DOSTEPY nauki i techniki

Advances in Science and Technology

5/2010

Zespół Redakcyjny / Editorial Committee: Gabriel Borowski – redaktor naczelny / Editor-in-Chief Monika Wrona – sekretarz redakcji / Secretary Renata Lis – redaktor / Editor Sylwester Korga – redaktor / Editor

Czasopismo recenzowane / Reviewed Journal

Rada Programowa / Programing Board:

- Prof. dr hab. inż. Klaudiusz Lenik przewodniczący / Chairman Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. inż. Jerzy Bursa Politechnika Śląska w Gliwicach
- Prof. dr hab. inż. Franciszek Kluza Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
- Prof. dr hab. inż. Mirosław W. Kindraczuk National Aviation University, Kiev
- Prof. dr hab. inż. Mykhaylo Pashechko Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pełczyński Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. inż. Jan Senatorski Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie
- Dr hab. inż. Marek Jakubowski, prof. PL Politechnika Lubelska
- Dr hab. inż. Franciszek Lis, prof. PL Politechnika Lubelska
- Dr hab. inż. Dorota Wójcicka-Migasiuk, prof. PL Politechnika Lubelska
- Mgr inż. Chojnacki Paweł Prezes Zarządu Oddziału SIMP w Lublinie

Adres Redakcji / Editorial Office:

Politechnika Lubelska Katedra Podstaw Techniki 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38 tel. (81) 538 14 89, fax (81) 525 93 85 e-mail: pnt@pollub.pl, http://www.pnt.pollub.pl

© Copyright by Katedra Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej.

ISSN 2080-4075

Wydawca / Publisher:

Oddział SIMP w Lublinie ul. Chmielna 2a 20-079 Lublin http://www.lublin.simp.pl Politechnika Lubelska Katedra Podstaw Techniki 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38 http://www.kpt.pollub.pl

SPIS TREŚCI

Tadeusz Graczyk SYSTEMY POJAZDÓW GŁĘBINOWYCH	5
Hubert Bendig-Wielowiejski, Tadeusz Graczyk PROBLEMATYKA FUNKCJONOWANIA STOCZNIOWYCH ZAKŁADÓW PRODUKCYJNYCH NA TERENACH SILNIE ZURBANIZOWANYCH	5
Radosław Rutkowski ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW WYSOKOŚCIOWYCH W PROCESIE BUDOWY WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJI STALOWYCH	3
Tomasz Urbański PANELE SANDWICH W WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJACH STALOWYCH – CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU ŁĄCZENIA3	2
Michał Charlak, Marek A. Jakubowski ANALIZA KONCEPCJI ZBIORÓW PRZYBLIŻONYCH4	5
Oleg Draczew, Antoni Świć, Wiktor Taranenko, Georgij Taranenko PODSTAWY TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE MODELOWANIA OPERACJI OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI	5
Oleg Draczew, Antoni Świć, Wiktor Taranenko, Georgij Taranenko MODELOWANIE UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI7	1
Jerzy Józwik, Maciej Włodarczyk, Tomasz Ścierka MODEL GEOMETRYCZNY I KINEMATYCZNY PIONOWEGO CENTRUM OBRÓBCZEGO CNC FV 580A	5
Jerzy Józwik, Maciej Włodarczyk, Tomasz Ścierka WIRTUALNY KONTROLER VNC PIONOWEGO CENTRUM OBRÓBKOWEGO FV 580A – SYMULACJA, WERYFIKACJA I ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCESU OBRÓBKI 9	7
Dorota Wójcicka-Migasiuk WYKORZYSTANIE ENERGII SŁONECZNEJ WYZWANIEM DLA BADANIA MATERIAŁÓW 11:	4
Marian Marek Janczarek EFEKTY ENERGETYCZNE UZYSKANE NA PODSTAWIE BADAŃ PROCESÓW CIEPLNYCH W PRZECHOWALNIACH W REGIONIE LUBELSKIM12	4
Krystyna Pomorska PROBLEMATYKA OPRACOWYWANIA NORM NA OZNACZANIE PESTYCYDÓW W POWIETRZU ŚRODOWISKA PRACY13	2

Postępy Nauki i Techniki nr 5, 2010

Małgorzata Mrozik BADANIA I OCENA PRĘDKOŚCI PORUSZANIA SIĘ PIESZYCH UŻYTKOWNIKÓW RUCHU DROGOWEGO	138
Tomasz Oczkowicz NIEJEDNORODNOŚĆ WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH CIĄGNIONYCH RUR KWADRATOWYCH	145
Mykhaylo Pashechko, Mirosław Kindraczuk ODPORNE NA ZUŻYCIE POWŁOKI EUTEKTYCZNE UKŁADU Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr OTRZYMANE METODĄ NAPAWANIA Z WYKORZYSTANIEM DRUTÓW PROSZKOWYCH	156
Piotr Tarkowski, Ewa Siemionek UKŁADY NAPĘDOWE POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH	162

Tadeusz Graczyk1)

SYSTEMY POJAZDÓW GŁĘBINOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono ogólną klasyfikację pojazdów głębinowych oraz autorską propozycję klasyfikacji grupy pojazdów bezzałogowych, zdalnie sterowanych, uwzględniającą rozmaitość ich funkcji, zadań, typów konstrukcji i wyposażenia. Przedstawiono także analizę populacji tych pojazdów.

Słowa kluczowe: technologia podwodna, pojazd głębinowy.

WSTĘP

Tematem artykułu są szczególnego rodzaju obiekty pływające, jakimi są urządzenia głębinowe. Urządzenia te zwane są dalej **pojazdami** z uwagi na ich właściwości ruchowe, sposób posługiwania się nimi, a także tłumaczenie tradycyjnej ich nazwy z języka angielskiego (a vehicle), w którym publikowana jest większość opracowań literaturowych dotyczących zagadnień z tego obszaru.

Od najdawniejszych czasów człowiek wykazuje zainteresowanie badaniem i wykorzystaniem głębin morskich. Znane jest zastosowanie rozmaitych pojazdów podwodnych już w czasach starożytnych, w okresie średniowiecza, a zwłaszcza w czasach intensywnego postępu technicznego wieków XIX i XX [2, 5, 6, 7]. Pojazdy te umożliwiały przebywanie obserwatora w wodzie na większych głębokościach i w czasie dłuższym niż pozwala na to fizjologia człowieka, bowiem ludzkie możliwości bezpośredniego przebywania w środowisku wodnym są ograniczone z uwagi na ciśnienie panujące w głębinach. Budowa kapsuł ochraniających ludzi przed wpływem ciśnienia wymaga użycia materiałów o wysokich charakterystykach wytrzymałościowych, stosowania konstrukcji grubościennych o znacznej masie, rozbudowanych systemów zabezpieczenia życia załogi. Oddalenie człowieka od swobodnej powierzchni wody, świadomość dystansu dzielącego go od bezpiecznej przestrzeni nie sprzyja poczuciu komfortu i zagraża jego bezpieczeństwu. Aby pokonać te ograniczenia obok głębinowych pojazdów załogowych zaczęto budować różnorodne pojazdy bezzałogowe, zdalnie sterowane z powierzchniowej stacji kontrolnej.

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Podejmowane są próby klasyfikacji pojazdów, uwzględniające rozmaitość typów ich konstrukcji i zastosowań. Ponieważ jednak w dynamicznie zmieniającej się populacji pojazdów pojawiają się nowe obiekty, posiadające często cechy wspólne dla różnych klas, klasyfikacja taka staje się nieprecyzyjna.

Na podstawie analizy literatury przedmiotu i doświadczeń projektowych przedstawiono własną propozycję ogólnej klasyfikacji pojazdów głębinowych i uporządkowano dotyczącą ich terminologię, a także zwięźle scharakteryzowano populację tych pojazdów. Pozwala to precyzyjnie określić obszar dla dalszych rozważań dotyczących projektowania tych pojazdów.

KLASYFIKACJA OGÓLNA POJAZDÓW GŁĘBINOWYCH

Pojazdy głębinowe można podzielić na dwie główne kategorie: pojazdy **załogowe** i **bezzałogowe** (rys. 3) [3, 4, 8, 9, 10]:

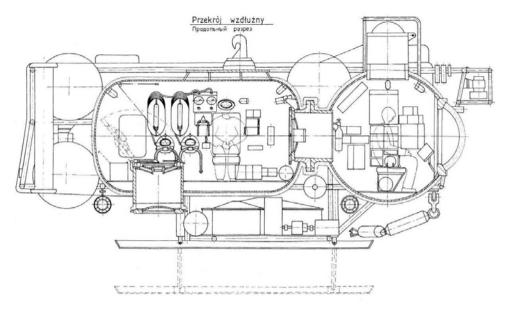
Pojazdy załogowe reprezentowane są przez trzy typy:

- pojazdy stałociśnieniowe, w których załoga chroniona jest przez kadłub wytrzymałościowy pozwalający na zachowanie wewnątrz ciśnienia atmosferycznego; dla niewielkich głębokości kadłub ma kształt cylindryczny, dla większych – kulisty, co podyktowane jest koniecznością spełnienia wymagań wytrzymałościowych;
- pojazdy zmiennociśnieniowe, hiperbaryczne, w których załoga poddawana jest ciśnieniu równoważnemu ciśnieniu słupa wody na głębokości roboczej; do tej grupy zalicza się także pojazdy "mokre" dla nurków, służące im jako środki transportu podczas przemierzania znacznych odległości pod wodą;
- pojazdy z komorą dla nurków (tzw. typu diver lock-out), będące kombinacją dwóch pozostałych typów, w których piloci znajdują się w kapsułach o ciśnieniu atmosferycznym, natomiast nurkowie w kapsułach hiperbarycznych (rys. 1); nurkowie transportowani są do miejsca pracy, gdzie opuściwszy pojazd wykonują zadania traktując go jako bazę, która podtrzymuje ich funkcje życiowe, wspomaga narzędziami oraz stanowi miejsce odpoczynku.

O sposobie pływania, ich mobilności, decyduje przeznaczenie pojazdów, co z kolei wpływa na koszt ich budowy i eksploatacji.

Pojazdy pływające swobodnie bez uwięzi są niezależne od statku-bazy, ale jednocześnie muszą przenosić źródła energii (najczęściej akumulatory ołowiowe lub srebrowo-cynkowe) oraz systemy podtrzymania życia, co zdecydowanie powiększa masę, rozmiary i koszt pojazdu oraz komplikuje jego budowę.

Zastosowanie uwięzi uzależnia pojazd od statku-bazy, umożliwia jednakże praktycznie nieograniczony dopływ energii i mieszanek oddechowych, co zmniejsza znacznie koszty budowy i eksploatacji, a jednocześnie stwarza większe możliwości długotrwałej pracy pod wodą. Z drugiej strony fizyczne połączenie pojazdu ze statkiem-bazą ogranicza mobilność i manewrowość pojazdu, kablolina łącząca pojazd ze statkiem



Rys. 1. Pojazd głębinowy z komorą dla nurków *NPG-600/300* – przekrój w płaszczyźnie symetrii przez przedział nurkowy i przedział dowodzenia (projekt: Politechnika Szczecińska) [4]

oddziaływuje na jego ruchy oraz stwarza zagrożenie zaplątania się w konstrukcjach podwodnych lub jej urwania.

Pojazdy bezzałogowe reprezentowane sa przez dwa typy:

- bezuwięziowe pojazdy pływające swobodnie, wykonujące zadania według wcześniej ustalonego programu, zarejestrowanego w ich urządzeniach pokładowych;
- pojazdy uwięziowe, połączone kabloliną ze stacją zasilania, sterowania i kontroli znajdującą się na statku-bazie, platformie lub nabrzeżu.

W grupie pojazdów bezuwięziowych pojazdy autonomiczne są przeznaczone dla wypełnienia określonej misji (kurs, głębokość pływania, zadania). Rozwój techniki mikroprocesorów, robotyki i sztucznej inteligencji umożliwia obecnie realizację bardzo ambitnych zadań, w których istnieje konieczność nie tylko ich wykonania według założonego programu, ale również podejmowania decyzji. Nie w pełni rozwiązane problemy transmisji sygnałów pod wodą sprawiają, że dane zbierane podczas długotrwałych misji badawczych rejestrowane i przechowywane są w pamięci komputerów pokładowych do czasu zakończenia misji lub przesyłane drogą radiową podczas zaplanowanych kolejnych wynurzeń pojazdu.

Dla pojazdów uwięziowych określenie "bezzałogowy" oznacza brak człowieka w samym pojeździe. W rzeczywistości są one sterowane przez operatora z kabiny kontrolnej na powierzchni morza, który stanowi jego "załogę". Takie rozwiązanie stwarza komfort pracy z uwagi na brak bezpośredniego zagrożenia dla życia człowieka w miej-

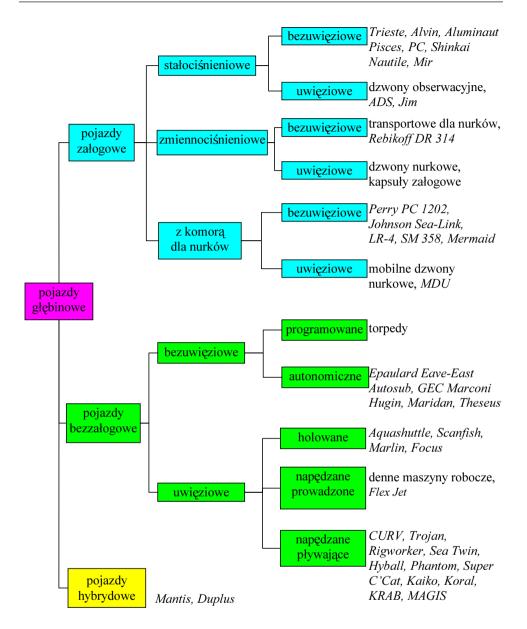
scu wykonywania prac w głębinach. Początkowo to oddalenie pojazdu od operatora utrudniało jego sterowanie, gromadzenie i przesyłanie danych uzyskanych podczas obserwacji. Obecnie dzięki technice światłowodowej, zaawansowanym systemom wizyjnym i echolokacyjnym, możliwościom telewizyjnej obserwacji i rejestracji, precyzyjnym systemom nawigacyjnym i układom automatyzacji ruchu oraz systemom roboczym wykorzystującym wielofunkcyjne manipulatory, zdalnie sterowany pojazd bezzałogowy na uwięzi stał się powszechnie wykorzystywanym narzędziem do penetracji przestrzeni wodnej i obiektów podwodnych. Dla tego typu pojazdów występują ograniczenia swobody ruchu z jednej strony, z drugiej zaś – istnieje możliwość zasilania pojazdu i przekazywania sygnałów w obie strony w sposób ciągły, co umożliwia ich długotrwałą pracę.

Pojazdy bez własnego napędu, holowane za statkiem na odpowiedniej głębokości, są wyposażone najczęściej w kamery telewizyjne lub sondujące systemy akustyczne, dysponują aparaturą do pomiaru właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych wody i służą do penetracji dużych obszarów dennych i przestrzeni wodnej.

Pojazdy napędzane obejmują dwie grupy pojazdów: pływające na uwięzi w przestrzeni trójwymiarowej (rys. 2) oraz konstrukcje poruszające się na uwięzi po obiektach podwodnych lub na dnie, co ogranicza ich swobodę, wymuszając ruch po zadanej krzywej lub powierzchni. Są to pojazdy inspekcyjne dla rurociągów, konstrukcji wspierających, różnego rodzaju duże maszyny do prac ziemnych wykonywanych na dnie. W odróżnieniu do pozostałych pojazdów te obiekty charakteryzuje ujemna pływalność (ciężar przewyższa siłę wyporu).



Rys. 2. Bezzałogowy zdalnie sterowany pojazd głębinowy MAGIS (Politechnika Szczecińska) przygotowany do inspekcji doku w Szczecińskiej Stoczni Remontowej "Gryfia" [4]



Rys. 3. Ogólna klasyfikacja pojazdów głębinowych z przedstawicielami klas [4]

Odrębna kategoria obejmuje **pojazdy hybrydowe**, łączące funkcje pojazdów załogowych i bezzałogowych, które mogą być zastosowane jako pojazdy załogowe sterowane bezpośrednio przez pilota i jako pojazdy załogowe lub bezzałogowe sterowane zdalnie przez operatora z powierzchni.

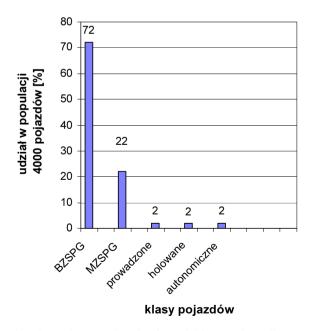
KLASYFIKACJA SZCZEGÓŁOWA BEZZAŁOGOWYCH POJAZDÓW GŁĘBINOWYCH

Proponuje się klasyfikację odbiegającą od klasyfikacji przyjętej przez International Marine Contractors Association (IMCA), która wyróżnia tylko pięć klas pojazdów [1].

Z uwagi na szybko zmieniający się obszar zastosowań pojazdów konieczne jest dokonanie zestawienia uwzględniającego rozmaitość funkcji pojazdów, zadań, typów konstrukcji i wyposażenia. Proponuje się przypisanie bezzałogowych pojazdów prezentowanych w tabeli 1 do 11 klas funkcjonalnych, podanych w tabeli 1 [4].

Obecnie użytkowanych jest na świecie kilka tysięcy bezzałogowych zdalnie sterowanych pojazdów głębinowych. Ich liczba z roku na rok rośnie, co spowodowane jest stale wzrastającym zapotrzebowaniem na pojazdy znanego typu jak i na nowe pojazdy, które znajdują zastosowanie zwłaszcza w dziedzinie obsługi wierceń i eksploatacji złóż zasobów naturalnych. Udział pojazdów poszczególnych klas w badanej populacji, klasyfikowanych według sposobu działania, przedstawia rysunek 4, a według przeznaczenia pojazdów – rysunek 5 [4].

Bezzałogowe zdalnie sterowane pojazdy głębinowe pływające na uwięzi BZSPG stanowią 94% populacji, wliczając pojazdy miniaturowe MZSPG – o niskich kosztach budowy i eksploatacji. Ponad połowa populacji to pojazdy inspekcyjne, ponad 20% populacji stanowią pojazdy o przeznaczeniu militarnym.

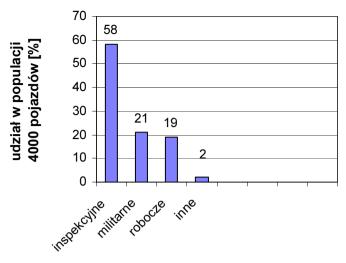


Rys. 4. Klasy bezzałogowych pojazdów głębinowych według sposobu działania – udział procentowy w populacji 4000 pojazdów

Tabela 1. Klasy funkcjonalne bezzałogowych pojazdów głębinowych

Nr	Klasa	Charakterystyka, zastosowanie	Wyposażenie	Przykłady
1	Mikropojazdy	Niewielkie pojazdy.	Kamera video,	Micro-ROV Albatros
'	głębinowe zdalnie	lasa: <10 kg reflektory, pędn		ROV Micro Rem
	sterowane	Obserwacja telewizyjna.	, , , , , , , ,	
2	Miniaturowe zdalnie		Wg klasy 1	Hyball, TUM*, Phan-
	sterowane pojazdy	Masa: 10 – 50 kg.	,	tom 300, Super C'Cat,
	głębinowe	Obserwacja telewizyjna.		VideoRay Scout
3	Bezzałogowe	Rozbudowana wersja pojazdów	Wg klasy 1 oraz	MUNA*, KRAB I*,
	zdalnie sterowane	klasy 1.	dodatkowe wyposa-	KRAB II*, Koral,
	pojazdy głebinowe	Masa: 50 – 100 kg.	żenie: aparat foto,	Offshore Hyball,
	(obserwacyjne/			RCV 225, Sea Owl,
	inspekcyjne	Inspekcja.	katodowej, sonar,	Super Achille,
			prosty manipulator	Seaeye Falcon,
4	Bezzałogowe	Pojazdy o rozmiarach umożliwiają-	Kilka kamer,	Geosub,
	zdalnie sterowane	cych przenoszenie dodatkowych	sonar skanujący,	Hysub 25,
	pojazdy głębinowe	zdy głębinowe sensorów i narzędzi. Masa: 100 – czujniki,		MAGIS*,
	do zadań lekkich	500 kg. System operowania kabloliną	mały manipulator	Sea Twin
		 opcjonalny. Podstawowy przegląd, 		Seaeye Cougar-XT
L_		prace lekkie.		
5	Bezzałogowe	Duże pojazdy o konstrukcji ramowej.	Pojemniki wyporno-	NUR*, David, Demon,
	pojazdy głębinowe klasy roboczej	Masa: 500 – 5000 kg. System operowania kablolina – obligatoryjny.	ściowe dla narzędzi roboczych,	Dolphin-3K, Mars, Rigworker, Trojan,
	do zadań średnich	Przeglady typowe dla przemysłu	systemy manipula-	Triton, Seaeye Jaguar
	lub ciężkich	offshore, prace cieżkie, wsparcie	torów ciężkich	Tittori, Seaeye Jaguar
	idb cięzkicii	wierceń i prac budowlanych, przegląd	IOIOW CIĘZNICII	
		rurociągów, inspekcja budowy.		
6	Zdalnie sterowane	Duże pojazdy swobodnie pływające	System wymywania	BT Trencher, FlexJet II,
	pojazdy głębinowe	albo zorientowane względem dna	woda, manipulatory,	Gator, MUC 201,
	do zakopywania	(jeśli na gasienicach). Masa: 3000-	lokalizator kabla,	Scarab III, Seadog,
	i obsługi kabla	16000 kg. Zakopywanie i obsługa	narzedzia tnace i	Smartjet 1150
		kabli.	chwytające.	
7	Zdalnie sterowane	Pojazdy holowane z powierzchni,	Specjalne narzę-	Aquashuttle Mk II,
	pojazdy holowane	bez napędu, o manewrowości po-	dzia, np. do zako-	Focus 400,
		przecznej i pionowej. Masa: ~150 kg.	pywania kabla	GMI Scanfish MkII,
		Przegląd rurociągów, pomiary para-		Marlin Mk 2,
_	Divisi de selecció	metrów środowiska	Diversity and the second	U-Tow
8	Pługi do zakopy-	Bardzo duże i ciężkie maszyny,	Pług i system	APP, Sea Dragon,
	wania kabla	posadowione na dnie i holowane ze statku na powierzchni. Jeśli zdalnie	prowadzenia do układania i zakopy-	NTT Cable Plow, Tyco Sea Plow VII,
		sterowane, to uważane za ROV.	wania kabla	Tyco Sea Plow VII,
		Masa: 20000–150000 kg. Kładzenie i	wailia kabia	i you sea Fiow VIII
		zakopywanie kabli.		
9	autonomiczne	Pojazd z własnym napędem, niektóre	Sensory do pomia-	ARCS, Autosub,
	pojazdy głębinowe	pojazdy połączone z powierzchnią za	rów parametrów	Epaulard, Hugin,
		pośrednictwem światłowodu do przesy-	środowiska	Marius, MUST Lab,
		łu danych. Masa: 1000–1500 kg.		Ocean Voyager,
		Inspekcja stanu środowiska, marszruty		Theseus
		oceaniczne, głębokowodne, pod lodem.		
10	Przeciwminowe	Pojazdy zasilane z akumulatorów,	Czujniki magne-	Dolphin, Pap Mark 5,
	pojazdy głębinowe	połączone przewodem elektrycznym	tyczne, specjali-	Pinguin B-3,
	ze statkiem. Masa: 350–3500 kg.		styczne wyposaże-	Pluto, Sea Eagle,
	Poszukiwanie i unicestwianie środ-		nie do poszukiwa-	
		ków wybuchowych.	nia materiałów	
11	Drototymy alba	Poiozdy aposialnosa zastasawasia	wybuchowych	AiTC*
11	Prototypy albo	Pojazdy specjalnego zastosowania	Wyposażenie	AiTS*
	pojazdy doświad-	oraz niesklasyfikowane w klasach	specjalne	
	czalne	1 – 10.		

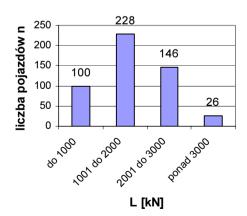
^{*} Pojazd zaprojektowany lub zbudowany na Wydziale Techniki Morskiej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (Politechnika Szczecińska do 31.12.2008 r.).



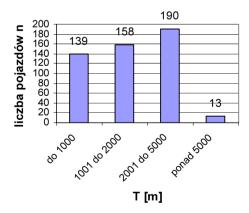
klasy pojazdów

Rys. 5. Klasy bezzałogowych pojazdów głębinowych według przeznaczenia – udział procentowy w populacji 4000 pojazdów

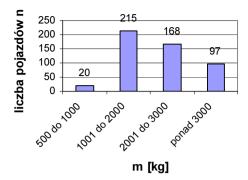
Pojazdy robocze BPGR – wysoce wyspecjalizowane, o bogatym wyposażeniu i dużym stopniu złożoności – stanowią 19% ogólnej liczby pojazdów. Populację 500 pojazdów typu BPGR charakteryzują rysunki 6 – 9, które ilustrują odpowiednio zakresy ładowności, głębokości roboczej, masy i zainstalowanej mocy pojazdów [4]

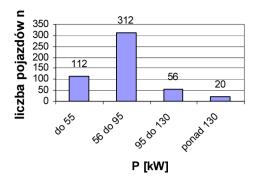


Rys. 6. Liczba pojazdów roboczych *n* w funkcji ich ładowności L (populacja 500 BPGR)



Rys. 7. Liczba pojazdów roboczych *n* w funkcji głębokości operacyjnej T (populacja 500 BPGR)





Rys. 8. Liczba pojazdów roboczych *n* w funkcji ich masy m (populacja 500 BPGR)

Rys. 9. Liczba pojazdów roboczych *n* w funkcji ich mocy P (populacja 500 BPGR)

PODSUMOWANIE

Dynamiczny rozwój technologii głębinowej, wyrażający się także poprzez budowę pojazdów głębinowych rozmaitego przeznaczenia, obejmuje obecnie nie tylko akweny morskie, gdzie aktywność gospodarcza jest najbardziej prężna, ale także wody śródlądowe, czego dowodem są aplikacje pojazdów w pracach inspekcyjnych obiektów hydrotechnicznych (tamy, jazy, śluzy, tunele, szyby kopalniane, jaskinie, baseny portowe i stoczniowe) i obiektów szczególnie niebezpiecznych (reaktory siłowni atomowych).

Pojazdy głębinowe projektowane i wytwarzane są przez wielu producentów według niejednolitych procedur i w oparciu głównie o własne doświadczenia poszczególnych wytwórców. Procedury te w większości przypadków nie są opublikowane i pozostają tajemnicami firm, co hamuje wymianę doświadczeń.

Zespół Techniki Głębinowej Wydziału Techniki Morskiej ZUT (Politechniki Szczecińskiej do 31.12.2008 r.) prowadzi, pod kierownictwem autora, prace badawcze i konstrukcyjne dotyczące pojazdów głębinowych od ponad 20 lat. U podstaw tych prac leży potrzeba uporządkowania wiedzy dotyczącej tego obszaru techniki i zagadnień projektowych, czego wyrazem jest przedstawiona w artykule propozycja klasyfikacji systemów pojazdów głębinowych i analiza ich populacji.

BIBLIOGRAFIA

- Code of Practice for the Safe and Efficient Operation of Remotely Operated Vehicles, R 004, IMCA, Dec. 1997.
- 2. Forman W.: American deep submersible operations. Best Publishing Company, Flagstaff, Arizona, USA 1999.
- Graczyk T.: Bezzałogowe zdalnie sterowane pojazdy głębinowe konstrukcje i zastosowania. Publikacja z cyklu "Technologie prac podwodnych", Instytut Okrętowy Politechniki Szczecińskiej i ODOK SIMP, Szczecin 1991, s. 387.

