którą chcemy przecież zmniejszyć. Przed analizą danej krzywej należy więc przyjąć, jaka jej zmiana jest dla nas korzystna z punktu widzenia jakości papieru. Wartość dodatnia badanego wskaźnika informuje nas o tym, że jesteśmy w zakresie wyższym niż masa przed młynem.

Spadek wartości wskaźnika K świadczy o tym, że JZE jest wykorzystywane efektywnie. Danemu JZE w określonym czasie mielenia odpowiada wtedy duży przyrost badanego parametru w odniesieniu do wartości przed młynem. W przypadku wzrostu wskaźnika K możemy mówić o nieefektywnym zużywaniu energii w danym przedziale mielenia recyrkulacyjnego. Analizę zmian wskaźnika K należy rozpatrywać oddzielnie dla wartości ujemnych oraz wartości dodatnich danej krzywej.

Biorąc pod uwagę jako pierwszy parametr smarność widzimy, że badany wskaźnik K jest dodatni i rośnie w kolejnych cyklach mielenia. Można powiedzieć, że dla tego parametru zwiększanie ilości cykli mielenia będzie nam podnosiło ten parametr, jednak efektywność energetyczna tego procesu będzie coraz mniejsza. Podobna sytuacja zachodzi w przypadku przepuklenia.



Rys. 7. Zmiany ekonomicznego wskaźnika K w zależności od liczby cykli mielenia dla różnych parametrów

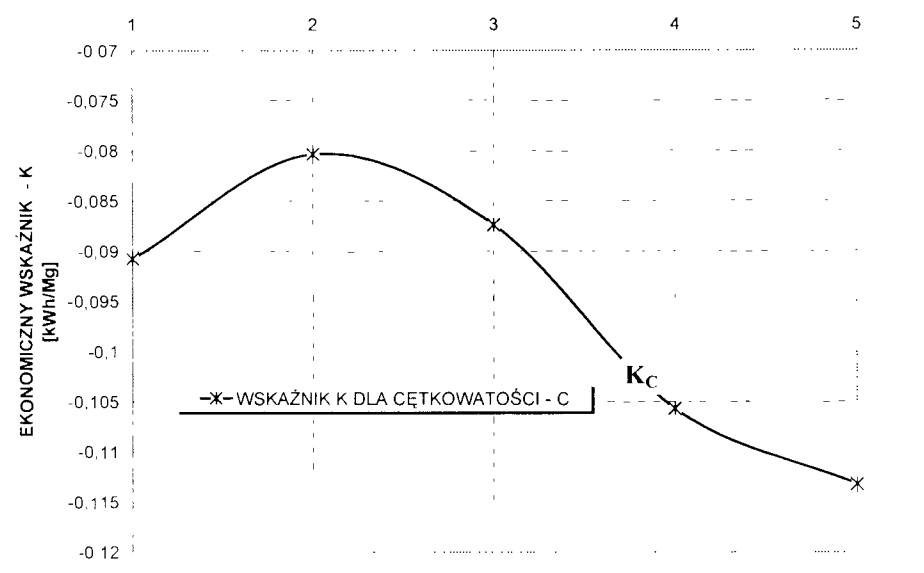


Rys. 8. Zmiany ekonomicznego wskaźnika K w zależności od liczby cykli mielenia dla bezwzględnego oporu przedarcia

Dla dwóch innych parametrów: podwójnego zginania i obciążenia zrywającego generalnie obserwowano wzrost wskaźnika K. Wyjątkiem była tutaj jego wartość dla liczby podwójnych zgięć między 1. a 3. cyklem (zakres efektywnego mielenia) oraz dla obciążenia zrywającego między 2. a 3. cyklem. W wymienionych zakresach czasu mielenia jednostkowe zużycie energii było wykorzystywane bardziej efektywnie.

W przypadku bezwzględnego oporu przedarcia wskaźnik K osiąga wartości dodatnie i ujemne. Wynika to z faktu, że od drugiego cyklu parametr ten zaczął spadać nawet poniżej wartości przed młynem. W tym układzie spadek wskaźnika K (rys. 8) w ujemnym zakresie jego wartości oznacza wykorzystywanie JZE na intensywne obniżanie tego parametru.

Dla cętkowości otrzymano wartości K mniejsze od zera. Wskutek mielenia ilość cętek zmniejszyła się poniżej wartości występującej przed młynem. Zmiany wartości wskaźnika w ujemnym zakresie interpretujemy inaczej niż w dodatnim. Tutaj zbliżanie się krzywej K_C do osi OX oznacza wzrost ekonomiczności mielenia przez zużywanie energii na zmniejszanie ilości cętek. Od drugiego cyklu krzywa K_C oddala się od osi OX , osiągając coraz niższe wartości ujemne. W zakresie tym występowała więc coraz niższa ekonomiczność energetyczna pracy młyna biorąc pod uwagę usuwanie cętek z masy.



Rys. 9. Zmiany ekonomicznego wskaźnika K w zależności od liczby cykli mielenia dla cętkowatości

4. PODSUMOWANIE

Opisane powyżej zagadnienia stanowią próbę nowego ujęcia złożonego problemu technicznego, jakim jest mielenie masy włóknistej. Zaprezentowane wyniki badań są związane z poszukiwaniem nowych dróg zmierzających do zmniejszenia zużycia energii w wysoce energetycznym procesie mielenia mas papierniczych. O ich ważności przekonuje fakt, że tylko około 1 % energii dostarczanej do obecnych urządzeń mielących zużywany jest na efektywną deformację i rozdrabnianie włókien.

Przeprowadzone badania umożliwiły określenie zmian parametrów wytrzymałościowych, zachodzących podczas mielenia recykulacyjnego masy. W zakresie przeprowadzonego czasu mielenia generalnie zarejestrowano wzrost podstawowych parametrów wytrzymałościowych papieru, tzn. samozerwalności, przepuklenia i liczby podwójnych zgięć. Nie zanotowano typowego spadku tych parametrów po długotrwałym mieleniu - stosowano w czasie badań pięć cykli mielenia. Wynika to z faktu, że dla badanej masy i danego typu młyna zjawisko to następuje po jeszcze dłuższym czasie mielenia masy wtórnej niż ten, który stosowano podczas badań. Pozostałe parametry, a więc smarność, opór przedarcia i cętkowatość wykazywały typowy dla tych wielkości przebieg.

Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, iż obliczony wskaźnik JZE był stosunkowo wysoki. Jego wartość wahała się od 150 do 408 kWh/Mg. Należy to tłumaczyć rodzajem obrabianej makulatury, jak również stosowanym typem młyna. Zasadnym wydaje się więc przeprowadzenie modernizacji konstrukcji młyna.

Wprowadzony ekonomiczny wskaźnik JZE umożliwił ocenę efektywności zużycia energii w czasie mielenia badanej masy. Uzyskane zmiany wskaźnika – w zależności od

czasu mielenia – umożliwiając ocenę zależności jednostkowego zużycia energii od zmiany poszczególnych własności papierotwórczych mielonej masy wtórnej.

LITERATURA

- [1] Kikiewicz Z.: Urządzenia do obróbki i oczyszczania mas włóknistych. Wyd. Uczeln. ATR, Bydgoszcz 1980.
- [2] Kikiewicz Z., Mroziński A.: Próba optymalizacji cyklu życia masy papierniczomakulaturowej. VIII International Conference on Machinery Recycling, Bydgoszcz 1998.
- [3] Kikiewicz Z., Mroziński A.: Estymacja mocy zużywanej na rafinację w młynach tarczowych. VII International Conference on Machinery Recycling, Bydgoszcz 1997.
- [4] Lumiainen J.: Refining – a key to upgrading the papermaking potential of recycled fibre. Paper Technology 7 (35), 1994.
- [5] Modrzejewski K., Olszewski J., Rutkowski J.: Metody badań w przemyśle celulozowo-papierniczym. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 1985.
- [6] Przybysz K.: Rola frakcji drobnej w kształtowaniu zdolności papierotwórczej mas makulaturowych. Konferencja Naukowo-Techniczna INPAP'97. Sulejów, 18-20 czerwca 1999.

IMPACT OF WASTEPAPER PULP BEATING PROCESS IN THE ST 300S DISC REFINER ON THE PROPERTIES OF PAPER IN RECYCLING SYSTEM

Summary

The paper presents the results of investigations carried out in the paper mill 'Bydgoskie Zakłady Papiernicze'. It describes changes of strength properties of paper depending on the number of cycles and beating time. The new criterion index was introduced, enabling to evaluate the utilisation of power consumption per unit depending on the change in parameter value. The analysis and comparison of the results obtained with data provided in foreign publications were carried out.

Key words: disc refiner, beating of wastepaper pulp, recycling, and strength properties of paper

ANALIZA ZUŻYCIA OSTRZA I TRWAŁOŚCI NARZĘDZI Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH. CZ. I. ANALIZA OBRAZÓW ZUŻYCIA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH

Tadeusz Mikołajczyk¹, Krzysztof Nowicki²

¹Katedra Inżynierii Produkcji

²Katedra Sterowania i Konstrukcji

Wydział Mechaniczny ATR

ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Opisano zaprojektowany i zbudowany układ pomiarowy służący do komputerowej analizy obrazu zużycia narzędzia. Omówiono zastosowaną sztuczną sieć neuronową oraz program do jej symulacji. Zaprezentowano sposób wyznaczania wskaźnika zużycia narzędzia w opierając się na analizie obrazu oraz przedstawiono ocenę błędów uzyskiwanych wyników.

Słowa kluczowe: analiza obrazu, zużycie narzędzi, sieci neuronowe

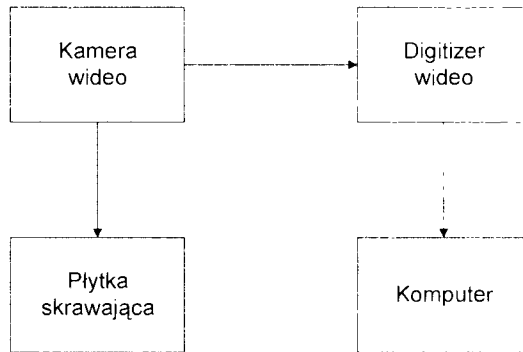
1. WSTĘP

W wielu badaniach eksperymentalnych odrzuca się możliwość zastosowania analizy obrazu ze względu na małą wydajność klasycznych metod przetwarzania tego rodzaju danych. Duże nadzieje wiąże się z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji, a wśród nich – sieci neuronowych [3, 6], których zastosowanie opiera się na naturalnej nadmiarowości danych zawartych w obrazie. Dzięki możliwości przetwarzania równoległego, zdolności automatycznej adaptacji do nowych warunków pracy, małej wrażliwości na szum oraz odporności na uszkodzenia wydają się one być obiecującym kierunkiem poszukiwań nowych metod analizy obrazu.

W opracowaniu tym wykorzystano system przeznaczony do analizy obrazu zużycia narzędzia oraz bazujący na nienadzorowanej sieci neuronowej SCBC [2]. Celem jego działania jest automatyczne wyznaczanie wskaźnika zużycia, który może być następnie wykorzystany do prognozowania czasu życia narzędzi skrawających. O dużych możliwościach wykonywania pomiaru zużycia narzędzi przekonują prace [1, 6], wykorzystujące zarówno algorytmy klasyczne [1], jak i sztuczne sieci neuronowe [6].

2. BUDOWA UKŁADU POMIAROWEGO

Obraz płytki rejestrowano za pomocą kamery CCD-FS-5612p. w rozdzielczości 684x512 punktów (S-VHS PAL, bez overscanu) i digitalizowano z wykorzystaniem karty Aver z modulem kompresji Aver Compression, a następnie zapisywano w formacie BMP z wykorzystaniem 256 stopniowej skali szarości. Analizę obrazu wykonano na komputerze IBM PC 486DX4 100MHz. Wykorzystano samodzielnie opracowane oprogramowanie, symulujące działanie sieci neuronowej SCBC. Do prób skrawania zastosowano zmodyfikowaną tokarkę uniwersalną SNB400 (produkcji rumuńskiej), którą wyposażono w układ płynnej regulacji prędkości obrotowej wrzeciona z wykorzystaniem falownika TPC 60.



Rys.1. Budowa układu pomiarowego

3. SIEĆ NEURONOWA SCBC

W pracy wykorzystano sztuczną sieć neuronową uczoną bez nadzoru. Wykrywanie obszaru zużycia przeprowadzono poprzez klasyfikowanie punktów obrazu ostrza narzędzia do kategorii normalnej (punkty znajdujące się poza obszarem zużycia) oraz błędnej (punkty leżące w obrębie obszaru zużycia). Klasyfikacja odbywała się wyłącznie w oparciu o znajomość kategorii normalnej. Działająca w ten sposób sieć neuronowa nosi nazwę SCBC – Single Category Based Classifier [2].

Rozpoznawanie kategorii informacji w sieci SCBC przeprowadzane jest poprzez klasyfikację wektora $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$, zawierającego informacje o jasności pojedynczego wiersza punktów obrazu, do jednej z dwóch możliwych kategorii. Pierwsza z nich zdefiniowana jest w sieci przez wektor współczynników wagowych $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$. Klasyfikacji dokonuje się poprzez pomiar podobieństwa jasności każdego punktu s_i do wielkości prototypowej w_i , bazując na wielkości porównawczej φ_i zdefiniowanej jako:

$$\varphi_i = \frac{[s_i - w_i]^2}{w_i^2} \quad (1)$$

gdzie:

s_i – sygnał klasyfikowany jako normalny, jeżeli φ_i jest mniejsze lub równe progowi h .

$$\begin{cases} \text{gdy } \varphi_i \leq h, \text{ wtedy } f_i = 0 \\ \text{w pozostałych przypadkach } f_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

f_i – jest binarną reprezentacją relacji pomiędzy s_i a progiem h określonym jako:

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[\max(s_i) - \mu_i]^2}{\mu_i^2} \quad (3)$$

gdzie:

$\max(s_i)$ – jest maksymalną jasnością w i -tej kolumnie pikseli w wierszach należących do grupy przykładów ze zbioru uczącego,

μ_i – jest średnią wartością jasności w i -tej kolumnie pikseli w wierszach należących do grupy przykładów treningowych, zdefiniowaną jako:

$$\mu_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \quad (4)$$

gdzie:

k – ilość wierszy pikseli należących do grupy przykładów treningowych.

Po sklasyfikowaniu jasności punktów pojedynczego wiersza obrazu, są one reprezentowane jako binarny wektor $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$, a następnie dalej przetwarzane poprzez głosowanie. Dla każdej wartości f_i sprawdzano warunek:

$$\begin{cases} \text{gdy } \frac{1}{2m+1} \sum_{i=1-m}^{i+m} f_i \leq 0,5, \text{ wtedy } f_i = 0 \\ \text{w przypadku przeciwnym } f_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

m – liczba wielkości f_i poprzedzających i następujących po badanej wielkości, biorących udział w głosowaniu (sąsiedztwo).

W wyniku zastosowania zależności (5) określano, że jeżeli co najmniej 50 % punktów otaczających badany punkt obrazu (w ramach pojedynczego wiersza), w odległości zdefiniowanej przez sąsiedztwo, należało do kategorii normalnej, to badany punkt również do niej należy. Ewentualna zmiana przyporządkowania punktu do określonej kategorii była wykonywana dopiero po dokonaniu oceny wszystkich wartości wektora F . Po wykonaniu klasyfikacji wszystkich wektorów pomiarowych, wektor prototypowy W jest aktualizowany w SCBC, tak aby zaadaptować go do zmiennych warunków oświetlenia (w ramach pojedynczego obrazu) i błędów wynikających z zakłóceń lub niedoskonałości układu odczytującego obraz. Wykonywane jest to w niżej opisanym sposób.

Niech w_1 reprezentuje prototypową wartość, która jest aktualizowana, a w_i pozostałe wartości prototypowe. Algorytm adaptacyjny modyfikuje wartość prototypową w_1 z zachowaniem następującej relacji:

$$w_1 = w_1 + \delta w_1 \quad (6)$$

$$\delta w_1 = \begin{cases} \eta \Lambda[s_1 - w_1], & \text{jeśli } f_1 = 0 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

η – określa szybkość uczenia sieci neuronowej.

Sieć neuronowa SCBC wspomaga tłumienie szumu poprzez operację podnoszenia kontrastu w wielkościach wejściowych. Adaptacja wartości prototypowych prowadzi do powiększenia jednorodności klasyfikacji pomiędzy poszczególnymi wierszami obrazu. W przypadku, gdy większość wielkości mierzonych sklasyfikowano w grupie normalnych – bazując na tej własności sieci – wówczas wartości prototypowe odpowiadające pomiarom sklasyfikowanym jako błędne są tak adaptowane, że prawdopodobieństwo sklasyfikowania wszystkich sygnałów jako normalnych wzrasta dla identycznych sygnałów. Procedura powiększania kontrastu sygnałów ma postać:

$$w_i = w_i + \delta w_i \quad \text{dla } i \text{ z przedziału } \langle I - m, I + m \rangle \text{ oraz } i \neq I \quad (8)$$

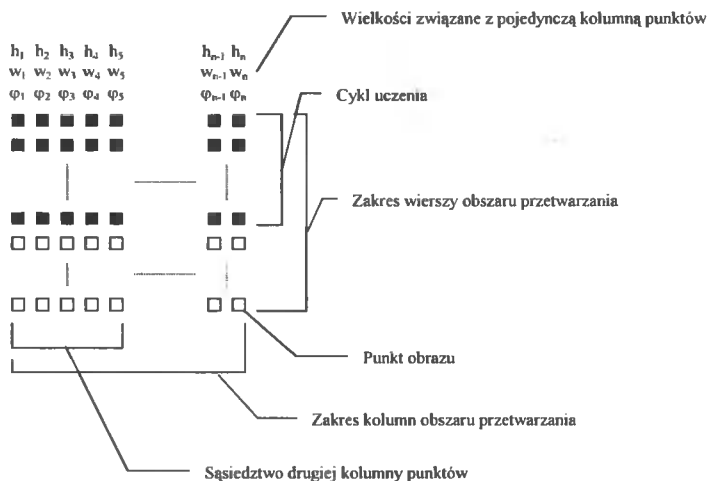
$$\delta w_i = \begin{cases} \eta \Lambda[s_i - w_i], & \text{jeśli } f_i = 0 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (9)$$

gdzie:

- m – ilość wielkości w_i poprzedzających i następujących po prototypie w_i biorących udział w adaptacji (sąsiedztwo),
- A – funkcja sąsiedztwa A , która wyznacza wartości pomiędzy 0 a 1; wartość 0 jest wykorzystywana w przypadku braku szumu, podczas gdy 1 – dla niepewnych wartości s_i ; w praktyce nie przekracza 0,5.

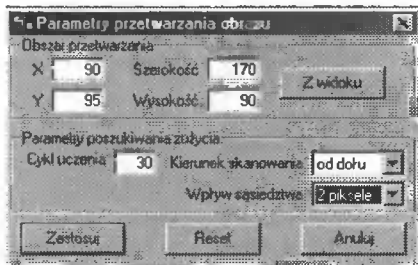
W algorytmie uczenia (równania 6 i 7) I zmienia się kolejno od 1 do n , w celu adaptacji wszystkich wartości prototypowych w_i . Dla każdego I sąsiednie wartości w_i są adaptowane z wykorzystaniem równań 8 i 9.

Algorytm adaptacyjny zaprezentowany w równaniach 6 do 9 pozwala na ciągłą aktualizację i utrzymywanie możliwie najlepszego wektora prototypowego. W sytuacji idealnej adaptacja powinna być wykonywana z wykorzystaniem wszystkich przeszłych wektorów pomiarowych. Wraz z analizą kolejnych wierszy obrazu liczba wektorów pomiarowych wzrasta, co prowadzi do wydłużenia czasu obliczeń (czasu treningu sieci). Zastosowano więc rozwiązanie, w którym wykorzystuje się m pierwszych linii obrazu (cykl uczenia). Graficzną reprezentację wszystkich opisywanych parametrów procesu przetwarzania obrazu ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Parametry przetwarzania obrazu

Program umożliwia ponadto zdefiniowanie parametrów nie wynikających z zastosowanego algorytmu, a jedynie rozszerzających zakres jego zastosowań. Umożliwiają one wybór obszaru analizy oraz określają kierunek przetwarzania danych w obrazie. Wybrany kierunek skanowania „od góry” informuje, że badano kolejne wiersze pikseli w obrębie obszaru przetwarzania, rozpoczynając od najwyższego wiersza z wybranego zakresu. Wiersze cyklu treningowego znajdują się również u góry.



Rys. 3. Definiowanie parametrów analizy obrazu w programie komputerowym

4. METODA WYKONANIA BADAŃ

Wykorzystano płytki skrawające wykonane z węgla spiekane należące do grupy S20. Geometrię ostrza opisują następujące parametry: $\alpha_n = 6^\circ$, $\gamma_n = -6^\circ$, $\lambda_s = -6^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\epsilon_r = 90^\circ$, $r_g = 0,4$ mm. Podczas badań wykorzystano następujące parametry skrawania: szybkość skrawania 220 m/min, posuw 0,067 mm/obr, głębokość skrawania 0,6 mm. Skrawano stal 45 o średnicy 120 mm. Przed rozpoczęciem procesu skrawania obraz płytki digitalizowano. Przeprowadzono skrawanie w czasie 1 lub 2 minut w zależności od aktualnego czasu pracy narzędzia (między 1 a 4 minutą pracy – skrawano 1 minutę, między 4 i 12 minutą skrawano 2 minuty, od 12 minuty – skrawano 1 minutę).

Po zakończeniu każdego cyklu skrawania płytka skrawająca była wymontowywana z uchwytu i przenoszona na stanowisko obróbki obrazu. Dokonywano na nim digitalizacji obrazu powierzchni przyłożenia i natarcia płytki. Uzyskany plik graficzny był następnie zapisywany na twardy dysk komputera. Równolegle odczytywano wartość wskaźnika zużycia VB_B .

Zakończenie cyklu pomiaru następowało po osiągnięciu przez wskaźnik zużycia ostrza VB_B wartości 0.4 mm. W ten sposób przebadano trzy płytki skrawające.

5. ANALIZA OBRAZU

Po zakończeniu badań obrazy zostały poddane analizie z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej opracowanym programem Neural Wear. Analiza obrazu zużycia ostrza narzędzia skrawającego polegała na odszukiwaniu w nim pikseli, które znajdują się w obszarze zużycia i określeniu ich całkowitej liczby. W tym celu każdy z obrazów powierzchni przyłożenia ostrza skrawającego został poddany obróbce, w czasie której:

1. Określono położenie i rozmiar obszaru przetwarzania obrazu (w zależności od położenia obszaru zużycia), ilość wierszy cyklu treningowego (zawsze 50), sąsiedztwo (2) oraz kierunek skanowania (od góry).
2. Dla każdej kolumny pikseli na szerokości obszaru przetwarzania i długości cyklu uczenia określano próg jasności obrazu h według zależności (3).
3. Przyjęto wartość wag początkowych w w sieci SCBC równą wartości maksymalnej jasności piksela znajdującego się w obszarze treningowym.
4. Dla wszystkich pikseli w pojedynczym wierszu pikseli określono wielkość porównawczą ϕ , z równania (1).
5. Sprawdzano warunek (2).
6. Wykonywano adaptację wartości wag w_i dla tych kolumn pikseli, w których nie wykryto zużycia narzędzia według zależności (6 i 7), przyjmując η szybkość uczenia sieci neuronowej 0.1.
7. Wykonywano adaptację wartości wag w , dla kolumn sąsiednich w stosunku do kolumn, w których nie wykryto punktu obrazu należącego do obszaru zużycia narzędzia według zależności (8 i 9), przyjmując: Λ wartość funkcji sąsiedztwa 0.5. Zakres kolumn objętych uaktualnianiem wag określono na 2. Przyjęta wartość oznacza, że aktualizowane są wartości wag dwóch kolumn znajdujących się po prawej i dwóch po lewej stronie kolumny, w której nie wykryto piksela należącego do obszaru zużycia.
8. Na etapie końcowym dokonywano ostatecznego przyporządkowania punktu do obszaru zużytego lub nieużytego. Dla każdego piksela w wierszu sprawdzano do której z kategorii przyporządkowano piksele z kolumn sąsiednich (sąsiedztwo kolumn określono jak w punkcie poprzednim). Jeżeli więcej niż 50 % pikseli z tych kolumn było przyporządkowanych do obszaru zużycia, to badany punkt obrazu był również do niego przyporządkowywany.

6. WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki badań uzyskane dla pierwszego ostrza poddawanego analizie przedstawiono w tabeli 1. Przykładowy obraz zużycia ostrza po 16 minutach pracy przed i po analizie programem NeuralWear zaprezentowano na rysunku 4.

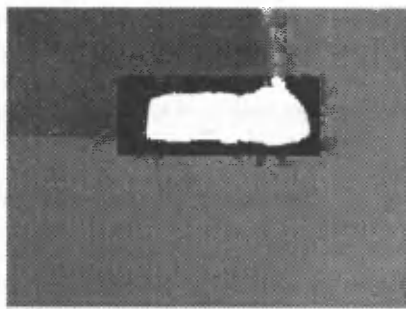
Tabela 1. Wyniki analizy obrazu zużycia narzędzia skrawającego (ostrze nr 1)

Lp.	Numer ostrza	Czas życia [min]	VB_B [mm]	Obszar zużycia [liczba punktów]
1	1	1,00	0,182	7369
2	1	2,00	0,224	13225
3	1	3,00	0,252	13409
4	1	4,00	0,266	14100
5	1	5,00	0,280	15321
6	1	6,00	0,287	15674
7	1	7,00	0,308	16691
8	1	8,00	0,322	17954
9	1	9,00	0,336	17264
10	1	10,00	0,343	17341
11	1	11,00	0,350	17500
12	1	12,00	0,364	19229
13	1	13,00	0,371	21548
14	1	14,00	0,378	22971
15	1	15,00	0,392	22553
16	1	16,00	0,406	24373

a)

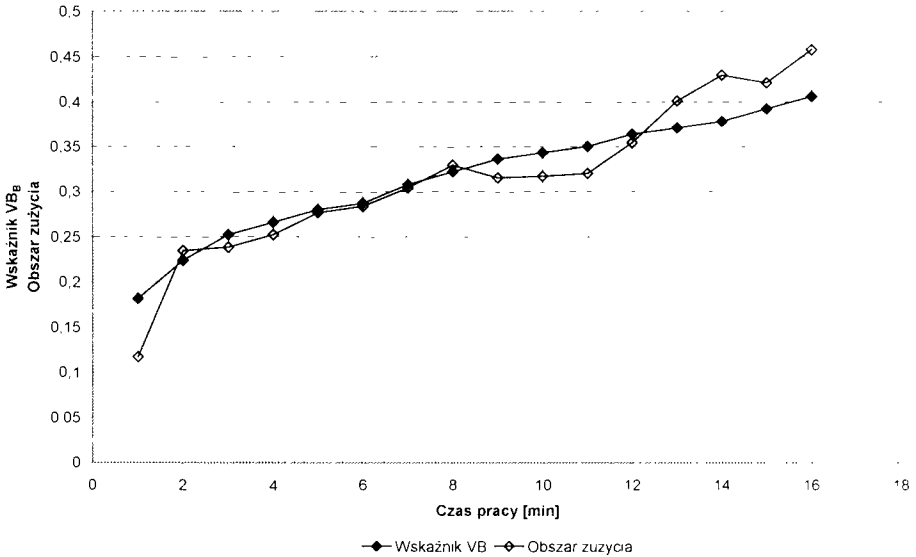


b)



Rys. 4. Przykłady obrazów zużycia ostrza przed (a) i po (b) obróbce programem analizy NeuralWear

W celu porównania współczynnika VB_B i określonego obszaru zużycia obie wielkości umieszczono na pojedynczym wykresie (osobnym dla każdego ostrza). W celu umożliwienia wykonania porównania uzyskane wyniki zostały znormalizowane, a następnie przesunięte. Wykres obszaru zużycia został tak przesunięty, aby suma kwadratów różnicy odległości poszczególnych punktów na wykresie od odpowiadających im punktom na wykresie VB_B była minimalna. Przykład takiego porównania zamieszczono na rysunku 5.