- Graczyk T.: Zagadnienia projektowania na przykładzie bezzałogowych pojazdów głębinowych. Rozprawy, nr 421, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008, ISSN 0551-6528, ISBN 978-83-7143-375-7, Wydanie I, s. 175.
- 5. Graczyk T., Matejski M., Dramski M.: Morskie badania wdrożeniowo-eksploatacyjne systemu monitoringu głębinowego. Polish Hyperbaric Research Nr 2 (27) 2009, Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej: 37–47.
- 6. Jane's Underwater Technology 1999–2000, Jane's Information Group Ltd., second edition, Surrey, UK 1999.
- 7. Miller J.W., Koblick I.G.: Living and working in the sea. Fife Corners publications, Ltd., Plymouth 1995.
- 8. Rowiński L.: Metodyka projektowania urządzeń zanurzalnych na etapie koncepcji przy zastosowaniu technik komputerowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 484, Budownictwo Okrętowe nr 59, Gdańsk 1993.
- Rowiński L.: Pojazdy głębinowe. Budowa i wyposażenie. Wydawnictwo Prywatne "WiB", Gdańsk 2008.
- Remotely operated vehicles of the Word VIII Edition. Clarkson Research Services Ltd., USA 2009.

SYSTEMS OF UNDERWATER VEHICLES

Summary

There is presented a general classification of underwater vehicles. There is also presented author's proposal of classification of remotely operated vehicles giving consideration to variety of functions, tasks, types of construction and equipment. Analysis of vehicles population is contained in the article, as well.

Keywords: underwater technology, underwater vehicle.

Hubert Bendig-Wielowiejski¹⁾, Tadeusz Graczyk¹⁾

PROBLEMATYKA FUNKCJONOWANIA STOCZNIOWYCH ZAKŁADÓW PRODUKCYJNYCH NA TERENACH SILNIE ZURBANIZOWANYCH

Streszczenie. Znaczna ilość stoczniowych zakładów produkcyjnych, w tym dużych stoczni, znajduje się w miastach. W Europie jest powszechne, że takie zakłady często są ulokowane w centrach miast lub w ich bliskim sąsiedztwie. Taka lokalizacja stwarza wiele problemów środowiskowych, transportowych i społecznych. Wpływa także na mieszkańców, miasto, jak i na samą stocznię. Identyfikacja tych zależności i problemów (a także sposobów im zapobiegania) pozwoli na lepsze funkcjonowania tego typu zakładów w miastach, ich mniejszą uciążliwość oraz polepszenie relacji pomiędzy stocznią a miastem.

Słowa kluczowe: urbanizacja, stocznia, przemysł okrętowy, zakład produkcyjny.

WSTĘP

Budownictwo okrętowe, pomimo kryzysu, wciąż się rozwija – głównie w krajach azjatyckich, gdzie udział budowy statków w ich globalnej produkcji jest coraz większy. Rozwój ten jest widoczny także w Europie, ma on jednak charakter dążenia do coraz bardziej wyspecjalizowanych i skomplikowanych konstrukcji [3] oraz rozwoju technologicznego. Mimo tych zmian przemysł okrętowy wciąż jest widoczny w Europie i w Polsce, gdzie ma także tutaj głęboką tradycję. Sektor okrętowy był i raczej zawsze będzie bardzo ważny dla Europy ze względu na swoją ekonomiczną, topologiczną i historyczną naturę oraz tradycję [7]. Samo budownictwo okrętowe jest kluczową częścią sektora okrętowego, który znacząco przyczynił się do rozwoju Europy w przeszłości i jest bardzo ważny dla jej morskiej przyszłości. W Niemczech, Holandii, Francji, Hiszpanii i Włoszech budownictwo okrętowe jest określane przemysłem strategicznym. Napędza ono gospodarkę, gdyż proces budowy statku dalece wykracza poza samą stocznię i zapewnia dużą liczbę miejsc pracy [1] – części, urządzenia lub całe systemy są budowane poza stocznią, materiały do budowy sprowadzane są od kooperujących dostawców. W ten sposób beneficjentami istnienia tego przemysłu są nie tylko regiony, gdzie są zlokalizowane stocznie, ale także regiony odległe, również w różnych częściach świta [2]. To wszystko rodzi perspektywy dalszego funkcjonowa-

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

nia obecnych stoczni w Europie, a nawet ponownego uruchamiania już zamkniętych, tym bardziej, że europejskie środowisko okrętowe, a w szczególności kadra naukowa i inżynierska wciąż jest znacząca i posiada olbrzymi kapitał intelektualny.

Jedną z charakterystycznych cech europejskich stoczni jest ich długa historia. Istnieją one w mniej lub bardziej zmienionym kształcie od wielu lat, uzupełniane o nowszy sprzęt i technologie, modernizowane, przebudowywane, dostosowywane do najnowszych wymagań. Ta ich długa historia wpłynęła na ich umiejscowienie. Często są to nie tylko peryferie miast, ale także ich miejska przestrzeń, a nawet samo centrum. Taka lokalizacja w centach miast lub w ich bliskim sąsiedztwie jest nieczęsto spotykana dla innych gałęzi przemysłu ciężkiego, lecz jest to nierzadkie zjawisko dla stoczni, właśnie ze względów historycznych – stocznie powstawały w portach, które, jako część miasta tętniąca życiem, były ulokowane w centrach miast. To odnosi się oczywiście tylko do przypadków, kiedy istnieją odpowiednie warunki terenowe miast, a w szczególności dostęp do wody i połączenie z morzem.

Duże stocznie, zajmujące znaczne obszary w miastach i zatrudniające liczne rzesze pracowników wpływały w istotny sposób na miasto, w którym się znajdują i odwrotnie – miasto oddziaływało na nie. Do tych czynników należą m.in. ruch miejski i mieszkalnictwo wokół stoczni, planowanie przestrzenne, rozwiązania komunikacyjne, zapewnienie możliwości dostaw, zapewnienie mediów oraz aspekty środowiskowe, a nawet kulturalne i społeczne.

ZANIECZYSZCZENIA I HAŁAS

Jednym z najbardziej uciążliwych czynników dla miasta jest zanieczyszczenie. Duża koncentracja ludzi, samochodów, zakładów produkcyjnych itp. powoduje znaczne zanieczyszczenia wszelkiego rodzaju na małym obszarze. Tak więc każde kolejne źródło zanieczyszczeń będzie dla miasta niemałym problemem. Niestety, stocznia jest takim znaczącym źródłem, powodującym zanieczyszczenia powietrza, wody, gruntu oraz hałas.

Procesy produkcji oraz naprawy statków to główne przyczyny zanieczyszczenia powietrza. Są to m.in. cięcie blach, spawanie, przygotowywanie powierzchni i malowanie. Do atmosfery dostaje się duża ilość toksycznych związków [4]. Farby rozpuszczalnikowe są źródłem lotnych związków organicznych (volatile organic compounds – VOC), przyczyniających się do zanikania warstwy ozonowej oraz będących źródłem niebezpiecznych zanieczyszczeń powietrza [5]. VOC mogą być produkowane przez wiele różnych procesów typowych dla produkcji stoczniowej, w tym czyszczenie małych elementów i malowanie natryskowe. Ze względu na rozmiar prowadzonych prac największy potencjał produkcji VOC mają procesy powlekania i malowania metodą natryskową [6]. Można temu przeciwdziałać stosując powłoki (farby) o zmniejszonej lub zerowej zawartości rozpuszczalnika. Alternatywą są powłoki oparte na wodzie, proszkowe lub o wysokiej zawartości cząstek stałych [5]. Można także zastosować techno-

logię kontroli zanieczyszczenia powietrza tak, aby usuwać substancje zanieczyszczające ze strumienia powietrza zawierającego VOC i inne szkodliwe czynniki powstałe w procesach produkcyjnych. Jednak przechwytywanie powietrza wydobywającego się z tych procesów w warunkach stoczniowych jest trudne. Procesy produkcyjne odbywają się na dużych powierzchniach i kubaturach. Koncentracja VOC i pozostałych substancji dla większości stoczni będzie zbyt niska by można było je wychwycić [6].

Można jednak przedsięwziąć jeszcze inne środki, aby zmniejszyć zanieczyszczenie powietrza: metody malowania o zwiększonej wydajności, odpowiednio utrzymywany i czyszczony sprzęt (pistolety natryskowe), wyposażenie wysokiej wydajności. Pozwoli to pracownikom na nakładanie powłok przy mniejszych stratach na odpady, co z kolei zmniejszy produkcję szkodliwych odpadów i zanieczyszczenia powietrza [5]. Należy też zwrócić uwagę, iż samo wyszkolenie, umiejętności i odpowiednia motywacja pracowników będzie miała wpływ na ich wydajność oraz sposób pracy.

Do atmosfery dostaje się także dużo dwutlenku węgla, pyłu i innych zanieczyszczeń pochodzących z szeregu procesów produkcyjnych i transportowych. W stoczni zużywa się ogromne ilości gazów (w tym acetylenu) oraz paliw (pojazdy i maszyny transportowe), choć i tak najczęściej to zużycie jest znacznie zredukowane poprzez korzystanie z wielu urządzeń i pojazdów o napędzie elektrycznym. W procesach oczyszczania blach (piaskowanie) do atmosfery dostaje się duża ilość pyłu. W dużej mierze pył ten oraz inne zanieczyszczenia są wdychane przez mieszkańców i osiadają na budynkach i ulicach, przez co jest źródłem chorób, zanieczyszczania elewacji oraz przyczyną powstawania kurzu i warstw brudu.

Zanieczyszczenia zatruwające atmosferę, zatruwają również wodę. Wiele powłok wykorzystywanych w kadłubach okrętowych zawiera ciężkie metale, takie jak miedź i cynk. Ich toksyczne działanie wykorzystywane jest w celu zapobiegania porastaniu i osiadaniu się organizmów morskich na kadłubie statku, spowalniających statek i powodujących zwiększenie zużycia paliwa. Podczas remontu statku będącego w eksploatacji usuwane są organizmy i stara farba w procesie mycia kadłuba [5]. Stosowane powszechnie piaskowanie jak i wycieki ze statków i urządzeń, nieodpowiednie zachowanie pracowników, brak barier ochronnych, zła organizacja prac również przyczynia się do zanieczyszczenia wody [2].

Tak jak i w przypadku zanieczyszczeń powietrza, tak i tu można przedsięwziąć odpowiednie środku w celu zmniejszenia zanieczyszczenia wody. Piaskowanie, które z reguły odbywa się za pomocą specjalnego suchego śrutu, można zastąpić wodą pod bardzo wysokim ciśnieniem, drobinami lodu lub zamienić śrut na specjalny zwilżony śrut, chemicznie przystosowany do łączenia się z metalami ciężkimi i izolowania ich od organizmów wodnych. Toksyczne powłoki zapobiegające porastaniu i siadaniu się organizmów morskich można zastąpić takimi powłokami, które bazują na właściwościach powierzchni i w ten sposób zniechęcają lub całkowicie zapobiegają tym niepożądanym procesom. Alternatywą jest zastosowanie powłok ślizgowych na bazie teflonu i silikonu [5].

Redukcję zanieczyszczeń wody możemy osiągnąć również poprzez odpowiednie przeszkolenie personelu, stosowanie barier zapobiegających rozprzestrzenianiu się za-

nieczyszczeń na powierzchni wody, odpowiedniej dbałości o maszyny, pojazdy i urządzenia oraz o przestrzeganie zasad ochrony środowiska tak, aby zminimalizować ilość wycieków i wyrzucanie odpadów wprost do wody. Należy także czyścić okresowo dno akwenu znajdujące się tuż przy nabrzeżu stoczni [2].

Zanieczyszczenia gruntu są związane z zanieczyszczeniem wody, gdyż te zanieczyszczenia przenikają z jednego środowiska do drugiego. Jednak powierzchnia gruntu jest bardziej narażona na wycieki z maszyn pojazdów transportowych oraz na zwykłe zaśmiecanie odpadami produkcyjnymi lub śmieciami zaliczanymi do grupy komunalnych, produkowanych przez samych pracowników.

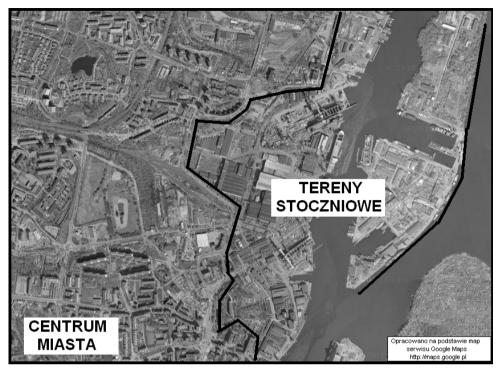
Jeszcze jednym poważnym zanieczyszczeniem środowiska, bardzo uciążliwym dla mieszkańców, jest hałas. Procesy produkcyjne stoczni są bardzo głośne: cięcie, formowanie blach, montaż, kucie, prostowanie, załadunek, rozładunek, nitowanie oraz wiele innych. Do tego dochodzą także maszyny transportowe. Praktyka pokazuje, że stocznie mają problem ze spełnieniem surowych norm hałasu obowiązujących w miastach [2].

Można przyjąć pewne rozwiązania zmniejszające uciążliwość hałasu. Głośne prace nie powinny odbywać się w porze nocnej, kiedy to hałas jest najbardziej uciążliwy, a i normy są wtedy dużo surowsze. Najbardziej głośne rejony stoczni powinny być jak najbardziej oddalone od zabudowań mieszkalnych, a do oddzielone barierami pochłaniającymi lub odbijającymi dźwięk. Te bariery mogą być naturalne (np. drzewa) jak i sztuczne – np. inne budynki stoczniowe, produkujące mniejszy poziom hałasu lub nieprodukujące go w ogólne (np. biuro projektowe, biurowiec administracyjny, parkingowiec), poprzez budynki poza stoczniowe niepełniące funkcji mieszkalnych, aż po dedykowane bariery dźwiękowe takie jak ekrany dźwiękochłonne [2].

Z tych rozważań wynika, że stocznia produkuje duże ilości różnych zanieczyszczeń. Jej lokalizacja w terenach silnie zurbanizowanych sprawia, że są one bardziej uciążliwe i dotykają większej liczby ludzi. Dlatego też, a także z powodu surowszych norm panujących na takich terenach, stocznia musi zwracać na to szczególną uwagę, ponieważ, poza odpowiedzialnością społeczną i naruszeniem dobrych zasad wzajemnego współżycia pomiędzy zakładem produkcyjnym a miastem i jego mieszkańcami, odpowiednie organy mogą nałożyć dotkliwe kary finansowe. Na rysunku 1 widać bliskie sąsiedztwo zakładów stoczniowych o ogromnej powierzchni i obszarów mieszkalnych.

TRANSPORT

Transport w warunkach miejskich jest utrudniony, szczególnie w przypadku towarów wielkogabarytowych, a tych do stoczni przybywa bardzo dużo. Są trzy sposoby dostarczenia towaru do stoczni: pojazdem samochodowym, koleją lub drogą wodną. Większość stoczni jest podłączona do sieci kolejowej, co pozwala na w miarę nieuciążliwy transport znacznej ilości towarów. Jeżeli tylko infrastruktura kolejowa jest dobrze utrzymana i nie ma innych przeciwwskazań dla transportu kolejowego, powinien on



Rys. 1. Przykładowe zdjęcie satelitarne części śródmieścia oraz terenów stoczniowych znajdujących się w mieście Szczecin

być w jak największym stopniu wykorzystywany jako alternatywa do transportu drogowego. Niestety, z uwagi na znaczne rozmiary nie wszystkie ładunki, a w szczególności ładunki ponadgabarytowe, można przewieźć koleją.

Transport drogą wodną będzie raczej odbywał się w wyjątkowych przypadkach. Nie jest możliwe, aby wszyscy dostawcy (czy choćby ich znaczna część) dysponowali dostępem do morza lub systemu transportu śródlądowego, a transport kombinowany może być za drogi ze względu na koszty przeładunku. Jednak często jest to jedyna alternatywa dla bardzo dużych i/lub bardzo ciężkich konstrukcji. Zaletą tej metody transportu jest fakt, że jest ona najmniej uciążliwa dla mieszkańców miasta. Są jednak ograniczenia – na drogach wodnych istnieją pewne przeszkody – konstrukcje wodne (np. jazy, stopnie) oraz mosty, występujące w miastach w większym zagęszczeniu. Do tego dochodzi ruch portowy, transportowy oraz rekreacyjny, który utrudnia transport.

Transport drogowy jest transportem najbardziej elastycznym. Występuje tu najmniej ograniczeń, sieć drogowa jest bardziej rozbudowana niż sieć śródlądowa czy też kolejowa. Niestety, ruch drogowy jest bardziej nieprzewidywalny. Minusem jest duża ilość uczestników ruchu. W miastach ta liczba jest jeszcze większa. Występują także zatory drogowe, remonty, wypadki oraz objazdy. Częste zakazy dla samochodów cię-

zarowych ograniczają dostępność tej infrastruktury. Jednak po uzyskaniu specjalnych zezwoleń można także poruszać się po drogach normalnie niedostępnych dla cięższych pojazdów, a także przewozić ładunki ponadgabarytowe (przy spełnieniu pewnych warunków), co jednak może być utrudnione w terenach zurbanizowanych ze względu na kształt i zagęszczenie infrastruktury miejskiej (światła, latarnie, obiekty w pasie drogowym, budynki, zaparkowane samochody, wąskie ulice, ciasne zakręty). Taki transport musi być dobrze zaplanowany, należy uwzględnić znaczny margines czasu na sytuacje nieprzewidziane i należy spełnić wszelkie warunki wymagane przepisami (np. uzyskać odpowiednie zezwolenia, zatrudnić kierowcę z odpowiednimi kwalifikacjami, zorganizować pojazd pilotujący lub policję, transportu dokonywać tylko w godzinach nocnych, uiścić odpowiednie opłaty itp.).

Transport drogowy jest jednakże najbardziej uciążliwym transportem w mieście, a najbardziej w terenach silnie zurbanizowanych jak centra miast. Samochody w tych obszarach poruszają się bardzo powoli. Taki transport przyczyni się do zanieczyszczenia powietrza, hałasu i zużycia dróg. Jest także ryzyko uszkodzenia innych pojazdów lub infrastruktury miejskiej. Rodzaj transportu powinien być odpowiednio dobrany biorąc pod uwagę czynniki ekonomiczne, społeczne i środowiskowe, a także by ładunek dojechał bezpiecznie i na czas.

Kolejnym zagadnieniem transportu jest kwestia ruchu miejskiego wokół stoczni. Duże stocznie zajmują znaczne tereny i przerywają tkankę miejską. Nie prowadzą przez nią ogólnodostępne drogi, więc ruch mieszkańców musi te tereny omijać. Przy stoczni panuje zwiększony ruch ze względu na dostawy oraz pracowników, co może się przyczynić do znacznego jego utrudnienia. Duże stocznie zatrudniają tysiące pracowników, znaczna ich część dojeżdża do pracy samochodem, konieczne są zatem odpowiednio pojemne parkingi. W przypadku ich braku zajmowane są także miejsca nieprzeznaczone do postoju, co może powodować zagrożenia ruchu oraz jego blokowanie. Te efekty są niekorzystne zarówno dla miasta i jego mieszkańców jak i dla stoczni, gdyż utrudnia to ruch wokół niej, czyli utrudnia ruch dostawcom, naraża pracowników na nieprzestrzeganie przepisów ruchu drogowego. Może to powodować ich frustrację na zakład pracy, który nie zorganizował odpowiedniej ilości miejsc parkingowych, a także pogarsza relacje z władzami miasta. Dlatego ważne jest, by zapewnić pracownikom, również we współpracy z miastem, odpowiednia liczbę miejsc parkingowych i zachęcać ich do korzystania z komunikacji zbiorowej. Komunikacja miejska jest również silnie zależna od licznej rzeszy pracowników stoczni, których potrzeby wpływają na jej rozwój i zagadnienia logistyczne. Pod rozwagę należy wziąć stworzenie linii pracowniczych.

POZOSTAŁE ASPEKTY

Obecność tak dużego i wyspecjalizowanego zakładu w regionie nie pozostaje bez wpływu na inne aspekty funkcjonowania miasta. Ma wpływ na kulturę, choćby poprzez industrialny charakter zakładu mogący być inspiracją dla artystów. Ma wpływ

na życie społeczne, gdyż tak duży zakład jest wszystkim mieszkańcom znany i każdy po części się z nim identyfikuje, tak jak identyfikuje się ze swoim miastem czy klubem piłkarskim. Ma również wpływ na gospodarkę, gdyż tak duży zakład to miejsca pracy, źródło podatków, współpraca firm kooperujących i prestiż. Istnieje też znaczny wpływ na edukację i szkolnictwo wyższe. Przy dużym zakładzie mogą powstać szkoły zawodowe i technika o profilu budowy okrętów. Możliwy jest także rozwój uczelni wyższych lub kierunków kształcących inżynierów okrętownictwa. To wszystko zapewnienia istnienie wyszkolonej i wykwalifikowanej kadry dla zakładu, a także rozwój techniczny i naukowy. Niezbędny jest w tych przedsięwzięciach jednakże aktywny udział stoczni, jako głównego beneficjenta, co stwarza warunki korzystne dla jej rozwoju.

O dobrą relację z mieszkańcami stocznia, jako największy lub jeden z większych pracodawców, powinna dbać w szczególny sposób, np. sponsorując drużyny sportowe. Dobre relacje z mieszkańcami wpływają na opinię o zakładzie. Ta opinia może być motywacją do podjęcia nauki w profilu działalności stoczni i wyboru tej ścieżki kariery, co pozwoli stoczni na pozyskanie odpowiedniej kadry.

PODSUMOWANIE

Tak wielki i znaczący zakład produkcyjny, jakim jest duża stocznia istotnie wpływa na jej otoczenie, które odwrotnie – może mieć również bardzo duży wpływ na samą stocznię. W warunkach silnie zurbanizowanych ten wpływ oraz wzajemna zależność są jeszcze bardziej widoczne. Ważne tutaj są aspekty gospodarcze, społeczne, ale przede wszystkim środowiskowe i transportowe. Na tym polu następują najbardziej podstawowe ingerencje odnośnie codziennego funkcjonowania stoczni. Te ingerencje w dużej mierze mają wpływ negatywny i należy podjąć odpowiednie działania (po części przedstawione w tej pracy), aby im zapobiec lub je zminimalizować. W ten sposób dwa organizmy, jakimi są stocznia i miasto, będą mogły koegzystować bez wzajemnego uszczerbku, a raczej przy obopólnych korzyściach.

Zawarte w artykule rozważania, przykłady i rozwiązania można zastosować do większości dużych zakładów przemysłowych, w szczególności przemysłu ciężkiego, znajdujących się w centrach miast lub w bliskim ich sąsiedztwie.

PIŚMIENNICTWO

- Andritsos F.: Integration & robot autonomy: key technologies for competitive shipbuilding. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Systems, Informatics & Safety, TP 210 21020 Ispra (Va), Italy, COMPIT 2000.
- 2. Bendig-Wielowiejski H.: Environmental, Technical and Organizational Aspects of Managing a Shipyard in Urban Areas. [W:] Trzcieliński S. (red.) "Management concepts, strategies and structures", Poznań 2010: 143–149.

- 3. Bendig-Wielowiejski H.: Production and Logistics Management of Shipbuilding Industry Selected Problems and Solutions Based on Polish Shipyards. Proceeding of the III International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists 19-21 May 2010, Poznan, Poland.
- 4. Clean Bay Campaign Environmental Health Coalition, "Shipyard Pollution: Campaign for Clean and Safe Shipyards", http://www.environmentalhealth.org.
- 5. Northwest Industry Roundtable Report, "Pollution Prevention at Shipyards", Pacific Northwest Pollution Prevention Resource Center, September 1997.
- Snider T.J.: An Analysis of Air Pollution Control Technologies for Shipyard Emitted Volatile Organic Compounds (VOCs). The National Shipbuilding Research Program, National Steel and Shipbuilding Company, March 1993, U.S. Department of Transportation, Maritime Administration.
- 7. Task Force: Maritime Systems of the Future, "The Maritime Industry R&D Master Plan", European Commission, DG III-F, Draft of 4 July 1996.

FUNCTIONING PROBLEMS OF A SHIPYARD PRODUCTION PLANT IN HEAVY URBAN AREAS

Summary

Significant number of shipyard production plants, including large shipyards, ale placed in cities. It is common in Europe that these kinds of plants are located in cities' centres or nearby. Such localization creates many environmental, transportational and social problems. It also affects citizens, the city and the shipyard itself. Identification of these relationships and problems (and also means of preventing them) will allow better functioning of these kinds of plants in cities, lowering their arduousness and relations improvement between a shipyard and a city.

Keywords: urbanisation, shipyard, shipbuilding industry, production plant.

Radosław Rutkowski¹⁾

ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW WYSOKOŚCIOWYCH W PROCESIE BUDOWY WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJI STALOWYCH

Streszczenie. Artykuł porusza zagadnienia kontroli wymiarowej w procesie budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. Przedstawiono w nim wyniki prac mających na celu zwiększenie jakości kontroli wymiarowej w zakładach produkujących wielkogabarytowe konstrukcje stalowe. Największy nacisk położono na pomiary wysokościowe.

Słowa kluczowe: wielkogabarytowe konstrukcje stalowe, jakość wymiarowa, pomiary, budownictwo okrętowe, technologia, metrologia.

WSTĘP

Jednym z podstawowych zadań zakładów produkujących wielkogabarytowe konstrukcje stalowe jest wytworzenie produktu o jak najwyższej jakości jednocześnie przy możliwie najniższym koszcie czyli przede wszystkim przy oszczędnym zużyciu materiałów i w jak najkrótszym cyklu produkcyjnym. Względy te są powodem bardzo wysokich wymagań jakościowych, tak w sensie projektowania procesów technologicznych, jak i racjonalizacji procesów wytwarzania oraz kontroli jakości produkcji.

Aby możliwe było prawidłowe zestawienie i połączenie elementów konstrukcji, niezbędne jest zachowanie, zgodnie z projektem, ich wymiarów, kształtów i wzajemnego usytuowania. Podstawowymi narzędziami służącymi do realizacji tego celu są prace kontrolno-pomiarowe prowadzone na każdym etapie budowy. Umożliwiają one sprawdzenie zgodności projektu z realizacją budowanego przedmiotu podczas cyklu budowy aż do jej zakończenia

Obecnie coraz częściej stosowane są systemy pomiarowe oparte na urządzeniach elektronicznych. Opis takich systemów można znaleźć m.in. w opracowaniach [3, 6]. Prace kontrolno-pomiarowe oparte na przyrządach elektronicznych wymagają odpowiedniego przygotowania technicznego stanowisk prefabrykacyjnych oraz montażowych. Zaplecze technologiczne w wielu przypadkach jednak uniemożliwia zastosowanie takich urządzeń pomiarowych we wszystkich etapach budowy. Przykładem może

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

być przemysł okrętowy, gdzie często proces produkcyjny odbywa się na stanowiskach nie przystosowanych do prowadzenia kontroli jakości wymiarowej zaawansowanymi technikami pomiarowymi.

Uwzględniając powyższe oraz stale rosnące wymagania co do jakości wymiarowej można stwierdzić, iż nadal niezbędne jest doskonalenie systemów pomiarowych opartych na klasycznych instrumentach umożliwiających wykonywanie pomiarów niemalże w każdych warunkach technicznych.