Rys. 5. Porównanie oceny zużycia narzędzia uzyskanych poprzez pomiar VB_B i analizę obrazu (ostrze nr 1)

Dla każdej płytki określono błąd maksymalny (błąd średni jest równy 0) oraz rozrzut wyników, przyjmując jako linię odniesienia wartość wskaźnika VB_B . Wyniki zebrano w poniższej tabeli.

Tabela 2. Błędy analizy obrazu zużycia narzędzia skrawającego (ostrze nr 1)

Numer płytki	Wariancja (względna)	Wariancja (bezwzględna)	Błąd maksymalny (względny)	Błąd maksymalny (bezwzględny)
1	0,002	0,001	0,15	0,085
2	0,004	0,002	0,18	0,100
3	0,007	0,004	0,25	0,144

7. PODSUMOWANIE

Otrzymane rezultaty nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, czy tak skonfigurowana sieć neuronowa będzie dobrze spełniała swoje zadania w każdych warunkach. Wydaje się jednak, że po poprawieniu metodyki badań jakość uzyskiwanych wyników może ulec poprawie.

Dotyczy to przede wszystkim konieczności zmiany sposobu oświetlenia obszaru zużycia płytki skrawającej. Proponuje się zastosowanie wyłącznie oświetlenia sztucznego (tak, aby pora dnia, o której wykonuje się badania nie wpływała na zmiany jasności obrazów). Wskazane jest również zastosowanie kilku zamiast pojedynczego źródeł światła o regulowanym położeniu (w celu redukcji rozblysków na krawędziach przedmiotów). Należy również wprowadzić ciemne tło do digitalizowanych obrazów, co umożliwi automatyczne określanie parametrów pracy sieci neuronowej.

Celowe jest też doskonalenie programu analizy obrazu w kierunku zastosowania sieci neuronowej analizującej całą powierzchnię obrazu, a nie jego pojedynczą linię.

LITERATURA

- [1] Balamucki J., Szawdzin K., Szubert Z., Żebrowski H.: Komputerowa analiza obrazu zużycia ostrzy narzędzi skrawających. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej. Seria Konferencje 20. Wrocław 1993.
- [2] Danaei K., Janunu V.B.: Unsuprised neural network for tool breakage detection in turning. Annals of CIRP 42 (1), 1993.
- [3] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
- [4] Marenka S., Sadun A., Watkins Ch.D.: Nowoczesne metody przetwarzania obrazu. WNT, Warszawa 1995.
- [5] Shibasaka T., Takuma M., Teshima T., Yamamoto A.: Estimation of cutting life by processing image data with neural network. Annals of CIRP 42 (1), 1993
- [6] Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.

ESTIMATION OF TOOL WEAR AND TOOL LIFE USING A NEURAL NETWORK PART I. ANALYSIS OF CUTTING TOOL WEAR VIDEO IMAGE

Summary

This paper describes image-processing systems based on an artificial neural network to estimate a tool wear. The SCBC neural network was used to process a tool image data. The paper discusses a method of estimation of the wear parameter based on the image. Moreover, assessment of errors in case of obtained results is presented.

Key words: image processing, tool wear, neural network

ANALIZA ZUŻYCIA OSTRZA I TRWAŁOŚCI NARZĘDZI Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH. CZ. II. OCENA CZASU ŻYCIA OSTRZA

Tadeusz Mikołajczyk¹, Krzysztof Nowicki²

¹Katedra Inżynierii Produkcji

²Katedra Sterowania i Konstrukcji

Wydział Mechaniczny ATR

ul. Prof. S. Kaliskiego, 85-796 Bydgoszcz

Wyniki pomiarów zużycia ostrza, uzyskane przez pomiar bezpośredni oraz komputerową ocenę obrazu zużycia poddano w pracy analizie z wykorzystaniem sieci neuronowych z jednym wejściem. Stwierdzono, że wskaźniki te mogą być wykorzystane do prognozowania czasu życia ostrza.

Słowa kluczowe: zużycie narzędzi, sieci neuronowe, analiza obrazu

1. WSTĘP

Wzrost udziału automatyzacji w procesie obróbki skrawaniem stwarza wysokie wymagania odnośnie niezawodności prognozowania trwałości ostrza. W ostatnim okresie pojawia się wiele opracowań, w których do prognozowania zużycia ostrza stosuje się sztuczne sieci neuronowe. Do analiz przebiegów zużycia ostrza z wykorzystaniem sieci neuronowych stosuje się różne wskaźniki. Do najczęściej stosowanych należą emisja akustyczna [1, 3, 4, 7], siła skrawania [3, 4, 5], rzadziej moc skrawania [7] oraz obraz zużycia ostrza [8]. Stosuje się różne postacie sieci neuronowych z wieloma wejściami. Opracowuje się też systemy adaptacyjne oparte na sieciach neuronowych [2, 6].

W pracy przedstawiono prognozowanie zużycia ostrza z wykorzystaniem sieci neuronowych, w oparciu o bieżące pomiary wskaźnika VB_B . Przeprowadzono równoległe analizy z wykorzystaniem bezpośredniego pomiaru zużycia ostrza oraz przy komputerowej analizie i klasyfikacji obrazu zużycia ostrza.

2. METODYKA BADAŃ

Technikę badań zużycia ostrza zaprezentowano w części pierwszej artykułu. Dokonywano pomiarów zużycia dwoma sposobami: bezpośrednio przy pomocy mikroskopu optycznego i pośrednio poprzez komputerową analizę przy wykorzystaniu specjalnie

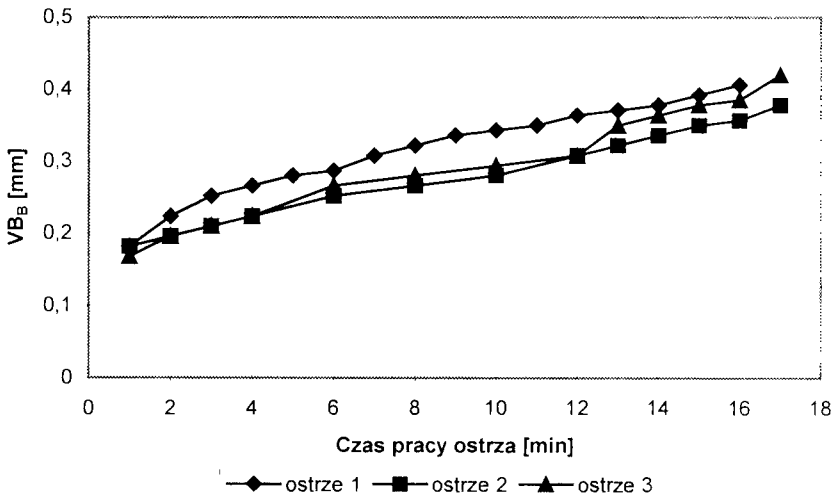
opracowanego programu NeuralWear. Zasadę i przykłady działania programu przedstawiono w pierwszej części artykułu. Wyniki pomiarów zużycia ostrza wykorzystano do prognozowania czasu pracy ostrza z zastosowaniem programów Microsoft Excel 4.0 i Neuralyst v1.4 Demonstration – demonstracyjnej wersji nakładki na program Excel.

3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań zestawiono na wykresach i w tabelach, przedstawiając kolejno wyniki badań i analiz dla bezpośredniego pomiaru zużycia ostrza oraz dla mikrokomputerowej klasyfikacji obrazów zużycia ostrza.

3.1. Wyniki badań zużycia ostrza przy bezpośrednim pomiarze

Wyniki badań zużycia ostrzy przedstawiono na rysunku 1, natomiast w tabeli 1 przedstawiono dane wykorzystane do treningu sieci neuronowej. Przebieg uczenia się sieci ilustruje wykres błędu na wyjściu sieci (rys. 2).



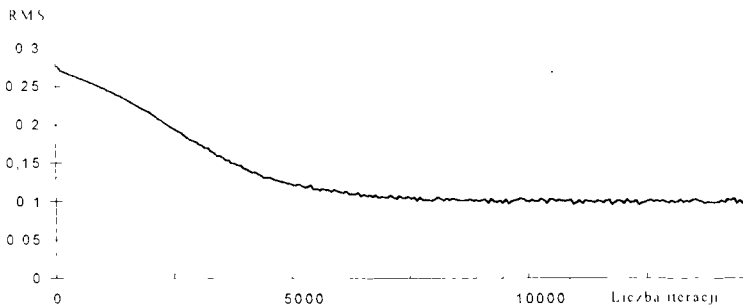
Rys. 1. Wyniki pomiarów wskaźnika VB_B

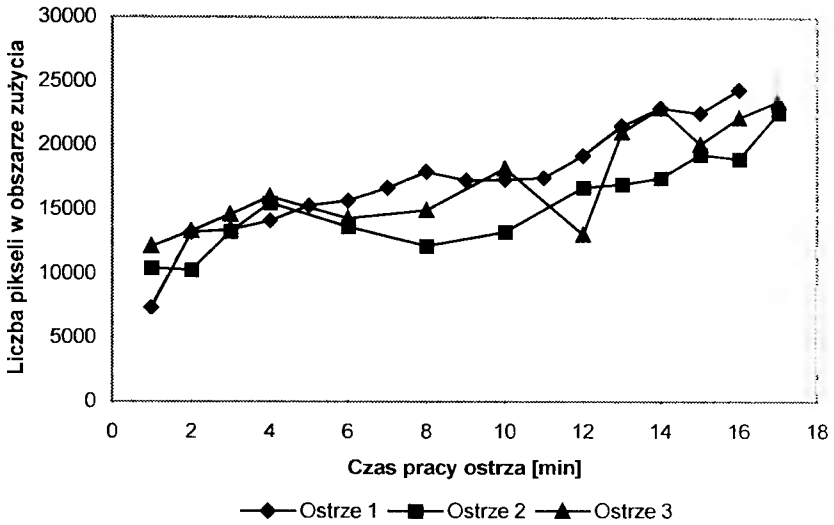
3.2. Wyniki badań analizy obrazu zużycia ostrza

Jako wskaźnik zużycia ostrza przyjęto w tym przypadku sumę pikseli zakwalifikowanych przez program NeuralWear jako należące do obszaru zużycia. Wyniki analiz obrazu zużytych ostrzy przedstawiono na rysunku 3. W tabeli 2 przedstawiono dane wykorzystane do treningu sieci neuronowej. W tym przypadku przebieg uczenia się sieci ilustruje wykres błędu na wyjściu sieci przedstawiony na rysunku 4.

Tabela 1. Wartości wskaźnika VB_B wykorzystane do uczenia i testowania sieci neuronowej

Numer ostrza	Czas pracy [min]	VB_B [mm]	Rezerwa trwałości [min]	Identyfikacja rezerwy trwałości [min]	Błąd prognozy [min]	Sposób użycia
1	1	0,182	15	14,70	0,30	trening
1	2	0,224	14	12,95	1,05	testowanie
1	3	0,252	13	11,20	1,80	trening
1	4	0,266	12	10,14	1,86	testowanie
1	5	0,280	11	8,98	2,02	trening
1	6	0,287	10	8,37	1,63	testowanie
1	7	0,308	9	6,50	2,50	trening
1	8	0,322	8	5,32	2,68	testowanie
1	9	0,336	7	4,26	2,74	trening
1	10	0,343	6	3,78	2,22	testowanie
1	12	0,364	4	2,56	1,44	trening
1	13	0,371	3	2,22	0,78	testowanie
1	14	0,378	2	1,91	0,09	trening
1	15	0,392	1	1,37	-0,37	testowanie
1	16	0,406	0	0,93	-0,93	trening
2	1	0,182	16	14,70	1,30	trening
2	2	0,196	15	14,22	0,78	testowanie
2	3	0,210	14	13,64	0,36	trening
2	4	0,224	13	12,95	0,05	testowanie
2	6	0,252	11	11,20	-0,20	trening
2	8	0,266	9	10,14	-1,14	testowanie
2	10	0,280	7	8,98	-1,98	trening
2	12	0,308	5	6,50	-1,50	testowanie
2	13	0,322	4	5,32	-1,32	trening
2	14	0,336	3	4,26	-1,26	testowanie
2	15	0,350	2	3,33	-1,33	trening
2	16	0,357	1	2,93	-1,93	testowanie
2	17	0,378	0	1,91	-1,91	trening

Rys. 2. Przebieg zmian błędów na wyjściu sieci neuronowej analizującej wskaźnik VB_B



Rys. 3. Wyniki analizy obrazu zużycia narzędzi w programie NeuralWear

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Poddana treningowi sieć neuronowa została wykorzystana do prognozowania trwałości ostrza w oparciu o bieżące pomiary zużycia ostrza przeprowadzone dla ostrza trzeciego. Wyniki analiz zaprezentowano na rysunkach 5 i 6. Porównanie wyników oceny czasu życia narzędzia uzyskanych w drodze eksperymentalnej i prognoz sieci neuronowej analizującej wskaźnik VB_B przedstawiono w tabeli 2.

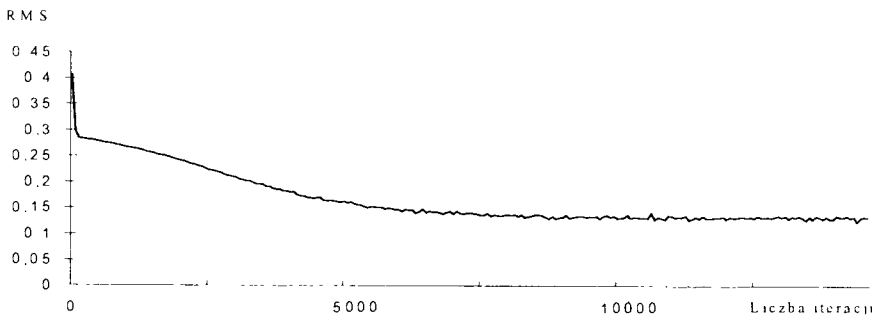
Analiza wyników przeprowadzonych badań wskazuje, że dla opisanych wskaźników zużycia narzędzia uzyskano różne prognozy trwałości ostrza.

Wyniki analizy wskaźnika VB_B (rys. 5) dobrze odpowiadały danym eksperymentalnym – błąd średni wyniósł 0,59 minuty (3 % całkowitego czasu życia narzędzia). klasyfikacja obrazów zużycia (rys. 6) dała efekt na średnim poziomie – błąd średni wyniósł 2,27 minuty (12 % całkowitego czasu życia narzędzia). Przy klasyfikacji obrazów zużycia pojawiły się błędne odczyty (punkty przy 4 i 12 minucie, rys. 6), które przy małej liczbie danych istotnie zakłóciły dokładność prognozowania. Wpłynęły one na wartość maksymalnego błędu prognozy czasu życia ostrza (rys. 7).

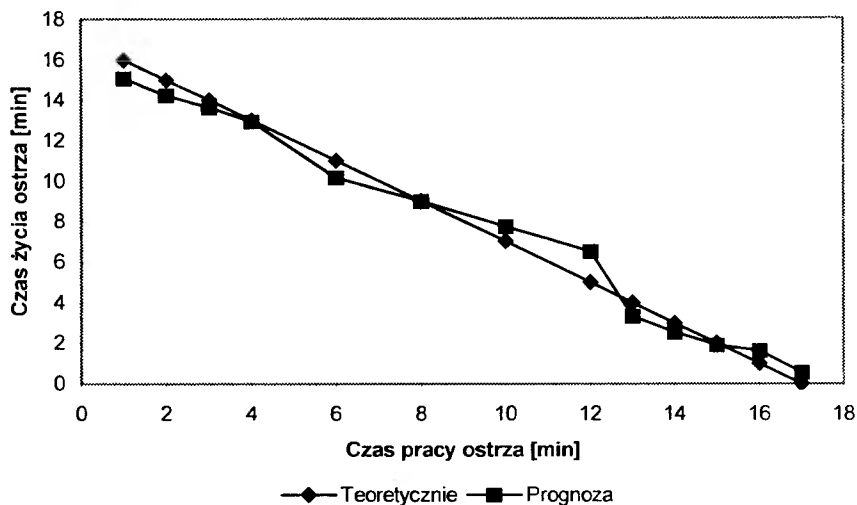
W zakresie wykorzystania klasyfikowanych komputerowo obrazów zużycia narzędzia możliwości poprawy jakości prognozowania można oczekiwać przy zastosowaniu korzystniejszych warunków uzyskania obrazów (zastosowanie równomiernego oświetlenia, kontrastowe tło dla ostrza) oraz doskonalenia programu analizy zużycia ostrza. Doraźną poprawę można by uzyskać przez ograniczenie pola analizy obrazu zużycia i wykorzystywanie opracowanego programu do oceny wskaźnika VB_B zużycia ostrza.

Tablica 2. Dane z obrazu zużycia narzędzia wykorzystane do uczenia i testowania sieci neuronowej

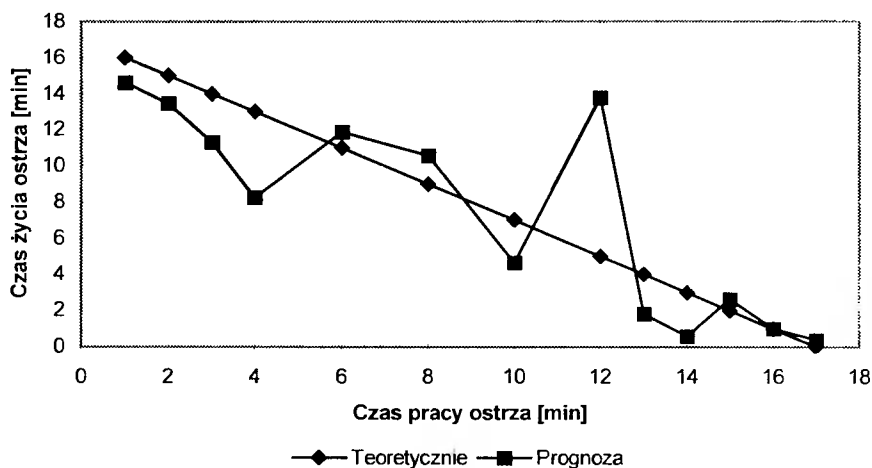
Numer ostrza	Czas pracy [min]	Liczba pikseli w obszarze zużycia [szt.]	Rezerwa trwałości [min]	Identyfikacja rezerwy trwałości [min]	Błąd prognozy [min]	Sposób użycia
1	16	24373	0	0,12	-0,12	trening
1	15	22553	1	0,82	0,18	testowanie
1	14	22971	2	0,61	1,39	trening
1	13	21548	3	1,46	1,54	testowanie
1	12	19229	4	3,54	0,46	trening
1	11	17500	5	5,59	-0,59	testowanie
1	10	17341	6	5,82	0,18	trening
1	9	17264	7	5,93	1,07	testowanie
1	8	17954	8	4,98	3,02	trening
1	7	16691	9	6,87	2,13	testowanie
1	6	15674	10	8,91	1,09	trening
1	5	15321	11	9,69	1,31	testowanie
1	4	14100	12	12,21	-0,24	trening
1	3	13409	13	13,34	-0,34	testowanie
1	2	13225	14	13,58	0,42	trening
1	1	7369	15	16,34	-1,34	testowanie
2	17	22616	0	0,78	-0,78	trening
2	16	18955	1	3,83	-2,83	testowanie
2	15	19299	2	3,47	-1,47	trening
2	14	17494	3	5,59	-2,59	testowanie
2	13	16982	4	6,37	-2,37	trening
2	12	16740	5	6,78	-1,78	testowanie
2	10	13244	7	13,55	-6,55	trening
2	8	12169	9	14,6	-5,6	testowanie
2	6	13657	11	12,98	-1,98	trening
2	4	15512	13	9,27	3,73	testowanie
2	3	13280	14	13,51	0,49	trening
2	2	10286	15	15,7	-0,57	testowanie
2	1	10442	16	15,51	0,49	trening



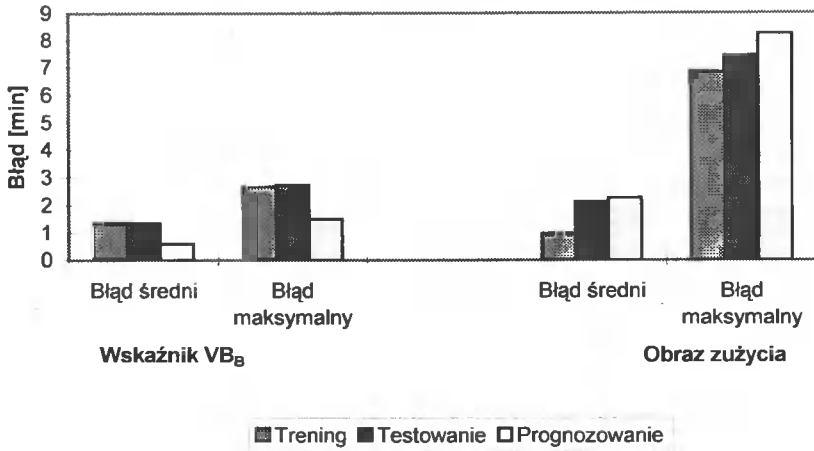
Rys. 4. Przebieg zmian błędów na wyjściu sieci neuronowej analizującej obraz zużycia ostrza



Rys. 5. Porównanie wyników oceny rezerwy trwałości narzędzia uzyskanych poprzez eksperyment oraz identyfikacji sieci neuronowej (ostrze nr 3, wskaźnik VB_B)



Rys. 6. Porównanie wyników oceny rezerwy trwałości narzędzia uzyskanych poprzez eksperyment oraz identyfikacji sieci neuronowej (ostrze nr 3, obraz zużycia)



Rys. 7. Porównanie błędów wyników pracy sieci neuronowej podczas przetwarzania wskaźnika VB_B i obrazu zużycia narzędzia

Uzyskane wyniki prognozowania czasu życia ostrza opierając się na analizie obrazu jego zużycia wskazują na celowość kontynuowania prac jako alternatywnej techniki prognozowania stanu narzędzia – przy możliwości obserwacji ostrza w przerwach procesu skrawania.

5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań – z uwzględnieniem literatury – wskazują na celowość wykorzystania sieci neuronowych do prognozowania zużycia ostrza oraz pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- w warunkach badań przy wykorzystaniu sieci neuronowych z jednym wejściem najkorzystniejsze wyniki prognozowania czasu życia ostrza uzyskano w oparciu o bezpośredni pomiar wskaźnika VB_B (błąd 3 %). Znaczną dokładność uzyskano przy wykorzystaniu sklasyfikowanego programem komputerowym obrazu zużycia powierzchni przyłożenia (błąd 12 %),
- uzyskane wyniki prognozowania czasu życia ostrza w oparciu o analizę obrazu jego zużycia wskazują na celowość kontynuowania prac jako alternatywnej techniki prognozowania stanu narzędzia.

LITERATURA

- [1] Chung E.S., Chiou Y.S., Liang S.Y.: Tool wear and chatter detection in turning via time-series modelling and frequency band averaging. Journal of Korean Society of Precision Engineering 11 (2), April 1994, 75-84.

- [2] Choi G.S., Wang Z., Dornfeld D.A.: Adaptive control of machining process using neural networks. Proceedings of IEEE Robotics and Automation Conference, 1991.
- [3] Dornfeld D.A.: In process recognition of cutting states. JSME International Journal 37C (4), 1994, 638-650.
- [4] Dornfeld D.A., Dreyfuss S.E., Lecom Ch.S.: Customised neural network for sensor fusion on-line monitoring of cutting tool wear. Transactions of ASME. Journal of Engineering for Industry 117 (5), 1995, 152-159.
- [5] Gawlik J. Karbowski K.: Prognozowanie stanu ostrza skrawającego z zastosowaniem sieci neuronowych. Mechanik 4, 1997, 153-156.
- [6] Kosmal J., Sokołowski A.: Diagnostyka narzędzi za pomocą sieci neuronowej. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria Konferencje 57, 1995.
- [7] Matsunamura T., Obikawa T., Shirakashi T., Usui E.: Autonomous Turning Operation planing with Adaptive Prediction of Tool Wear and Surface Roughness. Journal of Manufacturing Systems 12 (3), 253-261.
- [8] Shibusaka T., Takuma M., Teshima T., Yamamoto A.: Estimation of cutting life by processing image data with neural network. Annals of CIRP 42 (1), 1993.

ESTIMATION OF TOOL WEAR AND TOOL LIFE
USING A NEURAL NETWORK.
PART II. ESTIMATION OF TOOL LIFE

Summary

The paper describes the results of application of an artificial neural network with one input in prediction of the tool life in turning. The analysis uses the VB_B flank wear parameter and a signal from special program for the purposes of recognition of the tool wear based on a video image. It has been found that these ratios may be used in the prognosis of tool life.

Key words: tool wear, neural network, image processing

NÓŻ TOKARSKI UNIWERSALNY

Tadeusz Mikołajczyk

Katedra Inżynierii Produkcji
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono przykład narzędzia o elastyczności geometryczno-kinematycznej w postaci uniwersalnego noża tokarskiego o zmiennym kącie przystawienia, który umożliwia prowadzenie skrawania w kierunku lewym i prawym – zastępuje 14 katalogowych rozwiązań narzędzi.

Słowa kluczowe: toczenie, noże tokarskie, narzędzia uniwersalne

1. WSTĘP

Różnorodność warunków eksploatacji narzędzi, uwzględniając zarówno wpływ własności materiału obrabianego, jak i warunków jego obróbki ostrzem z określonego materiału wpływają na konieczność stosowania bardzo szerokiego asortymentu narzędzi dla spełnienia wymagań obróbki skrawaniem. Wynika to z braku uniwersalności większości produkowanych narzędzi ze stałą geometrią. Zmniejszenie asortymentu i obniżenie kosztów umożliwiają narzędzia o zmiennej geometrii, o dużej elastyczności geometryczno-kinematycznej EGK [1, 3, 4], zastępujące określony zakres narzędzi o geometrii stałej.

Określenie celowości i możliwości budowy narzędzi o geometrii zmiennej oraz opracowanie podstaw racjonalnych zasad ich projektowania, wymaga przeprowadzenia analizy całego asortymentu produkowanych narzędzi o geometrii stałej. Zakres zmian ich parametrów geometrycznych określa pożądany zakres geometrii narzędzi EGK.

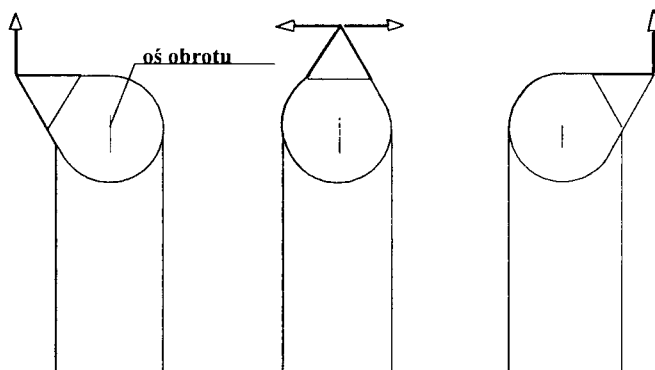
W pracy przedstawiono przykład konstrukcji narzędzia EGK w postaci noża tokarskiego o zmiennym kącie przystawienia, zastępującego cały zakres handlowych noży tokarskich [5].

2. KONCEPCJA ROZWIĄZANIA

W handlowych rozwiązaniach noży tokarskich całkowity zakres stosowanych kątów przystawienia ostrza κ_r jest szeroki, bowiem obejmuje on zarówno noże lewe, jak i prawe [5]. Na rysunku 1 przedstawiono koncepcję narzędzia z obrotową oprawką, mogącego zastąpić wiele konstrukcji noży. Ze względu na konieczność zapewnienia symetrycznego, bardzo szerokiego zakresu zmian wartości kąta κ_r usytuowanie osi

obrotu oprawki z ostrzem przyjęto w osi trzonka noża prostopadłej do powierzchni podstawowej.

W narzędziu takim występuje zmienne obciążenie ostrza uzależnione nie tylko od parametrów skrawania, ale również od kąta przystawienia κ_r (rys. 2).



Rys. 1. Koncepcja noża tokarskiego uniwersalnego

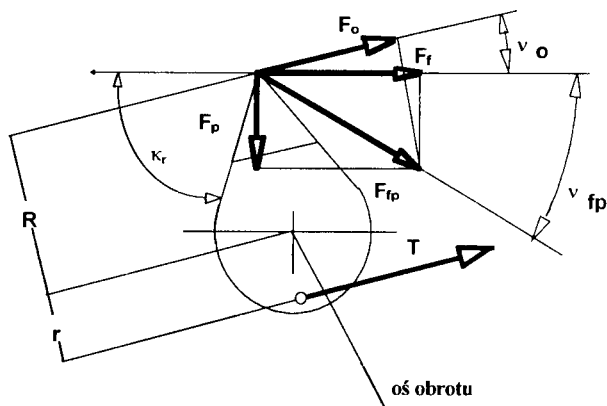
Przy skrawaniu tym nożem wypadkowa F_{fp} składowej posuwowej F_f i poprzecznej F_p siły skrawania usytuowana w okolicy wierzchołka ostrza wywołuje moment obrotowy „dążący” do obrotu oprawki w gnieździe narzędzia. Moment ten można wyznaczyć jako iloczyn promienia R odległości wierzchołka ostrza od osi obrotu oprawki i wartości rzutu F_o wypadkowej F_{fp} na kierunek prostopadły do promienia:

$$M = F_o \cdot R \quad (1)$$

gdzie:

F_o – siła prostopadła do promienia,

R – odległość punktu przyłożenia siły F_o od osi obrotu oprawki.



Rys. 2. Schemat do wyznaczenia obciążenia wkładki skrawającej

Siłę F_o , prostopadłą do promienia R można wyznaczyć z zależności:

$$F_o = F_{fp} \cos(v_{fp} + v_o) \quad (2)$$

Po podstawieniu do równania (2) F_{fp} , v_{fp} i v_o wg rysunku 2 otrzymuje się:

$$F_o = \sqrt{F_p^2 + F_f^2} \cdot \cos \left[\operatorname{atan} \left(\frac{F_p}{F_f} \right) + \kappa_r - 60^\circ \right] \quad (3)$$

Po uwzględnieniu równości momentu tarcia $M_T = N \mu r$ i momentu obrotowego M (1) oraz uproszczeniu można wyznaczyć siłę docisku oprawki N niezbędną do przeniesienia określonej siły F_o :

$$N > \frac{F_o \cdot R}{r \cdot \mu} \quad (4)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia między elementami noża.

Po przekształceniu dla znanej wartości siły N można wyznaczyć dopuszczalną siłę F_o :

$$F_o < \frac{r \cdot N \cdot \mu}{R} \quad (5)$$

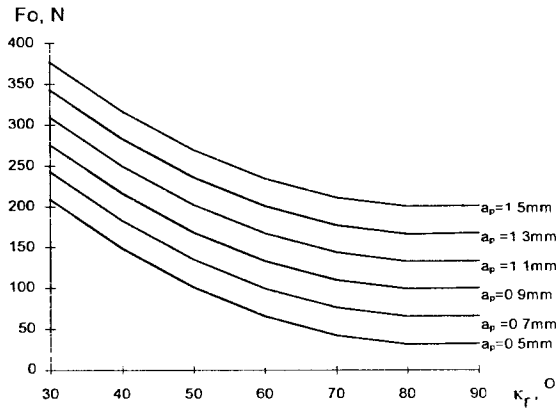
3. WYNIKI BADAŃ

W celu określenia wpływu kąta przystawienia κ_r na siłę F_o przeprowadzono badania wpływu parametrów skrawania na składowe siły skrawania. Badań dokonano przy pomocy specjalnej oprawki umożliwiającej obrót ostrza w płaszczyźnie podstawowej wokół jego wierzchołka [2], dzięki czemu uniknięto wpływu punktu przyłożenia siły na wyniki badań. Obliczone na podstawie pomiarów składowych F_f i F_p siły skrawania wartości F_o poddano analizie regresji (tab. 1).

Tabela 1. Równanie regresji $F_o = f(\kappa_r, t, f)$ z oceną istotności i korelacji ($\alpha = 0,05$)

Równanie regresji	
$F_o = 376,7 - 10,2\kappa_r + 800,2 a_p f - 0,061 \kappa_r^2$	
Ocena równania	
Istotność $F = 58,92$	Korelacja $R = 0,9378$
$n-k-1 = 11, k = 3$	$F_r = 55,25$

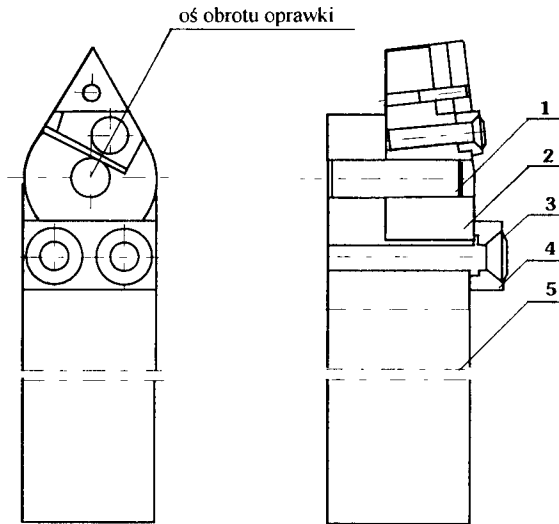
Z opracowanego równania (tab. 1) wynika, że wartość siły F_o jest uzależniona od przekroju warstwy skrawanej – $a_p f$ oraz kąta przystawienia κ_r . Wykresy wg równania regresji (rys. 3) wskazują, że siła F_o , a więc i moment obrotowy M szczególnie wyraźnie rosną dla wartości kąta $\kappa_r = 30^\circ$. Jest to jednak zakres wartości poniżej stosowanych w praktyce.



Rys. 3. Wpływ kąta przystawienia κ_f i głębokości skrawania a_p na siłę F_o działającą na wkładkę noża z rysunku 1 ($f = 0,210$ mm/obr)

4. ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE NARZĘDZIA

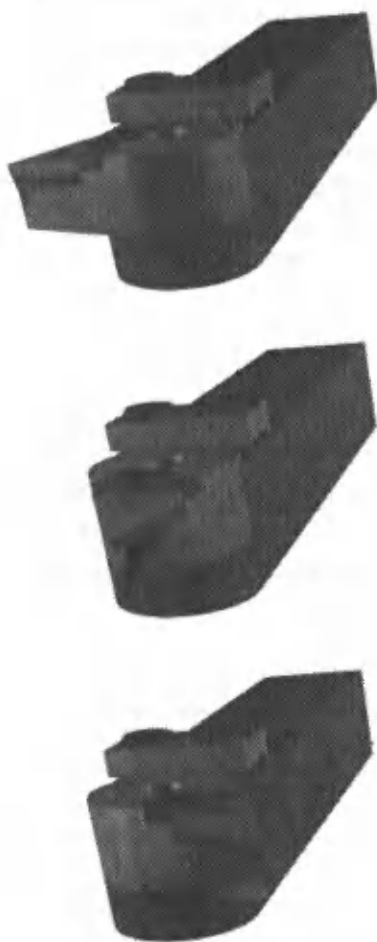
Opierając się na przedstawionej koncepcji (rys. 1) opracowano konstrukcję noża (rys. 4) z bezstopniową regulacją usytuowania wkładki z ostrzem. Dwuwymiarową konstrukcję noża (rys. 4) wykorzystano do wykonania rysunków 3D elementów składowych narzędzia.



Rys. 4. Rozwiązanie konstrukcyjne uniwersalnego noża tokarskiego: 1 – kołek, 2 – oprawka obrotowa, 3 – śruba, 4 – łapa dociskowa, 5 – trzonek noża

Dla celów analizy rozwiązania (rys. 4) sporządzono wirtualny model narzędzia. Zrealizowano go w programie 3D STUDIO 2.0 (firmy AUTODESK). Określono

w nim usytuowanie osi przemieszczeń poszczególnych elementów ruchomych modelu, przypisano materiał do wszystkich elementów, podano warunki oświetlenia obiektu. Następnie opracowano algorytm animacji przemieszczenia części roboczej narzędzia odtwarzający zmianę kątów przystawienia. Wybrane fazy animacji kąta przystawienia pokazano na rysunku 5.



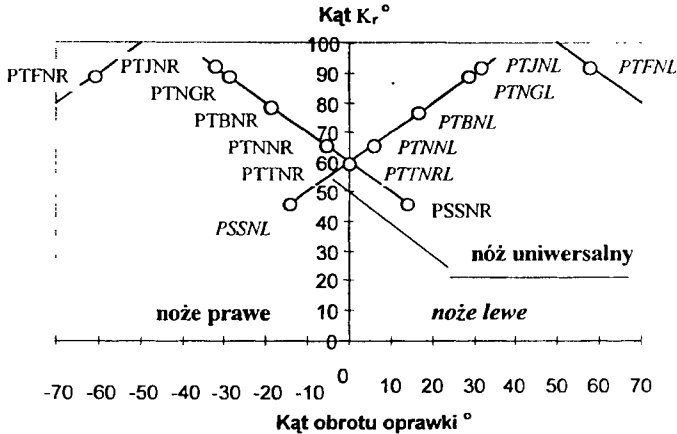
Rys. 5. Fazy animacji kąta przystawienia

Analiza modelu wykazała poprawność opracowanej konstrukcji, a model okazał się przydatnym do celów promocyjnych i prezentacyjnych rozwiązania.

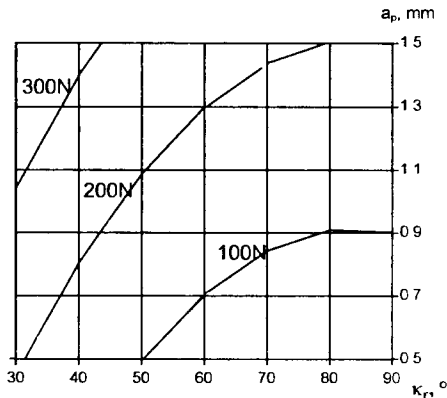
Opracowane rozwiązanie konstrukcyjne noża umożliwia zastąpienie 14 handlowych rozwiązań noży składanych [5], a także dzięki bezstopniowej regulacji pozwala na uzyskanie wartości pośrednich kąta przystawienia (rys. 6). Narzędzia handlowe o stałej geometrii zilustrowane są jako punkty.

Dla opracowanego noża (rys. 2), w oparciu o uzyskane parametry konstrukcji (przy $R = 28$ mm i $r = 12$ mm), przeprowadzono obliczenia dopuszczalnej siły F_0 wg zależno-

ści (5). Siła normalna uzależniona jest od wytrzymałości śrub dociskających łapę. Uwzględniając rozkład sił na łapie dociskowej, siła docisku N proporcjonalna do siły tarcia odpowiada sile wywieranej przez pojedynczą śrubę. Ograniczeniem wielkości siły jest kryterium wytrzymałościowe określające siłę docisku w zależności od średnicy rdzenia śruby. Przy wykorzystaniu śrub $M6 \times 0.75$ siła normalna wynosi 2064 N, natomiast dla śrub $M8 \times 0.75$ 3665 N. Po wstawieniu wartości sił normalnych do wzoru (5) otrzymano odpowiednio dla współczynnika tarcia $\mu = 0,1$ siłę tarcia 206,4 N i 366,5 N. Zakres dopuszczalnych warunków skrawania opracowany wg równania regresji (tab. 1). przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Wykres kątów przystawienia dla różnych nastaw noża



Rys. 7. Wykres warstwiczny wpływu kąta przystawienia κ_r i głębokości skrawania a_p na siłę F_o działającą na wkładkę noża ($f = 0.210$ mm/obr)

Przy zastosowaniu specjalnych przekładek ciernych możliwe jest zwiększenie współczynnika tarcia do $\mu = 0,3$.

Dla przyjętego rozwiązania ciernego mocowania wkładki obrotowej istnieje pewne ograniczenie w możliwościach stosowania tego narzędzia w przypadku występowania styku powierzchni stalowych. Celowe jest przeprowadzenie badań weryfikujących rzeczywisty moment hamujący w różnych warunkach styku powierzchni oprawki i trzonka.

5. PODSUMOWANIE

Narzędzia EGK umożliwiają zastąpienie pewnej liczby narzędzi o geometrii stałej. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku narzędzi o geometrii zmiennej bezstopniowo liczba narzędzi generowana przez tę konstrukcję jest nieograniczona.

Przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne noża tokarskiego zastępuje 14 handlowych rozwiązań noży składanych.

Wykorzystanie animacji komputerowej stwarza możliwość badań wirtualnego modelu konstrukcji na podstawie rysunków bez jego wykonania w metalu, co jest szczególnie istotne w przypadku narzędzi EGK.

Przedstawiony przykład wskazuje na celowość kontynuowania prac, których celem jest opracowanie koncepcji i konstrukcji narzędzi EGK pozwalających radykalnie ograniczyć liczbę narzędzi. Należy przy tym uwzględnić również narzędzia sterowane z własnym napędem.

LITERATURA

- [1] Latoś H., Bromberek F., Dalak M., Mikołajczyk T., Rozwadowski W.: Rozwój podstaw teoretycznych i doświadczalnych narzędzi skrawających o dużej elastyczności geometryczno-kinematycznej. Projekt badawczy nr 7 71 16 92 03 finansowany przez KBN (1992-1994). ATR Bydgoszcz 1994. Praca niepublikowana.
- [2] Latoś H., Bromberek F., Dalak M., Mikołajczyk T., Rozwadowski W.: Rozwój podstaw teoretycznych i doświadczalnych obróbki powierzchni kształtowych. Sprawozdanie z BS-43/91, ATR Bydgoszcz 1991 (praca niepublikowana).
- [3] Latoś H.: Elastyczność geometryczno-kinematyczna narzędzi skrawających. Wyd. Uczeln. Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1997.
- [4] Latoś H.: Kierunki rozwoju elastyczności kinematyczno-geometrycznej narzędzi skrawających do obróbki powierzchni kształtowych. IV Konf. „Narzędzia skrawające”, Wrocław 1986.
- [5] Katalog firmy PAFANA Pabianice 1999.

THE MULTIPURPOSE TURNING TOOL

Summary

The paper presents a sample tool with geometric and kinematic elasticity in the form of a multipurpose turning tool with variable cutting angle. The tool can cut to the right or to the left – replacing 14 traditional tools with stable geometry.

Key words: turning, turning tools, multipurpose tools

ANALITYCZNO–NUMERYCZNA OCENA TEMPERATUR W PROCESIE SPAWANIA PRZY WYKORZYSTANIU PRZESTRZENNYCH MODELI ŹRÓDEŁ CIEPŁA I NIELINIOWOŚCI PROCESU

Eugeniusz Ranatowski

Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W niniejszym opracowaniu przedstawiono liniowe i nieliniowe analityczno-numeryczne obliczenia temperatury w procesie spawania. W początkowej części pracy scharakteryzowano dwa przestrzenne modele źródeł ciepła: cylindryczno-potęgowo-normalny model (C-P-N) oraz podwójna elipsoida (PE). W dalszej kolejności przedstawiono rozwiązania oceny rozkładu temperatur dla płyt o dowolnej grubości z uwzględnieniem wymiany ciepła na powierzchniach ograniczających płytę. Analityczne rozwiązania zostały transformowane i przystosowane do obliczeń numerycznych, do których wprowadzono podstawowe parametry fizyczne zależne od temperatury. Podano również przykłady obliczeniowe.

Słowa kluczowe: źródła ciepła, analityczne obliczenia temperatury, płyta o dowolnej grubości, transformacja obliczeń na numeryczne, algorytmy

1. WSTĘP

Zjawiska fizyczne towarzyszące procesowi spawania są bezpośrednim skutkiem przebiegu cyklu cieplnego, zależnego od lokalnej intensywności wprowadzonej energii na sposób ciepła. Zasadniczo złożone zjawiska fizyczne transportu energii, masy i pędu w układzie źródło ciepła – jezioro płynnego metalu nie są do tej pory modelowane w sposób ścisły. Posiadają one decydujące znaczenie, między innymi w ukształtowaniu spoiny i faktycznym rozkładzie objętościowym wprowadzonego ciepła. Do zjawisk tych zaliczyć należy:

- rozkład ciśnienia na powierzchni jeziora od źródła ciepła, np. łuku,
 - wielkość napięcia powierzchniowego płynnego metalu powiązanego z gradientem temperatury,
 - siły wyporu hydrostatycznego, związane ze zmienną gęstością ciekłego metalu w jeziorce,
 - lepkość płynnego metalu,
- oddziałujące pomiędzy sobą w sposób synergiczny, powodując ruch cieczy w jeziorce spawalniczym i konwekcyjną formę transportu energii, decydując o kształcie jeziora

i głębokości penetracji przez strumień energii. Uwzględnienie powyższych procesów powinno, m.in. stanowić punkt wyjścia przy modelowaniu źródła ciepła w procesie spawania. Model ten powinien mieć charakter przestrzenny o możliwie wysokiej elastyczności w zakresie doboru jego kształtu. Ponadto, istotnym problemem rzutującym na efektywność i dokładność procesu modelowania jest również spełnienie warunków matematyczno-fizycznych, związanych z podobieństwem formalnego opisu modelu i obiektu rzeczywistego, stosując poprawne parametry fizyczne, uwzględniające ich zależność od temperatury, co czyni ww. proces nieliniowym i nierozwiązalnym metodą czysto analityczną.

2. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH PRZESTRZENNYCH MODELI ŹRÓDEŁ CIEPŁA

W niniejszym opracowaniu przyjmiemy dwa modele spawalniczych źródeł ciepła o przestrzennych kształtach i wysokiej elastyczności:

a) cylindryczno-potęgowo-normalny (C-P-N) model źródła ciepła [1, 3]

$$q_v = \frac{kK_z Q}{\pi(1 - \exp(-K_z \cdot s))} e^{-k(x^2 + y^2) - K_z \cdot z} (1 - u(z - s)) \quad (1)$$

b) podwójnej elipsoidy (PE) [2]
– przednia część źródła

$$q_{vp} = f_p \frac{6\sqrt{3}Q}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} e^{\frac{-3x^2}{a_1^2} - \frac{-3y^2}{b^2} - \frac{-3z^2}{c^2}} \quad (2a)$$

– tylna część źródła

$$q_{vt} = f_t \frac{6\sqrt{3}Q}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} e^{\frac{-3x^2}{a_2^2} - \frac{-3y^2}{b^2} - \frac{-3z^2}{c^2}} \quad (2b)$$

gdzie:

$$f_p + f_t = 2; \quad (1 - u(z - s)) = u(s - z); \quad a_1 \neq a_2; \quad b_1 = b_2 = b; \quad c_1 = c_2 = b$$

k – współczynnik koncentracji źródła ciepła, $1/\text{cm}^2$,

K_z – współczynnik potęgowy źródła ciepła, $1/\text{cm}$,

s – głębokość działania źródła ciepła, cm ,

$u(s - z)$ – skokowa funkcja Heaviside'a,

Q – praca źródła ciepła, J ,

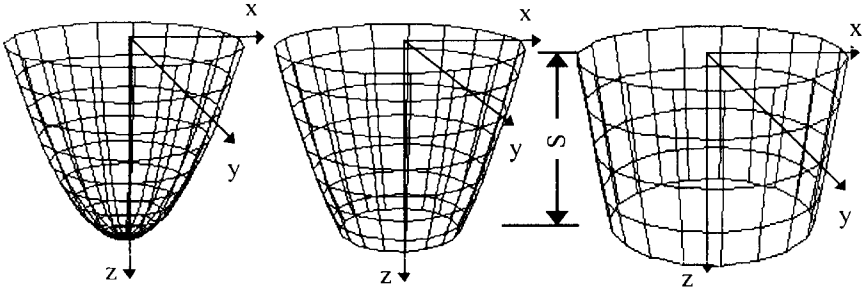
a_1, b_1, c_1 – półosie części przedniej źródła, cm ,

a_2, b_2, c_2 – półosie części tylnej źródła, cm ,

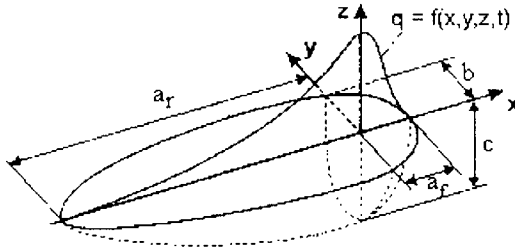
f_p – udział energii wydzielającej się w przedniej części źródła ciepła, $0 \div 2$,

f_t – udział energii wydzielającej się w tylnej części źródła ciepła, $0 \div 2$,

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono graficzne przykłady interpretacji opisanych równaniami (1) i (2) modeli źródeł ciepła.



Rys. 1. Przykłady paraboloidalnego kształtu C-P-N źródeł ciepła przy $q_v = \text{const}$ [1]



Rys. 2. Źródło ciepła o charakterze PE z zaznaczeniem głównych osi $a_f + a_r, b, c$ [2]

Pierwszy model (C-P-N) wydaje się lepiej odzwierciedlać sytuację przy spawaniu wysokoskoncentrowanymi źródłami ciepła, np. strumieniem plazmy, laserem czy wiązką elektronów, a nawet metodą GTA, GMA. Drugi model (PE) wydaje się być bardzo użyteczny przy użyciu źródeł ciepła o mniejszej gęstości mocy źródła ciepła np. dla metod spawania opartych na swobodnym jarzeniu się łuku elektrycznego. Na uwagę zasługuje szczególnie wysoka elastyczność C-P-N źródła ciepła poprzez parametry k, K_z oraz skokowej funkcji Heaviside'a.

3. OCENA ROZKŁADU TEMPERATURY PRZY WYKORZYSTANIU C-P-N MODELU ŹRÓDŁA CIEPŁA

Po uwzględnieniu formy i kształtu przyjętych modeli źródeł ciepła, podstawą oceny przepływu ciepła w płycie o dowolnej grubości będzie równanie Fouriera-Kirchhoffa (F-K):

$$\text{div}(\lambda \text{grad}T) - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q(x_o, y_o, z_o, t) \tag{3}$$

gdzie:

$$q(x_o, y_o, z_o, t) = q_v$$

λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $J/cm \cdot K$,

c_p – ciepło właściwe przy $p = \text{const}$, $J/kg \cdot K$,

ρ – gęstość, kg/cm^3 ,

t – czas, s ,

q_v – energia wydzielona na sposób ciepła w jednostce objętości w czasie, $J/cm^3 \cdot s$,

T – temperatura, $^{\circ}C$.

Rozwiązanie równania (3) dokonano, bazując na następujących warunkach początkowo-brzegowych:

$$T(x_0, y_0, z_0, t_0) = T_0 = 0 \quad (4a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_0} = 0, \quad x_0 \rightarrow \infty, \quad x_0 \rightarrow -\infty \quad (4b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y_0} = 0, \quad y_0 \rightarrow \infty, \quad y_0 \rightarrow -\infty \quad (4c)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z_0} = \alpha_0 \cdot T, \quad z_0 = 0 \quad (4d)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z_0} = -\alpha_1 \cdot T, \quad z_0 = g \quad (4e)$$

α_0 – współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni $z = 0$, $W/cm^2 \cdot K$,
 α_1 – współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni $z = g$, $W/cm^2 \cdot K$.

Stosując technikę obliczeniową opartą na transformacji całkowej otrzymamy ocenę rozkładu temperatur od ruchomego źródła ciepła w postaci:

– względem nieruchomego układu współrzędnych [1]:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{q \cdot k \cdot K_z}{\pi \cdot c \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s))} \cdot \int_0^t \frac{u(t') \cdot dt'}{(1 + 4 + \alpha \cdot k \cdot (t - t'))} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot ((x_0 - v \cdot t')^2 + y^2)}{4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t') + 1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot C_i \cdot D_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - t')) \quad (5)$$

gdzie:

$$B_i = \cos(r_i \cdot z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda r_i} \sin(r_i \cdot z_0) \quad (6a)$$

$$C_i = \frac{2 \cdot r_i^2}{\left[\left(\frac{\alpha_0^2}{\lambda^2} + r_i^2\right) \cdot \left(g + \frac{\alpha_1 \cdot \lambda}{\alpha_1^2 + r_i^2 \cdot \lambda^2}\right) + \frac{\alpha_0}{\lambda}\right]} \quad (6b)$$

$$D_i = \exp(-K_z \cdot s) \frac{(-K_z \cdot \cos(r_i \cdot s) \lambda \cdot r_i + r_i^2 \cdot \sin(r_i \cdot s) \lambda - \alpha_0 \cdot r_i \cdot \cos(r_i \cdot s) - \alpha_0 \cdot K_z \cdot \sin(r_i \cdot s))}{(K_z^2 + r_i^2) \lambda \cdot r_i} + \frac{K_z \cdot \lambda + \alpha_0}{(K_z^2 + r_i^2) \cdot \lambda} \quad (6c)$$

$r_1, r_2, r_3, \dots, (r_i)$ – pierwiastki równania:

$$\operatorname{ctg}(r_i \cdot g) = \frac{\lambda^2 \cdot r_i^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{\lambda \cdot r_i (\alpha_0 + \alpha_1)} \quad (6d)$$

– względem ruchomego układu współrzędnych: $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $z = z_0$:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q \cdot k \cdot K_z}{\pi \cdot c \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s))} \cdot \int_0^t \frac{u(t') \cdot dt'}{(1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t'))} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot ((x + v \cdot (t - t'))^2 + y^2)}{4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t') + 1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot C_i \cdot D_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - t')) \quad (7)$$

gdzie:

$$B_i = \cos(r_i \cdot z) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z) \quad (8)$$

natomiast wartości C_i , D_i i pierwiastków r_i są analogiczne jak w układzie nieruchomym (6b, 6c, 6d).

Przedstawiona forma rozwiązania jest oczywiście zbyt trudna i pracochłonna do bezpośrednich obliczeń analitycznych oraz nieodpowiednia w przypadku obliczeń komputerowych. Analiza pól temperaturowych w czasie stanie się jednak możliwa przy pewnej dyskretyzacji tych równań, umożliwiającej kalkulację komputerową z określoną dokładnością.

Założono, iż ciepło wprowadzane jest przez określony, mały przedział czasowy Δt , a nie impulsowo, gdzie $\Delta t \rightarrow 0$. W związku z tym oddziaływania źródeł ciepła na drodze ich przesuwu sumujemy w punktach oddalonych od siebie o $\Delta x = v\Delta t$. Wobec tego $t' = j \cdot \Delta t$ ($j = 1, 2, 3 \dots n$).

Ponadto zmieniono całkę z chwilowych pól temperatur od źródeł impulsowych na sumę pól temperaturowych, powstających w odstępach czasu równych Δt . Liczba składników sumy zależy od czasu badania przebiegu cyklu cieplnego. Po przekształceniu zależności analitycznych (5) i (7) uzyskujemy zależności użyteczne do obliczeń numerycznych.