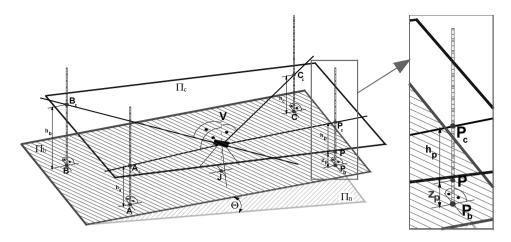
Niniejsze opracowanie przedstawia wyniki prac przeprowadzonych w celu racjonalizacji klasycznych metod pomiarowych. Zostały one wykonane głównie dla potrzeb przemysłu okrętowego, jednakże mogą zostać zastosowane w każdym zakładzie produkującym konstrukcje wielkogabarytowe.

METODY POMIAROWE

Podstawową cechą charakterystyczną prac pomiarowych prowadzonych podczas produkcji wielkogabarytowych konstrukcji stalowych jest konieczność wykonywania pomiarów w nachylonych układach współrzędnych oraz w układach zmieniających się dynamicznie – stanowiska montażu są przeważnie nachylone względem poziomu niwelacyjnego. Ponadto przykładowo w przemyśle okrętowym część prac wyposażeniowych statku wykonywana jest przy nabrzeżu (statek podlega kołysaniu). Uwarunkowania te utrudniają, a w wielu przypadkach uniemożliwiają bezpośrednie zastosowanie typowych metod pomiarowych wykorzystujących stały poziom niwelacyjny wyznaczony za pomocą libel lub mechanizmów samopoziomujących. Przedstawione wyżej uwarunkowania wymagają stosowania specjalnych metod pomiarowych pozwalających na uniezależnienie układu odniesienia od poziomu niwelacyjnego. Poniżej przedstawiono krótki opis podstawowej metody stosowanej w budownictwie okrętowym – metody niwelacji optycznej. Szersze omówienie tej metody oraz jej modelu matematycznego można znaleźć w piśmiennictwie [5, 6].

Metoda niwelacji optycznej

W przypadku gdy zachodzi konieczność odnoszenia pomiarów do płaszczyzn lub powierzchni zbliżonych do płaszczyzn nachylonych względem poziomu niwelacyjnego pod pewnym niewielkim kątem Θ odpowiednie pomiary wykonywane są przeważnie metodą niwelacji optycznej. Metoda ta nie korzysta z poziomu odniesienia, ale wykorzystuje pomocniczą płaszczyznę Π_c (rys. 1), względem której wykonuje się pomiar. Metodę tę można stosować zarówno podczas prowadzenia pomiarów na stanowiskach montażowych znajdujących się na lądzie, jak i na wodzie (dok pływający, statek po zwodowaniu). Omawianą metodę przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Metoda niwelacji optycznej

Zasadniczym zadaniem podczas wykonywania pomiarów z wykorzystaniem metody niwelacji optycznej jest wyznaczenie współrzędnych z_p punktów P_i w pewnym układzie współrzędnych ortokartezjańskich 0xyz. W przypadku, gdy powierzchnią odniesienia jest płaszczyzna Π_b , osie x i y tego układu przyjmuje się na tej właśnie płaszczyźnie, nadając im odpowiednią dla danych potrzeb orientację. Płaszczyzna Π_b wyznaczana jest przez trzy odpowiednio wybrane punkty A,B,C leżące przeważnie na konstrukcji mierzonej. Punkty te nazywane są bazą.

Wartość oblicza się według poniższego wzoru:

$$z_P = z_{P_C} - h_P \tag{1}$$

gdzie: z_{P_C} – współrzędna "z" punktu P_C .

Wartość z_{P_C} można wyznaczyć, korzystając ze wzoru wyrażającego równanie płaszczyzny Π_c przechodzącej przez punkty $A(x_A,y_A,h_A)$, $B(x_B,y_B,h_B)$, $C(x_C,y_C,h_C)$:

$$\begin{vmatrix} x_{P} & y_{P} & z_{P_{C}} & 1 \\ x_{A} & y_{A} & h_{A} & 1 \\ x_{B} & y_{B} & h_{B} & 1 \\ x_{C} & y_{C} & h_{C} & 1 \end{vmatrix} = 0$$
(2)

Po przekształceniach powyższą zależność można przedstawić w następujący sposób:

$$z_{P_{C}} = \frac{\left(\Delta x_{AB} y_{P} + \Delta x_{BP} y_{A} - \Delta x_{AP} y_{B}\right) h_{C} + \left(\Delta x_{AP} y_{C} - \Delta x_{AC} y_{P} - \Delta x_{CP} y_{A}\right) h_{B} + \left(\Delta x_{BC} y_{P} - \Delta x_{BP} y_{C} + \Delta x_{CP} y_{B}\right) h_{A}}{\Delta x_{AB} y_{C} + \Delta x_{BC} y_{A} - \Delta x_{AC} y_{B}}$$
(3)

gdzie:
$$\Delta x_{AB} = x_B - x_A$$
 $\Delta x_{AP} = x_P - x_A$ $\Delta x_{CP} = x_P - x_C$
 $\Delta x_{BP} = x_P - x_R$ $\Delta x_{AC} = x_C - x_A$ $\Delta x_{BC} = x_C - x_B$

Podstawiając prawą stronę równania (3) do wzoru (1) otrzymano:

$$z_{p} = \left(\frac{\left(\Delta x_{AB}y_{p} + \Delta x_{BP}y_{A} - \Delta x_{AP}y_{B}\right)h_{C} + \left(\Delta x_{AP}y_{C} - \Delta x_{AC}y_{p} - \Delta x_{CP}y_{A}\right)h_{B} + \left(\Delta x_{BC}y_{p} - \Delta x_{BP}y_{C} + \Delta x_{CP}y_{B}\right)h_{A}}{\Delta x_{AB}y_{C} + \Delta x_{BC}y_{A} - \Delta x_{AC}y_{B}}\right) - h_{P}(4)$$

Jest to model matematyczny niwelacji optycznej służący do analizy dokładności pomiarów wykonywanych ta metodą.

ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW WYSOKOŚCIOWYCH

Stosując do wzoru (4) prawo przenoszenia się błędów średnich otrzymano zależność (5) pozwalającą na wykonanie analizy dokładności.

$$m^{2}_{z_{P_{i}}} = \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{A}}\right)^{2} m^{2}_{h_{A}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{B}}\right)^{2} m^{2}_{h_{B}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{C}}\right)^{2} m^{2}_{h_{C}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{P_{i}}}\right)^{2} m^{2}_{h_{P_{i}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{A}}\right)^{2} m^{2}_{x_{A}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{A}}\right)^{2} m^{2}_{y_{A}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{B}}\right)^{2} m^{2}_{y_{A}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{B}}\right)^{2} m^{2}_{x_{B}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{B}}\right)^{2} m^{2}_{y_{B}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{C}}\right)^{2} m^{2}_{x_{C}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{C}}\right)^{2} m^{2}_{y_{P_{i}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{C}}\right)^{2} m^{2}_{y_{P_{i}}}$$

$$(5)$$

i = 1,2,...ngdzie: n – ilość punktów P,

 m_{h_A} m_{h_B} , m_{h_B} , m_{h_C} , m_{h_R} – odchylenia standardowe odpowiednich odczytów na łatach niwelacyjnych,

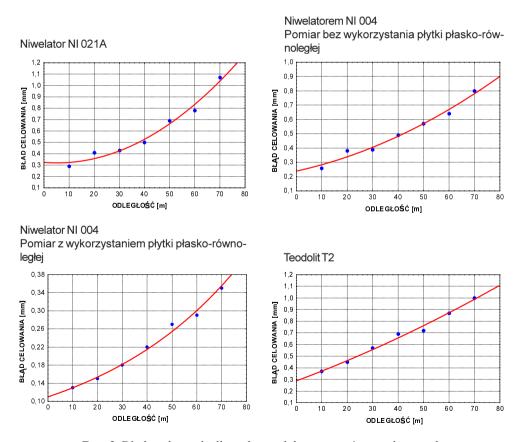
 m_{x_A} , m_{y_A} , m_{x_B} , m_{y_B} , m_{x_C} , m_{y_C} , $m_{x_{P_i}}$, $m_{Y_{P_i}}$ – odchylenia standardowe wyznaczania współrzędnych punktów A, B, C i P_i .

Przy zmiennej z_P wprowadzono parametr "i" () opisujący ilość punktów P, których współrzędne "z" należy wyznaczyć w jednym procesie pomiarowym.

Analizując przedstawiony powyżej opis matematyczny dokładności pomiarów wykonywanych metodą niwelacji optycznej można łatwo dojść do wniosku, iż na dokładność wyznaczania wartości mierzonych mają przede wszystkim wpływ błędy odczytu z łat pomiarowych. Wielkości te są opisywane w literaturze np. [2] wzorami przybliżonymi zdecydowanie za mało dokładnymi dla celów kontroli geometrycznej procesów budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. W związku z powyższym wielkości te zostały określone doświadczalnie. Proces badawczy został omówiony w [6]. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rysunku 2.

Biorąc pod uwagę fakt, iż w pomiarach prowadzonych w procesach produkcyjnych zachodzi często konieczność stosowania długich celowych wykonano analizę zastosowania w takich przypadkach metody płaszczyzn przyporządkowanych, która pozwala wykonać pomiar na dużej przestrzeni z jednoczesnym zmniejszeniem długości osi celowych.

Metoda płaszczyzn przyporządkowanych była dotychczas stosowana w przypadku gdy wykonywanie pomiarów metodą niwelacji optycznej było utrudnione a czasami



Rys. 2. Błędy celowania dla wybranych instrumentów pomiarowych

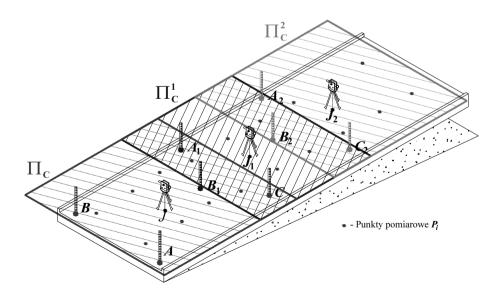
niemożliwe z powodu przeszkód ograniczających widoczność łat niwelacyjnych (np. elementy na pokładzie głównym statku podczas jego niwelacji). W przypadkach takich, powiązanie zasłoniętych punktów pomiarowych z punktami bazy ABC (rys. 1) można realizować wykorzystując zasadę płaszczyzn przyporządkowanych. Zasada ta polega na zastosowaniu baz pomocniczych A_j B_j C_j (j – numer płaszczyzny przyporządkowanej Π_b^j), które posiadają znane rzędne $(z_{A_j}, z_{B_j}, z_{C_j})$ wyznaczone podczas wykonywania pomiarów względem płaszczyzny podstawowej Π_b utworzonej przez punkty ABC. Wartości z_{P_i} punktów pomiarowych P_i wyznaczanych względem płaszczyzny przyporządkowanej Π_b^j obliczamy według zależności (6) opracowanej na bazie wzoru (4):

$$z_{R} = \left(\frac{\left(\Delta x_{A_{i}B_{i}}y_{R} + \Delta x_{B_{i}R}y_{A_{i}} - \Delta x_{A_{i}B_{i}}y_{B_{i}}\right) h_{C_{i}} + \left(\Delta x_{A_{i}R}y_{C_{i}} - \Delta x_{A_{i}C_{i}}y_{R} - \Delta x_{C_{i}R}y_{A_{i}}\right) h_{B_{i}} + \left(\Delta x_{B_{i}C_{i}}y_{R} - \Delta x_{B_{i}R}y_{C_{i}} + \Delta x_{C_{i}R}y_{B_{i}}\right) h_{A_{i}}}{\Delta x_{A_{i}B_{i}}y_{C_{i}} + \Delta x_{B_{i}C_{i}}y_{A_{i}} - \Delta x_{A_{i}C_{i}}y_{B_{i}}}\right) - h_{R} (6)$$

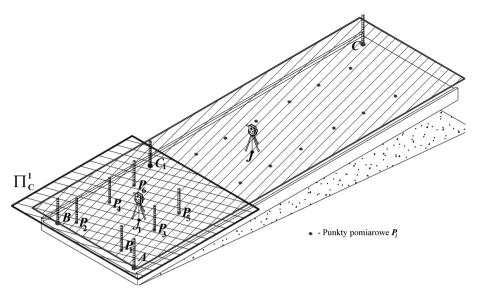
$$\text{gdzie:} \quad h_{A_{i}}' = \left(h_{A_{i}} + z_{A_{i}}\right); \quad h_{B_{i}}' = \left(h_{B_{i}} + z_{B_{i}}\right); \quad h_{C_{i}}' = \left(h_{C_{i}} + z_{C_{i}}\right).$$

Przyporządkowanie pomocniczych płaszczyzn bazowych obrazuje schematycznie rysunek 3.

Omawianą zasadę pomiaru w szczególnym przypadku można wykorzystać w celu skrócenia celowych w procesach pomiarowych wykonywanych np. na całej długości statku. Sytuację taką przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Przyporządkowanie płaszczyzn bazowych



Rys. 4. Pomiary wysokościowe obejmujące całą długość statku

Postawioną tezę, iż zastosowanie metody płaszczyzn przyporządkowanych zwiększy dokładność pomiarów w przypadku niwelacji optycznej wykonywanej na dużych obszarowo konstrukcjach (przykładowo pokład statku) zweryfikowano przykładem obliczeniowym, który został przedstawiony poniżej.

Dokładność pomiarów metodą niwelacji optycznej wykonywanych względem bazy przyporządkowanej określono korzystając z prawa przenoszenia się błędów średnich:

$$\begin{split} m^{2}{}_{z_{R_{i}}} &= \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{A_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{h_{A_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial z_{A_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{z_{A_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{B_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{h_{B_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial z_{B_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{z_{B_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{C_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{h_{C}} \\ &+ \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial z_{C_{1}}}\right)^{2} m^{2}{}_{z_{C_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial h_{P_{i}}}\right)^{2} m^{2}{}_{h_{P_{i}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{A_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{x_{A_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{A_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{y_{A_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{B_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{x_{B_{i}}} \tag{7} \\ &+ \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{B_{i}}}\right)^{2} m^{2}{}_{y_{B}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{C_{i}}}\right)^{2} m^{2}{}_{x_{C_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{C_{j}}}\right)^{2} m^{2}{}_{y_{C_{j}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial x_{P_{i}}}\right)^{2} m^{2}{}_{x_{P_{i}}} + \left(\frac{\partial z_{P_{i}}}{\partial y_{P_{i}}}\right)^{2} m^{2}{}_{y_{P_{i}}} \end{split}$$

gdzie: $m_{z_{A_J}}, m_{z_{B_J}}, m_{z_{C_J}}$ – odchylenia standardowe wyznaczania $(z_{A_j}, z_{B_j}, z_{C_j})$ względem płaszczyzny Π_b wyznaczone na podstawie wzoru (5).

Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia wielkości dla sytuacji zaprezentowanej na rysunku 4. Współrzędne stanowisk instrumentu, punktów A, B, C, C_1 oraz P_i zamieszczono w tabeli 1.

Punkty	Α	В	С	C ₁	J	J_1
Współrzędne (x, y) [m]	(0,0)	(0,20)	(200,20)	(50,20)	(100,10)	(25,10)
Punkty	P ₁	P_2	P_3	P_4	P ₅	P ₆
Współrzędne (x, y) [m]	(5,2)	(5,18)	(25,2)	(25,18)	(45,2)	(45,18)

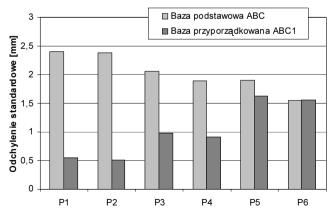
Tabela 1. Współrzędne stanowisk instrumentu oraz punktów bazowych i pomiarowych

Jako instrument pomiarowy przyjęto niwelator Ni-021A. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 2 oraz zaprezentowano graficznie na rysunku 5.

Przedstawione obliczenia dowodzą, iż w pomiarach wykonywanych metodą niwelacji optycznej przy długich celowych, zastosowanie zasady płaszczyzn przyporządkowanych może znacząco zwiększyć dokładność pomiarów. Błędy powstające podczas wyznaczanie punktów bazowych płaszczyzn przyporządkowanych mają zdecydowanie mniejszy wpływ na wynik końcowy niż błędy wynikające z długich osi celowych.

Tabela 2. Odchylenia standardowe pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem bazy podstawowej oraz baz płaszczyzn przyporządkowanych

Baza podstawowa wyznaczona przez punkty A, B, C							
Punkty	C ₁	P ₁	P_2	P ₃	P_4	P ₅	P ₆
Odchylenie standardowe wyznaczania rzędnej [mm]	1,63	2,40	2,38	2,06	1,89	1,90	1,54
Baza przyporządkowana wyznaczona przez punkty A, B, C ₁							
Punkty		P ₁	P_2	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
Odchylenie standardowe wyznaczania rzędnej [mm]		0,54	0,51	0,98	0,91	1,62	1,55



Rys. 5. Odchylenia standardowe pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem bazy podstawowej oraz baz płaszczyzn przyporządkowanych

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w niniejszym artykule analiza dokładności wykazuje, iż optyczne metody pomiarowe przy zastosowaniu odpowiednich założeń i procedur zapewniają otrzymanie wyników dobrej jakości. Wartość niepewności pomiarowej jest częstokroć mniejsza niż przy zastosowaniu metod elektronicznych. Ponadto metody optyczne nie wymagają specjalistycznego sprzętu oraz odpowiednio przygotowanych stanowisk montażowych. Reasumując, optyczne metody pomiarowe są nadal konkurencyjne w zakresie kontroli jakości wymiarowej w procesie budowy konstrukcji wielkogabarytowych.

BIBLIOGRAFIA

- Humieny Z., Bialas S., Osanna P.H., Tamre M., Weckenmann A., Blunt L. (et. al.): Geometrical Product Specifications (GPS) course for Technical Universities. Warsaw University of Technology Printing House, Warsaw 2001.
- 2. Jagielski A.: I (Geodesy I). Stabill Publishing House, Cracow 2002.
- 3. Niebylski J.: Optymisation of the collection of geometrical data in shipbuilding. International conference on marine technology ODRA 99, Computational Machanics Publications Southampton Boston 2000.
- 4. Okumoto Y.: Optymization of Block Erection Using a Genetick Algorithm. Journal of Ship Production, Vol. 18, No 2, 2002.
- 5. Rutkowski R.: Dynamical control of dimensional quality of large steel structures in production enterprises of low level technological support. Polish Maritime Research Vol 17, No 1(63), 2010.
- Rutkowski R.: Geometrical control systems modelling of three-dimensional steel structures referring to the required accuracy standards. Rozprawa doktorska. Wydział Techniki Morskiej, Politechnika Szczecińska, 2005.

ANALYSIS OF HEIGHT MEASUREMENTS ACCURACY IN A BUILDING PROCESS OF LARGE DIMENSIONAL STEEL STRUCTURES

Abstract

Problems of measurement control in a building process of large dimensional steel structures are discussed in the paper. Results of works aiming at improvement of the measurement control in plants producing such constructions are presented. Levelling measurements are especially pointed.

Keywords: large-size steel structures, measurement quality, measurements, shipbuilding, technology, metrology.

Tomasz Urbański¹⁾

PANELE SANDWICH W WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJACH STALOWYCH - CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU ŁĄCZENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe typy innowacyjnych elementów konstrukcyjnych, zwanych panelami sandwich. Pokazano możliwości zastosowań paneli w wielkogabarytowych sekcjach stalowych. Konstrukcja hybrydowa, która powstaje w wyniku łączenia struktury konwencjonalnej z innowacyjną, stwarza konieczność rozwiązania szeregu problemów, zwłaszcza natury technologicznej. Do najistotniejszych problemów z tej dziedziny należy łączenie, zarówno paneli między sobą, jak również z konstrukcją konwencjonalną. W artykule dokonano charakterystyki problemu łączenia w kontekście technologicznym.

Słowa kluczowe: innowacyjny element konstrukcyjny, panel sandwich, węzeł hybrydowy, odkształcenia spawalnicze.

WSTĘP

Potrzeba wytwarzania konstrukcji stalowych o coraz większych rozmiarach i za-awansowaniu konstrukcyjno-technologicznym przyczyniła się do poszukiwania nowych struktur, które mogłyby konkurować z konwencjonalnymi elementami wielkogabarytowych budowli. Strukturami tymi stały się innowacyjne elementy konstrukcyjne, zwane powszechnie panelami sandwich.

Określenie panel sandwich jest bardzo ogólne i może odnosić się zarówno do paneli stosowanych na elementy tzw. wyposażeniowe (nie przenoszące obciążeń) jak i do paneli wchodzących w skład elementów konstrukcji wielkogabarytowych (mogących przenosić obciążenia). Pomimo znaczących różnic między wspomnianymi grupami paneli, idea ich budowy jest taka sama (dwie powłoki zewnętrzne połączone rdzeniem) i opiera się na rozwiązaniach stosowanych w strukturach z tworzyw sztucznych. W artykule mowa będzie wyłącznie o drugiej grupie paneli sandwich.

Idea tego typu elementów (tj. warstwowych, przekładkowych) wywodzi się z rozwiązań stosowanych w lotnictwie [11] i zaczęła się (w gospodarce wojskowej), w Europie, na początku ubiegłego stulecia od paneli typu honeycomb (patent pierwszego

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

rdzenia typu honeycomb pochodzi z 1905 r., z Niemiec) [3]. Do dziś sandwich'e tego typu wykorzystywane są w przemyśle wojskowym, zarówno w lotnictwie [3], jak i w marynarce wojennej [17].

Przełomem, umożliwiającym produkcję innowacyjnych elementów konstrukcyjnych na skalę przemysłową, było wprowadzenie nowoczesnych technologii spawania, tj. spawania laserowego i hybrydowego oraz stworzenie nowych komponentów, np. elastomeru. Dzięki temu powstały m.in.: stalowe panele sandwich wytwarzane przez Meyer Werft w Papenburgu [16] oraz panele SPS (czyli sandwich plate system) [14].

Ostatnie kilkanaście lat to ciągły wzrost zainteresowania panelami sandwich, głównie ze strony ośrodków naukowo-badawczych oraz towarzystw klasyfikacyjnych, mający swoje odzwierciedlenie w wielu projektach o skali międzynarodowej (np. projekty: BONDSHP, SANDCORE, SANDWICH), których tematyka badawcza skupiała się głównie na problemach związanych z samymi panelami, ze szczególnym uwzględnieniem tematyki konstrukcyjno-wytrzymałościowej [7, 12].

Obecnie samo stosowanie paneli wydaje się być zagadnieniem opanowanym (np.: wydane zostały tymczasowe przepisy dotyczące remontów jednostek pływających przy wykorzystaniu technologii SPS [6] oraz projekt przepisów odnoszący się do stalowych, spawanych laserowo paneli sandwich [5]).

Jednak dalej najwięcej problemów generują obszary związane z technologicznością konstrukcji zawierającej w sobie panele sandwich w kontekście jej dalszej przydatności montażowej na etapie wytwarzania – tj. w warunkach produkcyjnych. Jednym z takich zagadnień jest problem łączenia innowacyjnych elementów konstrukcyjnych.

W artykule skupiono się głównie na jednym typie paneli (tj. I-core, rys. 1) z uwagi na dużą popularność tych elementów [7, 16] oraz prowadzone przez autora badania eksperymentalne z ich wykorzystaniem [12].

CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA PANELI SANDWICH

Budowę panelu sandwich przedstawiono na rysunku 1. Każdy taki panel składa się z dwóch płyt zewnętrznych i rdzenia. Różnice konstrukcyjne między poszczególnymi typami paneli wynikają z kształtów oraz rodzajów materiałów użytych na elementy rdzenia i sposobu ich łączenia z płytami wierzchnimi.

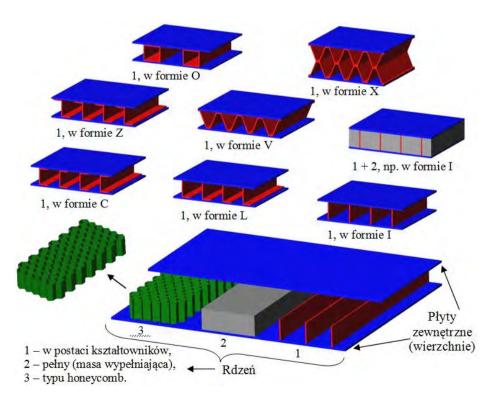
Płyty zewnętrzne paneli, stosowanych na elementy konstrukcyjne, mogą być wykonane są z różnych gatunków stali (najczęściej ze stali zwykłej oraz podwyższonej wytrzymałości, innych spawalnych gatunków stali – w tym stali o specjalnych własnościach, np. odpornych na korozję), stopów aluminium, stopów tytanu [15, 16].

Panele sandwich, w zależności od rodzaju rdzenia (rys. 1), podzielono na:

Stalowe panele sandwich spawane laserowo. Podstawowe typy geometrii rdzeni
mogą być w nich wykonane z kształtowników w formie: I (I-core), C, O, V, Z, L,
X. Największym producentem paneli tego rodzaju oraz liderem w ich zastosowaniu
w Europie jest Meyer Werft [16].

- Panele z rdzeniem pełnym. Najbardziej rozpowszechnionymi obecnie strukturami tego rodzaju są panele SPS (Sandwich Plate System); rdzeń tworzy w nich poliuretanowy kompozyt – elastomer. Badaniami, rozwojem oraz wdrażaniem technologii SPS zajmuje się firma Intelligent Engineering (IE) [15].
- Panele honeycomb. Posiadają rdzeń o specyficznej strukturze plastra miodu. Najczęściej spotykane są rdzenie o ogniwach w kształcie: sześciokątnym, czworokątnym, trójkątnym [14, 17].
- Panele hybrydowe (mieszane). Powstają poprzez modyfikacje, polegającą na połączeniu geometrii wyżej wymienionych rdzeni, np. stalowy panel typu I-core z wypełnieniem np.: betonowym lub z pianek syntetycznych.

Panele sandwich, jako elementy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych, mogą być użyte przede wszystkim w rejonach nie posiadających krzywizn, głównie budowli z gałęzi przemysłu typu Offshore. Dotyczy to zarówno budowy nowych, jak i remontów jednostek już eksploatowanych. Innowacyjny element konstrukcyjny może być potencjalnie zastosowany:



Rys. 1. Budowa panelu sandwich oraz jego podstawowe rodzaje [12]

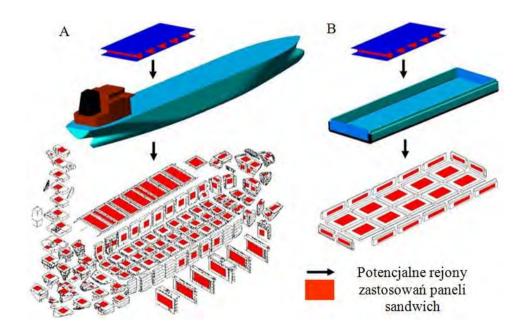
- w kadłubie statku pełnomorskiego, jako element: burt i den wewnętrznych w rejonie wstawki cylindrycznej, pokładów, grodzi, pokryw lukowych, ścianek zewnętrznych nadbudówek oraz klatek schodowych, szybów maszynowych i mostków kapitańskich (rys. 2) [12, 13],
- w kadłubie barki śródlądowej, jako niemalże wszystkie jego elementy poza obłami i skrajnikami (rys. 2) [12, 13].

Panele sandwich mogą również znaleźć zastosowanie jako elementy:

- innych konstrukcji oceanotechnicznych, w szczególności platform wiertniczych, głównie jako pokłady i ściany nadbudówek,
- konstrukcji budowlanych, np. jako elementy wielopiętrowych parkingów samochodowych oraz nawierzchni mostów.

Zastosowanie paneli sandwich w wymienionych konstrukcjach niesie szereg korzyści, z których najważniejsze to:

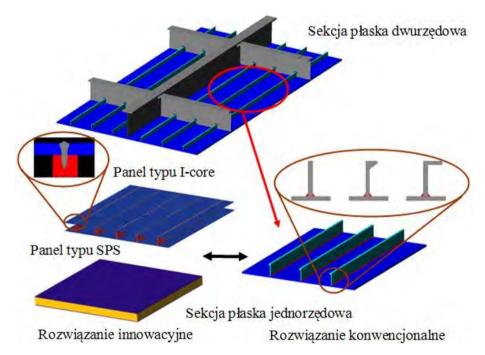
od strony konstrukcyjnej – zwiększona wytrzymałość statyczna innowacyjnego
panelu w porównaniu z konwencjonalną płytą usztywnioną (np. spawany laserowo
panel sandwich jest w stanie przenieść ponad trzy krotnie większe obciążenie od
tradycyjnie usztywnionej płyty stalowej, o tej samej masie oraz wymiarach [9]).



Rys. 2. Rejony zastosowania paneli sandwich w konstrukcji kadłuba: A – statku pełnomorskiego, B – barki śródlądowej [12, 13]

• od strony technologicznej – eliminacja usztywnień zwykłych (występujących najczęściej w postaci: płaskowników, kształtowników łebkowych, kątowników (rys. 3).

Oszacowano, że zastosowanie pokazanego na rysunku 3 uproszczenia konstrukcji (z wykorzystaniem paneli sandwich typu SPS) w rejonie przestrzeni ładunkowej tankowca, o objętości 10 130 m³, pozwoli na wyeliminowanie kształtownika łebkowego w ilości ok. 9000 m oraz ok. 3700 detali konstrukcyjnych. Efektem powyższego będzie redukcja objętości spoin w tym rejonie konstrukcji o ok. 40% [4].



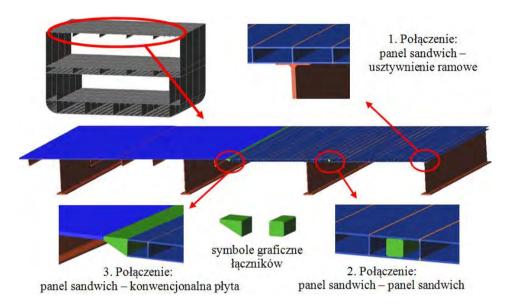
Rys. 3. Uproszczenie konstrukcji poprzez zastosowanie paneli sandwich: typu I-core oraz SPS (na podst. [12])

ŁĄCZENIE INNOWACYJNYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

Użycie innowacyjnych paneli, niesie ze sobą wiele problemów, pojawiających się zarówno na etapie projektowania, wytwarzania, jaki i eksploatacji konstrukcji. Problemy na każdym z w/w etapów mają swój specyficzny charakter, który w fazie wytwarzania wielkogabarytowej konstrukcji stalowej może być natury: konstrukcyjnej, technologicznej oraz ekonomicznej. Za najbardziej znaczący, od strony technologicznej, uznano: prefabrykację oraz montaż wielkogabarytowych sekcji i bloków zawierających innowacyjne elementy konstrukcyjne. Z zagadnieniem tym nieodzownie związa-

ny jest problem łączenia ze sobą montowanych detali oraz podzespołów. Rodzaje połączeń występujących w wielkogabarytowej konstrukcji stalowej, która posiada innowacyjne panele przedstawiono na rysunku 4, a ogólną ich charakterystykę zamieszczono w tabeli 1.

Każde z połączeń (rys. 4) posiada inną skalę trudności technologicznej i występuje na innych etapach budowy konstrukcji. Do połączeń: dwóch paneli między sobą oraz panelu sandwich z konwencjonalną płytą poszycia niezbędne są, zazwyczaj, elementy



Rys. 4. Rodzaje połączeń występujących w wielkogabarytowej konstrukcji stalowej (na przykładzie kadłuba statku) zawierającej panele sandwich [12]

Tabela 1. Ogólna charakterystyka połączeń występujących w wielkogabarytowej konstrukcji stalowej zawierającej panele sandwich [12]

Składowe charakterystyki	Typ połączenia		
ogólnej połączeń przedstawionych na rys. 4	panel sandwich z usztywnieniem ramowym	panel sandwich z panelem sandwich	panel sandwich z tradycyjną płytą poszycia
Fragmenty (rodzaje) łączonych konstrukcji	innowacyjny z konwencjonalnym	innowacyjny z innowacyjnym	innowacyjny z konwencjonalnym
Etap budowy kadłuba, w którym może wystąpić połączenie	prefabrykacja	prefabrykacja oraz montaż	prefabrykacja oraz montaż
Konieczność użycia łącznika (najczęściej o specyficznym kształcie)	nie	tak	tak
Poziom spodziewanych odkształceń spawalniczych*	mały	średni	duży

^{*} Poziom spodziewanych odkształceń spawalniczych założono na podstawie ilości oraz różnorodności geometrycznej elementów wchodzących w skład połączenia.

trzecie, tzw. łączniki. Dodatkowo trzeci rodzaj połączenia (rys. 4) wyróżnia się największą różnorodnością geometryczną elementów wchodzących w jego skład i dlatego odgrywa, w opinii autora, największą rolę w dalszej przydatności montażowej (poprzez przydatność montażową rozumie się zdolność konstrukcji, bądź jej fragmentu, do połączenia z inną konstrukcją, bądź jej fragmentem, najlepiej bez dodatkowych zabiegów korekcyjnych [12]). Elementy wchodzące w skład połączenia 3 (rys. 4) tworzą tzw. węzeł hybrydowy (zdefiniowany w [12] jako: szczególny fragment wielkogabarytowej konstrukcji stalowej, w którym łączą się dwie odmienne pod względem konstrukcyjno-technologicznym części tej konstrukcji).

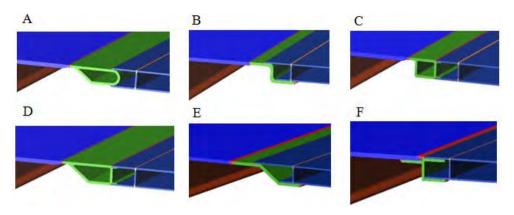
Ze względu na geometrię innowacyjnych elementów konstrukcyjnych – cienkościenna płyta dwuposzyciowa – łączenie ich jest bardziej problematyczne, niż elementów konwencjonalnych. Zależnie od różnych rozwiązań konstrukcyjnych mogących wystąpić w wielkogabarytowej konstrukcji, pojawić się może wiele odmiennych wariantów połączeń. Kluczową rolę odgrywa tutaj kształt elementu scalającego (łącznika), którego wybór jest zagadnieniem kompleksowym i trudnym. Potrzebuje bowiem spojrzenia na problem z wielu punktów widzenia (m.in. konstrukcyjno-wytrzymałościowego, technologicznego, ekonomicznego), tak aby maksymalnie zwiększyć obiektywność wyboru. Kształt łącznika w znacznej mierze decyduje m.in. o ilości i jakości postaci odkształceń spawalniczych, które pojawią się w połączeniach, zawierających panele sandwich. Dlatego próba kompleksowego spojrzenia wymaga sformułowania zbioru trafnych kryteriów oceny. Ponieważ przedstawienie zbioru kryteriów oraz metody wyboru mogłoby być przedmiotem co najmniej odrębnego artykułu, postanowiono ograniczyć się tylko do przedstawienia propozycji kilku kształtów łączników.

Dla połączenia panel sandwich – konwencjonalna płyta poszycia (tj. węzła hybrydowego) propozycję wybranych łączników zestawiono na rysunku 5. Łączniki te szczegółowo analizowano w rozprawie [12], a dla wariantu widocznego na rysunku 5. E opracowano metodę prognozowania odkształceń spawalniczych opartą na badaniach eksperymentalnych.

Połączenia panel-panel, w zależności od kształtu elementu scalającego, sklasyfikowano następująco:

- 1. Połączenia I-go typu wykonywane za pośrednictwem łącznika w formie jednego z rodzajów rdzenia panelu (np. rys. 6.B, C).
- 2. Połączenia II-go typu wykonywane za pośrednictwem łącznika w formie standardowych profili walcowanych.
- 3. Połączenia III-go typu wykonywane za pośrednictwem łącznika o specyficznym, niestandardowym kształcie (np. rys. 6.A).
- 4. Połączenia IV typu wykonywane za pośrednictwem łącznika stanowiącego jednocześnie zakończenie panelu, przybierającego, w przypadku paneli I-core, formę jednego z rodzajów rdzenia (np. rys. 6.C).

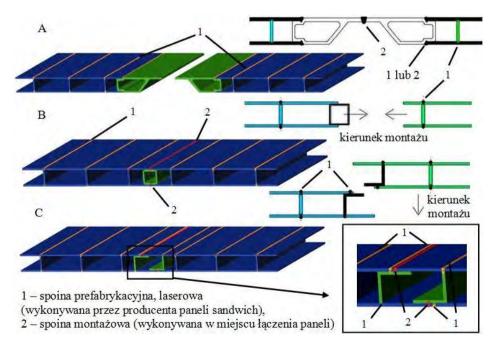
Znajdujące się na brzegach budowanych konstrukcji krawędzie paneli sandwich powinny być osłonięte. W przeciwnym wypadku stanowić będą potencjalne źródło



Rys. 5. Propozycje kształtów łączników w węźle hybrydowym (na podstawie [12])

powstawania korozji. Ponadto zakończenia paneli stanowią lokalne wzmocnienie konstrukcji oraz poprawiają estetykę wyrobu. Mogą również pełnić rolę łączników (rys. 6.C).

Bardzo istotnym zagadnieniem dotyczącym technologii wykonywania połączeń innowacyjnych elementów konstrukcyjnych jest zastosowanie właściwej metody łączenia.



Rys. 6. Łączniki proponowane przez Meyer Werft dla połączeń poprzecznych paneli I-core: A) o niestandardowym kształcie, B), C) w kształcie rdzenia panelu (na podst. [10])

Wśród metod, które mogą znaleźć zastosowanie w analizowanym zagadnieniu, wyróżniono trzy grupy [2]:

- 1. Mechaniczne za pomocą np.: skręcania (wkrętami, śrubami), nitowania.
- 2. Chemiczne za pomocą klejenia.
- 3. Termiczne za pomocą:
 - spawania (zarówno metodami konwencjonalnymi, jaki i innowacyjnymi),
 - zgrzewania (głownie metodami innowacyjnymi np.: przy pomocy zgrzewania tarciowego).

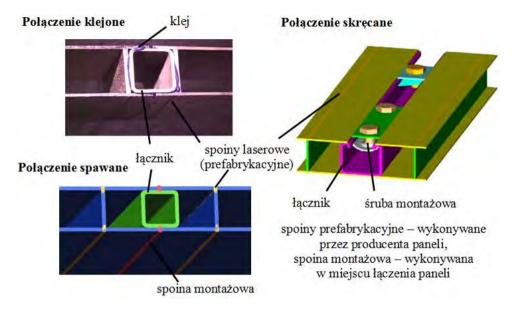
Zdecydowanie najbardziej atrakcyjną, w odniesieniu do wielkogabarytowych konstrukcji stalowych, jest grupa trzecia. Dotyczy to zwłaszcza konwencjonalnych odmian spawania łukowego, jako najlepiej opanowanych, a tym samym najpowszechniej stosowanych metod łączenia wspomnianych konstrukcji (nie wymagających dodatkowych nakładów finansowych, które trzeba by ponieść wdrażając np. którąś z innowacyjnych metod spawania).

Dwie pierwsze grupy należą do zdecydowanie mniej interesujących. Połączenia mechaniczne mają ograniczony zakres zastosowań (w odniesieniu do elementów konstrukcyjnych, nie biorąc pod uwagę detali wchodzących w skład wyposażenia) ze względu na gorszą szczelność połączeń i zdecydowanie większą pracochłonność prac w porównaniu np. ze spawaniem. Połączenia klejone posiadają również wady, które dyskwalifikują je na obecnym poziomie technologicznego stanu techniki, tzn.: brak odporności na działanie wysokiej temperatury np. w trakcie pożaru [7], konieczność przestrzegania ostrego reżimu przeprowadzania prac, z uwagi na możliwość dostania się zanieczyszczeń (brudu, kurzu) do połączenia, co uniemożliwia klejenie na otwartych przestrzeniach (np. na pochylni, czy w doku – mających istotne znaczenie dla gałęzi przemysłu typu offshore).

Prace prowadzone nad połączeniami klejonymi paneli sandwich, np. [1], dotyczą jedynie aspektów wytrzymałościowych samego połączenia, z pominięciem, na chwilę obecną, zagadnień technologicznych.

Przykłady połączeń paneli tylu I-core wykonanych wymienianymi wyżej metodami przestawiono na rysunku 7.

Istotą problemu łączenia, w aspekcie technologicznym, jest analiza odkształceń spawalniczych powstałych w miejscach styku łączonych ze sobą elementów oraz w obszarach do nich przyległych. Szczególnie istotna wydaje się być postać deformacyjna powstała na powierzchni innowacyjnych elementów konstrukcji z uwagi na ogromne trudności związane z ewentualnymi pracami naprawczymi – głównie prostowaniem – tych elementów (bardzo cienkie blachy paneli sandwich w stosunku do pozostałych elementów konstrukcji). Z naukowego oraz praktycznego punktu widzenia ważnym zagadnieniem, jest opracowanie metody prognozowania odkształceń spawalniczych, co pozwoli na dokładne określenie tzw. przydatności montażowej dla danego rodzaju połączenia. W konsekwencji umożliwi to sterowanie technologicznością wielkogabarytowej konstrukcji na etapie jej wytwarzania.



Rys. 7. Rodzaje połączeń (metod łączenia) innowacyjnych elementów konstrukcyjnych, na przykładzie paneli typu I-core (na podst.: [1, 8])

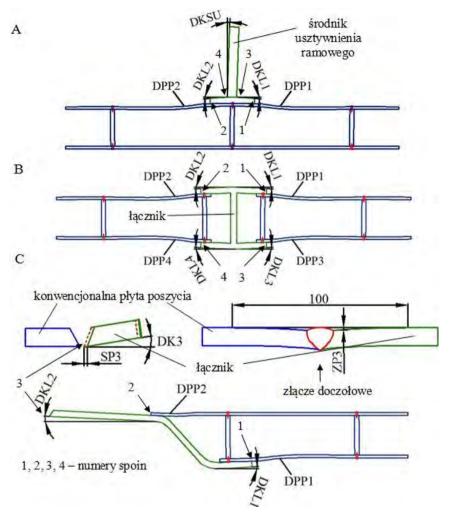
Wybrane postacie od kształceń spawalniczych występujących w połączeniach zawierających panele sandwich przedstawiono w tabeli 2 oraz zobrazowano na rysunku 8. Oprócz wymienionych postaci odkształceń w każdym rodzaju połączenia wystąpią (nie widoczne na rysunku 8):

- deformacje wzdłużne (strzałki ugięcia): poszycia panelu, łącznika, usztywnienia ramowego, przy spoinie czołowej;
- deformacje poprzeczne (strzałki ugięcia) całego połączenia.

Tabela 2. Wybrane postacie odkształceń spawalniczych występujących w połączeniach zawierających panele sandwich, przedstawione na rysunku 8 (na podst. [12])

L.p.	Postać odkształcenia spawalniczego (rys. 8)	Symbol postaci odkształcenia*	
1	Deformacja poprzeczna poszycia panelu (pofalowanie powierzchni)	DPP1, DPP2, DPP3, DPP4	
2	Deformacja kątowa łącznika	DKL1, DKL2, DKL3, DKL4	
3	Deformacja kątowa środnika usztywnienia ramowego	DKSU	
4	Skurcz poprzeczny przy spoinie czołowej	SP3	
5	Deformacja kątowa przy spoinie czołowej	DK3	
6	Załamanie poszycia przy spoinie czołowej	ZP3	

^{*} Numer przy symbolu odpowiada numerowi spoiny (rys. 8).



Rys. 8. Wybrane postacie odkształceń spawalniczych wyróżnionych w połączeniach panelu sandwich z: A) usztywnieniem ramowym, B) panelem sandwich C) płytą konwencjonalną (na podst. [12])

WNIOSKI

Zastosowanie innowacyjnych elementów konstrukcyjnych, zwanych powszechnie panelami sandwich, stwarza nowe możliwości w budowie wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. Zmniejszenie ilości prac montażowych i naprawczych nowo budowanych konstrukcji zawierających nowoczesne struktury, może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne i stanowi atrakcyjną alternatywę dla konwencjonalnych metod budowy.

Jednak pojawienie się nowych elementów niesie ze sobą szereg problemów, zwłaszcza natury technologicznej. Za najbardziej istotny z nich, tj. warunkujący możliwości aplikacyjne innowacyjnych paneli w danej konstrukcji, uznano problem łączenia, którego istotą jest opanowanie odkształceń spawalniczych.

Dlatego dla pełnego wykorzystania paneli sandwich w procesie wytwarzania złożonych konstrukcji konieczne jest prowadzenie prac badawczo-wdrożeniowych.

Przytaczane w artykule badania eksperymentalne realizowano w ramach projektu promotorskiego na Wydziale Techniki Morskiej Zachodniopomorskiego Uniwersytety Technologicznego w Szczecinie w latach 2007–2009. Wyniki tych badań będą przedmiotem kolejnych publikacjach w czasopismach krajowych i zagranicznych.

LITERATURA

- Brede M.: Design and Testing of Adhesive Joints in Ship-Building Examples from the BONDSHIP Mock-up. Public conference, Papenburg, Germany, 24 October 2003 (http://sandwich.balport.com).
- Iwańkowicz R., Rutkowski R., Graczyk T.: Review of Joining Methods of Sandwich Panels in Ship Construction. Marine Technology V, proc. of the Fifth International Conference on Marine Technology ODRA'03, Szczecin 28-30 May 2003, WITPress – Southampton & Boston 2003.
- 3. Joyce P.J.: Sandwich Structures (http://web.ew.usna.edu).
- 4. Lloyd's Register Maritime Bulletin Special Report, September 2000.
- Project Guidelines for Metal-Composite Laser-Welded Sandwich Panels (Public Version), Technical Report, Det Nosrke Veritas (Document of SANDWICH Project).
- Provisional Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure, Lloyd's Register, London 2006.
- Pyszko R.: Zastosowanie stalowych paneli typu sandwicz w konstrukcjach okrętowych i oceanotechnicznych. Rozprawa doktorska, Katedra Technologii Okrętu, Systemów Jakości i Materiałoznawstwa, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
- 8. Reinert T.: Laser Welding and I-core Panels. Sandwich-Presentation (http://sandwich.bal-port.com).
- Roland F., Metschkow B.: Laser welded sandwich panels for shipbuilding and structural steel engineering. Second International Conference On Maritime Technology ODRA 1997.
- Roland F., Reinert T.: Laser Welded Sandwich Panels for the Shipbuilding Industry. USER GROUP Inauguration, Advanced composite sandwich steel structure, Bremen 19.09.2000 (http://sandwich.balport.com).
- 11. Said P., Elbridge Z. Stowell: Elastic and plastic buckling of simply supported solid-core sandwich panels in compression (http://naca.larc.nasa.gov).
- 12. Urbański T.: Metoda prognozowania odkształceń spawalniczych węzła hybrydowego na podstawie badań eksperymentalnych. Rozprawa doktorska, Zakład Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów, Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2009.

- Urbański T., Graczyk T.: Application of innovative materials in waterborne transport means – identification of technological problems. International Conference on Innovative Materials and Technologies for Surface Transport (INMAT 2005), Gdańsk, Poland, 7-8 November, 2005.
- 14. http://www.hexcelcomposites.com.
- 15. http://www.ie-sps.com.
- 16. http://www.meyerwerft.de.
- 17. http://www.tricelcorp.com.

SANDWICH PANELS IN LARGE-SIZE STEEL STRUCTURES – CHARACTERISTIC OF JOINING PROBLEM

Abstract

The underlying article presents fundamental types of innovative structural elements, called sandwich panels. It reveals possibilities of using panels in large-size steel sections. The hybrid construction, which emerges as a result of joining conventional structure with innovative, creates the necessity of solving several problems, especially of technological nature. The most important problems in this field are joining panel to panel and panel with conventional construction. The article performed a characteristic of joining problem in technological point of view.

Keywords: innovative constructional element, sandwich panel, hybrid node, welding distortions

Michał Charlak¹⁾, Marek A. Jakubowski²⁾

ANALIZA KONCEPCJI ZBIORÓW PRZYBLIŻONYCH

Streszczenie. Artykuł zawiera analizę opisu podstaw matematycznych teorii zbiorów rozmytych opracowanych przez Z. Pawlaka. Praca zawiera znany w literaturze dowód Z. Pawlaka, stwierdzający, że idea zbiorów przybliżonych nie może być zredukowana do idei zbiorów rozmytych poprzez wprowadzenie przybliżonej funkcji przynależności. Istnieją więc zagadnienia, które są możliwe do rozwiązanie z zastosowaniem zbiorów przybliżonych a nie znajdują rozwiązania w zbiorach rozmytych. Na podstawie analizy i interpretacji przykładów określone zostały przyczyny trudności z zastosowaniem teorii zbiorów przybliżonych.

WSTĘP

Koncepcja zbiorów przybliżonych została przedstawiona przez Zdzisława Pawlaka w 1982 roku, a niektóre właściwości i zastosowania tej koncepcji były analizowane w wielu późniejszych pracach (np. Orłowska i Pawlak 1984; Materska M. 1994; Pedrycz W. 1998 i innych). Teoria zbiorów przybliżonych przedstawiona przez Z. Pawlaka nie jest jednak znana i rozpowszechniona w zastosowaniach praktycznych tak jak teoria zbiorów rozmytych. Przyczyną tego stanu mogą być liczne nieścisłości w interpretacji koncepcji zbiorów przybliżonych. Dokładna analiza wczesnych koncepcji teorii Z. Pawlaka skłania nas do postawienia tezy, że niektóre sformułowania i nieścisłości zapisu matematycznego mogą być przyczyną błędnej interpretacji teorii i problemów w zastosowaniach praktycznych.

W artykule zostanie przedstawiona analiza i własna interpretacja koncepcji zbiorów przybliżonych i logiki rozmytej Z. Pawlaka. Zostaną przedstawione różnice między tymi teoriami oraz analiza przykładów zastosowania.

ZBIORY PRZYBLIŻONE

W tej części przedstawiono autorską interpretację koncepcji teorii zbiorów przybliżonych przedstawionej przez prof. Z. Pawlaka w 1984 r. w publikacji "Rough sets and fuzzy sets" [7] z korektą nieścisłości zapisu matematycznego.

¹⁾ Michał Charlak – Katedra Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

²⁾ Marek A. Jakubowski – Katedra Metod i Technik Nauczania, Politechnika Lubelska.

Niech U będzie zbiorem zwanym uniwersum oraz niech R będzie równoważną zależnością U, zwaną nierozróżnialną relacją (indiscernibility relation). Odpowiedniki klas relacji R zwane są elementarnymi zbiorami w A (pusty zbiór jest także elementarnym). Każda alternatywa zbiorów elementarnych jest zbiorem złożonym w A. Rodzina wszystkich zbiorów złożonych jest oznaczona jako $\operatorname{Com}(A)$. Para A = (U, R) nazywana jest przestrzenią aproksymacji.

Niech $X \subseteq U$ będzie podzbiorem U. Definiujemy dolne i górne przybliżenie $X \le A$, zapisując $\underline{A}(X)$ i $\overline{A}(X)$ jak poniżej:

$$\underline{\underline{A}}(X) = \{ x \in U : [x]_{\mathbb{R}} \subset X \}$$
$$\overline{\underline{A}}(X) = \{ x \in U : [x]_{\mathbb{R}} \cap X \neq 0 \}$$

gdzie $[x]_R$ oznacza równowartość klas relacji R zawierającej element x.

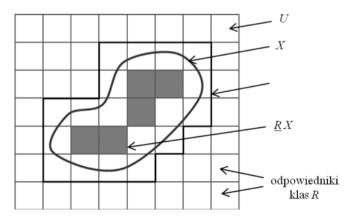
$$Fr_A(X) = \overline{A}(X) - \underline{A}(X)$$
 oznacza granicę $X \le A$.

W ten sposób możemy określić dwie funkcje przynależności $-\mathbf{I}_A$, \mathbf{I}_A zwane silną i słabą przynależnością:

$$x - \mathbf{1}_A X$$
 jeżeli $x \in \underline{A}(X)$, $x - \mathbf{1}_A X$ jeżeli $x \in \overline{A}(X)$.

Jeśli $x - \mathbf{C}_A X$ możemy powiedzieć, że "x pewnie należy do X w A" oraz jeśli x $\mathbf{C}_A X$ znaczy, że "x prawdopodobnie należy do X w A".

 $\underline{A}(X)$ jest maksymalnym A-rozróżnialnym zbiorem zawartym w X oraz $\overline{A}(X)$ jest minimalnym A-rozróżnialnym zbiorem zawierającym X. Inaczej mówiąc, $\underline{\underline{A}}(X)$ jest podzbiorem wszystkich zbiorów z tą samą silną przynależnością, natomiast $\overline{A}(X)$ jest sumą wszystkich zbiorów z taką samą słabą przynależnością (rys. 1).



Rys. 1. Ilustracja zbioru przybliżonego [5]

Można łatwo sprawdzić, że przestrzeń aproksymacji A=(U,R) determinuje niepowtarzalną przestrzeń topologiczną $T_A=(U\operatorname{Com}(A))$ a $\operatorname{Com}(A)$ jest rodziną wszystkich otwartych zbiorów w T_A . Rodzina wszystkich elementarnych zbiorów w T_A jest podstawą dla T_A . Z definicji dolnej i górnej aproksymacji w A wynika, że $\operatorname{Com}(A)$ jest równocześnie zbiorem wszystkich otwartych i domkniętych zbiorów w T_A oraz $\underline{A}(X)$ i $\overline{A}(X)$ są wnętrzem i domknięciem zbioru X w przestrzeni topologicznej T_A . $\underline{A}(X)$ i $\overline{A}(X)$ mają następujące właściwości:

1)
$$A(X) \subseteq X \subseteq \overline{A}(X)$$

2)
$$A(U) = \overline{A}(U) = U$$
 by $A(U) = A(U) = U$

3)
$$A(0) = \overline{A}(0) = 0$$
 było $A(0) = A(0) = 0$

4)
$$\overline{A}(X \cup Y) = \overline{A}(X) \cup \overline{A}(Y)$$
 by $\overline{A}(X \cup Y) = \overline{A}(X) \cup A(Y)$

5)
$$\underline{A}(X \cup Y) \supseteq \underline{A}(X) \cup \underline{A}(Y)$$
 było $\underline{A}(X \cup Y) \supseteq A(X) \cup A(Y)$

6)
$$\overline{A}(X \cap Y) \subseteq \overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y)$$
 było $\overline{A}(X \cap Y) \subseteq A X \cap A Y$

7)
$$\underline{A}(X \cap Y) = \underline{A}(X) \cap \underline{A}(Y)$$

8)
$$\overline{A}(-X) = -\underline{A}(X)$$

9)
$$\underline{A}(-X) = -\overline{A}(X)$$

10)
$$\underline{A} \underline{A} X = \overline{A} \underline{A} X = \underline{A} X$$
 było $\underline{A} \underline{A} X = \overline{A} \underline{A} X = \underline{A} X$

11)
$$\overline{A} \overline{A} X = \underline{A} \overline{A} X = \overline{A} X$$

Klasyfikacja zbiorów przybliżonych

Niech A=(U,R), R będzie nierozróżnialną relacją w A i $X\subseteq U$ będzie R-nierozróżnialne (zbiór przybliżony w przestrzeni aproksymacji A). Można następująco sklasyfikować zbiory przybliżone:

- zbiór X jest przybliżenie R-rozróżnialny w A, jeżeli $\underline{R} X \neq 0$ i $\overline{R} X \neq U$;
- zbiór X jest zewnętrznie R-nierozróżnialny w A, jeżeli $\underline{R}X \neq 0$ i $\overline{R}X = U$;
- zbiór X jest wewnętrznie R-nierozróżnialny w A, jeżeli $\underline{R}X = 0$ i $\overline{R}X \neq U$;
- zbiór X jest całkowicie R-nierozróżnialny w A, jeżeli $\underline{R} X = 0$ i $\overline{R} X = U$;

Powyższa klasyfikacja opisuje w jaki sposób zbiór obiektów *X* może zostać rozróżniony w znaczeniu nierozróżnialnej relacji *R*.