W układzie nieruchomym zależność (5) przyjmuje postać [1]:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \sum_{j=1}^n \text{if} \left\{ t < (j-1) \cdot \Delta t, 0, \frac{q \cdot k \cdot K_z \cdot \Delta t}{\pi (1 - \exp(-K_z \cdot s)) \cdot c (1 + 4 \cdot \alpha \cdot k (t - (j-1)\Delta t))} \cdot \exp\left[-k \frac{(x_0 - (j-1)v \cdot \Delta t)^2 + y_0^2}{(1 + 4 \cdot \alpha \cdot k (t - (j-1)\Delta t))}\right] \cdot \sum_{i=1}^m \left(D_i \cdot \left(\cos(r_i \cdot z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z_0) \right) \cdot C_i \cdot \exp[\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t)] \right\} \quad (9)$$

W układzie ruchomym zależność (7) przyjmuje postać:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n \text{if} \left\{ t < (j-1) \cdot \Delta t, 0, \frac{q \cdot k \cdot K_z \cdot \Delta t}{\pi \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s)) \cdot c \cdot (1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t))} \right\}$$

$$\cdot \exp \left[-k \cdot \frac{(x + v \cdot t - (j-1) \cdot v \cdot \Delta t)^2 + y^2}{1 + 4 \cdot \alpha \cdot k(t - (j-1)\Delta t)} \right] \cdot \sum_{i=1}^m D_i \cdot \left(\cos(r_i \cdot z) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z) \right) \cdot C_i \cdot \exp \left[\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t) \right] \quad (10)$$

Zależności (9) i (10) zawierają funkcję IF, której struktura jest następująca: IF (warunek, wyrażenie 1, wyrażenie 2), co praktycznie oznacza, że proces sumowania odbywa się dla kolejnych impulsów dopiero od momentu generowania danego impulsu.

4. OCENA ROZKŁADU TEMPERATUR PRZY WYKORZYSTANIU PE MODELU ŹRÓDŁA

Nieco bardziej złożona sytuacja pojawia się w trakcie aplikacji PE jako spawalniczego źródła ciepła. Analizując chwilowe pola temperatur należy określić dwa równania różniczkowe dla dwóch odmiennych „ćwiartek” elipsoid o tych samych warunkach brzegowych wg (4a) ÷ (4e):

– dla $x > 0$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_0^2} + \frac{q_v f}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11a)$$

– dla $x < 0$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_0^2} + \frac{q_v f}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11b)$$

Transformując je kolejno względem:

a) zmiennej x_0 z jądrem $K(p, x_0) = e^{-ipx_0}$ otrzymamy:

– dla $x_0 > 0$

$$-p^2 \bar{T} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z_0^2} + \frac{6f_f \cdot Q \cdot \delta(t)}{\pi \lambda b c} \cdot \exp \left(\frac{-3a_1^2 (y_0^2 c^2 + z_0^2 b^2)}{a_1^2 b^2 c^2} - \frac{p^2 a_1^2}{12} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (12a)$$

– dla $x_0 < 0$

$$-p^2 \bar{T} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z_0^2} + \frac{6f_f \cdot Q \cdot \delta(t)}{\pi \lambda b c} \cdot \exp \left(\frac{-3a_2^2 (y_0^2 c^2 + z_0^2 b^2)}{a_2^2 b^2 c^2} - \frac{p^2 a_2^2}{12} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (12b)$$

b) zmiennej y_0 z jądrem $K(q, y_0) = e^{-iqy_0}$:

– dla $x_0 > 0$

$$-p^2 \bar{\bar{T}} - q^2 \bar{\bar{T}} + \frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}}{\partial z_0^2} + \frac{2\sqrt{3}f_f \cdot Q \cdot \delta(t)}{\sqrt{\pi \lambda c}} \cdot \exp \left(-\frac{3z^2}{c^2} - \frac{1}{12} \left(p^2 a_1^2 + \frac{1}{12} q^2 b^2 \right) \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\bar{T}}}{\partial t} \quad (13a)$$

– dla $x_0 < 0$

$$-p^2 \bar{\bar{T}} - q^2 \bar{\bar{T}} + \frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}}{\partial z_0^2} + \frac{2\sqrt{3} f_r \cdot Q \cdot \delta(t)}{\sqrt{\pi} \lambda c} \cdot \exp\left(-\frac{3z_0^2}{c^2} - \frac{1}{12}(p^2 a_2^2 + q^2 b^2)\right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\bar{T}}}{\partial t} \quad (13b)$$

c) zmiennej z_0 z jądrem $K(r, z_0) = \cos r z_0 + \frac{\alpha_0}{\lambda r} \sin r z_0$:

– dla $x_0 > 0$

$$\begin{aligned} \bar{\bar{T}}(-p^2 - q^2 - r^2) + \frac{2\sqrt{3} f_r \cdot Q \cdot \delta(t)}{\sqrt{\pi} \lambda c} \cdot \exp\left(-\frac{1}{12}(p^2 a_1^2 + q^2 b^2)\right) \cdot \\ \cdot \int_0^{z_0} \left(\cos(r z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda r} \sin(r z_0)\right) \cdot e^{-\frac{3z_0^2}{c^2}} dz_0 = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\bar{T}}}{\partial t} \end{aligned} \quad (14a)$$

– dla $x_0 < 0$

$$\begin{aligned} \bar{\bar{T}}(-p^2 - q^2 - r^2) + \frac{2\sqrt{3} f_r \cdot Q \cdot \delta(t)}{\sqrt{\pi} \lambda c} \cdot \exp\left(-\frac{1}{12}(p^2 a_2^2 + q^2 b^2)\right) \cdot \\ \cdot \int_0^{z_0} \left(\cos(r z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda r} \sin(r z_0)\right) \cdot e^{-\frac{3z_0^2}{c^2}} dz_0 = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{\bar{T}}}{\partial t} \end{aligned} \quad (14b)$$

Należy jednakże stwierdzić, iż w wyniku transformacji Fouriera względem zmiennej „ z_0 ” w równaniach (14a) i (14b) występuje nierozwiązalna – drogą analityczną – całka:

$$\int_0^{z_0} \left(\cos(r z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda r} \sin(r z_0)\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z_0^2}{c^2}\right) dz_0 \quad (15)$$

W celu określenia rozwiązania całki (15) zastąpiono jej funkcję podcałkową $\exp(-3z_0^2 / c^2)$ szeregiem w postaci [4]:

$$\exp\left(-\frac{3z_0^2}{c^2}\right) = 1 + \sum_{n=1}^{nlast} \frac{\left(-\frac{3}{c^2} z^2\right)^n}{\left[\prod_{n=1}^n (n)\right]} = \text{approx}(z, c, nlast) \quad (16)$$

co pozwala przedstawić całkę (15) w postaci:

$$\int_0^{z_0} \left(\cos(r \cdot z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda r} \sin(r \cdot z_0)\right) \cdot \text{aprox}(z, c, nlast) dz_0 \quad (17)$$

z użyciem komputerowej symboliki obliczeń. Wobec powyższego, przeprowadzając retransformację zmiennych: p na x_0 , q na y_0 oraz r na z_0 , chwilowe pole temperatur od impulsu możemy wyrazić następującą zależnością [4]:

$$\begin{aligned}
 T = & \left(\frac{q \cdot f_r \cdot 3\sqrt{3}}{\pi \cdot \sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_r \sqrt{(12 \cdot \alpha \cdot t + a_f^2)(12\alpha t + b_f^2)}} \exp \left(- \left(\frac{x_0^2}{4\alpha t + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y_0^2}{4\alpha t + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right) \right) + \\
 & + \left(\frac{q \cdot f_r \cdot 3\sqrt{3}}{\pi \cdot \sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_r \sqrt{(12 \cdot \alpha \cdot t + a_r^2)(12\alpha t + b_r^2)}} \cdot \exp \left(- \left(\frac{x_0^2}{4\alpha t + \frac{1}{3}a_r^2} + \frac{y_0^2}{4\alpha t + \frac{1}{3}b_r^2} \right) \right) \right) \cdot \\
 & \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i C_i E_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot t) \quad (18)
 \end{aligned}$$

gdzie:

B_i, C_i, r_i – wg (6a), (6b) i (6d),

$$E_i = \int_0^g \left(\cos(r_i z) + \frac{\alpha_0}{\alpha \cdot r} \sin(r_i z_0) \text{approx}(z, c, \text{nlast}) dz_0 \right) \quad (19)$$

Tak więc, sumaryczne pole temperatur generowane od przesuującego się źródła ciepła wynosi:

$$T(t) = \int_0^t dT(t') \quad (20)$$

gdzie t' jest czasem, który upłynął od momentu startu źródła ciepła $t = 0$ do chwili generacji impulsu ciepła. Bazując na równaniu (20) możemy określić rozkład temperatury przy działaniu ciągłym PE modelu źródła ciepła po upływie czasu t [4]:

– względem nieruchomego układu współrzędnych (x_0, y_0, z_0)

$$\begin{aligned}
 T(x_0, y_0, z_0, t) = & \int_0^t \left(\frac{q f_r 3\sqrt{3} dt'}{\pi \sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_r \sqrt{(12\alpha(t-t') + a_f^2) \cdot (12\alpha(t-t') + b_f^2)}} \right) \cdot \\
 & \cdot \exp \left(- \left(\frac{(x_0 - vt')^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y_0^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right) + \\
 & \frac{q f_r 3\sqrt{3} dt'}{\pi \sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_r \sqrt{(12\alpha(t-t') + a_r^2) \cdot (12\alpha(t-t') + b_r^2)}}
 \end{aligned}$$

$$\cdot \exp \left[- \left(\frac{(x_0 - vt')^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y_0^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i C_i E_i \cdot \exp(-\alpha r_i^2(t-t')) \quad (21)$$

– względem ruchomego układu współrzędnych $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $z = z_0$

$$T(x,y,z,t) = \int_0^t \frac{q f_f 3\sqrt{3} dt'}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_f \sqrt{(12\alpha(t-t') + a_f^2) \cdot (12\alpha(t-t') + b_f^2)}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x + v \cdot (t-t'))^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] + \frac{q f_f 3\sqrt{3} dt'}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_f \sqrt{(12\alpha(t-t') + a_f^2) \cdot (12\alpha(t-t') + b_f^2)}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x + v \cdot (t-t'))^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y^2}{4\alpha(t-t') + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i C_i E_i \cdot \exp(-\alpha r_i^2(t-t')) \quad (22)$$

Wobec powyższego, chcąc dostosować zależności (21), (22) do numerycznych obliczeń nieliniowych, w wyniku uzależnienia od temperatury podstawowych parametrów fizycznych takich jak λ , c_p , ρ , α , konieczna jest ich transformacja do wyrażeń algebraicznych. Postępując analogicznie jak w przypadku zależności (9), (10), wyrażenia określające rozkład temperatury od PE źródła ciepła, przydatne do obliczeń numerycznych, mają postać:

– względem nieruchomego układu współrzędnych (x_0, y_0, z_0)

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \sum_{j=1}^n \text{if} \{ t < (j-1)\Delta t, 0, \left[\frac{q f_f 3\sqrt{3} \Delta t}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_f} \cdot \frac{1}{\sqrt{(12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + a_f^2) \cdot (12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + b_f^2)}} \right] \}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x_0 - v(j-1)\Delta t)^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y_0^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] + \\
 & \frac{q f_f 3\sqrt{3} \Delta t}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_f \sqrt{(12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + a_f^2) \cdot (12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + b_f^2)}} \cdot \\
 & \cdot \exp \left[- \left(\frac{x_0^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y_0^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] \Bigg) \cdot \\
 & \cdot \sum_{i=1}^m B_i C_i E_i \cdot \exp \left[-\alpha r_i^2 (t - (j-1)\Delta t) \right] \Bigg\} \quad (23)
 \end{aligned}$$

– względem ruchomego układu współrzędnych $x = x_0 - v t$, $y = y_0$, $z = z_0$

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, t) &= \sum_{j=1}^n \text{if} \{ t < (j-1)\Delta t, 0, \left(\frac{q f_f 3\sqrt{3} \Delta t}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_f} \right) \cdot \\
 & \frac{1}{\sqrt{(12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + a_f^2) \cdot (12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + b_f^2)}} \cdot \\
 & \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x + v \cdot (t - (j-1)\Delta t))^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] + \\
 & \frac{q f_f 3\sqrt{3} \Delta t}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_f \sqrt{(12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + a_f^2) \cdot (12\alpha(t - (j-1)\Delta t) + b_f^2)}} \cdot \\
 & \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x + v \cdot (t - (j-1)\Delta t))^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}a_f^2} + \frac{y^2}{4\alpha(t - (j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}b_f^2} \right) \right] \Bigg) \Bigg) \cdot \\
 & \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i C_i E_i \cdot \exp \left[-\alpha r_i^2 (t - (j-1)\Delta t) \right] \Bigg\} \quad (24)
 \end{aligned}$$

5. ALGORYTMY ROZWIĄZAŃ PODSTAWOWYCH ZALEŻNOŚCI ROZKŁADU TEMPERATUR – PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

Ustalenie odpowiednich algorytmów rozwiązań równań (9), (10) oraz (23), (24) związane jest w pierwszej kolejności z ustaleniami pierwiastków r_i według równania przestępnego (6d), zgodnie z ustaloną dokładnością (threshold value), kolejny etap – to ocena temperatury przy spełnieniu następujących warunków:

- energia dostarczona jest podczas spawania w czasie Δt , gdzie $\Delta t \rightarrow 0$,
- ciepło dostarczane jest sumą oddziaływań na dystansie $\Delta x = v\Delta t$, natomiast $t^j = j \Delta t$ ($j = 1, 2, 3...n$),
- całki w równaniach (5), (7), (21), (22) są zamienione na operację sumowania z uwzględnieniem zmiany wartości parametrów fizycznych jako funkcji temperatury: $\lambda(T)$, $c_p(T)$, $\rho(T)$, $\alpha(T)$, wprowadzając odpowiednie macierze, co dla stali niskowęglowej przedstawiono w tabeli 1 [1].

Tabela 1. Wartości $\lambda(T)$, $\rho(T) \cdot C_p(T)$, $\alpha(T)$ dla T od 0 do 1500 °C

T	$\lambda(T)$ Wcm ⁻¹ K ⁻¹	T	$\rho(T) c_p(T)$ JK ⁻¹ cm ⁻³	T	$\alpha(T)$ cm ² s ⁻¹
0	0,6285	0	3,307	0	0,190
100	0,5866	100	3,666	100	0,160
200	0,5447	200	4,190	200	0,130
300	0,5028	300	4,570	300	0,110
400	0,4609	400	4,950	400	0,093
500	0,4190	500	5,303	500	0,079
600	0,3771	600	6,082	600	0,062
700	0,3477	700	6,955	700	0,050
800	0,3268	768	9,809	768	0,034
900	0,3226	800	6,536	800	0,042
1000	0,3268	900	5,866	900	0,055
1100	0,3310	901	5,204	901	0,062
1200	0,3352	1200	5,406	1200	0,062
1300	0,3352	1300	5,406	1300	0,062
1400	0,3352	1400	5,406	1400	0,062
1500	0,3352	1500	5,406	1500	0,062

W dalszej kolejności przedstawiono algorytmy dla C-P-N i PE źródeł ciepła w ruchomym układzie współrzędnych.

Algorytm 1 oceny rozkładu temperatury T_n od C-P-N źródła ciepła w ruchomym układzie współrzędnych x, y, z.

$$T_n(x, y, z, t) = \begin{cases} T \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 1...S \\ \alpha \leftarrow \alpha(T) \\ \lambda \leftarrow \lambda(T) \\ \text{for } i \in 1...last \end{cases}$$

$$r_i = \begin{cases} n \leftarrow \text{threshold} \\ \text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right]^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{(\alpha_0 + \alpha_1) \cdot \left[\lambda \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right] \right]} \right] \cdot n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \\ \text{if} \left[\text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right]^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{(\alpha_0 + a_1) \cdot \left[\lambda \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right] \right]} \right] \cdot n \right] > \text{threshold} \\ \text{threshold} + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

$$T \leftarrow T \text{ if } t < (j-1) \cdot \Delta t, 0 < q \cdot k \frac{K_Z \Delta t}{\pi \cdot (1 - \exp(-K_Z \cdot s))}$$

$$\left[\frac{\lambda}{\alpha} + 4 \cdot \lambda \cdot k(t - (j-1) \cdot \Delta t) \right]$$

$$\cdot \exp \left[-k \frac{\left((x + (t - (j-1) \cdot \Delta t)v)^2 + y^2 \right)}{1 + 4\alpha \cdot k(t - (j-1) \Delta t)} \right]$$

$$\sum_{i=1}^{\text{last}} \exp(-K_Z \cdot s) \frac{-K_Z \cdot \cos(r_i \cdot s) \cdot \lambda \cdot r_i + r_i^2 \cdot \sin(r_i \cdot s) \cdot \lambda -}{(K_Z^2 + r_i^2) \cdot \lambda \cdot r_i^2}$$

$$\frac{-\alpha_0 \cdot r_i \cdot \cos(r_i \cdot s) - \alpha_0 \cdot K_Z \cdot \sin(r_i \cdot s)}{(K_i^2 + r_i^2) \cdot \lambda} + \frac{K_Z \cdot \lambda + \alpha_0}{(K_i^2 + r_i^2) \cdot \lambda}$$

$$\left(\cos(r_i \cdot s) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \sin(r_i \cdot z) \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot r_i^2}{\left(\frac{\alpha_0^2}{\lambda^2} + r_i^2 \right) \left(g + \frac{\alpha_1 \cdot \lambda}{\alpha_1^2 + r_i^2 \lambda^2} \right) + \frac{\alpha_0}{\lambda}} \right)$$

$$\exp \left[\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t) \right]$$

T

(24)

Algorytm 2 oceny rozkładu temperatury T_n od PE źródła ciepła w ruchomym układzie współrzędnych x, y, z .

$$T_n(x, y, z, t) = \begin{cases} T \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 1..S \\ \alpha \leftarrow \alpha(T) \\ \lambda \leftarrow \lambda(T) \\ \text{for } i \in 1..last \end{cases}$$

$$r_i = \begin{cases} n \leftarrow \text{threshold} \\ \text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right]^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{(\alpha_0 + \alpha_1) \cdot \left[\lambda \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right] \right]} \cdot n \right] + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \\ \text{if} \left[\text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right]^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{(\alpha_0 + \alpha_1) \cdot \left[\lambda \cdot \left[n + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \right] \right]} \cdot n \right] > \text{threshold} \right. \\ \left. \text{threshold} + (i-1) \cdot \frac{\pi}{g} \quad \text{otherwise} \right] \end{cases}$$

$$T \leftarrow T \text{ if}$$

$$\left\{ t < (j-1)\Delta t, 0, \frac{q f_r 3\sqrt{3}\Delta t}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_r \cdot \sqrt{(12\alpha(t-(j-1)\Delta t) + a_i^2) \cdot (12\alpha(t-(j-1)\Delta t) + b_i^2)}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x + v \cdot (t-(j-1)\Delta t))^2}{4\alpha(t-(j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}a_i^2} + \frac{y^2}{4\alpha(t-(j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}b_i^2} \right) \right] + \frac{q f_r 3\sqrt{3}\Delta t}{\pi\sqrt{\pi} \frac{\lambda}{\alpha} c_r \cdot \sqrt{(12\alpha(t-(j-1)\Delta t) + a_i^2) \cdot (12\alpha(t-(j-1)\Delta t) + b_i^2)}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x + v \cdot (t-(j-1)\Delta t))^2}{4\alpha(t-(j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}a_i^2} + \frac{y^2}{4\alpha(t-(j-1)\Delta t) + \frac{1}{3}b_i^2} \right) \right] \right\}$$

$$\cdot \sum_{i=1}^{last} B_i C_i E_i \cdot \exp[-\alpha r_i^2(t-(j-1)\Delta t)]$$

(25)

T

Algorytmy oceny rozkładu temperatur względem nieruchomego układu współrzędnych różnią się formą zapisu układu współrzędnych: $x_0 = x - vt$, $y_0 = y$, $z_0 = z$.

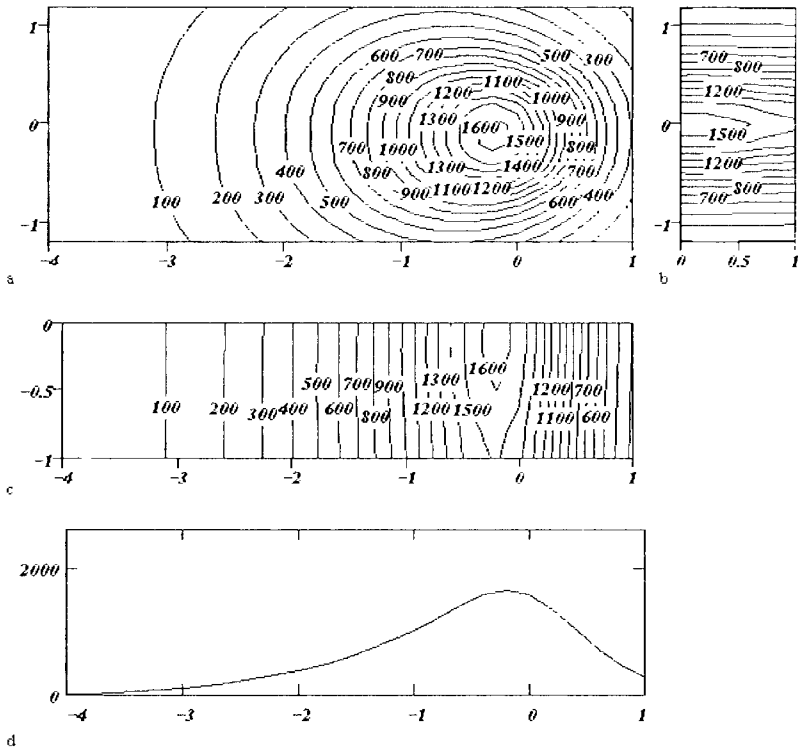
W celu nadania powyższym rozważaniom konkretnych kształtów, na rysunku 3 przedstawiono rezultaty obliczeń dla płyty o grubości 1 cm, spawanej PE modelem źródła o mocy $q = 6000$ W i prędkości $v = 0,15$ cm s^{-1} dla następujących parametrów:

$$f_r = 0,8 ; a_r = 0,8 \text{ cm} ; b_r = 0,7 \text{ cm} ; c_r = 3,0 \text{ cm} ,$$

$$f_i = 1,2 ; a_i = 1,2 \text{ cm} ; b_i = 0,7 \text{ cm} ; c_i = 3,0 \text{ cm} ,$$

$$\text{stab_time} = 19 \text{ s} ; \Delta t = 0,05 \text{ s} ; s = \frac{\text{stab_time}}{\Delta t} = 380$$

$$\text{last} = 60$$



Rys 3. Ustalone pole temperatur względem ruchomego układu współrzędnych x , y , z dla parametrów jw. dla [4]:

- a. przekrój $z = 0$ b. przekrój $x = 0$
 c. przekrój $y = 0$ d. wzdłuż osi x ($y = 0$, $z = 0$)

6. WNIOSKI

Przedstawiona w niniejszym opracowaniu ocena rozkładu temperatur $T(x_0, y_0, z_0, t)$, $T(x, y, z, t)$, przy spawaniu płyt o dowolnej grubości z uwzględnieniem przestrzennych modeli źródeł ciepła: C-P-N oraz PE i nieliniowości procesu z jednoczesną wymianą ciepła na powierzchniach ograniczających płytę, wskazuje na możliwość uzyskania efektywnych rozwiązań poprzez połączenie ich z metodami numerycznymi. Czyni to owe rozwiązania konkurencyjnymi dla metod czysto numerycznych, opartych, np. na metodzie MES oraz użytecznymi w praktyce inżynierskiej i budowie systemów ekspertowych.

LITERATURA

- [1] Ranatowski E., Poćwiardowski A.: An analytic-numerical evaluation of the thermal cycle in the HAZ during welding. Mathematical Modelling of Weld Phenomena IV. Edited by H. Cejrak. Cambridge. Book 695. UK 1998.
- [2] Goldak J., Bibby M., Chakravarti A.: A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B., Vol. 158, 1984.
- [3] Ranatowski E., Poćwiardowski A.: Analityczna ocena cyklu cieplnego w procesie spawania w strefie wpływu ciepła przy wykorzystaniu różnych modeli źródeł ciepła. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy 212, Mechanika 42, 1998.
- [4] Ranatowski E., Poćwiardowski A.: An analytic - numerical estimation of the thermal cycle during welding with various heat source models application.
- [5] Mathematical Modelling of Weld Phenomena IV. Edited by H. Cejrak. Cambridge. UK (in press).

AN ANALYTIC-NUMERICAL ASSESSMENT OF TEMPERATURE DURING WELDING PROCESS WITH THE USE OF THREE DIMENSIONAL HEAT SOURCE MODELS AND A NON-LINEAR PROCESS

Summary

This paper presents a linear and non-linear analytic-numerical calculation of temperature during welding process. Firstly, it determines and describes two three dimensional models of heat sources: the cylindrical-involution-normal configuration of source and the double ellipsoidal configuration of source. Further, the solution of temperature assessment for plates with optional thickness and the radiative heat transfer on both surfaces is presented. Analytic solutions are transformed and adapted to numerical calculation of temperature and the temperature-dependent materials properties are also considered. An analytic example was demonstrated.

Key words: heat sources, analytic calculation of temperature, plate with optional thickness, transformation to numerical calculation, algorithms

UWAGI O MODELOWANIU PROCESU CIEPLNEGO W CZASIE SPAWANIA

Eugeniusz Ranatowski

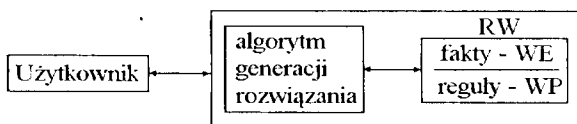
Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz.

W początkowej części artykułu przedstawiono krótką charakterystykę systemów ekspertowych – zasady ich budowy z wykorzystaniem modelowania procesu spawania. W dalszej części przedstawiono wymagania dotyczące zasad modelowania ze szczególnym uwzględnieniem cieplnych procesów spawalniczych, określając kryteria i niezmienniki podobieństwa. Ostatnia część pracy zawiera ocenę klasycznych rozwiązań teorii procesów cieplnych w aspekcie zasad modelowania łącznie z krytyczną oceną rozwiązań analitycznych Rosenthala oraz Rykalina. Podano również przykłady różnorodnych modeli źródeł ciepła możliwych do stosowania w procesie modelowania spawania metali.

Słowa kluczowe: system ekspertowy, zasady modelowania, ocena analitycznych rozwiązań

1. WSTĘP

Bardzo istotnym elementem wspomagającym opracowanie technologii spawania i procesów pokrewnych są szeroko rozumiane systemy ekspertowe i komputerowe. Efektywność ich zastosowania związana jest z przyjętym poziomem reprezentacji wiedzy, obejmującej rozwiązywany problem wraz z zastosowaniem reguł i mechanizmów analizy problemu. W odróżnieniu od komputerowych systemów doradczych, które wspomagają użytkownika w podejmowaniu decyzji, np. technologicznych, systemy ekspertowe rozwiązują kompleksowo problemy techniczne z wykorzystaniem reprezentacji wiedzy, czyli jej formalnego opisu i ustalonego mechanizmu analizy problemu. Na rysunku 1 przedstawiono podstawowe człony systemu ekspertowego [1].