Dokładność, zależność i wpływ

Jeśli X jest dowolnym zbiorem obiektów danej przestrzeni aproksymacji A = (U, R), $X \subseteq U$, to największy dokładny podzbiór R nazywa się wnętrzem X i oznaczany jest

symbolem \underline{R} . Zbiór X jest dokładny wtedy i tylko wtedy, gdy jest równy swemu wnętrzu. Wnętrze danego zbioru można traktować jako przybliżony opis: stosunek liczebności wnętrza do liczebności całego zbioru nazywany jest dokładnością tego przybliżenia i oznaczany symbolem $\gamma(X)$:

$$\gamma(X) = \frac{\operatorname{card}(\underline{R}X)}{\operatorname{card}(X)}$$

Liczbę $\alpha_R(X)$ nazywamy R-dokładnością (lub dokładnością w zależności od R) zbioru X w A:

$$\alpha_R(X) = \frac{\operatorname{card} \underbrace{RX}}{\operatorname{card} RX}$$

Szorstkością (bądź chropowatością) zbioru X w A nazywamy dopełnienie *R*-dokładności do 1:

$$\rho_R(X) = 1 - \alpha_R(X)$$

Oczywiście $0 \le \alpha_R(X)$, $\rho_R(X) \le 1$.

Zbiór X jest wyraźnie R-rozróżnialny jeżeli $\underline{R}X = \overline{R}X$, w innym przypadku np. jeżeli $RX \neq \overline{R}X$, to zbiór X jest R-nierozróżnialny, bądź przybliżony w zależności od R.

Należy zwrócić uwagę, że $\gamma(X)=1$ wtedy i tylko wtedy, gdy X jest zbiorem dokładnym. Jeśli $C=(R_1,R_2,R_3,...,R_n)$ jest kategoryzacją uniwersum na zbiory niepuste i rozłączne R, to liczba

$$\gamma(C) = \frac{\sum \operatorname{card}(\underline{R}_i X)}{\operatorname{card}(X)}$$

jest dokładnością (lub stopniem dokładności) tej klasyfikacji w przestrzeni aproksymacji (U, R). Podobnie jak poprzednio, klasyfikacja C jest dokładna (tzn. wszystkie klasy R są zbiorami dokładnymi), wtedy i tylko wtedy, gdy $\gamma(C) = 1$.

Pojęcie dokładności kategoryzacji jest oczywiście zrelatywizowane do rozważanego przestrzeni aproksymacji. Obserwacja ta umożliwia wprowadzenie pojęcia zależności między zbiorami atrybutów.

Niech A = (U, R) będzie przestrzenią aproksymacji, a P i Q nierozróżnialną relacją w przestrzeni aproksymacji. Liczba:

$$\gamma_P(Q^\bullet) = \frac{\operatorname{card} \, \mathbf{Int}_P(Q^*)}{\operatorname{card} \, U}, \, \, \mathrm{gdzie} \, \, \operatorname{Int}_P(Q^\bullet) = \bigcup_{X \in Q^\bullet} \underline{P} \, X$$

będzie nazywana dokładnością klasyfikacji Q^* w odniesieniu do P (P-dokładność klasyfikacji Q^*). Oczywiście $0 \le \gamma_P$ (Q^*) ≤ 1 dla każdego P i Q. Mówimy, że Q zależy w stopniu k od P w przestrzeni aproksymacji A:

$$P \stackrel{k}{\rightarrow} Q$$
, jeżeli $k = \gamma_P(Q^*)$

Jeśli $P \xrightarrow{\mathbf{1}} Q$, to Q całkowicie zależy od P (lub po prostu "zależy"), można to też zapisać $P \rightarrow Q$.

Jeśli 0 < k < 1 oraz $P \to Q$, to Q częściowo zależy od P.

Jeśli $P \rightarrow Q$, to Q jest całkowicie niezależne od P.

Niech A i B będą dwoma zbiorami atrybutów określonych na tym samym uniwersum U, a C(A) i C(B) – odpowiednimi kategoryzacjami. Wtedy dokładność klasyfikacji C(B) w przestrzeni aproksymacji (U, R) nazywa się zależnością (albo stopniem zależności) zbioru atrybutów B od zbioru atrybutów A i oznacza symbolem $\gamma(A \rightarrow B)$.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że tak zdefiniowana zależność jest niesymetryczna: może się zdarzyć, że B będzie zależało w niskim stopniu od A, ale A będzie w pełni (tj. w stopniu 1) zależało od B. Warto też podkreślić, że $\gamma(A \rightarrow B) = \gamma(B \rightarrow A) = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy C(A) = C(B) – tzn. wtedy, gdy oba zbiory atrybutów określają tę samą kategoryzację obiektów.

Ze względów interpretacyjnych, omówionych poniżej, liczbę $\gamma(B \rightarrow A)$ nazwano wpływem (lub stopniem wpływu) A na B i oznaczono symbolem $w(A \rightarrow B)$:

$$w(A \rightarrow B) \not\equiv \gamma(B \rightarrow A)$$

Wskaźniki zależności i wpływu definiuje się wyłącznie za pomocą kategoryzacji [6]. Dla wartości tych wskaźników nie jest istotne, jakie są atrybuty należące do zbiorów A i B, a jedynie to, jakie są kategoryzacje odpowiadające tym zbiorom. Wynika stąd, że dla dowolnych kategoryzacji C i D tego samego uniwersum U można w analogiczny sposób zdefiniować zależność $\gamma(D \rightarrow C)$ i wpływ $w(C \rightarrow D)$.

Analiza przykładu

Poniżej przedstawiamy własną interpretację przykładu pochodzącego z artykułu Z. Pawlaka [5] zawierającego niekonsekwencje zapisu matematycznego.

Niech $U = \{x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$ oraz niech R będzie nierozróżnialną relacją z następującymi ekwiwalentnymi klasami:

$$\begin{split} E_I &= \{x_0, \ x_I\}, \, E_2 = \{x_2, \ x_6, \ x_9\}, \, E_3 = \{x_3, \ x_5\}, \, E_4 = \{x_4, \ x_8\}, \, E_5 = \{x_7, \ x_{10}\}. \end{split}$$
 Zbiory:
$$X_I &= \{x_0, \ x_I, \ x_4, \ x_8\}, \end{split}$$

$$Y_{1} = \{x_{3}, x_{5}, x_{7}, x_{8}\},\$$

$$Z_{1} = \{x_{2}, x_{3}, x_{5}, x_{6}, x_{9}\}$$

są przykładami *R*-rozróżnialnych zbiorów.

Zbiory:

$$\begin{split} X_2 &= \{x_0, \, x_3, \, x_4, \, x_5, \, x_8, \, x_{10}\}, \\ Y_2 &= \{x_1, \, x_7, \, x_8, \, x_{10}\}, \\ Z_2 &= \{x_2, \, x_3, \, x_4, \, x_8\} \end{split}$$

są przykładami przybliżonych *R*-rozróżnialnych zbiorów. Analogiczne przybliżenia granic i dokładności wynoszą:

$$\underline{R} \ X_2 = E_3 \cup E_4 = \{x_3, x_4, x_5, x_8\},
\overline{R} X_2 = E_1 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_0, x_1, x_3, x_4, x_5, x_7, x_8, x_{10}\},
B \ n_R (X_2) = E_1 = \{x_0, x_1\},
\alpha_R (X_2) = 4/8 = 1/2
\underline{R} \ Y_2 = E_5 = \{x_7, x_{10}\},
\overline{R} \ Y_2 = E_1 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_0, x_1, x_4, x_7, x_8, x_{10}\},
B \ n_R (Y_2) = E_4 \cup E_5 = \{x_4, x_7, x_8, x_{10}\},
\alpha_R (Y_2) = 2/6 = 1/3,
\underline{R} \ Z_2 = E_4 = \{x_4, x_8\},
\overline{R} \ Z_2 = E_2 \cup E_3 \cup E_4 = \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9\},
B \ n_R (Z_2) = E_2 \cup E_3 = \{x_2, x_3, x_5, x_6, x_9\},
\alpha_R (Z_2) = 2/7.$$

$$X_3 = \{x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_7\},$$

Zbiory:

 $Z_3 = \{x_0, x_2, x_3, x_4, x_8, x_{10}\}$ są przykładami zewnętrznie *R*-nierozróżnialnych zbiorów. Odpowiednie przybliżenia granic i dokładności są równe:

 $Y_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{10}\},\$

$$\begin{split} \underline{R}\,X_3 &= E_1 = \{x_0,\,x_1\},\\ \overline{R}\,X_3 &= U,\\ B\,n_R(X_3) &= E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_2,\,x_3,\,x_4,\,x_5,\,x_6,\,x_7,\,x_8,\,x_9,\,x_{10}\},\\ \alpha_R(X_3) &= 2/10 = 1/5\\ \underline{R}\,Y_3 &= E_2 = \{x_2,\,x_6,\,x_9\},\\ \overline{R}\,Y_3 &= U,\\ B\,n_R(Y_3) &= E_1 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_0,\,x_1,\,x_3,\,x_4,\,x_5,\,x_7,\,x_8,\,x_{10}\},\\ \alpha_R(Y_3) &= 3/10,\\ \underline{R}\,Z_3 &= E_4 = \{x_4,\,x_8\},\\ \overline{R}\,Z_3 &= U,\\ B\,n_R(Z_3) &= E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_5 = \{x_0,\,x_1,\,x_2,\,x_3,\,x_5,\,x_6,\,x_7,\,x_9,\,x_{10}\},\\ \alpha_R(Z_3) &= 2/10 = 1/5. \end{split}$$

Zbiory:

$$X_4 = \{x_0, x_2, x_3\},\$$

$$Y_4 = \{x_1, x_2, x_4, x_7\},\$$

$$Z_4 = \{x_2, x_3, x_4\}$$

są przykładami wewnętrznie R-nierozróżnialnych zbiorów.

Poniżej przedstawiono górne aproksymacje tych zbiorów:

$$\overline{R} \ X_4 = E_1 \cup E_2 \cup E_3 = \{x_0, x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_9\},$$

$$\overline{R} \ Y_4 = E_1 \cup E_2 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_0, x_1, x_2, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\},$$

$$\overline{R} \ Z_4 = E_2 \cup E_3 \cup E_4 = \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9\},$$

Oczywiście dolne przybliżenie tych zbiorów jest zbiorem pustym i dokładność jest równa zero. Poniżej przedstawiono przykłady zbiorów całkowicie *R*-nierozróżnialnych:

$$X_5 = \{x_0, x_2, x_3, x_4, x_7\},\$$

$$Y_5 = \{x_1, x_5, x_6, x_8, x_{10}\},\$$

$$Z_5 = \{x_0, x_2, x_5, x_8\}$$

Wnioski z analizy przykładu

Z braku miejsca nie przytaczamy w całości oryginału tylko przykładowe rozbieżności.

W oryginale jest: $\overline{R}X_2 = E_1 \cup E_3$ Č $E_4 = \{x_0, x_1, x_3, x_4, x_5, x_7, x_8, x_{10}\}$, natomiast w wyniku naszej analizy otrzymujemy $\overline{R}X_2 = E_1 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_0, x_1, x_3, x_4, x_5, x_7, x_8, x_{10}\}$.

W oryginale jest: $B n_R(Y_2) = E_1 \cup E_4 = \{x_{4}, x_{7}, x_{8}, x_{10}\}$, natomiast w wyniku naszej analizy otrzymujemy $B n_R(Y_2) = E_4 \cup E_5 = \{x_{4}, x_{7}, x_{8}, x_{10}\}$.

W oryginale jest: $\overline{R} Y_4 = E_1 \cup E_2 \cup E_4 \cup E_7 = \{x_0, x_1, x_2, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$, natomiast w wyniku naszej analizy otrzymujemy $\overline{R} Y_4 = E_1 \cup E_2 \cup E_4 \cup E_5 = \{x_0, x_1, x_2, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$.

ZBIORY ROZMYTE

W tej części przedstawiono definicję zbiorów rozmytych wprowadzoną przez Zadeha w 1965 r. [3] na podstawie artykułu Z. Pawlaka [7]. W związku z rozbieżnościami opisu matematycznego teorii zbiorów rozmytych występujących w dostępnej literaturze autorzy przedstawiają poniżej własną interpretację pozbawioną nieścisłości matematycznych.

Niech U będzie zbiorem zwanym uniwersum. Zbiór rozmyty X w U jest funkcją przynależności $\mu_X(x)$, której każdy element $x \in U$ należy do liczb całkowitych z przedziału <0, 1> i $\mu_X(x)$ określa stopień przynależności x do zbioru X.

Alternatywa i koniunkcja zbiorów rozmytych X i Y są zdefiniowane następująco:

$$\mu_{X \cup Y}(x) = \text{Max} (\mu_X(x), \mu_Y(x))$$

$$\mu_{X \cap Y}(x) = \operatorname{Min} (\mu_X(x), \, \mu_Y(x))$$

dla każdego $x \in U$.

Dopełnienie – X zbioru rozmytego X jest zdefiniowane funkcją przynależności

$$\mu - \chi(x) = 1 - \mu_{\chi}(x)$$
 dla każdego $x \in U$.

PRZYBLIŻONA FUNKCJA PRZYNALEŻNOŚCI

Powstaje pytanie – kiedy możemy zamienić koncepcję aproksymacji przez funkcję przynależności podobną do tej zaproponowanej przez Zadeha? [3].

Niech $X \subseteq U$. Funkcję przynależności definiujemy następująco:

$$\mu_{X}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli} \quad x \in \underline{A} \ (X) \\ 1/2 & \text{jeżeli} \quad x \in Fr_{\underline{A}}(X) \\ 0 & \text{jeżeli} \quad x \in -\overline{A} \ (X) \end{cases}$$

gdzie -X oznacza U-X.

Do tak określonej funkcji przynależności nie można zastosować alternatywy i koniunkcji zbiorów przedstawionej uprzednio, ponieważ:

$$m_{X \cup Y}(x) \neq \text{Max} (\mu_Y(x), \mu_Y(x))$$
 (a)

$$m_{Y \cap Y}(x) \neq Min(\mu_Y(x), \mu_Y(x))$$
 (b)

Ad. a)
$$\mu_{X \cup Y}(x) = 1 \equiv \text{Max } (\mu_X(x), \mu_Y(x)) = 1 \equiv \mu_X(x) = 1 \text{ lub } \mu_Y(x) = 1 \equiv (1)$$

$$\equiv x \in \underline{A}(X) \text{ lub } x \in \underline{A}(Y) \equiv x \in \underline{A}(X) \cup \underline{A}(Y)$$

Z definicji funkcji przynależności dla alternatywy zbiorów otrzymujemy:

$$\mathsf{m}_{X \cup Y}(x) = 1 \equiv x \in \underline{A} \ (X \cup Y) \tag{2}$$

Z właściwości wewnętrznej operacji otrzymujemy

$$\underline{A}(X \cup Y) \supseteq \underline{A}(X) \cup \underline{A}(Y) \tag{3}$$

W ten sposób $x \in W = \underline{A}(X \cup Y) - (\underline{A}(X) \cup \underline{A}(Y)), \mu_{X \cup Y}(x) \neq 1$ z uwzględnieniem (1) i $\mu_{X \cup Y}(x) = 1$ zgodnie z (2) (sprzeczność).

Ad. b)
$$\mu_{X \cap Y}(x) = 0 \equiv \text{Min } (\mu_X(x), \mu_Y(x)) = 0 \equiv \mu_X(x) = 0 \text{ lub } \mu_Y(x) = 0 \equiv (4)$$

 $\equiv x \in -\overline{A}(X) \text{ lub } x \in -\overline{A}(Y) \equiv x \in -\overline{A}(X) \cup -\overline{A}(Y) \equiv x \in -(\overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y))$

Z definicji funkcji przynależności koniunkcji zbiorów mamy:

$$\mathsf{m}_{Y \cap Y}(x) = 0 \equiv x \in -\overline{A}(X \cap Y) \tag{5}$$

Z własności domknięcia działania mamy:

$$\overline{A}(X \cap Y) \subseteq \overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y) \tag{6}$$

i w rezultacie otrzymujemy:

$$-(\overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y)) \subseteq -\overline{A}(X \cap Y) \tag{7}$$

W ten sposób $x \in W = -\overline{A}(X \cap Y) - (-(\overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y))); \mu_{X \cap Y}(x) \neq 0$ zgodnie z (4) i m $X \cap Y(x) = 0$ zgodnie z (5) (sprzeczność).

Oznacza to, że funkcja przynależności przedstawiona w tym punkcie nie może być rozciągnięta na alternatywę i koniunkcję zbiorów.

UZUPEŁNIENIE ZBIORÓW

Funkcja przynależności dla uzupełnienia zbiorów jest taka sama dla zbiorów rozmytych i przybliżonych:

a)
$$\mu_{-Y}(x) = 1 \equiv x \in \underline{A}(-X) \equiv x \in -\overline{A}(X) \equiv \mu_{Y}(x) = 0 \equiv 1 - \mu_{Y}(x) = 1$$

b)
$$\mu_{-X}(x) = 0 \equiv x \in -\overline{A}(-X) \equiv x \in \underline{A}(X) \equiv \mu_{X}(x) = 1 \equiv 1 - \mu_{X}(x) = 0$$

c)
$$\mu_{-X}(x) = 1/2 = x \in \overline{A}(-X) - \underline{A}(-X) \equiv x \in \overline{A}(-X) \cap (-\underline{A}(-X)) \equiv x \in \overline{A}(-X) \cap \overline{A}(X) \equiv x \in \overline{A}(X) \cap (-\underline{A}(X)) \equiv x \in \overline{A}(X) - \underline{A}(X) \equiv x \in \overline{A}(X) = 1/2 = 1 - \mu_{X}(x) = 1/2$$

PODUMOWANIE I WNIOSKI

Teoria zbiorów przybliżonych nie może zostać zredukowana do teorii zbiorów rozmytych przez wprowadzenie funkcji przynależności wyrażającej stopień przynależności. Udowodnienie tej tezy wymaga jednak konsekwentnego stosowania jednolitej notacji matematycznej. Autorzy artykułu napotkali liczne przykłady nieścisłości występujących w literaturze tematu, szczególnie we wczesnej fazie rozwoju koncepcji zbiorów przybliżonych. Oprócz tego teoria zbiorów przybliżonych jest szersza niż koncepcja logiki rozmytej. Można ją zredukować do zbiorów rozmytych, jeśli zamiast:

$$\underline{A}(X \cup Y) \supseteq \underline{A}(X) \cup \underline{A}(Y) \text{ i } \overline{A}(X \cap Y) \subseteq \overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y)$$
obowiązuje
$$\underline{A}(X \cup Y) = \underline{A}(X) \cup \underline{A}(Y) \text{ i } \overline{A}(X \cap Y) = \overline{A}(X) \cap \overline{A}(Y),$$

co oczywiście w ogólnym przepadku nie jest prawdą.

Faktem jest, że teoria zbiorów przybliżonych prof. Z Pawlaka nie jest tak znana i rozpowszechniona jak pokrewna teoria zbiorów rozmytych. Analiza autorów przeprowadzona z myślą odnalezienia przyczyn tego stanu skłania do wniosku, że we wcześniejszych pracach, a nawet aktualnej literaturze, występuje:

- 1. rozbieżność w nazewnictwie, np. prof. M. Materska nazywa zbiory przybliżone zbiorami zgrzebnymi;
- 2. rozbieżność oznaczania,

np.
$$\gamma_P(Q^*) - \frac{\operatorname{card} \operatorname{Int}_P(Q^*)}{\operatorname{card} U}$$
 lub $\gamma(Y) = \frac{\operatorname{card} (Y)}{\operatorname{card} (Y)}$ lub $\alpha_R(X) = \frac{\operatorname{card} \underline{R}X}{\operatorname{card} \overline{R}X}$;

3. rozbieżność pojęć, np. $A = (U, R), X \subseteq U$ lub A = (U, Ind) lub $(X, A), Y \subseteq X$, gdzie X = U.

Wymienione nieścisłości powodują duże trudności z zastosowaniem i rozpowszechnianiu wspomnianych teorii w informatyce oraz komputerowym wspomaganiu w technice i nauczaniu. Można sformułować hipotezę badawczą, że te trudności stanowią zasadniczą przeszkodę także w innych obszarach zastosowań.

LITERATURA

- Pawlak Z. 1982. Rough sets. International Journal of Information and Computer Sciences, 11(5): 341—356.
- 2. Orłowska E., Pawlak Z. 1984. Expressive Power of Knowledge Representation. International Journal of Man-Machine Studies.
- 3. Zadeh L.A. 1965. Fuzzy sets. Information and Control, 8: 338–353.
- 4. Pedrycz W. 1998. Computational intelligence, An introduction. CRC Press, New York.
- 5. Pawlak Z. 1988. Zbiory przybliżone i systemy informacyjne. Podstawy Sterowania, tom 18, zeszyt 3-4, PWN, Warszawa-Wrocław: 175–201.
- Materska M. 1994: Z badań nad ocenianiem profesjonalnym czyli jak mierzona jest niewymierna wartość szkolnych wypracowań? Wydawnictwo Instytutu Psychologii PAN, Warszawa.
- 7. Pawlak Z. 1984. Rough sets and fuzzy sets. Prace IPI PAN, ss.540, Warszawa.

ANALYSIS OF ROUGH SETS CONCEPTS

Summary

We describe our interpretation of rough sets mathematical foundations theory on basis Z. Pawlak works. We cite famous Z. Pawlak outcome, that the idea of rough set cannot be reduced to the idea of fuzzy set by introducing membership function expressing the grade of membership. There are some problems which could be solved only in rough sets but not in fuzzy sets. Finally we describe the problem with application rough sets theory based on Z. Pawlak works.

Oleg Draczew¹, Antoni Świć², Wiktor Taranenko², Georgij Taranenko³

PODSTAWY TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE MODELOWANIA OPERACJI OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe założenia, umożliwiające modelowanie operacji obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności. Pokazano schematy realizacji metod obróbki cieplno-mechanicznej, wyniki badań odkształceń i naprężeń przy obciążeniu osiowym, charakterystyki temperatury nagrzewania i chłodzenia, odkształceń i naprężeń. Przedstawiono przykład urządzenia do sterowania procesem odkształceń plastycznych wału o małej sztywności.

Słowa kluczowe: modelowanie, wały o małej sztywności, obróbka cieplno-mechaniczna

WSTĘP

Przy produkcji samolotów, samochodów, ciągników, wyrobów elektrotechnicznych i innych, często są stosowane części o okrągłym przekroju poprzecznym – elementy cylindryczne (gładkie, stopniowane, krzywkowe i mimośrodowe) [1, 2].

Proces wykonania długich części osiowosymetrycznych, powinien zawierać operacje podstawowe, określające niezmienność kształtu części w procesie ich eksploatacji: prostowanie na zimno, obróbkę cieplno-mechaniczną, obróbkę mechaniczną i obróbkę wibracyjną. W artykule jest rozpatrywana operacja obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności.

Paczenie się części o małej sztywności jest uzależnione od naprężeń szczątkowych, powstających w wyniku odkształceń plastycznych przy obciążeniu półfabrykatu. W trakcie walcowaniu półfabrykatów długich można wyodrębnić dwie przyczyny powstawania naprężeń szczątkowych: nierównomierność odkształceń plastycznych metalu przy jego zgniocie i niejednorodność pola temperaturowego podczas chłodzenia [6].

Poziom naprężeń szczątkowych w częściach o małej sztywności, w zależności od ich właściwości fizyko-mechanicznych, można obniżyć w wyniku zastosowania: odkształcenia plastycznego, wyżarzania lub odpuszczania [4, 5]. Jednym ze sposobów

¹⁾ Państwowy Uniwersytet Techniczny w Togliatti, Rosja.

²⁾ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska.

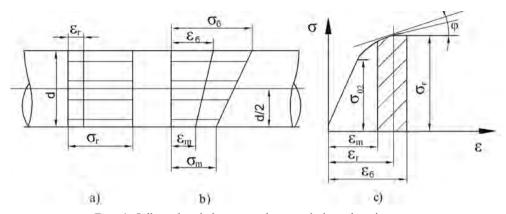
³⁾ Narodowy Uniwersytet Techniczny w Sewastopolu, Ukraina.

zachowania niezmienności kształtu cześci jest obróbka cieplna przy ustalonym na sztywno położenia półfabrykatu – w trakcie obróbki cieplnej bez takiego ustalenia (na przykład przy odpuszczaniu) praktycznie prawie zawsze zmianie ulegają wymiary części. Złożony stan mechaniczny materiału, w trakcie obróbki cieplnej wyrobów o podwyższonym poziomie naprężeń oraz różnorodność jego stanów fazowych, mogą być przyczyną zmiany wymiarów części w trakcie kolejnych operacji obróbki mechanicznej lub składowania. Paczenie w stanie swobodnym ma miejsce również po obróbce cieplnej, początkowo często w określonym kierunku (zginanie, rozciąganie), przed zakończeniem przekształceń fazowych i odkształceń niesprężystych. Ustalenie wyrobu przy hartowaniu także charakteryzuje się określoną specyfiką. Na przykład wtedy, kiedy ustalenie wyrobu hartowanego trwa dosyć długo, odkształcenia są niewielkie (w przypadku próbek 1–2% wielkości odkształcenia plastycznego powstającego przy obciążeniu) [6]. Odpuszczanie realizowane po hartowaniu, w szczególności przy występowaniu austenitu szczatkowego, gdy w materiale zachodzą przekształcenia fazowe (na przykład około 10%), zwiększa działania wtórne, które sumują się z poprzednimi (w tych samych kierunkach). Ostateczne odkształcenie wyrobu może być modelowane zależnościa nieliniową w funkcji działających naprężeń.

SPECYFIKA I WYMAGANIA DO DOKŁADNOŚCI OBRÓBKI WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

W celu minimalizacji paczenia – odkształceń wałów o małej sztywności, w trakcie obróbki cieplnej pod obciążeniem należy stworzyć warunki do powstania odpowiedniego odkształcenia plastycznego lub przemiany fazowej. Na przykład, w trakcie przemiany martenzytycznej stal traci wytrzymałość i ulega niewielkiemu odkształceniu (σ₀₂ ulega zmniejszeniu od 12 do 14 razy). Przy temperaturach hartowniczych pole naprężeń szczątkowych ulega redukcji do zera i jest jednorodne w przekroju – pełnej likwidacji ulega warstwa utwardzona przez zgniot. Technologicznie trudne jest utrzymanie takiego stanu materiału przy chłodzeniu do temperatury otoczenia. Parametry geometryczne dokładności półfabrykatu po prostowaniu i obróbce mechanicznej nie mogą być większe od tolerancji na obróbkę kształtującą. Nierównomierność odkształceń w przekroju poprzecznym i wzdłuż półfabrykatu jest spowodowana niedokładnością wykonania (szczególnie wielkością mimośrodu półfabrykatu – nie pokrywania się osi technologicznej i teoretycznej części). Przy obciążeniu, niesymetryczność w przekroju poprzecznym w wyniku odkształceń prowadzi do powstania momentu zginającego.

Rozpatrzone zostaną kolejne działania (procesy) technologiczne przy wprowadzeniu odkształcenia osiowego, w przypadku materiału nagrzanego i bez jego nagrzewania. W zależności od przeznaczenia wyrobu, każda operacja może występować jako samodzielna. Istota pierwszego procesu technologicznego polega na tym, że przy rozciąganiu wszystkie siły wzdłużne, w pierwszym przybliżeniu, są jednakowe – powstają



Rys. 1. Odkształcenia i naprężenia przy obciążeniu osiowym Fig. 1. Strain and stresses during axial tensions

takie same naprężenia (rys. 1a). Wielkość naprężeń roboczych σ_r można określić z diagramu naprężeń według wielkości odkształcenia względnego ε_n (rys. 1c).

Na odcinkach skrzywionych pomimo rozciągania ma miejsce również prostowanie półfabrykatu, w wyniku czego odkształcenia względne warstw wzdłużnych tych odcinków są różne. Zwykle promień krzywizny nie jest mniejszy niż 20–30-krotna wysokość przekroju poprzecznego półfabrykatów walcowanych, a więc charakter rozkładu odkształceń w przekroju wału przy prostowaniu można przyjąć taki, jak przy zginaniu belki prostoliniowej. W tym przypadku rozkład odkształceń względnych, wzdłuż wysokości półfabrykatu, jest zgodny z zależnością liniową (rys. 1b), a ich wartość najmniejszą i największą w warstwach skrajnych zewnętrznej i wewnętrznej wału, można przedstawić jako:

$$\varepsilon_{\delta} = \varepsilon_r + \frac{d}{2r_{sk}}, \quad \varepsilon_m = \varepsilon_r - \frac{d}{2r_{sk}},$$

gdzie: r_{sk} – promień krzywizny półfabrykatu.

Wartości wydłużeń względnych znajdują się w zakresie, przedstawionym na diagramie naprężeń strefą $\epsilon_{\delta}-\epsilon_{m}$ (rys. 1c). Można więc przyjąć, że moduł sprężystości podłużnej E_{y} jest stały. W tym przypadku rozkład naprężeń również odpowiada zależności liniowej (rys. 1, b). Zależność naprężeń w strefie odkształceń względnych można zapisać jako:

$$\sigma_{\delta} = \sigma_r + \frac{E_y}{E} v, \qquad \sigma_m = \sigma_r - \frac{E_y}{E} v,$$
 (1)

gdzie: v — współrzędna naprężeń od centralnej warstwy półfabrykatu.

Siła rozciągająca i moment zginający wyznaczane są z zależności:

$$F_{roz} = \sigma_r \cdot S, \qquad M_{zg} = E_v \cdot v / E \cdot J,$$
 (2)

W wyniku nierównomiernego rozkładu naprężeń, po średnicy na odcinkach skrzywionych, działa moment sił wewnętrznych, który powinien być równoważony momentem zginającym zewnętrznym. Moment ten powstaje w wyniku przemieszczenia środka ciężkości przekroju poprzecznego skrzywionego odcinka wału, w stosunku do linii działania siły rozciągającej. W tym przypadku moment zginający od sił zewnętrznych jest równy $M_{\rm zewn} = F_{\rm roz} \cdot y_{\rm e}$, gdzie $y_{\rm j}$ – jest wielkością bezwzględną części skrzywienia ostatecznego, którą można przedstawić przy pomocy znanych wielkości:

$$y_e = J \cdot E_v / r \cdot S \cdot \sigma_r \,. \tag{3}$$

Wielkość σ_r jest tylko częścią, pozostałego po prostowaniu, naprężenia. Podstawowa część skrzywienia końcowego powstaje po zdjęciu zewnętrznego obciążenia rozciągającego, w wyniku relaksacji naprężeń szczątkowych i oddziaływań niesprężystych, to znaczy skrzywione wcześniej odcinki częściowo odbudowują krzywiznę, ponieważ przestaje na nie oddziaływać oprócz sił rozciągających również moment zginający spowodowany tymi siłami.

Na podstawie przeprowadzonych badań analitycznych procesów odkształcenia osiowego wału można wyciągnąć wniosek, że krzywizna ostateczna wyrobu zależy od skrzywienia początkowego $1/R_{\rm kr}$, od właściwości fizyko- mechanicznych materiału i technologii wykonania. W związku z tym należy odnotować kilka podejść do projektowania procesów technologicznych obróbki wałów o małej sztywności, w zależności od materiału półfabrykatu. W przypadku, kiedy materiał półfabrykatu ma charakterystykę rosnącą to, przy określaniu zewnętrznego obciążenia rozciągającego, strefa wydłużeń względnych $\epsilon_{\delta}-\epsilon_{m}$ powinna odpowiadać odcinkowi diagramu $\sigma-\epsilon,$ o minimalnym module sprężystości podłużnej. W przypadku stali niskoweglowych jest to strefa plastyczności (E_{v} . = 0). Przy określaniu odkształcenia osiowego, materiałów skłonnych do umacniania, strefa $\epsilon_{\delta}-\epsilon_{m}$ na diagramie $\sigma-\epsilon$ powinna być umiejscowiona po odcinku początkowym wznoszenia się krzywizny naprężeń. Stale wysokoweglowe i wysokostopowe, charakteryzują się dużym wzrostem naprężeń na odcinku wydłużenia równomiernego, w wyniku dużych wartości modułu sprężystości podłużnej, wymagane są więc duże obciążenia osiowe, co powoduje, że odkształcenia znacznie przekraczając granicę wytrzymałości materiału.

Przedstawione podejście technologiczne, umożliwiające zmniejszenie krzywizny części osiowosymetrycznych, jest do przyjęcia w przypadku procesu obróbki zgrubnej (wstępnej) w przypadku wałów o stosunku L/d=100, nieprzejawiających skłonności do umacniania.

W celu zwiększenia dokładności i niezmienności kształtu geometrycznego części o małej sztywności opracowano sposób, łączący w sobie proces prostowania i obróbki cieplnej [10, 11]. Istota tej metody polega na tym, że odkształcenie osiowe – rozciąganie jest przykładane do wału przy nagrzewaniu (do temperatury hartowania), natomiast prędkość stygnięcia wału (zamocowanego w urządzeniu) jest kilkakrotnie większa niż urządzenia (rys. 2a). Na rysunkach 2 i 3 cyfrą 1 oznaczono urządzenie, a 2 – wyrób oraz charakterystyki przy nagrzewaniu i chłodzeniu.

Przy obliczeniach teoretycznych założono, że krzywizna osi półfabrykatu opisywana jest sinusoidą:

$$y = \alpha \cdot \sin \pi \cdot x / L, \tag{4}$$

a wielkość zmiany długości półfabrykatu określana jest zależnością (rys. 2a):

$$\Delta L = \pi^2 \cdot y_\alpha^2 / 4L \,, \tag{5}$$

gdzie: α — początkowa strzałka ugięcia.

Przy rozciąganiu półfabrykatu o krzywiźnie początkowe nie większej niż 1% na długości L, wielkość odkształceń $y_{\alpha 1}$ jest powiązana z krzywizną początkową y_{α} zależnością:

$$y_{\alpha_1} = y_{\alpha} / (1 + F_{roz} / F_{kr}),$$
 (6)

z której można określić wartość obciążenia osiowego, niezbędnego do zmniejszenia ugięcia

$$F_{roz} = F_{kr} \cdot (y_{\alpha} / y_{\alpha 1} - 1), \tag{7}$$

gdzie: F_{kr} — siła osiowa krytyczna.

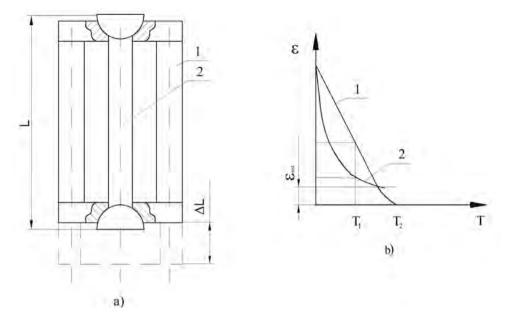
Zależność naprężeń od wydłużeń względnych może być stosowana pod warunkiem spełnienia nierówności (8):

$$\lambda \ge (\pi^2 \cdot E / \sigma_{02})^{1/2}, \tag{8}$$

jeżeli λ < 100, to osiowa siła rozciągająca powinna być określana z zależności:

$$F_{roz} = E \cdot S_{p \acute{o}l} \cdot \Delta L / L \; , \tag{9}$$

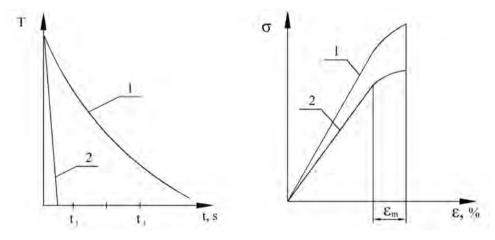
gdzie $S_{p\acute{o}l}$ – pole przekroju poprzecznego półfabrykatu.



Rys. 2. Schemat uproszczony realizacji technologicznej metodyobróbki:
a) charakterystyki przy nagrzewaniu, b) chłodzeniu

2. Simplified model of realization of technological method of processing

Fig. 2. Simplified model of realization of technological method of processing:: a) temperature profiles while heating, b) cooling



Rys. 3. Zależności temperatury chłodzenia urządzenia i półfabrykatu: a) zależność naprężeń. b) wydłużeń względnych

Fig. 3. The relation between the temperature of cooling the device and semimanufactured article: a) the relation between strains, b) unit elongation

Na podstawie danych obliczeniowych można stwierdzić, że do osiągnięcia granicy proporcjonalności materiału (na przykład stal nierdzewna) półfabrykatu o średnicy 60 mm i długości 3000 mm, w przypadku którego $\sigma_{02}=200~\text{N/mm}^2$, jest konieczne przyłożenie siły osiowej w granicach $6\cdot10^5~\text{N}$. Proces odkształcenia osiowego, oprócz wymienionych wad, ma więc jeszcze jedną – niezbędny jest napęd o dużej mocy. W proponowanych technikach znajdują zastosowanie podstawy fizyczne procesu obróbki cieplnej; odkształcenie osiowe półfabrykatu jest uzyskiwane w wyniku doboru odpowiednich współczynników rozszerzalności cieplnej wyrobu i urządzenia oraz ich długości (półfabrykat jest umieszczany w urządzeniu i mocowany – rys. 2a). Różnica wydłużeń półfabrykatu i urządzenia jest określana z zależności:

$$\Delta L = \alpha_{urz}(T^{\circ}) \cdot T^{\circ} \cdot L_{urz} - \alpha_{pol}(T^{\circ}) \cdot T^{\circ} \cdot L_{pol}. \tag{10}$$

Analiza pokazuje, że ze wzrostem temperatury nagrzewania różnica wydłużeń wzrasta nieliniowo. W celu utrzymania niezmienności geometrii wyrobu przy obróbce cieplnej w urządzeniu, należy wytworzyć wydłużenie sumaryczne nie mniejsze niż 1% jego długości.

Przy nagrzewaniu półfabrykat ulega wydłużeniu o:

$$\Delta L = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{02} + \Delta_3) \cdot L \cdot K_1, \tag{11}$$

gdzie: Δ_1 – początkową krzywizną półfabrykatu,

 Δ_2 – różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej materiałów,

 Δ_{02} – umownym przedziałem proporcjonalności przy $T = 20 \, ^{\circ}C$,

 Δ_3 – wydłużeniem względnym półfabrykatu,

 $K_1 = S_{
m p\acute{o}i} + S_{
m p\acute{o}i} / S_{
m prz}$ – współczynnik uwzględniający ściśnięcie przyrządu ($S_{
m p\acute{o}i}$, $S_{
m prz}$ – odpowiednio pole przekroju poprzecznego przyrządu i półfabrykatu).

Analiza zależności obliczeniowych (11) pokazuje, że ze wzrostem temperatury nagrzewania, odkształcenie osiowe półfabrykatu rośnie nieliniowo i wynosi nie więcej niż 1%.

W proponowanym rozwiązaniu wał odkształca się, przy nagrzewaniu, z założoną prędkością, zgodnie z technologią obróbki cieplnej. Urządzenie wydłuża się w większym stopniu niż wyrób – proporcjonalnie do różnicy współczynników rozszerzalności liniowej, a prędkość jego chłodzenia jest mniejsza od 1,5 do 3 razy od prędkości chłodzenia wału.

Umożliwia to stabilizację obciążenia osiowego na początku chłodzenia i łagodne zdjęcie obciążenia. Przy obliczaniu typowych procesów należy rozwiązać problem niestacjonarnej przewodności cieplnej, to znaczy określić zależność zmiany temperatury i ilości przekazywanego ciepła w czasie, w dowolnym punkcie ciała. Równanie różniczkowe przewodności cieplnej w przypadku ciał sztywnych ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right). \tag{12}$$

W celu rozwiązania analitycznego równania (12) należy wyznaczyć warunki brzegowe: 1) początkowy rozkład temperatury w materiale; 2) oddziaływanie na powierzchnie środowiska zewnętrznego – można je określić na trzy sposoby: a) temperatura powierzchni, b) ilościa ciepła przechodzacego przez powierzchnie, c) temperatura otoczenia zewnętrznego i współczynnikiem wnikania ciepła y. Zgodnie z prawem Newtona:

$$dQ = b(T_{prz}^{\circ} - T_c^{\circ})dS, \qquad (13)$$

gdzie: dQ – ilość ciepła, T_{prz}^{o} ,

 T_c° – temperatura ścianki przyrządu i cieczy,

dS – jednostka powierzchni,

b – współczynnik przewodności temperaturowej.

Wynikiem rozwiązania równania (12) jest funkcja, która powinna jednocześnie spełniać warunki brzegowe. Szukana funkcja zależy od dużej ilości parametrów, które można zgrupować w dwa bezwymiarowe zestawy:

- liczba Biota $B_i = \gamma \cdot \delta / \varphi$,
- kryterium Fouriera $F_0 = b \cdot t / \delta$,

gdzie: φ – współczynnik przewodzenia ciepła,

δ – grubość ścianki przyrządu,

γ – współczynnik wnikania ciepła,

t – czas chłodzenia.

Na podstawie drugiego twierdzenia podobieństwa, szukana funkcja w postaci bezwymiarowej Q / Q, w różnych punktach, może być przedstawiona jako:

$$Q/Q' = \Phi(\mathbf{B}_i, F_0, L),$$

gdzie: $L = x / \delta$, x – współrzędne strefy nagrzewania.

Wał można przedstawić jako nieskończenie długi cylinder o promieniu R; w tym przypadku równanie różniczkowe przewodności cieplnej ma postać:

$$\partial Q/\partial t = b(\partial^2 Q/\partial t^2 + \partial Q/t\partial t). \tag{14}$$

przy r = R; $\partial Q / \partial t = \gamma \cdot Q / \varphi_c$. przy t = 0; $Q = Q^*$. Warunki brzegowe:

Warunki poczatkowe:

Na wykresie zależności $e = \psi(T^{\circ})$ (rys. 2b) pokazano charakter zależności odkształcenia przyrządu i wału przy chłodzeniu, gdzie $\varepsilon_{\rm ost}$ – odkształcenie półfabrykatu równe ε_{pł} (rys. 3b) – w przypadku różnicy współczynników rozszerzalności liniowej.

Jeżeli współczynniki rozszerzalności cieplnej półfabrykatu i przyrządu są jednakowe, to odkształcenie osiowe jest określane jako różnica długości przyrządu i półfabrykatu lub w wyniku odpowiedniego doboru prędkości ich chłodzenia (rys. 3a).

Naprężenia rozciągające osiowe przy obróbce cieplnej są określane z zależności:

$$\sigma_r = \alpha_T \cdot \Delta T^{\circ} \cdot E \cdot S_{p\acute{o}l} / S_{prz}, \qquad (15)$$

gdzie: ΔT – różnica temperatury półfabrykatu i przyrządu przy chłodzeniu, $\alpha_{\rm T} = \alpha(T^{\rm o}) + T^{\rm o} \cdot {\rm d}\alpha / {\rm d}T^{\rm o}$ – rzeczywista różnica współczynników rozszerzalności cieplnej.

Przy hartowaniu wału stopniowanego warunki równości naprężeń roboczych, na wszystkich jego stopniach, są określane z zależności:

$$S_{p\delta l} \cdot E_{p\delta l}^{n} \cdot \alpha(T^{\circ}) \cdot T^{\circ} / S_{prz}^{n} = S_{p\delta l}^{n-1} \cdot E_{p\delta l}^{n-1} \cdot \alpha(T^{\circ}) / S_{prz}^{n-1}, \tag{16}$$

gdzie: $S_{p\delta l}^n$, $S_{p\delta l}^{n-1}$, S_{prz}^n , S_{prz}^{n-1} , – płaszczyzny przekrojów poprzecznych półfabrykatu i przyrządu w "n" i "n-1" stopniach.

W pierwszym etapie chłodzenia wału w przyrządzie, gdy różnica temperatur wału i przyrządu jest maksymalna, odkształcenia ostateczne półfabrykatu są sumą odkształceń sprężystych $\epsilon_{\rm v}$, plastycznych $\epsilon_{\rm pl}$ i temperaturowych $\epsilon_{\rm T}$:

$$\varepsilon_{\sum} = \varepsilon_{y} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{T}, \qquad (17)$$

gdzie:
$$\varepsilon_T = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_T(T^\circ) dT$$
.

Opracowana technologia obróbki cieplnej, z przyłożeniem odkształceń osiowych, umożliwia, niezależnie od właściwości materiału, eliminację naprężeń pozostałych od operacji poprzednich [8]. Przy chłodzeniu wału, zamocowanego w przyrządzie powstają jednak nowe naprężenia rozciągające, o rozkładzie równomiernie w przekroju półfabrykatu. Poziom naprężeń końcowych jest określany zależnością:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_{v} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{T}). \tag{18}$$

Przy chłodzeniu powierzchnia zewnętrzna półfabrykatu ostyga szybciej niż wewnętrzna. Znak naprężeń w warstwach wierzchnich będzie więc przeciwny w stosunku do znaku naprężeń wewnątrz półfabrykatu. Po ochłodzeniu całkowitym znaki naprężeń ulegną zamianie. Zaletą proponowanego rozwiązania technologicznego jest uzyskanie takich samych znaków naprężeń w warstwach zewnętrznych, co wyklucza paczenie części. Dalsza obróbka przy równomiernym zdejmowaniu metalu odnośnie do osi wału również nie spowoduje paczenia cześci.

Przedstawione zależności są prawidłowe przy założeniu liniowości modelu. Nieliniowość, to znaczy odkształcenie plastyczne przy hartowaniu z odkształceniem osio-

wym, nie przekracza 1%, co umożliwia jej aproksymację z wystarczającą w praktyce dokładnością.

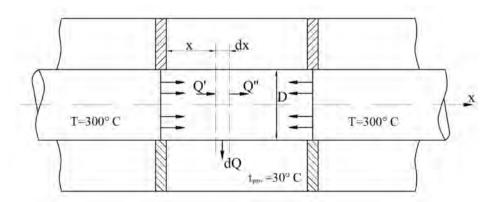
Proces hartowania jest początkiem technologii obróbki cieplnej, a więc procesy relaksacji i inne następstwa tutaj nie są rozpatrywane. Kontrola czynna stanu materiałów, w procesie nagrzewania i odkształcenia półfabrykatu, umożliwia sterowanie naprężeniami szczątkowymi w trakcie całego czasu obróbki.

PRZYKŁAD URZĄDZENIA DO STEROWANIA PROCESEM ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Urządzenie do realizacji sposobu sterowania procesem odkształcenia plastycznego, wałów o małej sztywności (rys. 4) [3], zawiera piec szybowy 1, z sekcyjnymi elektrycznymi elementami grzewczymi 2. Obrabiany półfabrykat jest ustawiany w pryzmie i umieszczany w piecu. Wstępnie na półfabrykacie są ustawiane żebra, rozdzielające przestrzeń pieca szybowego na komory, przy czym każda komora posiada wejście i wyjście powietrza chłodzącego.

Po ustawieniu na sztywno półfabrykatu, są włączane elementy grzewcze w celu nagrzania półfabrykatu. Wartość bieżąca temperatury jest określana przy pomocy termopar, znajdujących się w każdej komorze. Po osiągnięciu temperatury półfabrykatu $T=300\,^{\circ}\mathrm{C}$ jest włączany system oddziaływania osiowego (rozciągania) na półfabrykat.

Właściwości fizyko-mechaniczne wzdłuż półfabrykatu nie są jednakowe, tak więc na różnych jego odcinkach czas osiągnięcia granicy plastyczności może być inny. Rejestracja miejsca naruszenia proporcjonalności wydłużenia osiowego jest wykonywana przy pomocy czujnika pneumatycznego (na rys. 4 umownie niepokazany).



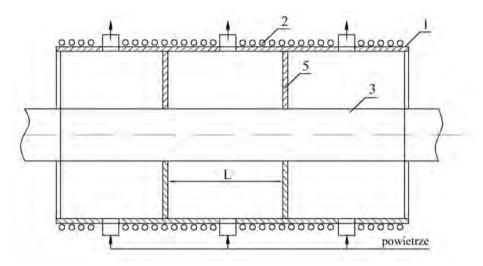
Rys. 4. Schemat urządzenia do sterowania procesem odkształceń plastycznych wału o małej sztywności

Fig. 4. Diagram of control device for process of elastic strain of non-rigid shafts

Elektryczne sekcje grzewcze, na odcinku, na którym występuje strefa umocnienia plastycznego, są odłączane i jest włączana sprężarka podająca powietrze chłodzące.

Odcinek półfabrykatu chłodzony powietrzem osiąga temperaturę $T=200\,^{\circ}\mathrm{C}$, po czym znowu następuje nagrzewanie po odłączeniu podawania powietrza. Na rysunku 5 jest przedstawiony schemat obliczeniowy do określenia czasu ochłodzenia odcinka i jego długości.

Materiał półfabrykatu: stal X10CrNi18-8, masa właściwa $-\gamma = 7900 \text{ kg/m}^3$, współczynnik przewodności cieplnej $-\lambda_{st} = 14,5 \text{ W/m}^\circ\text{N}$, pojemność cieplna $-C = 0,5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{N}$, współczynnik przekazywania ciepła od powietrza do wału $-\psi_w = 6 \text{ W/m}^2^\circ\text{N}$, współczynnik przewodności cieplnej $-\mu = 5\cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



Rys. 5. Schemat obliczeniowy do określania długości odcinka oraz czasu jego chłodzenia **Fig. 5.** Computational scheme for defining the length of section and the time of cooling it

Rozpatrzono przekazywanie ciepła przez sworzeń cylindryczny, którego przekrój poprzeczny jest równy: $S = \pi \times R^2$, a obwód przekroju $U = 2\pi \cdot R$, (R - promień wału).

Temperatura sworznia zmienia się tylko wzdłuż jego długości – jest funkcją jego długości, to znaczy

$$T^{\circ} = f(x)$$
.

Określono zasadę zmiany temperatury wzdłuż sworznia i ilość ciepła, przekazywanego przez sworzeń przy trybie stacjonarnym.

W odległości *x* od początku odcinka (rys. 5) wyodrębniano element *dx*, w przypadku którego zapisano równanie bilansu cieplnego:

$$Q' - Q'' = dQ.$$

Zgodnie z zasadą Fouriera:

$$Q' = -\lambda prz \cdot S \frac{dT^{\circ}}{dx},$$

$$Q'' = -\lambda_{prz} \cdot S(\theta + \frac{dT^{\circ}}{dx} \cdot dx),$$

a wiec

$$Q'-Q'' = -\lambda_{prz}S\frac{dT^0}{dx} + \lambda_{prz}S(\theta + \frac{dT^0}{dx}dx), \qquad (19)$$

z drugiej strony

$$dQ = \alpha_R \cdot U \cdot \theta \cdot dx \,. \tag{20}$$

Porównując zależności (19) i (20) otrzymano:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{\psi_B \cdot U \cdot T}{\lambda_{prz} \cdot S} = m^2 \cdot \theta \,, \tag{21}$$

gdzie: $m = \sqrt{\psi_B \cdot U / \lambda_{prz} \cdot S}$ [1/m].

Rozwiązanie równania (21) można zapisać w postaci:

$$T^{\circ} = C_1 \cdot e^{mx} + C_2 \cdot e^{-mx}.$$

Wartości współczynników C_1 oraz C_2 są wyznaczane z warunków brzegowych. W przypadku sworznia o nieskończonej długości i przekroju okrągłym:

$$U/S = 4/D$$
,
 $K_1 = x \cdot m = x \sqrt{\frac{\psi_B \cdot U}{\lambda_{prz} \cdot S}} = x \sqrt{\frac{6 \cdot 4}{0,045 \cdot 14,5}} = 6x$,
 $T^{\circ} = T_0^{\circ} \cdot e^{-mx}$,

gdzie: x – współrzędna bieżąca,

 $T^{\circ} = T^{\circ} - T_{\text{oddz}} - \text{temperatura otoczenia},$

 $T_0^{\circ} = T_0^{\circ} - T_{pow}$ – temperatura początkowa,

 T° – temperatura bieżąca, $T_0^{\circ} = 300^{\circ} C$, $T_{pow}^{\circ} = 30^{\circ} C$.

Równanie krzywej temperaturowej przy danych warunkach jest następujące:

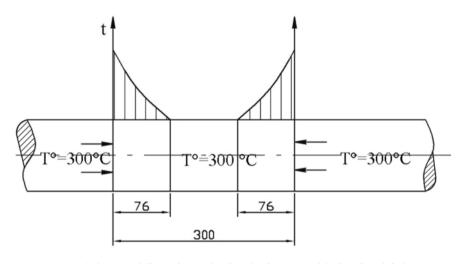
$$T^{\circ} = 270 \cdot e^{-6x} \,. \tag{22}$$

Z równania (22) jest wyznaczana długość odcinka x, na którym zostanie ustalona temperatura $T^{\circ} = 200^{\circ}$:

$$T^{\circ} = T^{\circ} - T_{\text{pow}} = 260^{\circ} - 30^{\circ} = 170^{\circ} C,$$

$$\frac{170}{270} = \frac{1}{6x}; e^{6x} = \frac{270}{170} = 1,58; 6x = 0,45; x = 0,076 m = 76 mm.$$

Schemat obliczeniowy do określenia czasu chłodzenia odcinka przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat obliczeniowy do określania czasu chłodzenia odcinka **Fig. 6.** Computational scheme for defining the time of cooling the section

Ilość ciepła przekazywanego przez przekrój jest równa:

$$Q = \lambda_{CT} \cdot S \cdot m \cdot T_0 = 14,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 6 \cdot 270 = 37,3 \text{ J.}$$

Czas chłodzenia odcinka wału, w przypadku kryteriów:

$$\begin{split} B_i &= \psi_B \cdot R \, / \, \lambda_{CT} = 6 \cdot 0,0225 \, / \, 14,5 = 0,0093 \, , \\ F_0 &= \mu \cdot \tau \, / \, \delta^2 = 5 \cdot 10^{-6} \, \tau \, / \, 0,0225^2 = 0,0098 \tau \, . \end{split}$$

Stosując zależność przy małych wartościach B_i otrzymano:

$$T = T' \cdot e^{-2B_i \cdot F_0} \,, \tag{23}$$

gdzie: $T^{\circ} = 200^{\circ} - 30^{\circ} = 170^{\circ} \text{C}$, $T^{\sim} = 300^{\circ} - 30^{\circ} = 270^{\circ} \text{C}$.

Z zależności (23) jest określany czas chłodzenia odcinka wału

$$t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta^2 \cdot \ln \frac{\theta'}{\theta}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0093} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.0225^2 \cdot \ln \frac{270}{170}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0093} = 0.025 \ h = 90 \ s$$

Ilość ciepła, odprowadzanego przez powietrze w czasie pełnego ochłodzenia odcinka wału o długości L=300 mm przy T=100°C, wyznacza się jako:

$$Q' = c \cdot \gamma \cdot V \cdot T',$$

$$V = \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 0,3 = 4,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$Q' = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 7900 \cdot 100 \cdot 4,75 \cdot 10^{-4} = 187625 \text{ J}.$$

Ilość ciepła przepływającego przez przekrój w czasie t = 90 s jest określana z zależności:

$$Q_{cey} = 2 \cdot 37, 3 \cdot 90 = 6714$$
 J.