Rys. 1. Podstawowe człony systemu ekspertowego: RW – reprezentacja wiedzy, WP – wiedza podstawowa, WE – wiedza dodatkowa [1]

W przypadku analizy procesu cieplnego spawania, algorytm generacji rozwiązania opiera się na ustaleniach fizyki procesu spawania oraz zagadnieniach pokrewnych, bazując na odpowiednim modelu procesu. Równocześnie sam zapis algorytmu może odbywać się w oparciu o źródło wiedzy podstawowej (WP) oraz wiedzy dodatkowej (WE), opartej na badaniach eksperymentalnych. Dla analizowanego procesu cieplnego spawania, w zakres WP wchodzi prawa fizyczne wyrażone poprzez równania Fouriera, Naviera-Stokesa, Maxwella itp., natomiast w zakres WE wchodzi wartości parametrów opisujących model, z czym wiąże się zagadnienie identyfikacji obiektu badań. Tak więc, podstawowym zadaniem, w pierwszej kolejności jest stworzenie odpowiedniego modelu rzeczywistego obiektu (lub układu) badań.

2. PODSTAWOWE WYMAGANIA DOTYCZĄCE ZASAD MODELOWANIA

Poprawna procedura modelowania wymaga przede wszystkim uporządkowania sfery pojęciowej i wymiarowej procesu.

Ocena zjawisk fizycznych w procesie spawania sprowadza się w praktyce do rozpatrzenia wzajemnych relacji pomiędzy parametrami ekstensywnymi a intensywnymi. Pierwsze można transportować oraz sumować w obszarze o skończonych wymiarach i mogą być skalarami (masa, entropia i jej różne formy), wektorami (pęd, jednostkowy strumień energii) oraz tensorami (jednostkowy strumień pędu).

Parametry intensywne (temperatura T , ciśnienie p , potencjał chemiczny μ , napięcie U) i pseudointensywne (ilorazy dwóch wielkości ekstensywnych – np. gęstość pędu $m\bar{v}N = \rho\bar{v}$, gęstości masy $m/v = \rho$) są wielkościami połowymi, tworząc pole czasoprzestrzenne, gdzie każdemu punktowi przestrzeni przyporządkowuje się określoną wielkość fizyczną. W tej sytuacji siły napędowe transportu wielkości ekstensywnych są wyrażone w postaci gradientów parametrów intensywnych lub pseudointensywnych.

Ponadto w procesie obliczeniowym występują parametry materiałowe, np. ciepło właściwe C , współczynnik przewodzenia ciepła λ itp.

Proces transportu wielkości ekstensywnych wymaga więc obserwacji i oceny parametrów intensywnych w procesie spawania i praktycznie realizowany jest przy pomocy metod: Eulera i Lagrange'a. Metoda Eulera polega na rozpatrzeniu zmiany parametru intensywnego w czasie, w punkcie nieruchomym względem układu odniesienia. Metoda Lagrange'a polega na ocenie zmiany parametru intensywnego w czasie, w punkcie poruszającym się.

Przyjęcie określonego modelu zjawiska, procesu związane jest z założeniem, iż przedstawia on rzeczywistość fizyczną – obiekt badań z na tyle dobrym przybliżeniem, iż zapewnia co najmniej techniczne znaczenie jego analizy. Pojęcie modelu stosuje się do określenia struktury teoretycznej, odzwierciedlającej badaną rzeczywistość, czy też do opisu nowych, mniej zbadanych zjawisk za pomocą znanych reguł, pojęć i praw fizycznych. Ponadto cechą charakterystyczną modelu jest zdolność do zastąpienia badanego, realnego obiektu, układu przez model o określonym stopniu uproszczenia, pozwalając jednakże na transmisję rezultatów badań teoretycznych bądź doświadczalnych modelu na rzeczywisty obiekt badań.

Określenie struktury teoretycznej obiektu badań odbywa się poprzez:

- model fizyczny (obliczeniowy), przedstawiający w pewnym uproszczeniu obiekt (układ rzeczywisty) z zachowaniem jego istotnych cech, które nas interesują,
- model matematyczny, tworzy najczęściej równanie lub układ równań różniczkowych, opisujących wewnętrzne prawidłowości procesu wraz z warunkami brzegowymi, charakterystycznymi dla danego zjawiska.

Powyższe stwierdzenia są zasadniczo zgodne z spostrzeżeniem Fouriera, który w wstępie do „Théorie analytique de la chaleur” stwierdził, iż „... wszystkie zjawiska mające związek z ciepłem zależą od bardzo niewielu ogólnych i prostych faktów w taki sposób, że każde zagadnienie tego rodzaju można sformułować w języku analizy matematycznej...”. Podstawowe prawa fizyczne określa się matematycznie, otrzymując pierwszą generację modeli matematycznych, które w dalszej kolejności podlegają różnym poprawkom, niektóre z nich mają charakter empiryczny. Zgodnie z ustaleniami Riemanna, rzeczywiste prawa podstawowe – na przykład przepływ ciepła – mogą zachodzić jedynie dla wielkości nieskończenie małych i muszą być formułowane jako równania różniczkowe cząstkowe np. równanie (6). Całkowanie tych równań prowadzi do ustaleń i praw dla większych obszarów czasu i przestrzeni, np. do oceny rozkładu temperatur w płycie o dowolnej grubości po upływie czasu t podczas jej spawania. Duża zgodność i zdolność przewidywania – przyczynowa lub probabilistyczna – jest wysoka. Jeżeli spełnione są określone zasady modelowania określonych zjawisk fizycznych.

Poprawne przeprowadzenie badań wymaga użycia właściwych modeli i warunków w aspekcie ich podobieństwa. Znając postać równania różniczkowego, opisującego dany proces, np. przewodzenia ciepła wg równania Fouriera, wówczas możemy ustalić kryteria i niezmienniki podobieństwa.

Kryteria i niezmienniki podobieństwa są liczbami bezwymiarowymi i powstają w wyniku przekształcenia metodą podobieństwa modelu matematycznego procesu lub zjawiska fizycznego. Jeżeli i-tą zmienną w układzie rzeczywistym oznaczymy przez x_i , a w układzie modelowym symbolem \bar{x}_i , to dla obu układów zachodzą związki:

$$\frac{x_1}{\bar{x}_1} = c_1, \dots, \frac{x_i}{\bar{x}_i} = c_i, \dots, \frac{x_n}{\bar{x}_n} = c_n \quad (1)$$

gdzie:

c_i – skala modelowania.

Skala modelowania, będąca w swojej istocie czynnikiem transformującym jest dla każdej zmiennej stała, lecz dla różnych zmiennych może posiadać różną wartość. Jeżeli do ogólnej formy równania zjawiska fizycznego $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ wprowadzimy wielkości \bar{x}_i , to wówczas zachodzi relacja:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \varphi(c_1 \bar{x}_1, c_2 \bar{x}_2, \dots, c_n \bar{x}_n) \quad (2)$$

Dla zjawisk fizycznych podobnych zachodzi związek:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \varphi(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (3)$$

Zależność (3) jest spełniona, jeżeli skala modelowania c_n spełnia poniższy warunek [2]:

$$\Psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = 1 \quad (4)$$

$$\Psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = \frac{\varphi(c_1 \bar{x}_1, c_2 \bar{x}_2, \dots, c_n \bar{x}_n)}{\varphi(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)} \quad (5)$$

Zgodnie z ustaleniami Federmana [2], który stwierdził, że jeżeli liczba zmiennych w eksperymencie wynosi n , a część z nich jest o wymiarach niezależnych $k < n$, to czynniki transformacyjne wyrażone przez skalę modelowania c_i są związane ($n - k$) zależnościami. Wobec powyższego część liczb bezwymiarowych może być przyjęta przez eksperymentatora, stanowiąc niezmienniki podobieństwa. Pozostała część określona jest przyjętymi liczbami bezwymiarowymi i w/w związkiem Federmana nosi nazwę kryteriów podobieństwa. Koniecznym warunkiem występowania podobieństwa między modelem a rzeczywistym obiektem jest opisanie zachodzących w nich procesów fizycznych [3]:

- za pomocą tych samych równań różniczkowych,
- zgodność kryteriów podobieństwa.

W zależności od tego, które elementy opisu matematycznego są znane w praktyce, rozróżniamy kilka grup zadań modelowania:

- zadanie bezpośrednie, w którym badamy reakcję układu na ingerencję zewnętrzną, np. ocenę skutków działania skoncentrowanego, ruchomego źródła ciepła na powierzchnię płyty o dowolnej grubości,
- zadanie pośrednie, odwrotne do poprzedniego, w którym chcemy uzyskać informacje jak należy zmienić warunki, aby uzyskać określoną reakcję układu, np. określony rozkład temperatur w płycie spawanej,
- zadanie indukcyjne, w którym opierając się na pewnym ciągu danych pomiarowych dla różnych warunków brzegowych należy określić matematyczną postać prawa określającego zachodzący proces, np. ocenę rozkładu temperatur przy spawaniu wielowarstwowym.

3. OCENA KLASYCZNYCH ROZWIĄZAŃ TEORII PROCESÓW CIEPLNYCH W ASPEKTCIE ZASAD MODELOWANIA

Przed wszystkim prace Rosenthala i Rykalina zapoczątkowały klasyczne rozwiązania równania różniczkowego przewodzenia ciepła prowadzące do analitycznego określenia pól temperaturowych w czasie procesu spawania. Pola temperatur oraz parametry pokrewne w procesie spawania określono, dokonując następujących uproszczeń i założeń:

- a) analiza ograniczona jest do stanu quasi-stacjonarnego, czyli ustalonego pola temperatur,
- b) źródła ciepła mają postać: punktową, liniową lub płaską o działaniu chwilowym lub ciągłym,
- c) stałe charakteryzujące własności fizyczne materiału nie zależą od temperatury,
- d) spawane ciała mają charakter izotropowy,
- e) brak źródeł lub upustów ciepła w czasie przemian fazowych podczas spawania,
- f) przedmiot, który poddany jest działaniu źródeł ciepła ma charakter: ciała nieskończonego, ciała masywnego ($g > 25$ mm), płyty ($3 < g < 25$ mm), powłoki ($g < 3$ mm), pręta ($F = \text{const}$, F – przekrój).

Należy podkreślić, iż przyjęte przez autorów założenia są daleko idącymi uproszczeniami, rzutującymi w sposób istotny na dokładność oceny temperatur oraz innych parametrów charakteryzujących cieplny cykl spawalniczy.

W pierwszej kolejności naturalne ograniczenia tkwią w samej metodyce obliczeń, opartej na metodzie czysto analitycznej, ograniczonej tylko do rozwiązań liniowych. Stosowane metody najczęściej wykorzystują metodę transformacji całkowych oraz metodę funkcji Greena. Przykładowo podstawą rozwiązań Rykalina, dla powłoki przy liniowej formie źródła ciepła jest całkowanie funkcji Greena. Dla modelu płyty i ciała masywnego zastosowano punktowy model źródła ciepła. Wpływ grubości spawanej płyty na rozkład temperatur w metodzie Rykalina i Rosenthala został w tym przypadku uwzględniony poprzez tzw. metodę źródeł, polegającą na wprowadzeniu dodatkowych, fikcyjnych źródeł ciepła. Związane jest to z uwzględnieniem ograniczonego przepływu ciepła w kierunku osi „z”, związanego z grubością elementu. Przy przyjęciu punktowego źródła ciepła, kształt spoiny i głębokość penetracji zależy tylko od mocy źródła ciepła, chociaż jak wykazuje praktyka spawalnicza, ta sama moc, lecz inne parametry określające charakterystykę źródła ciepła tworzą spoinę o różnym kształcie. Dzięki metodom czysto analitycznym uzyskano również rozwiązania dla modelu źródła ciepła o charakterze kołowo-normalnym. Przyjęte powyżej modele źródeł ciepła, w rozwiązaniach analitycznych, stwarzają w naturalny sposób ograniczenia związane z koniecznością przyjęcia adekwatnych modeli elementów spawanych, co uczyniono w klasycznych rozwiązaniach Rykalina i Rosenthala, wprowadzając modele ciała nieskończonego, półnieskończonego, płyty, powłoki i pręta. Należy podkreślić, iż przyjęte modele zarówno źródeł ciepła, jak i związane z nimi modele ciał spawanych nie są adekwatne do stosowanych obecnie metod, np. opartych na strumieniu plazmy, laserze, wiązce elektronowej, czy nawet opartych na łuku elektrycznym w metodzie GTA, GMA czy automatycznym spawaniu łukiem krytym. Pierwszą konsekwencją obecnego stanu techniki spawalniczej jest konieczność użycia nowych modeli źródeł ciepła o charakterze przestrzennym ale o różnej „smukłości” i wprowadzenia zupełnie nowej relacji w zakresie źródła ciepła model elementu spawanego. Związane jest to z zupełnie innym przepływem ciepła w elemencie spawanym oraz odmienną charakterystyką rozkładu temperatur i parametrów pokrewnych.

Istotną wadą klasycznych rozwiązań Rykalina i Rosenthala jest również nieuwzględnienie wymiany ciepła na powierzchniach ograniczających elementy spawane. Kolejną wadą, wynikającą z naturalnych ograniczeń metody analitycznej jest identyfikowanie procesów spawalniczych w opisie fizycznym jako liniowych, chociaż natura ich opisu powinna być nieliniowa, gdyż taka jest w rzeczywistości, co możemy łatwo udowodnić, bazując na określonych w punkcie 2 zasadach modelowania. Jeżeli dla stacjonarnego układu współrzędnych x_0 , y_0 , z_0 , przyjmiemy za podstawę analizy równanie różniczkowe prowadzenia ciepła w płycie, w postaci:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q_v(x_0, y_0, z_0, t) \quad (6)$$

gdzie:

- T – temperatura, °C lub K,
- t – czas, s,
- λ – współczynnik przewodności cieplnej, $W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$,
- c_p – ciepło właściwe, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,

$$\begin{aligned} \rho & - \text{gęstość, kg}\cdot\text{cm}^{-3}, \\ q_v & - \text{źródło ciepła, W}\cdot\text{cm}^{-3}. \end{aligned}$$

to dla klasycznych rozwiązań analitycznych wg Rykalina i Rosenthala parametry fizyczne charakteryzujące ww. model procesu są stałe, natomiast dla rzeczywistego układu spawanego są nieliniowe, co wynika z ich uzależnienia od temperatury T . Wobec powyższego charakterystyka podobieństwa wg równań (1) ÷ (4) wynosi:

- dla modelu procesu

$$\lambda = \text{const}$$

$$c_p = \text{const}$$

$$\rho = \text{const}$$

dla układu rzeczywistego

$$\bar{\lambda}(T) \neq \text{const}$$

$$\bar{c}_p(T) \neq \text{const}$$

$$\bar{\rho}(T) \neq \text{const}$$

$$\frac{\lambda}{\bar{\lambda}(T)} \neq c_1, \frac{c_p}{\bar{c}_p(T)} \neq c_2, \frac{\rho}{\bar{\rho}(T)} \neq c_3 \quad (7)$$

$$\Psi(c_1, c_2, c_3) \neq 1 \quad (8)$$

Również parametr q_v – w przypadku modelu i układu rzeczywistego – nie spełnia podobieństwa geometrycznego dla większości współczesnych metod spawania – lutowego pod topnikiem, ręcznego spawania lutowego elektrodami głęboko topiącymi metodą GTA oraz GMA, a także wysokoskoncentrowanymi źródłami ciepła (strumień plazmy, laser, wiązka elektronów) przy przyjęciu punktowego, liniowego lub płaskiego modelu źródła ciepła \bar{q}_v :

$$\frac{q_v}{\bar{q}_v} \neq c_4 \quad (9)$$

W związku z powyższym w tabeli 1 zestawiono różnorodne modele źródeł ciepła, adekwatne do różnorodnych źródeł ciepła stosowanych w procesach spajania – od klasycznych opartych na łuku elektrycznym, płomieniu acetylenowym do współczesnych, wynikających ze stosowania strumienia plazmy, wiązki elektronowej oraz lasera [3]. Umożliwiają one poprawny dobór relacji q_v / \bar{q}_v . Na szczególną uwagę zasługują dwa modele: cylindryczno-potęgowo-normalny oraz podwójny elipsoid z uwagi na swoją dużą uniwersalność i elastyczność w zakresie doboru jego kształtu. Pierwszy model jest bardzo użyteczny w procesie modelowania przy użyciu wysokoskoncentrowanych modeli źródeł ciepła, natomiast drugi w przypadku niższej koncentracji gęstości mocy źródeł ciepła.

Tabela 1. Modele źródeł ciepła stosowane przy spajaniu metali

Lp.	Rodzaj modelu źródła ciepła	Analityczna charakterystyka modelu
1.	Punktowe źródło ciepła chwilowego działania	$q_v = Q \cdot \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z) \cdot \delta(t)$
2.	Liniowe źródło ciepła chwilowego działania	$q_v = \frac{Q}{s} \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta(t) \cdot u(s-z)$
3.	Liniowe źródło ciepła ciągłego działania	$q_v = \frac{Q}{s} \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot u(s-z)$
4.	Kołowo-normalne źródło ciepła ciągłego działania, penetrujące całą grubość płyty	$q_v = \frac{Q \cdot k}{g \cdot \pi} e^{-kr^2}, r^2 = x^2 + y^2, q_{v \max} = \frac{Q \cdot k}{g \cdot \pi}$
5.	Kołowo-normalne źródło ciepła ciągłego działania o dowolnej głębokości penetracji s	$q_v = \frac{Q \cdot k}{s \cdot \pi} e^{-kr^2} (1 - u(z-s)), q_{v \max} = \frac{Q \cdot k}{s \cdot \pi}$
6.	Płasko-kołowo-normalne źródło ciepła ciągłego działania o działaniu powierzchniowym s = 0	$q_v = \frac{2Q \cdot k}{\pi} e^{-kr^2} \cdot \delta(z), q_{v \max} = \frac{2Q \cdot k}{\pi}$
7.	Cylindryczno-potęgowo-normalny model źródła ciepła	$q_v = q_{v \max} \cdot e^{-kz^2 - K_z z} (1 - u(z-s))$ $q_{v \max} = \frac{k \cdot K_z \cdot Q}{\pi [1 - \exp(-K_z \cdot s)]}$
8.	Półkolisty model źródła ciepła ciągłego działania	$q_v = \frac{6\sqrt{3} \cdot Q}{R^3 \pi \sqrt{\pi}} e^{\frac{3}{R^2}(x^2+y^2+z^2)} q_{v \max} = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^2 \cdot R^3}$
9.	Półelipsoidalny model źródła ciepła ciągłego działania (a, b, c - półosie elipsoidy)	$q_v = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{c^2}}$ $q_{v \max} = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^2} \cdot \frac{1}{abc}$
10.	Dwie ćwierćelipsoidy stanowiące model źródła ciepła (przednia część źródła a ₁ , b ₂ , c ₃ - półosie, tylna część źródła a ₂ , b ₂ , c ₂ - półosie) b ₁ = b ₂ = b c ₁ = c ₂ = c a ₁ ≠ a ₂	- przednia część źródła $q_{vp} = f_p \frac{6\sqrt{3}Q}{a_1 bc \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a_1^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{c^2}}$ - tylna część źródła $q_{vt} = f_t \frac{6\sqrt{3}Q}{a_2 bc \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a_2^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{c^2}}$ k(f _p + f _t) = 2

Powyższe ustalenia wskazują na brak podobieństwa dla większości metod spawania pomiędzy modelem a rzeczywistym układem spawania. Stwarza to naturalne ograni-

czenia w ich stosowaniu we współczesnych rozwiązaniach spawalnictwa, kierując uwagę na takie rozwiązania, w których sam proces modelowania pozwala w pełniejszym stopniu spełnić podstawowe zasady i kryteria podobieństwa poprzez aplikację metod analityczno-numerycznych i numerycznych.

4. WNIOSKI

Poprawne rozwiązanie zagadnień termicznych procesu spawania koniecznie wymaga aplikacji:

- tych samych równań różniczkowych wraz z warunkami początkowymi i brzegowymi,
- zgodności kryteriów podobieństwa, dla przyjętego modelu i rzeczywistego układu spawanego.

Wyżej wymieniony problem nabiera szczególnego znaczenia w formowaniu rozwiązań w komputerowych systemach doradczych i ekspertowych.

LITERATURA

- [1] Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych. PWN, Warszawa 1990.
- [2] Gabryszewski Z., Gronostajski J.: Mechanika procesów obróbki plastycznej. PWN, Warszawa 1991.
- [3] Ranatowski E.: Elementy fizyki spajania metali. Wyd. Uczeln. ATR, Bydgoszcz 1999.
- [4] Szuks E.: Modelowanie matematyczne w fizyce technicznej. WNT, Warszawa 1977.

REMARKS ON MODELLING OF THE THERMAL PROCESS UNDER WELDING

Summary

The paper begins with a short characteristic of expert systems - rules of their structure with applied modelling of the welding process. Further, it presents the requirements as regards modelling rules with a special consideration for the welding thermal process and determines the criteria and invariant of similarity. The final part of this paper contains an assessment of classical solution of thermal process theory in aspect of laws of modelling together with critical evaluation of Rosenthal's and Rykalin's analytic solutions. An example of different heat source models that can be applied in modelling of the thermal process under welding is also given.

Key words: expert system, rules of modelling, assessment of analytic solution

WYMIANA CIEPŁA W PODGRZEWACZACH WARNIKÓW O DZIAŁANIU OKRESOWYM

Marian Szymański

Katedra Techniki Ciepłej i Metrologii
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Przedstawiono analizę parametrów pracy podgrzewaczy warników. Określono możliwości intensyfikacji wymiany ciepła w podgrzewaczach.

Słowa kluczowe: przemysł celulozowo-papierniczy, warzelnia siarczanowa

1. WSTĘP

Roztworzenie drewna metodą siarczanową w warnikach o działaniu okresowym charakteryzuje się dużymi zmianami zapotrzebowania ciepła. Szczególnie duży pobór ciepła występuje w początkowym okresie procesu, gdzie w możliwie krótkim czasie – około 90 minut – należy podgrzać wsad warnika od temperatury początkowej $t_1 \cong 70$ °C do końcowej $t_k = 172$ °C. Instalowane przy warnikach podgrzewacze, stanowiące wraz z pompami cyrkulacyjnymi oraz układem rurociągów i armatury zespoły grzewczo-cyrkulacyjne winny spełniać wymagania:

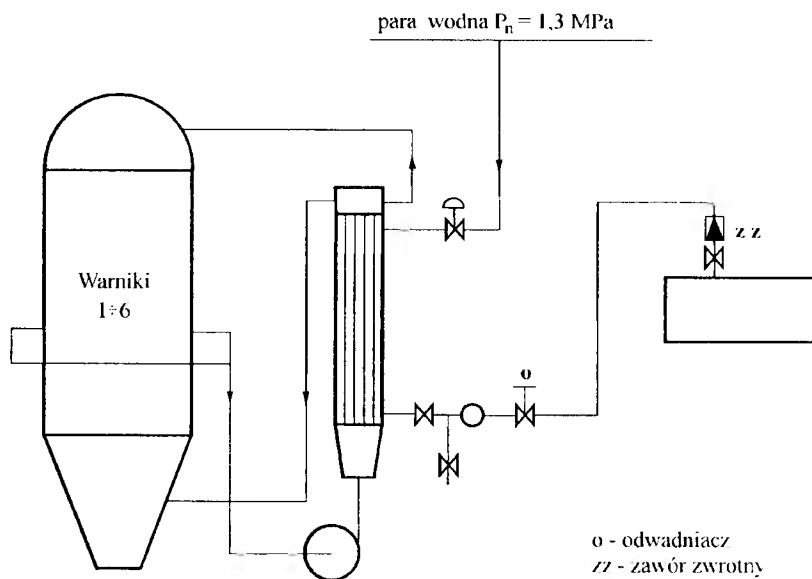
- zapewniać możliwie szybkie podgrzanie wsadu,
- równomierne podgrzewanie wsadu w całej objętości warnika,
- równomierną cyrkulację cieczy warzelnej w całej objętości warnika,
- dokładną regulację temperatury cieczy warzelnej według ustalonego programu roztwarzania.

Podgrzewacz warnika musi mieć moc cieplną, zapewniającą szybkie podgrzewanie wsadu warnika. Obliczenia parametrów: powierzchni wymiany ciepła, strumieni mas czynników przepływających przez podgrzewacz winny uwzględniać zapotrzebowanie ciepła w początkowym okresie roztwarzania.

Analizę wymiany ciepła między parą grzejną a ługiem warzelnym przeprowadzono na przykładzie powszechnie stosowanego podgrzewacza typu Schaufelbergera.

2. PRZEPIY W CIEPŁA W PODGRZEWACZU

Podgrzewacz Schaufelbergera jest wymiennikiem wielorurowym. Podgrzewany ług warzelny przepływa wewnątrz rur podgrzewacza, a czynnik grzejny – para wodna – przepływa i skrapla się w przestrzeni międzyrurowej, omywając zewnętrzne powierzchnie rur. Schemat układu podgrzewacza przedstawiono na rysunku 1.



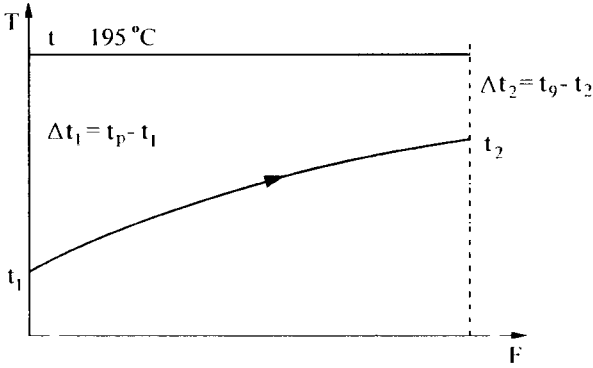
Rys. 1. Schemat układu podgrzewacza typu Schaufelberga

Przykładowo rozpatrywany podgrzewacz zainstalowany przy warniku o pojemności 225 m³ ma następujące dane techniczne:

- liczba rur $i = 241$
- wymiary rur:
 - średnica wewnętrzna $d_1 = 31$ mm
 - średnica zewnętrzna $d_2 = 35$ mm
 - długość robocza $l = 7905$ mm
 - długość całkowita $l_c = 8000$ mm
- wymiary płaszcza:
 - średnica zewnętrzna
 - I stopnia $D_1 = 1000$ mm
 - II stopnia $D_2 = 810$ mm
 - grubość ścianki $\delta = 14$ mm
- powierzchnia wymiany ciepła $F = 210$ m²
- wydatek pompy cyrkulacyjnej $\dot{V} = 1440$ m³/h
- ciśnienie robocze po stronie ługu $p = 0,8$ MPa
- ciśnienie robocze po stronie pary $p_p = 1,2$ MPa
- temperatura pary grzejnej $t_p = 195$ °C

Przy izobarycznej wymianie ciepła temperatura skraplającej się pary grzejnej ma stałą wartość wzdłuż powierzchni wymiany. Temperatura ługu warzelnego zmienia się wzdłuż powierzchni wymiany ciepła. W okresie podgrzewania początkowego zmienia się również temperatura ługu na wlocie i wylocie podgrzewacza. Przebieg zmian temperatury wzdłuż powierzchni wymiany ciepła, a więc wzdłuż rur podgrzewacza przedstawiono na rysunku 2.

Zależność opisującą zmianę temperatury ługu można określić na podstawie bilansu cieplnego nieskończenie małego wycinka powierzchni wymiany ciepła.