W związku z tym, że moduł sprężystości odzwierciedla zmianę międzyatomowych sił adhezyjnych, wraz ze zmianą odległości międzyatomowych naturalne jest oczekiwanie, iż moduły sprężystości powinny być powiązane z parametrami siatki.

Poziom temperatury istotnie wpływa na odkształcenie plastyczne (rys. 4). Jak wynika z rysunku 4 opór przeciwko początkowym odkształceniom plastycznym (granica plastyczności) w istotny sposób zależy od temperatury. Przy zmianie temperatury występują zasadnicze różnice pomiędzy metalami z siecią regularną przestrzennie centryczną i siecią regularną płasko centryczną [8]. Odkształcenie metalu przy różnych temperaturach zależy głównie od dwóch czynników: wpływu temperatury na kierunek przepływu ciepła przy danej strukturze odkształcanego metalu oraz wpływu różnic w strukturze (na przykład różnej gęstości dyslokacji), powstających przy różnych temperaturach w przypadku materiałów o określonym stopniu odkształcenia.

Wpływ temperatury na krzywą umocnienia metalu o sieci regularnej płasko centrycznej (stal X10CrNi18-8) wynika z tego, że metal w stanie odkształconym ma różną strukturę przy różnych temperaturach – nie zauważono dużej zmiany wartości naprężenia przy zmianie temperatury. Przekształcenia fizyko-mechaniczne zachodzące przy zmianie temperatury w istotny sposób wpływają na plastyczność i ciągliwość. Przy obniżeniu temperatury w większym stopniu zmniejsza się plastyczność, a nie ciągliwość.

Szeroko rozpowszechnione jest prostowanie osiowe. Przy wyciąganiu półfabrykatu cylindrycznego wszystkie włókna są doprowadzane do granicy plastyczności, dlatego występujące wcześniej naprężenia szczątkowe osiowe zanikają. W procesie prostowania osiowego przy odkształceniach ostatecznych 0,5–1% naprężenia szczątkowe zanikają w pełni [6].

Badania, prostowania osiowego wałów o małej sztywności ze stali austenitycznej X10CrNi18-8 (połączone z operacją hartowania, wykonywaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali) przeprowadzono w urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej – odpuszczanie w tym przypadku nie jest wymagane [5]. Stale austenityczne charakteryzują się dużym współczynnikiem rozszerzalności i niską granicą plastyczności, a więc w celu wytworzenia obciążenia prostowania osiowego, po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu wału do hartowania, końce jego są ustalane w urządzeniu (wykonanym ze stali o współczynniku rozszerzalności termicznej niższym niż materiał półfabrykatu wału), które jest poddawane chłodzeniu.

W wyniku różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej, przy chłodzeniu powstaje obciążenie osiowe, które działając na półfabrykat wału powoduje jego prostowanie osiowe.

PODSUMOWANIE

Przeanalizowano procesy technologiczne, z zastosowaniem odkształcenia osiowego, w przypadku materiału nagrzanego i nienagrzanego. Każda operacja może być realizowana jako samodzielna w zależności od przeznaczenia wyrobu.

W celu zwiększenia dokładności i niezmienności kształtu geometrycznego części o małej sztywności, opracowano sposób łączący proces prostowania i obróbki cieplnej. Istota jego polega na tym, że odkształcenie osiowe – rozciąganie ma miejsce przy nagrzewaniu wału, natomiast przy stygnięciu wyrób jest ustalany odnośnie urządzenia, przy czym prędkość stygnięcia wału jest kilkakrotnie większa niż urządzenia. Ma zastosowanie fizyka samego procesu obróbki cieplnej – odkształcenie osiowe półfabrykatu jest realizowane w wyniku doboru współczynników rozszerzalności cieplnej wyrobu i urządzenia, oraz ich długości.

Przeprowadzono badania eksperymentalne – w opracowanym urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej, w przypadku prostowania osiowego wałów o małej sztywności ze stali austenitycznej X10CrNi18-8, połączonego z operacją hartowania (przeprowadzaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali) – potwierdziły prawidłowość przyjętych założeń teoretycznych.

Zastosowanie proponowanego sposobu obróbki wałów, o małej sztywności, w przedsiębiorstwach przemysłu maszynowego, umożliwi znaczące podwyższenie jakości tych wyrobów, przy dużej wydajności ich wytwarzania.

PIŚMIENNICTWO

1. Abakumov A.M., Taranenko V.A., Taranenko G.V.: Sposob mekhanicheskoji obrabotki nezhestkikh osesimetrichnykh detaleji i ustrojistvo dlja ikh realizacii. MKI B23B 1/00, B23Q 15/00. Zajavka na patent Rossii. No 96109283 ot 22.05.96.

- 2. Abakumov A.M., Vidmanov Ja. I., Mikhelevich V.N.: Algoritmizacija processa prodol'nogo tochenija. Stanki i instrument No 9, 1972: 29–31.
- 3. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR a 1230715, V21D 3/16, 1986.
- 4. Drachev A.O., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: Sposob termomekhanicheskojj obrabotki nezhestkikh dlinnomernykh valov. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunarodnojj nauchno tekhnicheskojj konferencii. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009: 56–59.
- Drachev A.O., Drachev O.I., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: Termosilovaja obrabotka stupenchatykh osesimmetrichnykh detalejj. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunarodnojj nauchno-tekhnicheskojj konferencii. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009: 18–21.
- Hałas W. Badania wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność wytwarzania wałów. Rozprawa doktorska. Lublin: Politechnika Lubelska 2010.
- 7. Halas W., Taranenko V., Swic A., Taranenko G.: Designing structure of operations of technological process of machining shafts in CIM considering the technological inheritance. Preprints 9 th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'08) Szczecin, Poland 2008: 245–250.
- 8. Ivovich V. A.: Perekhodnye matricy v dinamike uprugikh sistem. Moskva: Mashinostroenie 1969, 199 s.
- 9. Karpushkin V. A.: Issledovanie uprugikh progibov nezhestkikh detalejj pri tokarnojj obrabotke s rastjazheniem. Vesci Akademii navuk Belaruskai SSR, Ser. Fiehika tekhnychnykh nauk No 1, 1978: 6–9.
- Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.: Systemic analysis of models of dynamic systems of shaft machining in elastic-deformable condition. Applied Computer Science. Business Process Optimisation. Vol. 3, No 2, 2007 Technical University of Zilina, Slovenska Republika
- 11. Taranenko W., Świć A., Wołos D.: Kolejność procedur i operacji projektowych dla typowego procesu zautomatyzowanego projektowania procesów technologicznych wałów o małej sztywności. W: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2006: 45–60.

THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL BASES OF MODELLING THE THERMO-MECHANICAL PROCESSING OF NON-RIGID SHAFTS

Summary

The paper introduces scientific principles of modeling the thermo-mechanical processing of non-rigid shafts. The schemes of realization of the thermo-mechanical processing of non-rigid shafts, the results of research of strains and stresses during axial tension and temperature profiles while heating and cooling were presented. The example of device for controlling the process of non-rigid shafts' elastic deformation was introduced.

Keywords: modeling, non-rigid shafts, thermo-mechanical processing.

Oleg Draczew¹, Antoni Świć², Wiktor Taranenko², Georgij Taranenko³

MODELOWANIE UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Streszczenie. W artykule rozpatrzono metodologię opracowania modeli matematycznych obróbki cieplno-mechanicznej wałów małej sztywności. Przedstawiono analizę modeli sterowania: odkształceniami sprężysto-plastycznymi, niezmiennością obciążeń zewnętrznych i procesów zdejmowania obciążeń. Do analizy jakościowej procesów opracowano modele matematyczne układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności. Przedstawiono proste modele trzyelementowe, opisujące tylko naprężenia i odkształcenia. Przeanalizowano również bardziej złożone modele matematyczne, opisujące niesprężyste ciała sztywne.

Słowa kluczowe: modelowanie, układ dynamiczny, wały o małej sztywności, obróbka cieplno-mechaniczna

WSTĘP

W wielu współczesnych agregatach, maszynach i przyrządach są stosowane bardzo dokładne części o małej sztywności. Ciągły wzrost ich ilości jest spowodowany zwiększaniem się produkcji maszyn precyzyjnych, możliwej dzięki doskonaleniu metod obliczeń wytrzymałościowych, optymalizacji kształtu części i konstrukcji oraz obniżaniu ilości materiału potrzebnego do wytworzenia części.

Analiza doświadczeń przemysłowych wytwarzania takich elementów w produkcji małoseryjnej i seryjnej pokazała, że tradycyjne sposoby obróbki części sztywnych są mało efektywne przy wytwarzaniu wyrobów o małej sztywności, dlatego w praktyce przy ich obróbce są zaniżane parametry obróbki oraz stosowane jest docieranie ręczne. Prowadzi to do zwiększenia pracochłonności obróbki, nie gwarantuje przy tym wymaganej jakości wyrobów [4].

Paczenie się części o małej sztywności jest uzależnione od naprężeń szczątkowych, powstających w wyniku odkształceń plastycznych o różnej wielkości przy obciążeniu półfabrykatu. W trakcie walcowaniu półfabrykatów o dużej długości można wyodręb-

¹⁾ Państwowy Uniwersytet Techniczny w Togliatti, Rosja.

²⁾ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska.

³⁾ Narodowy Uniwersytet Techniczny w Sewastopolu, Ukraina.

nić dwie przyczyny powstawania naprężeń szczątkowych: nierównomierność odkształceń plastycznych metalu przy jego zgniocie i niejednorodność pola temperaturowego podczas chłodzenia.

Poziom napreżeń szczatkowych w cześciach o małej sztywności, w zależności od właściwości fizyko-mechanicznych, może zostać obniżony w wyniku zastosowania: odkształceń plastycznych, wyżarzania, odpuszczania [1, 2]. Jednym ze sposobów umożliwiających zachowanie niezmienności kształtu jest obróbka cieplna przy ustalonym na sztywno położenia półfabrykatu; w trakcie obróbki cieplnej bez takiego ustalenia (na przykład przy odpuszczaniu) praktycznie prawie zawsze zmianie ulegają wymiary części. Złożony stan mechaniczny materiału w trakcie obróbki cieplnej wyrobów, w których naprężenia mają duże wartości, w połączeniu z różnorodnością występujących stanów fazowych, może spowodować zmianę wymiarów przedmiotu w trakcie kolejnych operacji obróbki mechanicznej lub składowania. Paczenie w stanie swobodnym ma miejsce również po obróbce cieplnej, przed zakończeniem procesu przekształceń fazowych i odkształceń niesprężystych. Ustalenie wyrobu przy hartowaniu także charakteryzuje się określoną specyfiką. W przypadku, kiedy ustalenie wyrobu hartowanego trwa dosyć długo, odkształcenia są niewielkie (1–2% wielkości odkształcenia plastycznego powstającego przy obciążeniu). Odpuszczanie realizowane po hartowaniu, w szczególności przy występowaniu austenitu szczątkowego, jeżeli w materiale zachodzą przekształcenia fazowe (na przykład około 10%), powiększa w nieco większym stopniu działania wtórne, które sumują się z poprzednimi (w tych samych kierunkach).

ANALIZA TEORETYCZNA PROCESÓW OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ

W przypadku dowolnego odkształcenia, naprężenia i odkształcenia powinny być przedstawione w postaci tensorów drugiego rzędu i wtedy prawo Hooke'a ulega przekształceniu do układu równań liniowych, wyrażających każdą składową tensora naprężeń przez składową tensora odkształcenia i odwrotnie. W danym przypadku to uogólnienie doprowadziłoby tylko do niepotrzebnego skomplikowana zagadnienia, dlatego oparto się na prawie Hooke'a, określonego zależnością:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = j \cdot \sigma$$

gdzie: E = 1 / j, $j - \text{współczynnik podatności mm}^2/\text{N}$.

Zakłada się, że w tym przypadku występuje odkształcenie postaciowe lub odkształcenie w jednej osi. Brak sprężystości materiału można określić trzema warunkami: każdej wartości naprężenia odpowiada jedna równoważna wartość odkształcenia lub

lub

odwrotnie; równoważna wartość wyjściowej wielkości uzyskiwana jest tylko po upływie odpowiedniego czasu – równowaga osiągana jest w zakresie od mikrosekund do bardzo dużych odcinków czasu; związek między odkształceniem i naprężeniem jest liniowy. Warunki pierwszy i trzeci – to powtórzenie warunków sprężystości idealnej.

W proponowanym sformułowaniu zagadnienia sens liniowości jest następujący: jeżeli zmiana naprężenia w czasie $\sigma_1(t)$ prowadzi do odkształcenia $\varepsilon_1(t)$ i jeżeli naprężenie $\sigma_2(t)$ prowadzi do odkształcenia $\varepsilon_2(t)$, to $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$ powoduje odkształcenie $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$.

Układ termodynamiczny, w przypadku szeregu nieskończenie małych zmian parametru zewnętrznego, może przyjmować wiele stanów równoważnych. Pierwszemu warunkowi niesprężystości, zawierającemu wymagania jednoznaczności równoważnego stosunku między naprężeniami i odkształceniem, w związku z pełną zdolnością do odbudowy, odpowiadają więc wszystkie materiały, spełniające wymagania termodynamicznego ciała sztywnego. Drugi warunek niesprężystości oznacza, że jeżeli ulegnie zmianie naprężenie mechaniczne, to ustalenie równowagi w materiale niesprężystym wymaga pewnego czasu.

Przechodzenie układu termodynamicznego do nowego stanu równowagi, w odpowiedzi na zmianę parametru wejściowego, nazywa się relaksacją. Jeżeli oddziaływaniem wejściowym jest naprężenie, to relaksacja jest zależnym od czasu ustaleniem stanu wartości równoważnej parametru wyjściowego – odkształcenia (lub odwrotnie). Zewnętrznym przejawem relaksacji jest osiągnięcie przez parametry wewnętrzne nowych wartości równoważnych. Z punktu widzenia teorii regulacji automatycznej parametry wewnętrzne układu wpływają na stronę ilościową procesu przejściowego – uważa się, że relaksacja jest procesem przejściowym. Między σ i ε istnieje nie tylko bezpośrednie powiązanie czysto sprężyste, ale również powiązanie pośrednie poprzez parametr wewnętrzny. W miarę relaksacji parametru wewnętrznego do wartości równowagi, odkształcenie ε dąży również do odpowiedniej wartości nie momentalnie, lecz z określoną prędkością (zmiana momentalna odpowiada przypadkowi sprężystości w postaci czystej).

Relaksacja jest w istocie właściwością termodynamiczną, uwarunkowaną powiązaniem σ i ϵ , z określonymi parametrami wewnętrznymi, które mogą ulegać zmianie do wartości równowagi w wyniku procesów kinetycznych (na przykład dyfuzji). Zewnętrznym przejawem takiej relaksacji wewnętrznej są zależne od czasu właściwości dotyczące odkształcania.

Paczenie półfabrykatu jest funkcjonalnie powiązane z niejednorodnością odkształcenia plastycznego i pola temperaturowego oraz różnym charakterem odkształceń plastycznych i sprężystych przy zdejmowaniu obciążenia. Analogiczny proces zachodzi także z naprężeniami szczątkowymi, ponieważ ich relaksacja zaczyna się niejednocześnie i w różnych częściach wyrobu, zarówno w przekroju poprzecznym, jak i wzdłużnym.

MODELE MATEMATYCZNE PROCESÓW OBRÓBKI CIEPLNO-MECHANICZNEJ

Opracowane sposoby osiągania niezmienności kształtu geometrycznego części o małej sztywności [1, 5] bazują na odkształceniu osiowym przy odpuszczaniu – sterowaniu nim przy nagrzewaniu i odpuszczaniu. Celowe jest więc rozpatrzenie trzech modeli sterowania: odkształceniem sprężysto-plastycznym; stabilizacją obciążeń zewnętrznych i procesem zdejmowania obciążenia. Taki umowny podział jest poprawny w przypadku rozpatrywania modelu prętowego, kiedy analizowane są naprężenia pierwszego rzędu.

W modelu pierwszym naprężenia $\sigma(t)$ i odkształcenia $\varepsilon(t)$ ulegają zmianie w czasie; sterowanie jest realizowane według dwóch parametrów σ i T° , jest kontrolowana wielkość wyjściowa $\varepsilon(t)$; w drugim $\sigma = const$ (podtrzymuje system sterowania automatycznego), zmianie ulega $\varepsilon(t)$; w modelu trzecim naprężenie σ jest utrzymywane na stałym poziomie, sterowanie jest realizowane według parametru $\varepsilon(t)$ z uwzględnieniem zmiany temperatury stygnięcia T° .

Do jakościowego zbadania procesów, są niezbędne równania opisujące układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej, jako obiekt sterowania.

W danym przypadku zastosowano znaną metodykę [10, 11] podziału obiektu na człony dynamiczne (tab. 1).

W celu scharakteryzowania stanu członu dynamicznego, jako współrzędną uogólnioną na wejściu członu przyjęto $\sigma_1(\epsilon)$, a na wyjściu $\epsilon_1(\sigma)$, i określono je odpowiednio jako wejściowa i wyjściowa wielość członu o działaniu ukierunkowanym.

Proces odkształcenia sprężysto-plastycznego można przedstawić członem o działaniu ukierunkowanym z wielkością wyjściową σ oraz wyjściową ϵ i odwrotnie, w zależności od tego, czy jest rozpatrywana relaksacja naprężeń czy też podatności.

Eksperymentalne charakterystyki statyczne (zależność wielkości wyjściowej ϵ członu od wejściowej σ w ustalonym trybie) przedstawiono na rysunku 1.

Istotne jest, że człon dynamiczny niekoniecznie jest przedstawiony w postaci konstrukcyjnej lub schematycznej. W niektórych przypadkach człony dynamiczne w ogóle mogą nie mieć sensu fizycznego, charakteryzując tylko zależności matematyczne pomiedzy niektórymi wielkościami układu automatycznego i obiektu.

Rodzinę charakterystyk statycznych, zbudowanych w przypadku różnych wartości temperatury T, przedstawiono na rysunku 1.

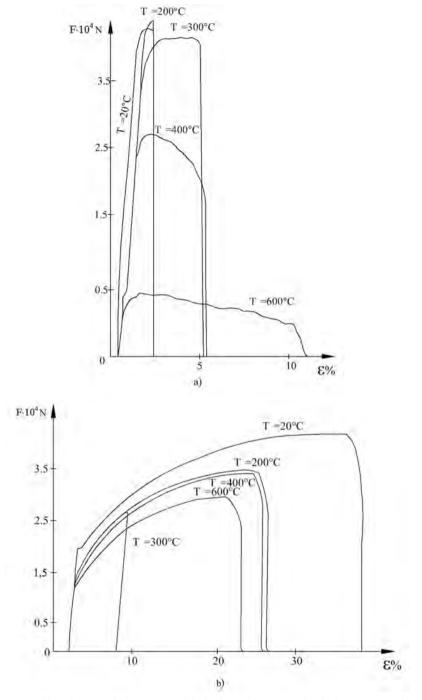
Modelami przedstawionych charakterystyk statycznych są zależności nieliniowe, które przy realizacji układu sterowania automatycznego są linearyzowane, co umożliwia uproszczenie układu sterowania automatycznego, nie powodując obniżenia wymagań odnośnie dynamiki procesów obróbki cieplno-mechanicznej.

Charakterystyki statyczne w pełni odzwierciedlają zachowanie członu dynamicznego w trybie ustalonym, umożliwia to opracowanie zasad sterowania odkształceniem sprężysto-plastycznym.

Tabela 1. Człony dynamiczne i ich opis matematyczny

Table 1. The dynamic elements and their mathematical description

	Model mechaniczny	Opis matematyczny	Proces przejściowy	Transmitacje operatorowe
1.	ξΕ, β	$σ=EE+β\dot{E}$ $T\dot{E}+E=K σ_{wej}$ $σ=σ_0/E(1-e^{4/T})$	Owej Ewyj Owej	$G(S)=\mathcal{E}(S)/\sigma(S)=$ $=K/(TS+1)$
2.	σ E β	$\dot{\epsilon}$ = $\sigma/\beta+\dot{\sigma}/E$ $T\sigma+\sigma=K\dot{\epsilon}$ $\sigma=\sigma_{o}\cdot e^{4/T}$	Ewej Owyj	G(S)=σ(S)/ε(S)= =K/(TS+1)
3.	E ₂ β 1 3	$\begin{split} & E \ E + \beta \dot{E} = (1 + E \ / E_2) \sigma + (\beta / E_1) \dot{\sigma} \\ & T_1 \dot{E} + E = T_2 \dot{\sigma} + K \sigma \\ & \sigma = E_0 (E \dot{+} (E_1 - E_1) e (-t(E_1 + E_2) / \beta) \end{split}$	σ _{wej} ε _{wyj}	$G(S)=\mathcal{E}(S)/G(S)=$ $=\frac{K(T_2S+1)}{(T_1S+1)}$
4.	σ _τ Ε σ	$\begin{split} & \sigma < \sigma_{\tau} & \sigma \geq \sigma_{\tau} \\ & \sigma = \epsilon \sigma & \sigma = \sigma_{wyj} \\ & \sigma = K \epsilon_{wej} & \epsilon_{wej} \geq \sigma_{\tau} \; E \end{split}$	Ewyj Gwej	$G(S)=\mathcal{E}(S)/\sigma(S)=$ $=K=1/E$ $przy \sigma < \sigma_T$
5.	σ, μβ	$\begin{split} \sigma &\geq \sigma_T & \sigma &= \sigma_T + \beta \dot{\tilde{\epsilon}} \\ \sigma &\leq \sigma_T & \sigma / \beta &= \dot{\tilde{\epsilon}} \\ \sigma &= \sigma_0 {>} \sigma_T & \dot{\tilde{\epsilon}} {=} K (\sigma_0 {-} \sigma_T) \\ S \tilde{\epsilon}_{wyj} &= K \sigma_{wej} \end{split}$	É Gord Owej	G(S)–ε(S)/σ(S)– –K/S
6.	ΔL ↑ _T	$\mathcal{E} = \alpha \cdot LT_{wej}$ $(TS+1)\mathcal{E} = KT_{wej}$ $T=C\cdot Q/K\cdot F$	ΔLwyj	G(S)= E (S)/T (S)= =K=α·L G(S)=K/T·S+1
4.	-E _α =σ	$\sigma = \alpha \cdot ET > \sigma_T$ $T = \sigma_T / E_{\alpha}$	σ σ _{wyj} Twej	$G(S)=\sigma(S)/T(S)=$ = $\alpha \cdot E$



Rys. 1. Charakterystyki statyczne układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej **Fig. 1.** The static characteristics of thermo-mechanical processing dynamic system

Układ sterowania działa również w trybie nieustalonym, a więc ważne jest przy badaniu układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej zachowanie członów dynamicznych, w trakcie procesów przejściowych.

Charakterystyki statyczne obiektu sterowania nie zawierają czasu relaksacji, co jest przeszkodą w opracowaniu urządzenia i regulowaniu procesu obróbki cieplno-mechanicznej.

Opis powinien być realizowany na podstawie układu parametrów, który można rozpatrywać jako właściwość samego materiału. Przy takim podejściu, jest istotny stosunek między naprężeniem i odkształceniem, zapisany w postaci równania różniczkowego, zawierającego naprężenie, odkształcenie i ich pochodne po czasie. Równania różniczkowe opisujące odkształcenia zawierają trzy parametry niezależne, a więc model jest budowany z trzech podstawowych elementów – dwóch sprężyn i tłumika.

Określenie niesprężystości zawiera wymóg liniowości. Równania różniczkowe opisujące niesprężystość, wiążące σ i ε, powinny być więc równaniami pierwszego rzędu i zawierać tyle niezależnych stałych, ile jest niezbędnych do opisu niesprężystego zachowania danego ciała sztywnego. W ogólnej postaci równanie liniowe ze stałymi współczynnikami można zapisać w sposób następujący:

$$a_0 \cdot \sigma + a_1 \cdot d\sigma / dt + \dots + a_n \cdot d^n \sigma / dt^n = b_0 \cdot \varepsilon + b_1 \cdot d\varepsilon / dt + \dots + b_n \cdot d^n \varepsilon / dt^n$$
 (1) lub
$$A\sigma = B\varepsilon ,$$

gdzie A i B – operatory liniowe zawierające odpowiednie współczynniki a_i i b_i .

Układ mechaniczny może być modelem określonego materiału niesprężystego wtedy, gdy spełnia te same zależnościom między siłą, przemieszczeniem i czasem, co odpowiednio naprężenia, odkształcenia i czas w przypadku materiału niesprężystego. Siła działająca na sprężynę odzwierciedla naprężenie, przemieszczenie – odkształcenie, a współczynnik sztywności sprężyny K – odpowiada modułowi sprężystości E lub podatności j. Cechą charakterystyczną takiej sprężyny jest nagromadzona w niej energia odwracalna. Innym elementem niezbędnym do występowania tarcia wewnętrznego jest tłumik Newtona, który jest tłokiem przemieszczającym się w idealnie lepkiej cieczy, prędkość ruchu tłoka jest proporcjonalna do działającej siły, a więc praca w pełni jest zużywana na powstawanie ciepła. W przypadku takich ciał sztywnych tłumik stosowany jest tylko w połączeniu ze sprężyną.

W trakcie konstruowania modeli elementy mechaniczne mogą być łączone szeregowo i równolegle [3]. Przy łączeniu szeregowym (tab. 1, model 2) naprężenia σ_1 i σ_2 są równe, a odkształcenia się sumują: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$. Przy połączeniu równoległym tych elementów $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$.

Kombinacje modeli różnorodnych połączeń z dwóch i trzech elementów są przedstawione w tabeli 1.

Model 1 posiada inercyjność jako wynik podatności i oddziaływania sprężystego. Do opisu ilościowego należy wyprowadzić, a następnie rozwiązać równanie różnicz-

kowe odkształcenia, odpowiadające przytoczonemu modelowi. Stosując zasadę równoległo-szeregowego połączenia elementów modelu mechanicznego, odkształcenie sprężyny przyjęto: $\varepsilon_1 = \varphi \cdot \sigma_1 = \sigma_1 / E$, a tłumika $\varepsilon_2 = j \cdot \sigma_2 / E \cdot T$. Eliminując ε_1 , ε_2 , σ_1 i σ_2 , otrzymano równanie (tab. 1, model 1). Rozwiązując to równanie, uzyskano funkcję podatności. Proponowany model nie dopuszcza odkształcenia momentalnego, to znaczy nie odzwierciedla on rzeczywistego zachowania ciała sztywnego, w momencie t=0, nie można wytworzyć odkształcenia ε_0 i opisać relaksacji naprężenia. Jednak w połączeniu z innymi elementami model ten także znajduje zastosowanie.

Przy połączeniu szeregowym sprężyny i tłumika (tab. 1, model 2) dobrze jest przedstawić lepkość β wielkością $E \cdot T$ (gdzie T – stała czasu). Rozpatrzony model umożliwia opisanie praktycznie pełnej relaksacji σ do wartości σ_2 , równych zero.

Uogólnione równanie odkształceń, odpowiadające temu modelowi, można otrzymać zakładając $\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$ oraz $\mathbf{s}_2 = E \cdot T \cdot \varepsilon_2$ (tab. 1, model 2). Równanie w przypadku tych dwóch modeli jest ekwiwalentne równaniu (1) wtedy, gdy wszystkie współczynniki oprócz a_0 , a_1 i b_0 , b_1 są równe zero oraz obie części pierwszego równania podzielone są przez b_0 , a drugiego przez a_0 .