Rys. 2. Zmiana temperatury czynników wymieniających ciepło wzdłuż rur podgrzewacza

Określona na jego podstawie wartość chwilowej różnicy temperatury ługu warzelnego ma wartość:

$$t = t_p - (\Delta t_1) \cdot e^{-W \cdot \tau} \quad (1)$$

gdzie:

t – chwilowa temperatura ługu warzelnego,

t_p – temperatura kondensacji pary wodnej,

Δt_1 – różnica temperatury pary grzejnej i ługu warzelnego na wlocie do podgrzewacza, $\Delta t_1 = t_p - t_1$,

t_1 – temperatura ługu warzelnego na wlocie do podgrzewacza,

$$W = \frac{\overset{\circ}{m} \cdot \tau}{Rz} \left(1 - e^{\frac{k \cdot F}{\overset{\circ}{m} \cdot \tau}} \right) \text{ – stała układu warknika,}$$

$\overset{\circ}{m}$ – strumień masy ługu warzelnego, kg/h

Rz – zastępczy (uwzględniający straty ciepłone) równoważnik wodny warknika,

k_1 – współczynnik przenikania ciepła od pary do ługu warzelnego.

Wartość współczynnika określona jest podstawową zależnością:

$$\frac{1}{k_1} = \frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} + \frac{l_n \frac{d_2}{d_1}}{2 \lambda_s} + \frac{1}{d_2 \cdot \alpha_2}$$

gdzie:

α_1 – współczynnik przyjmowania ciepła od ścianki wewnętrznej rury do ługu warzelnego w $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,

α_2 – współczynnik przyjmowania ciepła od pary wodnej do zewnętrznej powierzchni rury w $\frac{W}{m^2 \cdot K}$,

λ_s – współczynnik przewodzenia ciepła przez ściankę rury w $\frac{W}{m \cdot K}$, zależny od temperatury.

Wartość współczynnika α_1 obliczana jest z zależności:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

gdzie:

$$Nu = \frac{\alpha_1 \cdot d_1}{\lambda_s}$$

$$Re = \frac{w \cdot d_1 \cdot \rho}{\lambda_s}$$

$$Pr = \frac{\eta_p \cdot c_p}{\lambda_s}$$

w – średnia prędkość przepływu ługu w rurach podgrzewacza w m/s,

ρ – gęstość ługu w kg/m^3 ,

η_p – lepkość dynamiczna ługu w Pa·s,

c_p – ciepło właściwe ługu w J/kg·K.

Na wartość α_1 duży wpływ ma liczba Reynoldsa, której wartość zależy od prędkości średniej przepływu ługu w rurach. Dla rozpatrywanego podgrzewacza prędkość przepływu ługu równa się:

$$\omega = \frac{4 \cdot \dot{V}}{i \cdot \pi \cdot d_1^2}$$

i ma wartość 2,2 m/s. Prędkość ta w podgrzewaczach Schaufbergera osiąga wartość 1,8-3,4 m/s. Wartość liczby Reynoldsa w rozpatrywanym podgrzewaczu wynosi:

- dla temperatury ługu warzelnego 87 °C $Re = 128163$,
- dla temperatury ługu warzelnego 170 °C $Re = 215025$.

W rurach podgrzewacza ług warzelny przepływa ruchem burzliwym.

Wydatek pompy cyrkulacyjnej zapewnia 6,4 cyrkulacji ługu warzelnego w ciągu godziny. Stosowane podgrzewacze rozpatrywanego typu powinny zapewniać 6-10 cyrkulacji w ciągu godziny.

Obniżenie wartości strumienia ciepła wymianianego między parą grzejącą a ługiem powodowane jest osadzaniem się na wewnętrznej powierzchni rur stałego osadu. Prowadzi to do wzrostu oporu cieplnego rur oraz zmniejszenia ilości cyrkulującego ługu.

W rozpatrywanych podgrzewaczach stwierdzono sporadycznie występującą inkrustację wewnętrznej powierzchni rur powodującą, ze względu na trudności usunięcia osadu, znaczne kłopoty ruchowe. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że podstawowym składnikiem osadu – 94,4 % – był węglan wapnia $CaCO_3$. Związek ten wprowadzony może być do ługu warzelnego z niedostatecznie sklarowanym ługiem białym.

Przy prawidłowym składzie ługu warzelnego i prawidłowo przebiegającym procesie roztwarzania siarczanowego nie powinny występować po stronie ługu warzelnego zjawiska zanieczyszczenia inkrustami powierzchni wymiany ciepła. Do przyczyn inkru-

stacji wewnętrznej powierzchni rur podgrzewacza oprócz wspomnianej już obecności węglańu wapnia należą:

- obecność w ługu białym krzemianu sodowo-glinowego pochodzącego z procesu kaustyzacji prowadzonej z użyciem niewłaściwego wapna palonego CaO, zawierającego glin i krzem lub przechodzącym do ługu zielonego w wyniku erozji dna pieca topielnego i złego sklarowania tego ługu w kaustyzacji,
- obecność w ługu białym siarczanu sodowego Na₂SO₄ powodowana zbyt niskim stopniem redukcji tego związku w kotle sodowym.

Rozpuszczalność tych związków w wodzie maleje przy wzroście temperatury. Krzemian sodowo-glinowy tworzy na powierzchni rur niekrystaliczną, szklistą masę trudną do usunięcia. Węglan wapnia wytrąca się z cieczy warzelnej, osadza na powierzchni rur i przypala się. Inkrustację wzmaga osadzanie się i przypalanie włókien masy celulozowej oraz mydeł żywicznych zawartych w ługu czarnym.

Inkrustacji wewnętrznych powierzchni rur sprzyjają:

- duża chropowatość powierzchni wewnętrznych rur,
- stosowanie rur ze stali węglowej,
- małe prędkości cieczy warzelnej w rurach podgrzewacza,
- duża temperatura wewnętrznej powierzchni rur.

Chropowatość wewnętrznej powierzchni rur podgrzewacza może zostać zwiększona w wyniku mechanicznego usuwania osadu. Rury ze stali stopowych mają mniejszą chropowatość powierzchni, niż rury ze stali węglowej. Nadmienić jednak należy, że przewodność cieplna stali stopowych jest mniejsza, niż stali węglowej.

Prędkość przepływu ługu warzelnego w rurach podgrzewacza ma stosunkowo duży wpływ na przebieg wymiany ciepła. Wraz z jej wzrostem rośnie wprost proporcjonalnie wartość liczby Reynoldsa, która w decydującym stopniu wpływa na wartość współczynnika przyjmowania ciepła α_1 . Jednocześnie stosowanie dużych prędkości przepływu ługu warzelnego ogranicza możliwości powstawania osadu na wewnętrznej powierzchni rur. Stosowaną prędkość przepływu ługu w rozpatrywanym podgrzewaczu określić należy, jako zbliżoną do średnich wartości występujących w podgrzewaczach Schauffelberga.

3. ANALIZA ODBIORU KONDENSATU

Do odprowadzania kondensatu z podgrzewaczy ługu warzelnego, ze względu na bardzo duży przepływ pary grzejącej, nadają się odwadniacze:

- pływakowe zbiornikowe,
- dyszowe.

W rozpatrywanych podgrzewaczach stosowane są odwadniacze dyszowe. Odwadniacze mogą pracować przy zmiennych przepływach pary i stwarzają możliwość regulacji przepływu. Strata ciśnienia spowodowana działaniem odwadniacza dyszowego przy strumieniu masy kondensatu $m_s = 24000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$, jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, wynosi 0,2024 MPa.

Rozpatrywane odwadniacze są jednogniazdowymi ręcznie sterowanymi zaworami regulacyjnymi o współczynnikach przepływu $k_v = 19,26 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ przy gęstości czynnika

$$\rho = 876 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

Poprawna praca odwadniacza ma duże znaczenie dla przebiegu wymiany ciepła w podgrzewaczu.

Przepływ wraz z kondensatem pary wodnej prowadzi do strat czynnika grzejnego przy jednoczesnym obniżeniu współczynnika przejmowania ciepła od pary do zewnętrznej powierzchni rur. Zalanie źle odprowadzanym kondensatem części podgrzewacza prowadzi do zmniejszenia intensywności wymiany ciepła.

4. WNIOSKI

W rozpatrywanych podgrzewaczach warników intensyfikację wymiany ciepła można osiągnąć poprzez zwiększenie prędkości przepływu ługu warzelnego, zapobieganie wydzieleniu się osadu na wewnętrznej powierzchni rur i zapewnienie prawidłowej pracy odwadniaczy.

Zwiększenie prędkości przepływu ługu warzelnego z 2,2 m/s do 2,5 m/s, a więc o około 13,6 % spowodowałoby wzrost oporów przepływu $\Delta \sim 27 \%$, a związany ze wzrostem prędkości przyrost współczynnika przejmowania ciepła α_1 wynosilby $\sim 10 \%$.

LITERATURA

- [1] Szymański M.: Analiza parametrów pracy podgrzewaczy warników. Bydgoszcz 1999 (praca niepublikowana).

HEAT EXCHANGE IN HEATERS OF THE DIEGESTER BATCH COOKING

Summary

The paper provides an analysis of the operation of the diegester heater. It defines the possibility of intensification of heat exchange in the heater.

Key words: cellulose and paper industry, sulphate digestion

PROGNOZOWANIE STANU MASZYN

Henryk Tylicki

Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W opracowaniu przedstawiono problematykę prognozowania stanu technicznego maszyn, szczególnie wyznaczania terminu kolejnego diagnozowania w ich dynamicznym systemie obsługi. Rozpatrzono zagadnienie wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego maszyn, określono zbiór rozwiązań dopuszczalnych i zbiór kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnej zadania optymalizacyjnego oraz opracowano metodę wyznaczania terminu kolejnego diagnozowania. Zaprezentowano rozwiązanie zadania polioptymalizacji wraz z algorytmami wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego maszyn.

Słowa kluczowe: dynamiczny system obsługi maszyn, prognozowanie stanu, polioptymalizacja, termin kolejnego diagnozowania maszyn

1. WSTĘP

Urządzenia techniczne w każdej chwili znajdują się w pewnym określonym stanie, sekwencje czasowe tych stanów rozpatruje się jako ich czas istnienia. Destrukcyjne oddziaływanie czynników eksploatacyjnych (roboczych i zewnętrznych) prowadzi do zmiany stanu technicznego maszyn. W celu podjęcia decyzji eksploatacyjnych możliwe jest określenie tych stanów za pomocą metod i środków diagnostyki technicznej, co może być wykorzystane w każdej fazie istnienia maszyn. Może to być decyzja o ich użytkowaniu, o podjęciu przedsięwzięć profilaktycznych (regulacja lub wymiana) lub wprowadzeniu zmian podczas konstruowania i wytwarzania maszyn. Możliwe jest to dzięki diagnostyce technicznej, która pozwala na udzielenie odpowiedzi na pytania:

1. Jaki jest aktualny stan badanej maszyny?
2. Jak ocenić przeszłość maszyny na podstawie jej aktualnego stanu?
3. Jak przewidzieć przyszłą ewolucję stanu maszyny?

Odpowiedź na każde z tych pytań wymaga przeanalizowania zbioru zadań pojawiających się podczas opracowywania algorytmów diagnozowania.

W przypadku odpowiedzi na pytanie dotyczące przyszłej ewolucji stanu maszyny należy podczas procesu prognozowania rozwiązać zadanie, polegające na przewidywaniu stanów maszyny, które zaistnieją w przyszłości w chwilach $\Theta_p > \Theta_b$ (Θ_b – chwila diagnozy, Θ_p – jedna z chwil w przyszłości).

W odróżnieniu od klasycznego zadania diagnostycznego, którego celem jest identyfikacja aktualnego stanu maszyny według sekwencji:

„chwilowa wartość sygnału diagnostycznego → chwilowy stan maszyny”

w zadaniu prognostycznym występuje sekwencja:

„historia wartości sygnału diagnostycznego → prognozowana wartość sygnału diagnostycznego → prognozowany stan maszyny”.

Przyszłe stany maszyny można przewidzieć opierając się na:

- diagnozie przeprowadzonej dla chwili Θ_b ,
- znajomości przynajmniej niektórych stanów w chwilach $\Theta_i < \Theta_b$, poprzedzających Θ_b ,
- znajomości warunków pracy maszyny w czasie od chwili Θ_b do chwili Θ_p , której dotyczy proces prognozowania.

2. CHARAKTERYSTYKA PROCESU PROGNOZOWANIA

Proces prognozowania stanu technicznego maszyn (PSTM) wyróżnia się jako pewien zbiór czynności, które występują w odpowiedniej kolejności (rys. 1).

Wielkościami wejściowymi są: zamierzony cel prognostyczny, wartości symptomów, możliwości realizacji odpowiednich możliwości prognostycznych (metody prognostyczne) oraz informacje o obiekcie badań i jego otoczeniu. Wielkością wyjściową jest wynik realizacji procesu wyznaczania PSTM. Poszczególne bloki schematu reprezentują kolejno podejmowane czynności i towarzyszące im decyzje, które są elementami procesu wyznaczania PSTM.

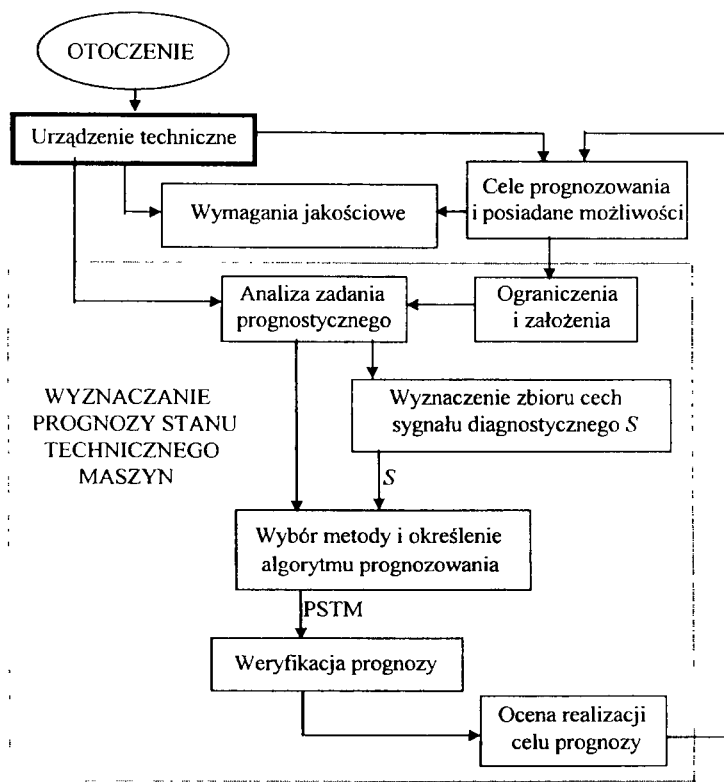
Analiza zadania prognostycznego zależy od rodzaju obiektu. W zależności od tego, jaka jest to maszyna oraz, jakie jej cechy stanu są celem badania diagnostycznego, należy rozpatrzyć możliwe oddziaływania różnorodnych czynników otoczenia, a szczególnie ich wpływ na proces zużycia.

Etap wyznaczania zbioru wartości symptomów związany jest z czynnościami wyboru i rejestracji informacji uzyskanych podczas diagnozowania maszyn. Konsekwencją realizacji tego etapu powinno być uzyskanie optymalnego zbioru danych (wartości symptomów w chwilach Θ_i , $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$).

Etap określenia predyktora jest zasadniczym elementem procesu prognozowania. Wybór właściwej metody prognozowania jest trudny, ponieważ uwarunkowany jest nie tylko dostępną liczbą danych, czy informacji wyznaczających granice poznania istoty fizycznej prognozowanych zjawisk, lecz także względami realizacyjnymi, które determinują, w jakich okolicznościach i przy użyciu jakich środków będzie realizowane wyznaczanie prognozy. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest konieczność podjęcia problemu wyboru metod prognozowania. W trakcie wyznaczania metod należy pamiętać, aby spełniały one postulaty wynikające z właściwości maszyny, a przede wszystkim opierały się na małej liczbie elementów szeregu czasowego oraz, aby cechowała je zdolność szybkiej adaptacji do możliwych zmian obserwowanych parametrów diagnostycznych. Istotną sprawą powinna być też możliwość algorytmizacji oraz sensownej interpretacji wyników procesu prognozowania.

Etap weryfikacji przyjętego rozwiązania prognostycznego polega zarówno na ocenie stopnia dokładności prognozy ocenianej według przyjętego kryterium, jak i jej wiarygodności. W praktyce przydatność metody wyznacza, przeważnie możliwy do przyjęcia, rząd wielkości błędów prognoz (np. 10 % wartości prognozowanej wielkości). Granice dopuszczalnych błędów przyjmować mogą różne wartości dla parametrów diagnostycznych i horyzontu prognozy. Dla niektórych metod wyznacza się mierniki oceny „ex post”, które oblicza się na podstawie wyników prognoz i faktycznie zaobserwowanych wartości prognozowanych symptomów.

Kończącym etapem realizacji komentowanych etapów procesu wyznaczania prognoz jest ocena osiągniętych wyników, tzn. porównanie, na ile rezultaty odpowiadają zamierzonemu celowi. Konsekwencją takiej oceny powinna być decyzja o akceptacji przyjętego sposobu rozwiązania lub, jeśli rozwiązania są niezadowalające, konieczność jego modyfikacji. Na schemacie (rys. 1) działanie takie reprezentuje sprzężenie zwrotne oceny osiągniętych wyników.



Rys. 1. Schemat wyznaczania prognozy stanu technicznego maszyn (PSTM)

Głównymi problemami pojawiającymi się przy rozwiązaniu zadania prognozowania stanu technicznego maszyn są więc:

- sformułowanie celu prognozowania stanu technicznego maszyny i określenie postaci prognozy,
- zmiana stanu technicznego maszyny w czasie eksploatacji,

- opis stanu technicznego maszyny za pomocą cech stanu oraz zależność pomiędzy cechami stanu a sygnałami diagnostycznymi,
- rozwiązanie zadania prognozowania stanu.

3. OKREŚLENIE POSTACI PROGNOZY

Rozpoznanie zmian stanu maszyny w określonym horyzoncie czasowym jest nieodzowne dla uzyskania właściwej efektywności działania maszyny, co pozwala użytkownikowi podejmować racjonalne decyzje dotyczące terminu i zakresu niezbędnych prac obsługowych. Proces prognozowania stanu maszyny może być realizowany na kilka sposobów, które określają jednocześnie cel i postać prognozy. Są to:

1. Prognozowanie stanu technicznego maszyny polegające na określeniu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzujących proces pogarszania stanu w przyszłości

Wówczas stan techniczny maszyny opisuje się za pomocą funkcji wektorowej: $S(\Theta) = [s_1(\Theta), \dots, s_j(\Theta), \dots, s_m(\Theta)]$, o przebiegu dyskretnym lub ciągłym w czasie $\Theta_1, \dots, \Theta_b$ (Θ_1 – czas początku eksploatacji maszyny, Θ_b – czas badania maszyny), przy czym wiadome są wartości funkcji $S(\Theta_1), \dots, S(\Theta_b)$ w tym czasie. Następnie określa się przebieg funkcji $S(\Theta_b + \tau)$, przy czym prognoza może dotyczyć funkcji $S(\Theta)$, jak również każdej jej składowej $s_j(\Theta)$.

W takim przypadku przyjmuje się jednak założenie, że przebieg funkcji $S(\Theta_b + \tau)$ jest „podobny” do przebiegu funkcji $S(\Theta_1), \dots, S(\Theta_b)$; czyni się to przy przyjęciu założenia, że istnieje ciągłość zmian wartości badanych parametrów diagnostycznych. Wniosekowanie takie, szczególnie w przypadku „podobieństwa przebiegu funkcji $S(\Theta)$ ”, może być uzasadnione tylko przy odpowiednim poznaniu przebiegu tych zmian, np. w okresie przebiegu zużycia normalnego i nieuwzględnieniu nieciągłości, wynikających z wymiany lub regulacji zespołów maszyny.

2. Wynik prognozowania określany jako prawdopodobieństwo znajdowania się wartości symptomów maszyny poza przedziałem wartości granicznych

Przy prognozowaniu prawdopodobieństwa znajdowania się maszyny w stanie zdadności zakłada się, że znane są wartości cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych) $s_j(\Theta_i)$ w czasach Θ_i , $i = 1, \dots, b$ oraz gęstości prawdopodobieństwa zmian parametrów diagnostycznych $f_t(s_j)$ w czasie Θ .

Poszukiwane prawdopodobieństwo znajdowania się parametru s_j w przedziale $s_j < s_{jg}$ określa zależność:

$$P [s_j(\Theta) < s_{jg}] = \int_{-\infty}^{s_{jg}} f_t(s_j) ds_j \quad (1)$$

gdzie:

s_{jg} – wartość graniczna parametru s_j .

Praktycznie więc, obliczenie poszukiwanego prawdopodobieństwa sprowadza się do scałkowania funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa określonego w procesie prognozowania. Określenie wartości parametrów rozkładów funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f_i(s_i)$ wymaga niezawodnościowych badań maszyny. Przeprowadzenie takich badań byłoby celowe, gdyby interesująca użytkownika maszyny prognoza miała być przedstawiona jako prawdopodobieństwo utrzymania zdatności maszyny. W rozważanym przypadku (obsługiwanie według stanu technicznego) wymaganą postacią prognozy jest termin diagnozowania maszyny.

3. Kwalifikowanie maszyny na podstawie prognozy do odpowiedniej klasy według kryterium założonego poziomu niezawodności lub trwałości

W tym przypadku prognozowanie polega na zakwalifikowaniu danej maszyny do jednej z klas na podstawie danych uzyskanych w czasie badania.

Zakłada się, że w chwili Θ_1 lub w przedziale czasu $\Theta_1, \dots, \Theta_b$ dysponuje się wartościami parametrów diagnostycznych s_1, s_2, \dots, s_m , na podstawie których klasyfikuje się maszynę do odpowiedniej klasy R^λ , $\lambda = 1, \dots, n$.

Rozróżnia się przy tym klasy parametryczne (według stanu zdolności do pracy, R^1_s, \dots, R^n_s) i czasowe (według bezawaryjności R^1_T, \dots, R^n_T).

Wielkości $R^1_s = s_2 - s_1, \dots, R^n_s = s_{n-1} - s_{gr}$ reprezentują dopuszczalne zakresy zmienności parametrów, zaś wielkości $R^1_T = \Theta_2 - \Theta_1, \dots, R^n_T = \Theta_{n-1} - \Theta_n$ wybrane zakresy czasów.

Wynikiem wykorzystania opisanych powyżej procedur prognozowania jest wnioskowanie o stanie maszyny na podstawie prognoz symptomów. Jednym z możliwych sposobów jest formułowanie prognostycznych wniosków o stanie maszyny na podstawie porównania prognoz wartości symptomów z ich wartościami granicznymi, wyznaczającymi np. klasy stanów zdatności i niezdatności maszyny i określenie postaci prognozy np. jako terminu kolejnego diagnozowania i obsługiwania w strategii eksploatacji maszyn według stanu.

4. OPIS STANU TECHNICZNEGO MASZYNY ZA POMOCĄ SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH

W procesie eksploatacji następuje pogorszenie właściwości użytkowych maszyn. Zwiększają się luzy w parach kinematycznych, osłabiają się mocowania elementów i zmieniają się nastawy regulacyjne. Następuje zatem zmiana własności zespołów pojazdów, co powoduje zmianę procesów wyjściowych realizowanych przez pracujące zespoły maszyn. Procesy wyjściowe dzieli się na:

- robotyczne, wynikające bezpośrednio z realizacji użytkowych funkcji urządzenia, np. przetwarzanie energii chemicznej w ciepło (pracę mechaniczną), przetwarzanie energii chemicznej w energię elektryczną, przetwarzanie energii elektrycznej w pracę mechaniczną, przetwarzanie energii kinetycznej w ciepło, przenoszenie i zwiększanie energii;
- towarzyszące, powstające jako wtórny efekt zasadniczych procesów roboczych, np. termiczne, wibroakustyczne, elektryczne generowane przy tarciu, starzenie środków smarnych;
- inne procesy fizyczno-chemiczne, wykorzystywane w badaniach nieniszczących, np. badania wizualne (endoskopowe i holograficzne), badania magnetyczne, badania radiograficzne, badania ultradźwiękowe.

Procesy wyjściowe można opisać wielkościami, mierzonymi bez demontażu urządzenia, które nazywa się parametrami wyjściowymi S_{wy} .

Tezę tę potwierdza praktyka eksploatacyjna maszyn oraz prowadzone badania, na podstawie których podano przykładowo dla niektórych układów pojazdu cechy stanu (ilościowe i jakościowe) i odpowiadające im parametry wyjściowe.

Stany techniczne, w których może znaleźć się maszyna tworzą zbiór $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_k, k = 1, 2, \dots, K\}$, zaś konkretny stan \mathbf{w}_k maszyny jest wyznaczony przez N niezależnych cech stanu u_n jako wektor $\mathbf{w}_k = (u_n)$; $n = 1, 2, \dots, N$.

Liczba stanów maszyny \mathbf{w}_k zależy od wymagań, jakie w praktyce eksploatacyjnej stawia się procesowi oceny stanu technicznego pojazdu. W najprostszym przypadku zbiór możliwych stanów $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_k\}$ dzieli się na klasy:

- klasę stanów zdatności \mathbf{W}^0 ,
- klasę stanów niezdatności \mathbf{W}^1 .

Przy założeniu szeregowej struktury niezawodnościowej maszyny wyróżnia się dwa skrajne przypadki:

- a) jeżeli w maszynie o p zespołach występuje pojedyncze uszkodzenie, wówczas występuje jeden stan zdatności \mathbf{W}^0 i $\mathbf{W}_p^1 = p$ stanów niezdatności,
- b) jeżeli dopuszcza się dowolną kombinację jednoczesnego uszkodzenia zespołów, wówczas liczba stanów wynosi: jeden stan zdatności \mathbf{W}^0 i \mathbf{W}_k^1 stanów niezdatności.

Przy założeniu k -wartościowej oceny stanów, liczbę stanów niezdatności określa wyrażenie $\mathbf{W}_p^1 = k^p - 1$, co powoduje znaczny wzrost liczby stanów i w konsekwencji komplikuje algorytmy oceny stanu technicznego maszyny. Dlatego też przy ustalaniu liczby stanów przedmiotu diagnozy dąży się do minimalizacji zbioru stanów, stosując przy tym różne kryteria, np. prawdopodobieństwo występowania stanów, bezpieczeństwo użytkownika maszyny i struktury użytkowej.

Stan \mathbf{w}_k będzie znany, jeśli będą znane wartości u_n . Zadanie to można rozwiązać, zastępując cechy stanu $\{u_n\}$, w myśl przedstawionej powyżej tezy, odpowiednimi parametrami wyjściowymi $\{s_{jwy}\}$:

$$\mathbf{w}_k = f_1(\{s_{jwy}\}); \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

Możliwe jest pośrednie określanie stanu technicznego \mathbf{w}_k , gdyż prawdziwa jest zależność:

$$u_n = f_2(\{s_j\}); \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

Postać funkcji $u_n = f_2(\{s_j\})$ ustala się podczas określania zależności pomiędzy cechami stanu a sygnałami diagnostycznymi (parametrami diagnostycznymi), gdzie uzyskuje się układ N równań typu (3), będący odwzorowaniem przestrzeni stanów, opisanej współrzędnymi u_1, u_2, \dots, u_N w przestrzeń parametrów diagnostycznych s_1, s_2, \dots, s_J . Ze względu na to, że posługiwanie się układami równań może być skomplikowane oraz kłopotliwe jest wyznaczenie wartości cech stanu, stan techniczny \mathbf{w}_k maszyny określane jest na podstawie wartości parametrów diagnostycznych $\{s_j, j = 1, \dots, J\}$ według zależności:

$$\mathbf{w}_k = f_1(\{s_j\}); \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (4)$$

Zbiór możliwych do uwzględnienia parametrów diagnostycznych jest bardzo liczny, stąd pojawia się konieczność ich redukcji. Konsekwencją tego jest utrata informacji związanej z parametrami objętymi obserwacją i pojawienie się obszaru niewiedzy. Powoduje to, podobnie jak w przypadku cech stanu, element przypadkowości (składnik losowy). Obecność tego składnika powoduje konieczność traktowania sygnałów diagnostycznych jako szczególnego rodzaju procesów losowych.

Przyjmując fakt, że zarówno cechy stanu maszyny, jak i sygnały diagnostyczne zmieniają się w sposób ciągły w czasie Θ (w przypadku wymiany lub regulacji zespołów maszyn zmiana może być skokowa), występuje konieczność dyskretnej reprezentacji takiego sygnału. Najczęściej stosuje się sposób reprezentowania losowych sygnałów diagnostycznych w dziedzinie czasu poprzez ciągi estymowanych wartości sygnału diagnostycznego. Czasowa historia zmienności sygnałów (parametrów diagnostycznych) jest wówczas dana w postaci dyskretnych, uporządkowanych w czasie, ciągów wartości liczbowych. Ciągi tego typu określone są terminem „szeregu czasowego”. Podstawą ustalenia kolejności elementów „szeregu czasowego”, w przypadku pojazdów mechanicznych, jest liczba przejechanych kilometrów przez pojazd od początku eksploatacji (przebieg pojazdu) lub liczba godzin działania (liczba motogodzin).

Istotnym wymaganiami dla szeregu czasowego jest żądanie stałej wielkości tzw. „kroku czasowego” w tym szeregu. Warunek ten należy interpretować, że wartość funkcji porządkującej (np. przebieg pojazdu) dla każdego elementu szeregu musi różnić się od wartości tej funkcji dla elementu sąsiedniego o stałą wartość (ze względu na bierne i bierno-czynne eksperymenty diagnostyczne, warunek ten, np. w przypadku pojazdów może być trudno osiągalny).

Wskutek oddziaływania procesów wymuszających zużycie następują zmiany wartości cech stanu objawiające się pogorszeniem stanu technicznego zespołów maszyn. Stopniowo kumulujące się zmiany doprowadzają do osiągnięcia wartości granicznych cech stanu, a także wartości granicznych odpowiadających im cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych), podczas których następuje zmiana lub pełna utrata właściwości eksploatacyjnych, przy których dalsza eksploatacja maszyny jest niemożliwa lub nieoptymalna.

Przekroczenie wartości granicznej mierzonych parametrów diagnostycznych oznacza wejście maszyn w stan przyspieszonego zużycia. W przypadku diagnostyki bezpośredniej i w eksperymentach czynnych ustalenie wartości granicznych dla zorientowanych uszkodzeniowo parametrów diagnostycznych jest stosunkowo proste.

Problem komplikuje się w diagnostyce pośredniej, w której ustalenie stanu granicznego na podstawie parametru jest trudniejsze. Realizowane najczęściej w przypadku maszyn bierne i bierno-czynne eksperymenty diagnostyczne dostarczają wartości parametrów diagnostycznych, które podczas wnioskowania diagnostycznego są porównywane z danymi własnych doświadczeń lub z wartościami granicznymi dostępnymi w normach krajowych, zagranicznych, branżowych. W przypadku braku takich norm możliwe jest wyznaczanie wartości granicznych parametrów diagnostycznych poprzez statystyczny opis procesu eksploatacji, np. za pomocą metody Neymana-Pearsona.

5. MODELE PROGNOSTYCZNE MASZYN

Metody prognozowania stanów badanej maszyny można podzielić na:

- a) metody intuicyjne,
- b) metody matematyczne.

Metody intuicyjne obejmują dość rozległy obszar rozciągający się od wypowiedzi poszczególnych ekspertów i ekspertyz zbiorowych opracowanych według zasady przegłosowania, aż do metody delfickiej i metody dyskusji panelowych.

W matematycznych metodach prognozowania stanów maszyn, wszelkie subiektywne przesłanki dotyczące badania zmian stanów są formułowane na podstawie dostępnych modeli matematycznych.

W prognozowaniu stanu maszyn zwraca się uwagę na dwa uwarunkowania:

- a) kontynuacyjne, które związane są z upływem czasu i związanymi z nimi procesami ewolucyjnej degradacji maszyny;
- b) nowo wstępujące, spowodowane pojawiającymi się w procesie prognozowania wymuszeniami, nowymi oddziaływaniami lub zakłóceniami.

Identyfikacja tych uwarunkowań ma istotne znaczenie w wyborze metody prognozy. Istnieją w tym zakresie dwie reguły:

- a) ekstrapolacyjna, która jest właściwa dla procesu kontynuacyjnego i prognozy ekstrapolacji na przyszłe okresy rozpatrywanego zjawiska;
- b) filtracyjna, eliminująca zakłócenia związane z oddziaływaniami nowo wstępującymi i formalizująca prognozy drogą prognozy interpolacji, odniesionej do mechanizmu rozwoju analizowanych symptomów.

Realizacja procesu prognozowania uwarunkowana jest procesem identyfikacji trendu zmian kontrolowanych symptomów. Przydatność różnych formalizacji prognozy pozwala wyróżnić niżej omówione modele.

Modele klasycznej ekstrapolacji wartości szeregów czasowych

W tym przypadku zasada prognozowania polega na arbitralnym doborze dla historii obserwowanego zjawiska odpowiedniej aproksymaty, którą ekstrapoluje się następnie na prognozowane przedziały czasu. Najczęściej stosowanymi w tej grupie metodami są rozwiązania aproksymujące trend wartości symptomów stanu funkcjami: liniowymi, potęgowymi, wielomianowymi i wykładniczymi, zaś przykładowymi metodami są metoda parametru uogólnionego i metoda funkcji regresji. Wybór konkretnej aproksymaty według przyjętego kryterium, np. wartości średniej błędów dopasowania wynika z oceny dopasowania uzyskiwanych na jej podstawie wyników do danych empirycznych.

Zaletą tego typu procedur jest prostota estymacji parametrów diagnostycznych. Dają one rezultaty, gdy zmiany wartości parametrów diagnostycznych są regularne lub dysponuje się adekwatnymi modelami procesów uszkodzenia urządzeń, jak i modelami generacji przypisanych im parametrów. Ponadto należy przyjąć założenie (często mało realne w przypadku niektórych maszyn, np. pojazdów) utrzymywania się przyjętej tendencji rozwojowej w prognozowanych okresach.

Do wad tego typu rozwiązań należą:

- a) stosunkowo duża pracochłonność estymacji parametrów (szczególnie przy dużej liczbie wyników obserwacji danego zjawiska), co ma miejsce, np. przy ciągłej kontroli diagnostycznej maszyny;
- b) konieczność założenia (często mało realnego) utrzymywania się przyjętej tendencji rozwojowej w prognozowanych okresach. Z tego względu tworzone są różne modyfikacje tych rozwiązań, np. poprzez ograniczenie procesu estymacji funkcji trendu do zawężonego zbioru danych (pomijanie najstarszych obserwacji) lub poprzez dołączenie, w każdym punkcie czasowym po czasie Θ_b , wartości rzeczywistej trendu do budowy jego aproksymaty;
- c) duża pracochłonność statystycznych badań adekwatności przyjętego modelu.

Adaptacyjne modele trendu

Rozwiązania te omijają etap wyznaczenia analitycznej postaci trendu obserwowanego procesu stochastycznego, tworząc od razu oszacowania jego liczbowych wartości. Owe procedury w sposób iteracyjny, przy każdej nowej obserwacji analizowanego zjawiska oraz wyniku prób prognozowania modyfikują przyjęty model trendu poprzez zmianę parametrów funkcji prognozującej lub jej postaci. Umożliwia to szybkie dopasowanie modelu do zmian badanego procesu stochastycznego. Przykładowymi metodami w tej grupie metod są: metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu I (model liniowy) i rzędu II (model kwadratowy).

Ich zaletą jest prostota realizacji. Umożliwiają one bowiem budowę prognoz według rekurencyjnych formuł obliczeniowych przy ograniczonej liczbie łatwo weryfikowanych założeń. Wadą ich jest natomiast brak oszacowania "ex ante" dokładności predykcji, czy trudności związanej z doбором właściwych sposobów estymacji, np. stałych adaptacji, chociaż trudność tę można ominąć, poprzez odpowiednią optymalizację stałych adaptacji tego modelu. Na podstawie tych rozwiązań możliwe są obliczenia rozwoju zjawisk opisywanych zarówno długimi, jak i krótkimi realizacjami, co w myśl przedstawionych postulatów stwarza możliwość ich wykorzystania w prognozowaniu stanu technicznego maszyn.

Metody autonomicznej ekstrapolacji procesów stochastycznych

Realizują one operacje filtracji i predykcji. Pierwsza z nich polega na konstrukcji, na podstawie dostępnego fragmentu prognozowanej realizacji, układu (filtru), który drogą minimalizacji przyjętego kryterium błędu na jego wyjściu umożliwia wybór, odpowiedniego dla modelowanego zjawiska, typu procesu stochastycznego. Poprzez ekstrapolację tak wybranego procesu stochastycznego realizowany jest następnie proces prognozy przyszłych jego wartości.

Najczęściej poszukiwane właściwego typu procesu stochastycznego ogranicza się do klasy modeli analizowanego zjawiska danej relacją z grupy modeli procesu autoregresyjnego średniej ruchomej ARMA.

Oceniając ich przydatność z punktu uwarunkowań eksploatacji maszyn należy stwierdzić, że najważniejszym wymaganiem w przypadku ich poprawnego stosowania jest możliwość dostępu do długich realizacji zjawisk podlegających prognozowaniu (w przypadku niektórych maszyn, np. pojazdów, jest to mało realne). Warunkuje to bowiem poprawną identyfikację ich własności probabilistycznych oraz parametrów modeli.

Modele obserwatora stanu opisywanego stochastycznymi równaniami różniczkowymi

W rozwiązaniach tej grupy zakłada się, że nieobserwowalny stan dynamiczny analizowanego procesu diagnostycznego jest opisany z dokładnością do pewnego procesu gaussowskiego. Jest on obserwowalny wraz z szumami pomiarowymi poprzez określone zmienne kontrolne wzajemnie z nimi sprzężone. Na bazie ich realizacji konstruuje się filtr estymujący nieobserwowalny stan. Wyjście jego stanowi wejście dla układu predyktora zbudowanego na estymowanych w procesie filtracyjnym równaniach, opisujących dynamikę rozpatrywanego procesu. Rozwiązania te wywodzą się z ogólnego zadania problemu filtracji i predykcji w ujęciu Kalmana-Bucy'ego. Pozwala on na tworzenie różnych algorytmów predykcyjnych dostosowanych do przyjętego zmian obserwowanych sygnałów diagnostycznych.

Rozwiązania te mają szczególnie zastosowanie w układach diagnozujących o dużym stopniu automatyzacji, stosowanych do monitorowania stanu maszyny

Statystyczne modele symptomowe

Opierają się na znajomości postaci funkcji gęstości rozkładu wartości symptomowych, występującej w „życiu” nadzorowanej maszyny. Wartości prognoz odnoszących się do czasu wystąpienia awarii, czy określonej wartości symptomowej dla założonego horyzontu prognozy estymują na bazie wyniku pomiaru kontrolnego symptomu i znajomości jego gęstości rozkładu, określającego statystyczną prawidłowości jego występowania. Umożliwiają także wyznaczenie, odniesionego do czasu kontroli, czasu dzielącego nadzorowaną maszynę od awarii oraz liczbę dzielących ją od niej pomiarów kontrolnych. Znane algorytmy obliczeniowe są przyporządkowane do rozkładu symptomów: Weibulla, Frecheta, jednorodnego i Pareto.

W zastosowaniach numerycznych ocena metod dodatkowo opiera się na kryterium zachowania się trendu nadzorowanego symptomu. Wyróżnia się dwa przypadki:

- a) znany lub łatwy do wyznaczenia a posteriori z obserwacji model trendu symptomu;
- b) nieznan i prawie niemożliwy do wyznaczenia model trendu.

Zadanie pierwsze realizowane jest wówczas za pomocą prostych funkcji rosnących monotonicznie, określających trend liniowy, kwadratowy, eksponentialny, itd. Do zalet takiego postępowania zalicza się:

- prostotę interpretacji modeli,
- możliwość prognozowania przy kilku pierwszych zmianach mierzonego symptomu,
- niski koszt obliczeń.

Jako wady takiego postępowania można uznać:

- konieczność utrzymania się założonej tendencji zmiany obserwowanego symptomu w okresie objętym procesem prognozowania,
- skończoną liczbę funkcji poddawanych analizie,
- dla funkcji złożonych wzrost kosztów obliczeń.

Zadanie drugie można realizować za pomocą wyżej opisanych modeli.

6. PROGNOZOWANIE STANU TECHNICZNEGO W EKSPLOATACJI MASZYN

Stan maszyny $\mathbf{W}(\Theta_n)$ w chwili czasu Θ_n można scharakteryzować za pomocą zbioru wartości symptomów $\{s_j(\Theta); e_j, \dots, m\}$.

Maszyna w chwili Θ_n znajduje się w stanie zdatności \mathbf{W}^0 , gdy spełniony jest warunek:

$$\mathbf{W}(\Theta_n) = \mathbf{W}^0 \Leftrightarrow \forall (j=1, \dots, m) \quad [\{s_{j,d}\} \leq \{s_j(\Theta_n)\} \leq \{s_{j,g}\}] \quad (5)$$

gdzie:

$\{s_{j,d}\}$, $\{s_{j,g}\}$ – zbiory dolnych i górnych wartości granicznych symptomów.

Analogicznie można sformułować warunek zdatności w chwili $\Theta_{n+\tau}$:

$$\mathbf{W}(\Theta_{n+\tau}) = \mathbf{W}^0 \Leftrightarrow \forall (j=1, \dots, m) \quad [\{s_{j,d}\} \leq \{s_j(\Theta_{n+\tau})\} \leq \{s_{j,g}\}] \quad (6)$$

przy czym elementy zbioru $\{s_j(\Theta_{n+\tau})\}$ są nieznanne i stąd istnieje konieczność ich przewidywania w założonym przedziale czasu τ .

Wielkość τ oznacza przedział czasu, dla którego realizowany jest proces prognozowania (wielkość τ nazywa się także wyprzedzeniem lub „horyzontem czasowym prognozy”).

W ujęciu tym ocenę czasu przejścia urządzenia w stan niezdatności wyznaczają wyniki prognoz parametrów diagnostycznych $\{s_j(\Theta_{n+\tau})\}$, sygnalizujące przekroczenie wartości granicznych.

Postępowanie takie umożliwia wyznaczenie terminu diagnozowania maszyny w strategii obsługiwanego według stanu technicznego. Realizowane to może być poprzez określenie zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzujących proces pogarszania stanu w przyszłości.

Biorąc pod uwagę to, że:

- a) występujące w czasie eksploatacji maszyny nieodwracalne procesy zużycia wymuszają monotoniczny trend wartości kontrolowanych parametrów diagnostycznych,
- b) zmiany wartości parametrów diagnostycznych pomiędzy poszczególnymi badaniami stanu mogą istotnie różnić się, oraz zazwyczaj nie znane są ich funkcje gęstości prawdopodobieństwa,

przyjmuje się, że:

„wyznaczenie terminu kolejnego diagnozowania maszyny jest możliwe w wyniku prognozowania stanu technicznego maszyny polegającego na określeniu zmian wartości parametrów diagnostycznych w przyszłości i przyrównaniu ich wartości chwilowych do wartości granicznych”.

6.1. Wyznaczanie terminu kolejnego diagnozowania maszyny

Metoda ta zgodnie z przyjętym sposobem prognozowania polega na tym, że:

- Zjawisko pogarszania się stanu technicznego maszyny można opisać szeregiem czasowym $s_t = \langle s_1, s_2, \dots, s_b \rangle$, (zbiór dyskretnych obserwacji $\{s_t = \zeta(\Theta); \Theta = \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_b\}$ niestacjonarnego procesu stochastycznego $\zeta(\Theta)$).
- Przy założeniu, że mechanizm zmian wartości $\zeta(\Theta)$ w czasie opisuje funkcja trendu $\mu(\Theta)$ zakłócona różnymi oddziaływaniami losowymi $\eta(\Theta)$

$$s_t = \mu(\Theta) + \eta(\Theta) \quad (7)$$

gdzie:

$\mu(\Theta)$ – opisuje tendencję rozwojową parametru diagnostycznego $s(\Theta)$,

$\eta(\Theta)$ – wyraża działanie czynników przypadkowych (warunki terenowe i klimatyczne, jakość obsługi),

konstruuje się takie oszacowanie $\{\mu_p(\Theta); \Theta = 1, 2, \dots, b\}$ dla nieznannej postaci trendu $\mu(\Theta)$, która zapewniłaby odpowiednią dokładność prognozy $s_p(\Theta)$, przy ekstrapolacji $\mu_p(\Theta)$ na odcinek czasu (przebiegu maszyny) (Θ_b, Θ_p) , $\Theta_p = \Theta_b + \tau$.

Oszacowanie $\mu_p(\Theta)$ wyznacza wówczas wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w chwili $\Theta_p = \Theta_b + \tau$, a tym samym prognozy stanu technicznego maszyny $W(\Theta_b + \tau)$.

Wówczas:

1. Wartość dopuszczalnego czasu eksploatacji układu lub zespołu pojazdu wyznacza horyzont prognozy τ_j^0 , dla którego brak jest przekroczenia wartości granicznej parametru diagnostycznego $\{s_{jg}\}$ przez granicę przedziału błędu prognozy, wyznaczoną przez promień granicy przedziału r_σ :

$$r_\sigma = q\sigma_p \quad (8)$$

gdzie:

q – parametr z tablicy rozkładu Studenta do wymaganego poziomu ufności γ i K-2 liczby stopni swobody,

σ_p – odchylenie standardowe składnika losowego błędu prognozy e_p .

2. W przypadku systemu obsługiwanego według stanu technicznego wymaganą postacią prognozy maszyny PSTM jest termin kolejnego diagnozowania i obsługiwanego Θ_{b1} .

Ponadto przyjęto, aby wielkościami dodatkowymi PSTM były: wartość błędu prognozy e_p oraz promień granicy przedziału błędu prognozy r_σ :

$$\text{PSTM} = \langle \Theta_{b1}, e_p, r_\sigma \rangle \quad (9)$$

3. Jako wartość Θ_{b1} przyjmuje się wówczas wartość dopuszczalnego czasu eksploatacji maszyny określony wartością horyzontu $\{\tau_j^0\}$, wyznaczoną jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego s_{jg} (rys. 2):

- z dolną (przy założeniu, że $s(\Theta_b) > s_{jg}$),
- lub górną (przy założeniu, że $s(\Theta_b) < s_{jg}$)

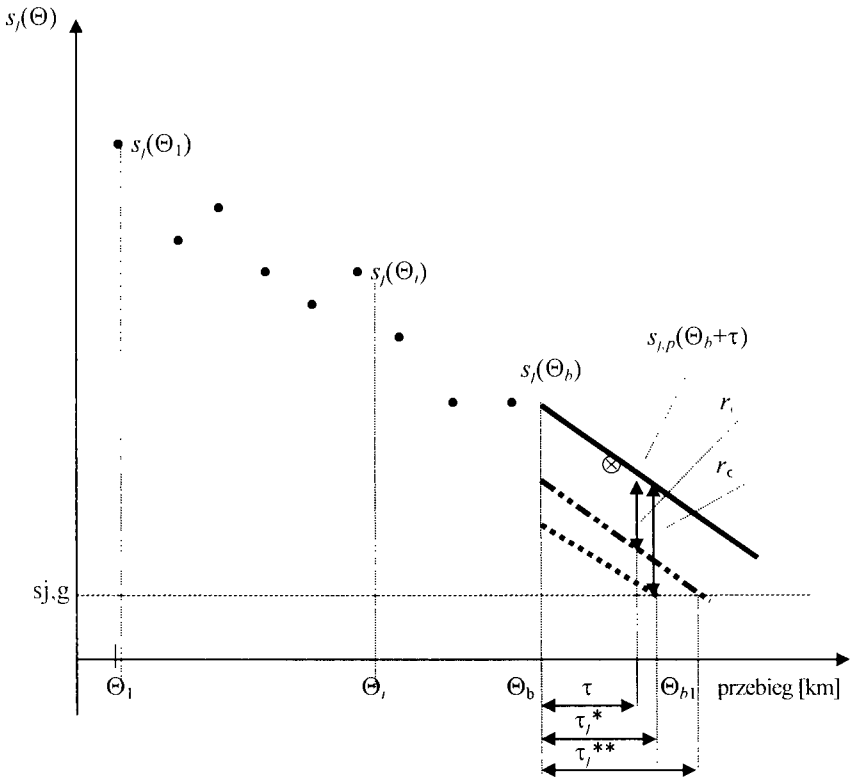
granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień $r_\sigma^{0.05}$ dla poziomu ufności $1 - \gamma = 0,95$, co interpretuje się, że w przedziale wyznaczonym przez horyzont τ_j^{**} prawdopodobieństwo, że parametr diagnostyczny s_j osiągnie wartość graniczną s_{jg} wynosi $p = 0,05$.

Ponadto rozpatruje się przecięcie linii wartości granicznej parametru diagnostycznego s_{jg} z granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez $r_\sigma^{0.01}$ dla poziomu ufności $1 - \gamma = 0,99$. Interpretuje się to, że w przedziale wyznaczonym przez horyzont τ_j^* prawdopodobieństwo, że parametr diagnostyczny s_j osiągnie wartość graniczną i wynosi $p = 0,01$. Wyróżnić można wówczas trzy opcje:

1. Nieprzekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień $r_\sigma^{0.01}$ interpretuje się wtedy jako brak sygnału alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu pojazdu.
2. Przekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień $r_\sigma^{0.01}$ interpretuje się jako sygnał alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu pojazdu (próg alertowy).
3. Moment przekroczenia przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień $r_\sigma^{0.05}$ interpretuje się jako czas Θ_{b1} – termin obsługiwanego układu lub zespołu pojazdu (próg alarmowy).

W takiej sytuacji przedział czasu (Θ_1, Θ_b) będzie okresem estymacji wartości oczekiwanej błędu prognozy e_p i promienia granicy przedziału błędu prognozy r_σ , zaś okres czasu po Θ_b będzie okresem aktywnej prognozy, tzn. wyznaczenia:

- wartości prognozowanej parametru diagnostycznego po czasie horyzontu prognozy τ , $s_{jp}(\Theta_b + \tau)$,
- określenia wartości promienia granicy przedziału błędu prognozy $r_\sigma(\Theta_b + \tau)$,
- wyznaczenia terminu następnego diagnozowania i obsługiwanego maszyny Θ_{b1} .



Rys. 2. Graficzna interpretacja wyznaczenia terminu kolejnego diagnozowania i obsługiwaną maszyną Θ_{b1} : Θ_1 – początek eksploatacji maszyny, Θ_b – ostatnie obsługiwaną maszyną. Θ_{b1} – termin kolejnego diagnozowania i obsługiwaną maszyną

6.2. Przykładowe metody prognozowania

- **Metoda parametru uogólnionego - $x_{2,1}$**

$$S(\Theta) = \frac{\sum_{j=1}^M w_j |s_j(\Theta)|}{\sum_{j=1}^M w_j} \tag{10}$$

gdzie:

$$|s_i(\Theta)| - \text{względna wartość modułu parametru diagnostycznego } |s_j(\Theta)| \\ = \left| \frac{s_j(\Theta) s_{j,g}}{s_{j,n} - s_{j,g}} \right|$$

$s_i(\Theta)$ – wartość parametru $s_j \in S$ w chwili $\Theta \in (\Theta_1, \Theta_b)$,

$s_{j,g}$ – wartość graniczna parametru s_j ,

- $s_{j,n}$ – wartość nominalna parametru s_j względnie jego wartość w chwili Θ_1 ,
 w_j – wartość funkcji wagi parametru s_j ,
 λ – wykładnik funkcji.

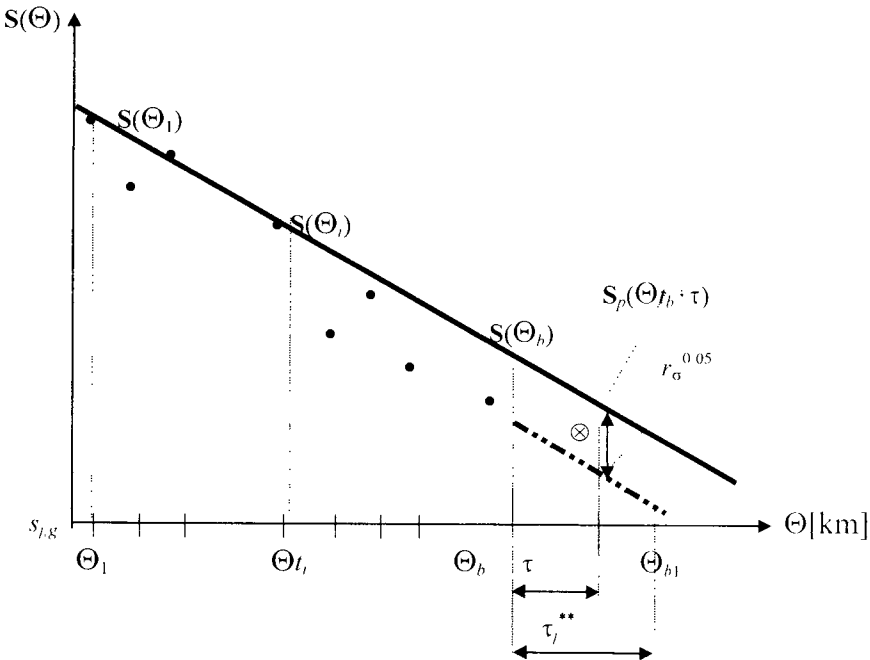
Algorytm wyznaczenia PSTM:

1. Na podstawie obserwacji wartości parametrów diagnostycznych w czasie (Θ_1, Θ_b) określić wartość charakterystyki $S(\Theta), \Theta \in (\Theta_1, \Theta_b)$ (rys. 3);
2. Aproksymować charakterystykę $S(t)$ (dla $\lambda = 1$) prostą $Z(\Theta)$ i określić dla jakiej wartości $\Theta = \Theta_0, Z(\Theta) = 0$;
3. Obliczyć promień granicy przedziału błędu prognozy r_σ :

$$r_\sigma(q(K, 0.05)) = \frac{q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{k=1}^K e_{pk}^2}}{\sqrt{K}} \quad (11)$$

4. Obliczyć termin następnego obsługiwanego Θ_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej uogólnionego parametru diagnostycznego s_{jg} (w tej metodzie stanowi ją oś odciętych) z dolną granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_σ :

$$\Theta_{b1} = \Theta_b + \frac{\tau(Z(\Theta_b) - r_\sigma)}{Z(\Theta_b) - Z_\tau}$$



Rys. 3. Wyznaczanie PSTM metodą parametru uogólnionego

5. Przeprowadzić badanie w terminie Θ_{b1} i określić różnicę $e_p(\Theta_{b1})$:

$$e_p(\Theta_{b1}) = |S(\Theta_{b1}) - Z(\Theta_{b1})|$$

Wartość średnia tych różnic w czasie Θ_{bi} , $i = 1, \dots, I$ oraz w czasie $(\Theta_1, \dots, \Theta_k, \dots, \Theta_b)$ stanowi błąd prognozowania e_p :

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(\Theta_{bi}) \quad (13)$$

• **Metoda funkcji regresji - $x_{2,2}$**

Algorytm wyznaczenia PSTM:

1. Na podstawie danych wartości parametru diagnostycznego s_j w czasie (Θ_1, Θ_b) oszacować metodą najmniejszych kwadratów liniową funkcję regresji liniowej zmiany parametru diagnostycznego.
2. Określić wartość prognozowaną parametru diagnostycznego $s_{pt}(\Theta_b + \tau)$.
3. Obliczyć promień granicy przedziału wartości błędu prognozy $r_{\sigma\tau}$:

$$r_{\sigma}(q(K, 0.05)) = q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{k=1}^K e_{pk}^2} \sqrt{1 + \frac{1}{K} + \frac{(\Theta_k - \bar{t})^2}{\sum_{k=1}^K (\Theta_k - \bar{t})^2}} \quad (14)$$

4. Obliczyć termin następnego obsługiwaną Θ_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego s_{jg} z dolną (przy założeniu, że $s_j(\Theta_b) > s_{jg}$) lub górną (przy założeniu, że $s_j(\Theta_b) < s_{jg}$) granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień $r_{\sigma\tau}$:

$$\text{Dla } s_j(\Theta_b) > s_{jg} \quad \Theta_{b1} = \Theta_b + \frac{\tau (s_{jp}(\Theta_b) - r_{j\sigma})}{s_{jp}(\Theta_b) - s_{pt}} \quad (15)$$

5. Przeprowadzić obsługiwane w terminie Θ_{b1} i określić różnicę $e_p(\Theta_{b1})$:

$$e_p(\Theta_{b1}) = |s_j(\Theta_{b1}) - s_{jp}(\Theta_{b1})|, \quad e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(\Theta_{bi}) \quad (16)$$

• **Metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu 1 (model liniowy) - $x_{2,3}$**

Kształtowanie się zmiennej $S(t)$ w czasie zapisuje się w postaci:

$$S(\Theta) = \mu(\Theta) + \xi(\Theta) \quad (17)$$

gdzie:

- $\mu(\Theta)$ – funkcja trendu,
- $\xi(\Theta)$ – składnik losowy.

Wartość prognozowaną parametru s_{pt} oblicza się, przy założeniu liniowości trendu zmiennej $S(t)$, z wyrażenia:

$$s_{pt} = a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} \quad (18)$$

$$a_t^{(0)} = M_t = 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)}$$

$$a_t^{(1)} = T_t = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} (M_t^{(1)} - M_t^{(2)})$$

oraz

$$M_t^{(1)} = \alpha y_t + (1-\alpha) M_{t-1}^{(1)}$$

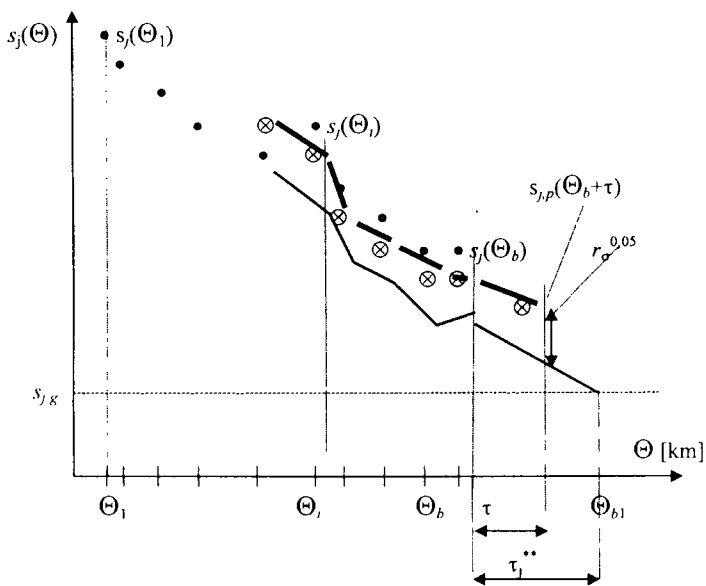
$$M_t^{(2)} = \alpha M_t^{(1)} + (1-\alpha) M_{t-1}^{(2)}$$

α - parametr wygładzenia wykładniczego, $\alpha \in <0, 1>$

Algorytm wyznaczenia PSTM:

1. Na podstawie danych wartości parametrów diagnostycznych w czasie $[\Theta_1, \Theta_b]$ określić wartość prognozowaną $s_{p\tau}(\Theta_b + \tau)$ (rys. 4).
2. Obliczyć promień granicy przedziału błędu prognozy r_σ :

$$r_\sigma(q(K, 0.05)) \cong q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{k=1}^K e^{2pk}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)^3} \left[1 + 4(1-\alpha) + 5(1-\alpha)^2 + 2(4-3\alpha)\tau^2 + 2\alpha^2\tau^2 \right]} \quad (19)$$



Rys. 4. Wyznaczenie PSTM metodą wyrównywania wykładniczego rzędu 1 i rzędu 2

3. Obliczyć termin następnego obsługiwanego t_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego s_{jg} z dolną (przy założeniu, że $s_j(\Theta_b) > s_{jg}$) lub górną (przy założeniu, że $s_j(\Theta_b) < s_{jg}$) granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień $r_{\sigma\tau}$:

$$\text{Dla } s_j(\Theta_b) > s_{jg} \quad \Theta_{b1} = \Theta_b + \frac{\tau (s_{jp}(\Theta_b) - r_{j\sigma})}{s_{jp}(\Theta_b) - s_{pt}} \quad (20)$$

4. Przeprowadzić obsługiwane w terminie Θ_{b1} i określić różnicę $e_p(\Theta_{b1})$:

$$e_p(\Theta_{b1}) = |s_j(\Theta_{b1}) - s_{jp}(\Theta_{b1})|, \quad e_p = \frac{1}{K+1} \sum_{i=1}^{K+1} e_p(\Theta_{bi}) \quad (21)$$

• **Metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu 2 (model kwadratowy) - $x_{2,4}$**

Wartość prognozowana parametru s_{pt} oblicza się, przy założeniu liniowości trendu zmiennej $S(t)$, z wyrażenia:

$$s_{pt} = a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} + \tau^2 a_t^{(2)} \quad (22)$$

Algorytm otrzymania prognozy PSTM:

1. Na podstawie danych wartości parametrów diagnostycznych w czasie $[\Theta_1, \Theta_b]$ określić wartość prognozowaną $s_{pt}(\Theta_b + \tau)$ (rys. 4).
2. Obliczyć promień granicy przedziału błędu prognozy $r_{\sigma\tau}$:

$$r_{\sigma}(q(K, 0.05)) \cong q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{k=1}^K e_{pk}^2} \sqrt{2\alpha + 3\alpha^2 + 3\alpha^3 \tau^2} \quad (23)$$

3. Obliczyć termin następnego obsługiwania Θ_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego s_{jg} z dolną (przy założeniu, że $s_j(\Theta_b) > s_{jg}$) lub górną (przy założeniu, że $s_j(\Theta_b) < s_{jg}$) granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_{σ} :

$$\text{Dla } s_j(\Theta_b) > s_{jg} \quad \Theta_{b1} = \Theta_b + \frac{\tau (s_{jp}(\Theta_b) - r_{j\sigma})}{s_{jp}(\Theta_b) - s_{pt}} \quad (24)$$

4. Przeprowadzić obsługiwane w terminie Θ_{b1} i określić różnicę $e_p(\Theta_{b1})$:

$$e_p(\Theta_{b1}) = |s(\Theta_{b1}) - s_p(\Theta_{b1})|, \quad e_p = \frac{1}{K+1} \sum_{i=1}^{K+1} e_p(\Theta_{bi}) \quad (25)$$

7. OPTIMALIZACJA PROCESU PROGNOZOWANIA

Formułując zadanie optymalizacyjne trudno jest określić jedną skalarną funkcję jakości F , bowiem rozwiązania dopuszczalne X (metody wyboru parametrów diagnostycznych i metody prognozowania) mogą mieć wiele różnych właściwości, których wartości świadczą o jakości rozwiązania. Stąd też zachodzi konieczność sformułowania w tym przypadku zadania optymalizacyjnego z wieloma (np. N) wskaźnikami jakości w postaci funkcji kryterium F :

$$F : X \rightarrow R^N \quad (26)$$

Funkcja ta przyporządkowuje każdemu rozwiązaniu dopuszczalnemu $x \in X$ jego liczbową ocenę w postaci wektora:

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_n(x), \dots, F_N(x)) \in \mathbb{R}^N \quad (27)$$

gdzie:

$N = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ – zbiór numerów wskaźników jakości,

$F_n(x)$ – wartość n -tego wskaźnika jakości (n -tej funkcji kryterium dla rozwiązania $x \in X$).

W przypadku optymalizacji wielokryterialnej procesu prognozowania zbiór rozwiązań dopuszczalnych X stanowią zbiory:

$$X = \{X_1, X_2\} \quad (28)$$

gdzie:

$X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}\}$ – zbiór metod wyznaczania parametrów diagnostycznych,

$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,m}\}$ – zbiór metod prognozowania.

W przypadku dysponowania zbiorami F_1 i F_2 , można określić wektorowy wskaźnik jakości rozwiązania prognozy F :

$$F = (F_1, F_2) \quad (29)$$

i wyznaczyć funkcje kryterialne F_1 i F_2 :

$$F_1 = \{f_{1,1}, f_{1,2}\}, \quad F_2 = \{f_{2,6}, f_{2,7}\} \quad (30)$$

gdzie:

$f_{1,1}$ – kryterium zmienności parametru diagnostycznego,

$f_{1,2}$ – kryterium skorelowania parametru diagnostycznego ze stanem technicznym pojazdu,

$f_{2,6}$ – kryterium rozbieżności przeciętnego względnego błędu prognozy – zespół miar Theila,

$f_{2,7}$ – promień przedziału błędu prognozy.

Wówczas zadanie optymalizacyjne procesu prognozowania przedstawia się jako parę zadań polioptymalizacji:

$$(X_1, F_1, \Phi_1), \quad (X_2, F_2, \Phi_2) \quad (31)$$

gdzie:

$X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, x_{1,4}\}$ – zbiór metod wyboru parametrów diagnostycznych,

$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, x_{2,4}\}$ – zbiór metod prognozowania,

F_1 – funkcja kryterialna wyboru parametrów diagnostycznych

$F_1: X_1 \Rightarrow R^2, F_1(X_1) = (f_{1,1}(X_1), f_{1,2}(X_1))$ o preferencji: $F_1(X_1): (\max, \max)$,

F_2 – funkcja kryterialna wyboru metod prognozowania

$F_2: X_2 \Rightarrow R^2, F_2(X_2) = (f_{2,6}(X_2), f_{2,7}(X_2))$ o preferencji: $F_2(X_2): (\min, \min)$,

Φ_1 – relacja dominowania zadania optymalizacyjnego określenia zbioru parametrów diagnostycznych,

Φ_2 – relacja dominowania zadania optymalizacyjnego wyboru metod prognozowania.

Rozwiązanie zadań polioptymalizacji realizuje się według następującego algorytmu, np. dla wyznaczenia optymalnej metody prognozowania:

1. Normalizacja przestrzeni kryterialnej – przestrzeń D^*

Zbiór wyników unormowanych D^* :

$$D^* = \{d^{*i}\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad d^{*i} = (d_1^{*i}, d_2^{*i}) \quad (32)$$

2. Określenie współrzędnych punktu idealnego – d^{**} :

$$d^{**} = (d_1^{**}, d_2^{**})$$

$$d_1^{**} = \min_{x \in X_2} f_{2,6}^*(x), \quad d_2^{**} = \min_{x \in X_2} f_{2,7}^*(x) \quad (33)$$

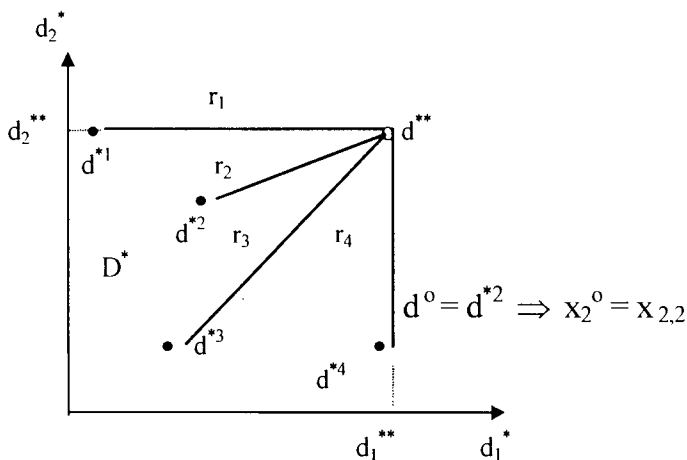
3. Obliczenie wartości normy $|\bullet|$ z parametrem $p = 2 - r_i (D^*)$

Norma $|\bullet|$ jest miarą odległości wyników $d^* \in D^*$ od punktu idealnego d^{**} :

$$r_i (D^*) = |d^{**} - d^{*i}| = \sqrt{(d_1^{**} - d_1^{*i})^2 + (d_2^{**} - d_2^{*i})^2} \quad (34)$$

4. Określenie wyniku optymalnego x^0 w zadaniu optymalizacji metod prognozowania – x_2^0 :

$$x_2^0 = d^0 = \min r_i \quad (35)$$



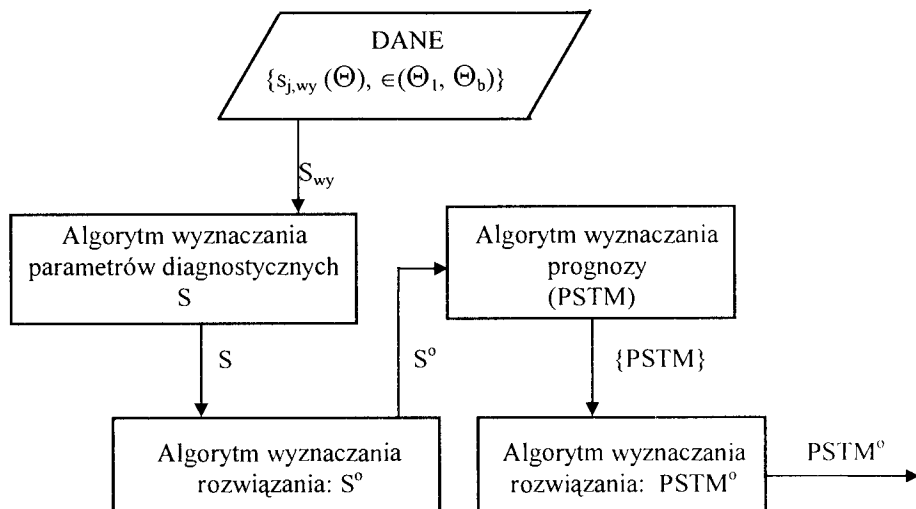
Rys. 5. Interpretacja graficzna rozwiązania zadania wyznaczania optymalnej metody prognozowania

W pokazanej przykładowo interpretacji graficznej rozwiązania zadania optymalizacyjnego rozwiązaniem optymalnym jest metoda $x_{2,2}$ (rys. 5), bowiem wartość jej funkcji kryterialnej (punkt d^{*2} w unormowanej przestrzeni kryterialnej D^*), jest najbliższej punktu idealnego d^{**} .

Algorytm metodyki wyznaczania optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i optymalnej metody prognozowania (rys. 6) zawiera następujące etapy:

a) wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych dla przedstawionych metod wyboru, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi $x \in X_1$;

- b) wyznaczenie prognozy według przedstawionych metod prognozowania, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi $x \in X_2$;
 c) wyznaczenia rozwiązań zadań optymalizacji.



Rys. 6. Schemat wyznaczania optymalnej prognozy (PSTM⁰)

8. PRZYKŁAD WYZNACZANIA PSTM⁰

Przedmiotem obliczeń jest wyznaczenie optymalnej metody prognozowania i składników PSTM⁰ dla:

a) silnika spalinowego (OB1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór parametrów $S = \{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}\}$;

b) układ tłokowo-korbowy silnika (U1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $S = \{s_{12}, s_{14}\}$;

gdzie:

s_{11} – moc silnika; $s_{n11} = 221$ kW, $s_{g11} = 165$ kW,

s_{12} – średnie ciśnienie sprężania; $s_{n12} = 2,5$ MPa, $s_{g12} = 1,9$ MPa,

s_{13} – średnie ciśnienie wtrysku, $s_{n13} = 24,8$ MPa, $s_{g13} = 17,0$ MPa,

s_{14} – ciśnienie oleju silnikowego, $s_{n14} = 1,05$ MPa, $s_{g14} = 0,6$ MPa.

Na podstawie obliczeń określono, że dla OB1 optymalnym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $S^0 = \{s_{11}, s_{13}\}$ z odpowiednimi wartościami wag: $w_{11} = 0,35$, $w_{13} = 0,65$, zaś dla U1 optymalnym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $S^0 = \{s_{12}, s_{14}\}$ z odpowiednimi wartościami wag: $w_{12}^* = 0,9$, $w_{14}^* = 0,1$ (zostały przyjęte według preferencji użytkownika).

Przykładowe wyniki obliczeń dla OB1 i U1 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyznaczenie optymalnej metody prognozowania i terminu kolejnego diagnozowania i obsługiwanania Θ_{b1}

Obiekt	S°	w_j	$x_2^\circ(\alpha)$	Θ_b [km]	e_p [%]	r_σ [%]	Θ_{b1} [km]
OB1	s_{11}, s_{13}	0,35; 0,65	$x_{2,3}(0,65)$	8800	11	8,1	11491
U1	s_{12}, s_{14}	0,9; 0,1	$x_{2,1}$	8800	18	8,2	12255

Optymalną metodą prognozowania x_2° i terminem kolejnego diagnozowania Θ_{b1} jest dla:

- OB1 – (metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu 1 ze współczynnikiem $\alpha = 0,65$), termin kolejnego diagnozowania wynosi 11491 km, błąd prognozy $e_p = 11$ %,
- U1 – (metoda uogólnionego parametru diagnostycznego), termin kolejnego diagnozowania wynosi 12255 km, błąd prognozy $e_p = 18$ %.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W podsumowaniu opracowania rozpatrującego problematykę prognozowania stanu maszyn jako ogólnej części teorii procesu diagnozowania stanu maszyn, należy zwrócić uwagę na czynniki warunkujące jej rozwój. Są nimi:

- zainteresowania służb logistycznych parku maszynowego prognozowaniem stanu maszyn,
- odpowiednia baza metodyczna dla podejmowania takich zadań,
- odpowiednie środki techniczne zabezpieczające ich realizację,
- odpowiednio przygotowana kadra specjalistów, którzy mogą w sposób właściwy podejmować takie zadania.

Należy także zwrócić uwagę, że prognozowanie stanu maszyn wiąże się z przetwarzaniem dużej ilości danych pomiarowych, jak również złożonymi operacjami numerycznymi związanymi z aproksymacją, modelowaniem, czy też predykcją szeregów czasowych. Nieodzowne jest więc komputerowe wspomaganie procesu prognozowania w oparciu o odpowiednie oprogramowanie, umożliwiające interaktywny dostęp do procedur bibliotecznych za pośrednictwem języka poleceń zbliżonego do konwencjonalnej notacji matematycznej. Pojawiło się w tym zakresie wiele programów, wśród których wyróżnia się MATLAB wraz z przybornikami (Control Systems Toolbox, Optimization Toolbox, Robust Control Toolbox, Neural Network Toolbox), służącymi do rozwiązywania konkretnych zadań, typu: aproksymacja, filtracja i modelowanie statystyczne.

Zadania te realizowane są w środowisku MATLAB za pomocą następujących operacji:

- symulacji modelu i predykcję,
- przetwarzania danych pomiarowych,
- estymacji parametrów modeli strukturalnych,
- wyboru modelu, jego transformacji i prezentacji,
- weryfikacji i walidacji modeli,
- rekurencyjnych procedur identyfikacji modeli.

Proste algorytmy prognozowania stanowią coraz częściej element standardowego oprogramowania zintegrowanych przyrządów, przeznaczonych do analizy sygnałów

diagnostycznych w badaniach maszyn. Najczęściej jednak wytwórcy aparatury badawczej nie publikują szczegółów dotyczących formalnych podstaw działania tych urządzeń, np. w zakresie narzuconych ograniczeń i mechanizmów zabezpieczających poprawne ich funkcjonowanie.

Tendencje rozwoju problematyki prognozowania stanu maszyn, jakie obecnie występują w badaniach diagnostycznych, można ocenić pozytywnie. Wynika to z coraz bogatszego software'u prognostycznego różnych firm na rynku, szerokiego zaplecza badawczego różnych ośrodków naukowo-badawczych i doniesień literaturowych dokumentujących nowe rozwiązania prognostyczne dla różnych klas maszyn (maszyn górniczych i hutniczych, systemów przeróbki ropy naftowej, turbogeneratorów, pojazdów i maszyn roboczych).

LITERATURA

- [1] Batko W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej. Zesz. Nauk. AGH w Krakowie, Mechanika 4, 1984.
- [2] Cholewa W., Kaźmierczak J.: Data processing and reasoning in technical diagnostics. WNT, Warszawa 1995.
- [3] Kaźmierczak J.: Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Mechanika 95, 1989.
- [4] Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Rozprawy 86, 1998, 1-103.
- [5] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki technicznej. Wyd. Uczeln. ATR, Bydgoszcz 1997.

THE PROGNOSIS OF STATE OF MACHINES

Summary

The paper deals with problems of prognosis of technical state of machines, and particularly of fixing the time of the next diagnosis in the their dynamic system of servicing. It examines the problem of determination of the optimum prognosis of technical state of machines. It describes gathering of admissible solutions and gathering of partial criteria of criterion function of the optimisation task and works out a method of fixing the time of the next diagnosis. It presents a solution to the polyoptimisation task along with algorithms of determining the optimum prognosis of the technical state of machines.

Key words: dynamic system of machine servicing, prognosis of state, polyoptimisation, time of the following diagnoses of machines

Wydawnictwa Uczelniane
Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy
ul. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz
tel. (052) 379 04 82, 379 04 26, fax 3790427
e-mail: wydawucz@atr.bydgoszcz.pl
www.atr.bydgoszcz.pl/~wyd

Monografie, podręczniki i skrypty – 1999

- J. Flizikowski: **Projektowanie środowiskowe maszyn**, Monografia, 12,00 zł
J. Flizikowski: **Rozdrabnianie tworzyw sztucznych**, Monografia, 12,00 zł
W. Jabłoński: **Automatyka i sterowanie**, Podręcznik, 14,50 zł
M. Jassem: **Genetyka**, Podręcznik, 12,00 zł
M. Jassem: **Hodowla roślin**, Podręcznik, 12,00 zł
A. Jazdon, B. Przybyliński: **Technologia napraw maszyn i pojazdów**, Skrypt, 12,50 zł
J.P. Kluczek: **Biochemiczne metody identyfikacji mikroorganizmów**, Skrypt, 14,00 zł
S. Łojewski, S. Iwicki: **Kierunki wielofunkcyjnego rozwoju obszarów wiejskich na przykładzie regionu kujawsko-pomorskiego**, Monografia, 30,00 zł
E. Maćkowska, R. Gogolin: **Nieorganiczna analiza ilościowa**, Podręcznik, 22,50 zł
Praca zbiorowa pod red. J. Misiewicz: **Przewodnik do zajęć z botaniki**, Skrypt, 16,00 zł
Praca zbiorowa pod red. Z. Wyszowskiej: **Podstawy marketingu**, Skrypt, 9,00 zł
E. Ranatowski: **Elementy fizyki spajania metali**, Monografia, 27,00 zł
F. Rudnicki, Z. Skinder: **Zrównoważony rozwój produkcji rolniczej i kształtowanie krajobrazu wiejskiego w regionie kujawsko-pomorskim**, Monografia, 20,00 zł
K. Sadkiewicz, J. Sadkiewicz: **Urządzenia pomiarowo-badawcze dla przetwórstwa zbożowo-mącznego**, Monografia, 36,00 zł
T. Topoliński: **Materiałoznawstwo**, Podręcznik, 16,50 zł
K. Wernerowski: **Kinematyka i dynamika**, Podręcznik, 19,00 zł
B. Żółtowski, H. Tylicki: **Osprzęt elektryczny pojazdów mechanicznych**, Podręcznik, 20,00 zł

Zeszyty Naukowe – 1999

- Budownictwo 31, 9,50 zł
Elektrotechnika 12, 7,50 zł
Mechanika 44, 16,50 zł
Mechanika 45, 15,50 zł
Nauki Społeczne 28, 9,00 zł
Rolnictwo 43, 17,50 zł
Rolnictwo 44, 30,00 zł
Zootechnika 30, 16,00 zł

Monografie i podręczniki – 2000

- M. Chalamoński: **Diagnozowanie układów hydraulicznych**, Podręcznik, 14,50 zł
L. Drelichowski: **Elementy teorii i praktyki zarządzania z technikami informacyjnymi w przedsiębiorstwie**, Monografia, 20,00 zł

- L. Drelichowski: **Projektowanie, wdrażanie i eksploatacja systemów zintegrowanych z heterogenicznymi bazami danych**, Monografia, 9,50 zł
- E. Dulcet, E. Jarmocik, K. Mójta, W. Ziętara: **Maszyny i urządzenia w technice rolniczej**, Podręcznik, 16,00 zł
- J. Flizikowski, K. Bieliński: **Projektowanie środowiskowych procesorów energii**, Monografia, 24,00 zł
- A. Gorączko: **Zbiór zadań z chemii ogólnej i nieorganicznej**, Podręcznik, 20,00 zł
- S. Ignaczak: **Rosliny zbożowe**, Podręcznik, 9,00 zł
- P. Indykiewicz: **Ptaki drapieżne Borów Tucholskich - ochrona i ekologia**, Monografia, 15,00 zł
- J. Kaleta, D. Kocańda, M. Skorupa, T. Topoliński: **Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów. Badania podstawowe**, Monografia, 20,00 zł
- J.P. Kluczek, A. Kojder: **Mikotoksyny w zarysie**, Podręcznik, 19,00 zł
- J.P. Kluczek: **Wybrane zagadnienia z ochrony środowiska**, Podręcznik, 22,00 zł
- L. Nowakowska: **Religia a polityka. Uwarunkowania religijne wybranych zachowań politycznych w RFN (1949-1990)**, Monografia, 18,00 zł
- Praca zbiorowa: **Zmęczenie i mechanika pękania**, Monografia, 50,00 zł
- K. Rosochowicz, J. Sikora, W. Sobczykiewicz: **Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji. Badania konstrukcji**, Monografia, 16,00 zł
- S. Smarzyński: **Badania procesu technologicznego zgrzewania i kształtowania tarciowego rur**, Monografia, 2000, 16,00 zł
- S. Zielińska-Kaniasty: **Zbiór zadań z fizyki z rozwiązaniami**, Podręcznik, 18,00 zł

Zeszyty Naukowe – 2000

- Budownictwo 31, 9,50 zł
- Mechanika 46, 25,00 zł
- Mechanika 47, 24,00 zł
- Mechanika 48, 10,50 zł
- Nauki Społeczne 29, 10,00 zł
- Rolnictwo 45, 13,00 zł
- Zootechnika 31, 13,50 zł
- Zootechnika 32, 11,00 zł

Monografie i podręczniki – 2001

- Barczak T., Kaczorowski G., Bennewicz J., Krasicka-Korczyńska E., **Znaczenie zarośli śródpolnych jako rezerwarów naturalnych wrogów mszyc**, Monografia, 14,00 zł,

Publikacje Wydawnictw Uczelnianych ATR w Bydgoszczy można nabywać w Dziale Udostępniania Biblioteki Głównej ATR, ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, tel. (0-52) 340-80-78, fax (0-52) 340-80-63, e-mail: wydawnictwa@atr.bydgoszcz.pl

ISSN 0208-6395