Z równania model 2 (tab. 1) wynika, że również drugi model – szeregowo połączone tłumik i sprężyna – opisują materiał niesprężysty, ponieważ umożliwia on określenie stacjonarnej podatność ciągliwości. Należy więc rozpatrzyć model składający się z trzech elementów. Model trzyelementowy jest przedstawiony w tabeli 1 (model 3). Ma on wszystkie specyficzne cechy charakterystyczne materiału niesprężystego; w tym przypadku odkształcenie na jednostkę naprężenia zmienia się od chwilowej wartości j do ostatecznej wartości podatności $j_{\sum} = j_1 + j_2$. W oparciu o ten model jest możliwe opisanie relaksacji naprężenia, ponieważ zaczynając z momentu t=0, można w nim podtrzymywać odkształcenie ε_0 ; w tym przypadku początkowo rozciągany jest tylko element – sprężyna 1, a następnie zaczyna się przemieszczać tłok tłumika 3, dopóty, dopóki naprężenie σ_3 , działające na tłumik (naprężenie na tłumiku), nie osiągnie wartości zero. Przemieszczenie to wpływa na zmniejszenie naprężenia od wartości początkowej ε_0 / j_1 do wartości końcowej ε_0 / $(j_1 + j_2)$.

Rozpatrywany model jest prosty, posiada jednak wszystkie charakterystyki materiału niesprężystego. Równanie różniczkowe opisujące taki model i jego rozwiązanie przedstawiono w tabeli 1- model 3. W przypadku elementów 1-3: $\varepsilon_1=j\cdot\sigma_1,\ \varepsilon_2=j\cdot\sigma_2,\ \varepsilon_3=j\cdot\sigma_3.$ Warunki początkowe przy rozwiązaniu równania są następujące: $\sigma=\sigma_2,\ \sigma=0,\ t\geq0,\ \varepsilon=j_1\cdot\sigma$ przy t=0. Przedstawione równanie różniczkowe trzech elementów modelu jest ekwiwalentne równaniu (1), kiedy wszystkie współczynniki oprócz $a_0,\ a_1$ i $b_0,\ b_1$ są równe zero oraz obie części równania są podzielone przez $b_0.$ Można oczekiwać, że dowolny bardziej złożony model 3-elementowy uwzględnia w równaniu różniczkowym odkształcenia pochodne wyższych rzędów, co komplikuje opis matematyczny obiektu sterowania, nie zmieniając fizycznej istoty procesu. Z rozwiązania równania wynika, że funkcja podatności jest eksponencjalną funkcją rosnącą typu $[1-\exp(-t/ts)],\ (ts-czas relaksacji przy stałym naprężeniu).$ Zgodnie z teorią stero-

wania automatycznego, wielkość tę przyjęto nazywać stałą czasową W szczególności, przy t=ts, j(t) ulegnie zwiększeniu o $(1-e^{-1})$, w stosunku do pełnej zmiany j_2 . Do określenia funkcji relaksacji naprężeń są niezbędne następujące warunki początkowe: $\varepsilon=\varepsilon_0, \varepsilon=0, t\geq 0, \sigma=E\cdot\varepsilon_0$ przy t=0. Dodatkowo wprowadzono oznaczenie $t=ts(j_1/j_2+j_2)=ts(E_2-t_1)/t_{\ell}$, gdzie $\Delta=j_1/j_2$ stopień relaksacji (wielkość bezwymiarowa). Wartość t_{ε} jest to czas, niezbędny do zmniejszenia naprężenia o ε razy, czyli t_{ε} jest czasem relaksacji naprężenia przy stałym odkształceniu. Funkcja relaksacji naprężeń jest ekspotencjalnie malejącą funkcją typu exp $\to (-t/t_{\varepsilon})$.

Łącząc kolejno *n* sprężyście-ciągliwych elementów (sprężyna wprowadzona równolegle do tłumika), otrzymano model o takich samych własnościach ogólnych, lecz o znacznie bardziej złożonej zależności procesu odkształcenia od czasu.

Połączenie równoległe *n* elementów (sprężyna połączona szeregowo z tłumikiem) tworzy model podobny do modelu 2 (tab. 1), lecz lepiej opisujący właściwości relaksacyjne materiałów rzeczywistych, w tym przypadku rozwiązanie równania wygląda następująco:

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \cdot E_m \cdot e^{-t/t_m \varepsilon}, \ t_m \varepsilon = \beta_m / E_m^{\varepsilon},$$

a przy $n \to \infty$, zamieniając stałe $E_{\rm m}$ i $E_{\rm m}^{\rm c}$ funkcję rozkładu można zapisać jako:

$$E(t)/\sigma_1 = \varepsilon_0 \int_0^\infty E(t) \cdot e^{-t/t} dt.$$

Zachowanie się półfabrykatów w trakcie nagrzewania oraz ich modele mechaniczne i matematyczne są przedstawione w tabeli 1, model 6. Przy opracowaniu schematu strukturalnego obiektu, jakim jest układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej, modele te są rozpatrywane w połączeniu z zaprezentowanymi modelami mechanicznymi (tab. 1).

W celu dalszych przekształceń matematycznych, w przypadku rozpatrywanych modeli, należy sformułować zasadę superpozycji. Jeżeli na materiał, kolejno różnych odstępach czasu, oddziałuje szereg naprężeń, to każde wpływa na odkształcenie. Sumaryczne odkształcenie spowodowane działaniem naprężeń stałych σ_1 i \mathbf{s}_2 jest równe $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$, gdzie $\varepsilon_1(t)$ i $\varepsilon_2(t)$ – odkształcenia, które powstałyby, jeżeli σ_1 i σ_2 oddziaływałyby niezależnie, analogicznie, więc odkształcenie sumaryczne $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ jest spowodowane naprężeniami $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$.

Zasada superpozycji jest najbardziej ogólnym sformułowaniem wymagania liniowości, zawartym w przytoczonym wcześniej określeniu niesprężystości.

Przeanalizowano funkcję następstwa: w momencie t_i przyłożono naprężenie σ_i , z funkcji podatności wynika, że przy t $\geq t_i$, $\epsilon(t) = \sigma \cdot j(t-t_i)$. Przy założeniu, że kolejno w czasie t_1 , t_2 ..., t_n są przykładane naprężenia σ_i (i=1,2,...,n), to zgodnie z zasadą superpozycji (jeżeli odkształcenie zmienia się dyskretnie lub ciągle) otrzymano:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{i} \cdot j(t - t_{i}) \text{ lub } \varepsilon(t) = \int_{\infty}^{t} j(t - t_{i}) \sigma_{i}(t) dt.$$
 (2)

Równanie (2) wiąże więc $\varepsilon(t)$ ze zmianami naprężenia w czasie przez funkcję podatności. Analogicznie, jeśli odkształcenie jest zmienną niezależną, a badana jest zależność naprężenia od czasu, to:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i(t - t_i) / j \text{ lub } \sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} E(t - t_i) \varepsilon(t) dt.$$
 (3)

Równania całkowe (2) i (3) wskazują, że obiekt zachowuje się w taki sposób, jakby posiadał pamięć; odkształcenie w momencie t jest związane z czasem poprzednim, poprzez zmianę naprężenia $\sigma(t)$ i podatności j(t), będących charakterystykami metalu. Ta własność pamięci pokazuje, że $\varepsilon(t)$ zależy nie tylko od chwilowej wartości $\sigma(t)$, ale również od parametrów wewnętrznych, których wartości chwilowe odtwarzają zachowanie materiału.

Jeżeli zmiany naprężenia $\sigma(t)$ w czasie przebiegają zarówno ciągle, jak i dyskretnie, to można zastosować kombinacje zależności (2) i (3), to znaczy

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i \cdot j(t - t_i) + \int_{-\infty}^{t} j(t - t_i) \sigma_i(t) dt.$$
 (4)

Do pełnej analizy obiektu sterowania – układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej rozpatrzono kilka modeli z elementem sprężysto-plastycznym (tab. 1, model 4). Połączone szeregowo: element plastyczny i sprężyna utworzą model ciała sprężysto-plastycznego. Do granicy plastyczności σ_T ciało odkształca się sprężyście, płynięcie plastyczne zachodzi przy stałym naprężeniu. Po zdjęciu obciążenia powstaje odkształcenie trwałe. Równania stanu plastycznego, wiążące naprężenia z odkształceniem, nie zawsze mają rozwiązanie z powodu złożoności procesu odkształcenia plastycznego [1, 6].

Model z elementami ciągliwo-plastycznymi (tab. 1, model 5) charakteryzuje się równoległymi połączeniami elementów ciągliwego i plastycznego. Przy naprężeniu poniżej granicy plastyczności σ_T , ciało nie ulega odkształceniu: przy $\sigma_T = const = \sigma_0 > \sigma_T$, prędkość odkształcenia jest proporcjonalna do naprężenia $\sigma_0 - \sigma_T$. Model ten opisuje materiały, które mają zauważalną plastyczność przy wysokich naprężeniach (na przykład metale w wysokiej temperaturze).

Przy jednoosiowym stanie naprężeń, równanie odkształcenia – równanie odkształcenia środowiska ciągliwo-plastycznego ma postać przedstawioną w tabeli 1, model 5. Specyfiką takich modeli jest, że w strefach o naprężeniach niezbyt dużych nie powstają odkształcenia.

Połączenie szeregowe elementów ciągliwego i plastycznego utworzy model o następujących własnościach: przy $\sigma_1 > \sigma_T$ – czynnik płynie, podobnie jak ciecz lepka;

przy $\sigma_1=R_e$ – ma miejsce płynięcie plastyczne, przy którym naprężenia nie mogą przekraczać granicy plastyczności. Dodatkowy element sprężysty włączony, do modelu ciągliwo-plastycznego, uwzględnia wpływ odkształceń sprężystych. W przypadku naprężeń niższych, niż granica plastyczności $\sigma_1<\sigma_T$, model zachowuje się jak czynnik sprężysto-plastyczny, przy $\sigma_1=\sigma_T$ występuje płynięcie plastyczne – naprężenia nie mogą być wyższe od granicy plastyczności.

Przedstawione wcześniej modele trzyelementowe, odpowiadające równaniu różniczkowemu odkształcenia, zawierające tylko naprężenia i odkształcenia oraz ich pochodne pierwszego rzędu po czasie, są modelami prostymi. W takich modelach funkcje podatności relaksacji naprężeń są funkcjami wykładniczymi, z których każda zawiera jeden czas relaksacji.

Przeanalizowano również modele bardziej złożone, opisujące niesprężyste materiały sztywne. Na podstawie modelu (tab. 1, model 1), można opisać zachowanie niesprężyste, w tym celu należy połączyć dwa modele szeregowo oraz dodatkowo włączyć szeregowo jedną sprężynę, uzyskując model zawierający pięć elementów. Równanie różniczkowe odkształcenia, zgodnie z przyjętymi wcześniej zasadami, zawiera w przypadku każdego elementu odpowiednie zależności miedzy naprężeniem i odkształceniem, bez wszystkich zmiennych oprócz naprężenia sumarycznego i odkształcenia sumarycznego.

Równanie odkształcenia przekształcane jest do równania drugiego stopnia odnośnie σ oraz ε . Odkształcenie sumaryczne jest równe sumie odkształceń $\varepsilon_{\sum} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, a więc z modelu można bezpośrednio, bez rozwiązywania równania różniczkowego, otrzymać funkcję odkształcenia:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 [1 - \exp(-t/T_{\sigma}^{(1)})] + \varepsilon_2 [1 - \exp(-t/T_{\sigma}^{(2)})]. \tag{5}$$

Funkcja odkształcenia jest sumą dwóch członów rosnących wykładniczo, a podatność na relaksację jest określana zależnością $\varepsilon_{\sum} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, przy tym $T_{\varepsilon}^{(1)}$ i $T_{\sigma}^{(2)}$ dwie wartości stałych czasowych (czas relaksacji) przy stałym naprężeniu.

Taki model nie umożliwia jednak rozwiązania zagadnienia relaksacji naprężeń, dlatego celowe jest jego przebudowanie, czyli równolegle podłączenie do dwóch równoległych modułów sprężyny (tab. 1, model 2); przy tym $E_{\sum}=E_1+E_2$. Oba równania różniczkowe opisujące model pięcioelementowy są ekwiwalentne i zawierają pięć niezależnych parametrów. Funkcję relaksacji naprężeń można zapisać w postaci sumy dwóch relaksacji wykładniczych o czasie relaksacji równym stałym czasowym $T_{\varepsilon}^{(1)}$ i $T_{\sigma}^{(2)}$:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 \exp(-t/T_{\varepsilon}^{(1)}) + \varepsilon_2 \exp(-t/T_{\varepsilon}^{(2)}). \tag{6}$$

Z przedstawionej analizy ciała sztywnego o pięciu parametrach wynika, że w przypadku standardowego ciała niesprężystego jest możliwe zastosowanie dwóch ekwiwa-

lentnych modeli, pierwszego w celu otrzymania funkcji podatności, a drugiego – funkcji naprężenia. W przytoczonych modelach nie ma masy, ponieważ powoduje ona zachowanie typu rezonansowego, a nie relaksacyjnego.

Zalety zastosowania zaprezentowanych modeli są widoczne w bardziej złożonych przypadkach, kiedy równanie różniczkowe jest rzędu wyższego niż drugi, wtedy funkcję podatności naprężenia można wyprowadzić bezpośrednio z modelu. Nie jest do tego konieczna znajomość parametrów innego modelu ekwiwalentnego oraz współczynników równania różniczkowego przedstawiającego odkształcenia. Funkcję pełzania w przypadku modelu z pięcioma parametrami można uogólnić na przypadek modelu, zawierającego kilka modeli typu (tab. 1, model 1):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon + \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{(i)} [1 - \exp(-t/T_{\sigma}^{(i)})], \qquad (7)$$

gdzie: $T_{\sigma}^{(i)}$ i $\varepsilon_{(i)}$ czas relaksacji i podatności *i*-go modelu.

Przy dużych naprężeniach, w przypadku wielu materiałów, zależność liniowa między naprężeniem i odkształceniem nie znajduje potwierdza w badaniach eksperymentalnych. Należy wtedy stosować zależności nieliniowe, które są jednak trudne do realizacji [7, 8] – bardziej właściwym rozwiązaniem jest zastosowanie równania przedłożonego w pracy [9]:

$$\varphi(\varepsilon_1) = \sigma_1(t) + \int_0^t Q(t - t_1) \cdot \sigma_1(t_1) dt_1, \qquad (8)$$

gdzie: t_1 czas przyłożenia obciążenia – jeżeli t jest niewielki, to odkształcenie działania wtórnego, opisywane członem całkowym, jest małe czyli $\sigma_1 = \varphi(\varepsilon_1)$.

Równanie (8) w stosunku do funkcji $\varphi(\epsilon_1)$ jest liniowe. Rozwiązując je względem σ_1 , otrzymano zależność:

$$\sigma_1(t) = \varphi(\varepsilon_1) - \int_0^t R(t - t_1) dt_1, \qquad (9)$$

gdzie: $R(t-t_1)$ – współczynnik relaksacji.

Z rozwiązania równania (8) przy naprężeniu $\sigma_1 = const = \sigma_0$ wynika, że:

$$\varphi(\varepsilon_1) = [1 + K(t)]\sigma_0, K(t) = \int_0^t Q(t - t_1)dt_1,$$

to znaczy krzywe odkształcenia przy ustalonych naprężeniach są podobne. W przypadku relaksacji, stała odkształcenia $\varepsilon_1 = const = \varepsilon_0$, z równania (9) uzyskuje się

$$\sigma_{\Gamma} = [1 - L(t)] \varphi(\varepsilon_0), \ L(t) = \int_0^t R(t - t_1) dt_1.$$
 (10)

Jeżeli rozciąganie początkowe realizowane jest szybko, to w związku z relaksacją $\sigma_1 = \phi(\epsilon_0)$ można zapisać:

$$\sigma_1 / \sigma_0 = 1 - L(t), \tag{11}$$

czyli krzywe relaksacji również są podobne.

PODSUMOWANIE

Stwierdzono, że paczenie półfabrykatu jest funkcjonalnie powiązane z niejednorodnością odkształcenia plastycznego i pola temperaturowego oraz różnym charakterem odkształceń plastycznych i sprężystych przy zdejmowaniu obciążenia. Analogiczny proces zachodzi także z naprężeniami szczątkowymi, ich relaksacja zaczyna się niejednocześnie i w różnych częściach wyrobu zarówno w przekroju poprzecznym jak i wzdłużnym.

Przeanalizowano modele sterowania: odkształceniem sprężysto-plastycznym; niezmien-nością obciążeń zewnętrznych i procesem zdejmowania obciążenia. Do jakościowego zbadania procesów opracowano równania opisujące układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej jako obiekt sterowania.

Przedstawiono proste modele trzyelementowe, odpowiadające równaniu różnicz-kowemu odkształcenia i zawierające tylko naprężenia i odkształcenia oraz ich pochodne pierwszego rzędu. W takich modelach funkcje podatności na relaksację naprężeń są funkcjami wykładniczymi, z których każda zawiera jeden czas relaksacji.

Przeanalizowano również modele bardziej złożone, opisujące materiały sztywne. W oparciu o nie można opisać również zachowanie niesprężyste, w tym celu należy połączyć dwa modele szeregowo oraz dodatkowo włączyć szeregowo jedną sprężynę, uzyskując model zawierający pięć elementów. Równanie różniczkowe odkształcenia zawiera w przypadku każdego elementu odpowiednie zależności miedzy naprężeniem i odkształceniem, bez wszystkich zmiennych oprócz naprężenia sumarycznego i odkształcenia sumarycznego.

Zalety zastosowania opracowanych modeli są widoczne w bardziej złożonych przypadkach, kiedy równanie różniczkowe jest rzędu wyższego niż drugi, wtedy funkcję podatności naprężenia można wyprowadzić bezpośrednio z modelu. Nie jest do tego konieczna znajomość parametrów innego modelu ekwiwalentnego oraz współczynników równania różniczkowego odkształcenia.

PIŚMIENNICTWO

1. Drachev A.O., Drachev O. I., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Swic A.: Termosilovaja obrabotka stupenchatykh osesimmetrichnykh detalej. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2009: 18–21.

- 2. Drachev A.O., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Swic A.: Sposob termomekhanicheskoj obrabotki nezhestkikh dlinnomernyh valov. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2009:. 56–59.
- 3. Drachev O.I.: Tekhnologija izgotovlenija malozhestkikh osesimmetrichnykh detalej. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politekhnika, 2005, 289 s.
- 4. Draczow O., Taranenko W.: Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długich. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 230 Mechanika, z. 67 Modułowe technologie i konstrukcje w budowe maszyn. Rzeszów 2006: 47–50.
- 5. Drachev O.I., Taranenko G.V., Taranenko V.A. Ehksperimental'nye issledovanija stabilizacii osi malozhestkoji detali pri ispolzovanii samocentrirujushikh lunetov. Mashinostroitelnye tekhnologii i tekhnika avtomatizacii. GIUA, Erevan 2008.
- 6. Draczov O., Taranenko W., Świć A., Halas W.: Controlling thermal deformations during mechanical shafts processing. Progressivnye tehnologii i sistemy mašinostroeniâ: Meždunarodnyj sbornik naučnyh trudov. Doneck: DonNTU, 2007. Vypusk 34: 278–283.
- Garbarczuk W., Zinowicz Z., Świć A.: Kiberneticheskiji podkhod k proektirovaniju sistem zashity informacii. Ukrainskaja Akademija Informatiki, Volynskiji Gosudarstvennyjj Universitet im. Lesi Ukrainki, Lublinskij Politekhnicheskij Universitet. Kiev-Luck-Lublin 2003, 657s.
- 8. Koptev D.V. Zakonomernosti dvizhenija chastic pyli v zone dejjstvija mestnogo iznosa. VCSPS NII OT. Sb. nauchn. rab. institutov OT. VCSPS. M. Vyp. 57, 1982: 9–14.
- 9. Postnikov V. S.: Vnutrennee trenie v metallakh. M.: Metallurgija, 1974, 23 s.
- Taranenko W., Taranenko G., Szabelski J., Świć A.: Identyfikacja układu dynamicznego szlifowania wałów o małej sztywności. Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny. Modelowanie Inżynierskie, Tom 4, Nr 35, Czerwiec 2008. Gliwice: Zakład Graficzny Politechniki Śląskiej. 2008: 115–130.
- Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.: Indentification and automation of shaft machining in elastic-deformable condition. Information systems architecture and technolodgy, Model Based Decisions, Part IV, Wrocław Uniwersity of Technolodgy. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2008: 203–223.
- 12. Ivanov O., Draczov O., Taranenko V., Swic A.: *Mathematical models of chip formation during the process of turning*. Acta Mechanica Slovaca, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice, Kosice, 2-A/2007, Rocnik 11:183–188.

MODELLING OF THE DYNAMIC SYSTEM OF THERMO-MECHANICAL PROCESSING OF NON-RIGID SHAFTS

Summary

The methodology of formulating mathematical models of thermo-mechanical processing of non-rigid shafts was presented in the article. The analysis of models of control was introduced for following parameters: the elastic and plastic deformation, the invariability of external loads and the processes of loads removal. The mathematical model of dynamic system of thermo-mechanical processing of non-rigid shafts was built for qualitative analysis of processes. Simple three-element models were introduced, describing only strains and stresses. More detailed mathematical models describing also inelastic solid bodies were analyzed as well.

Keywords: modeling, dynamic system, non-rigid shafts, thermo-mechanical processing.

Jerzy Józwik¹⁾, Maciej Włodarczyk¹⁾, Tomasz Ścierka¹⁾

MODEL GEOMETRYCZNY I KINEMATYCZNY PIONOWEGO CENTRUM OBRÓBCZEGO CNC FV 580A

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwości systemu NX jako zintegrowanego środowiska programowego CAD/CAM/CAE. Opisano proces tworzenia modelu geometrycznego i kinematycznego centrum frezarskiego FV-580A. Proces budowy wirtualnej maszyny przeprowadzono w środowisku konstruktora obrabiarek MTB (Machine Tool Builder) programu NX. Na zbudowanym modelu wirtualnym przeprowadzono symulację i weryfikację ruchów.

Słowa kluczowe: modelowanie, projektowanie, systemy CAD/CAM, model geometryczny, model kinematyczny, symulacja, NX system.

WPROWADZENIE

Nieodłącznymi narzędziami nowoczesnego inżyniera są programy wspomagające procesy projektowania *CAD/CAM/CAE* [2]. Szczególne miejsce w grupie narzędzi tego typu zajmuje system *NX* firmy *Siemens PLM Software* [11–12]. Szeroko rozwinięte funkcje modułu *CAD* oraz *CAM* sytemu *NX* dostarczają narzędzi wspomagających projektowanie i wytwarzanie, co zwiększa wydajności pracy inżynierów, konstruktorów, technologów i programistów maszyn. Budowanie wirtualnych parków maszynowych pozwala na projektowania procesów technologicznych bez konieczności eksperymentowania na maszynie rzeczywistej. Daje to możliwości tworzenia wirtualnych laboratoriów, w których prowadzenie działań dydaktycznych jest możliwe bez konieczności zakupu drogich i zajmujących dużo miejsca obrabiarek. Symulacja kinematyczna maszyn o geometrii modeli *3D*, pozwala w maksymalny sposób na przybliżenie się do rzeczywistego procesu, realizowanego fizycznie na maszynie [1, 3–9].

METODYKA I ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Proces budowy wirtualnej obrabiarki CNC w środowisku programu *NX* poprzedziła analiza zasadności tworzenia wirtualnych modeli kinematycznych. Zapoznano się z tematyką tworzenia kinematycznych modeli obrabiarek w systemie *NX*. Przed wykonaniem geometrycznego i kinematycznego modelu wirtualnej obrabiarki *CNC* przyjęto następujące założenia:

¹⁾ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

- zostanie wykonany model geometryczny i kinematyczny centrum frezarskiego FV-580A będącego na wyposażeniu Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej,
- do tworzenia geometrii modelu zostanie wykorzystana dokumentacja dostarczona przez dystrybutora maszyny oraz pomiary bezpośrednie maszyny,
- tworzony model będzie wiernie odwzorowywał przestrzenie robocze obrabiarki,
- utworzona kinematyka będzie współpracować z dostępnym postprocesorem,
- możliwa będzie symulacja procesów obróbki w znacznym stopniu zbliżonych do rzeczywistych.

Zakres prac przygotowawczo-projektowych obejmował:

- zapoznanie się z dokumentacją centrum frezarskiego FV-580A [10],
- przeprowadzenie niezbędnych do wykonania modelu 3D pomiarów gabarytów, przestrzeni obróbkowych, poszczególnych zespołów ruchowych maszyny nie uwzględnionych w dokumentacji,
- wykonanie modelu 3D centrum frezarskiego FV-580A,
- zapoznanie się z funkcjami modułu budowy kinematyki obrabiarki MTB (Machine Tool Builder) oraz działaniem aplikacji Post Builder systemu NX,
- wykonanie kinematycznego modelu obrabiarki na podstawie utworzonej wcześniej geometrii 3D zespołów obrabiarki.

Proces budowy wirtualnej maszyny przeprowadzono w środowisku konstruktora obrabiarek MTB (*Machine Tool Builder*) programu NX, przy pomocy którego możliwe jest:

- budowanie wirtualnych modeli obrabiarek i narzędzi,
- stosowanie modeli geometrycznych 3D do definiowania zespołów obrabiarki,
- definiowanie kinematyki poszczególnych członów,
- animacja ruchów według ustawionych osi maszyny do celów testowych,
- edycja podzespołów poprzez drzewo złożenia.

PROCES TWORZENIA MODELU KINEMATYCZNEGO OBRABIARKI

Model kinematyczny obrabiarki w programie NX wykonano jako złożenie brył geometrycznych elementów reprezentujących poszczególne zespoły wykonawcze maszyny. Kinematyka maszyny jest dodawana do modelowanych zespołów i zawiera się w pliku złożenia. Stopień odwzorowania rzeczywistej obrabiarki odzwierciedla gabaryty maszyny, tak aby możliwe było symulowanie pełnej przestrzeni roboczej obróbki. Model kinematyki określa związek pomiędzy częściami składowymi maszyny, określa również nazwy osi i wartości graniczne przemieszczeń [11].

Proces tworzenia modelu kinematycznego centrum frezarskiego *FV-580A* ze sterowaniem Fanuc 0iMC, przy pomocy konstruktora *MTB* obejmował:

- wykonanie złożenia modelu 3D centrum frezarskiego FV-580A,
- zdefiniowanie kinematyki w module budowy obrabiarki MTB,

- wygenerowanie wirtualnego kontrolera VNC w aplikacji Post Builder,
- konfigurację instalacji obrabiarki.
 - Model przeznaczony do konfiguracji kinematyki musi spełniać szereg wymagań:
- geometria złożenia maszyny musi zawierać podstawowe zespoły: korpusy, stoły, prowadnice, wrzeciona, obudowy odwzorowujące przestrzeń roboczą,
- w katalogu o przywoływanej z biblioteki nazwie maszyny muszą znajdować się wszystkie części złożenia obrabiarki,
- w bibliotece obrabiarek musi być dokonany wpis w "akta" w pliku machine_database.dat, aby obrabiarka mogła być wczytywana,
- w katalogu postprocesor musi być utworzony plik tekstowy *.ascii, w którym zdefiniowano postprocesor maszyny.

Złożenia modelu 3D centrum obróbkowego FV-580A

Budowa kinematyki obrabiarki w systemie *NX* jest możliwa po uprzednim wykonaniu modeli *3D* poszczególnych podzespołów. Polega ona na utworzeniu brył geometrycznych poszczególnych elementów, a następnie wykonaniu złożenia zespołów wykonawczych maszyny.

Na podstawie dokumentacji przekazanej przez producenta maszyny oraz dodatkowych pomiarów obrabiarki zbudowano model 3D pionowego centrum frezarskiego FV-580A [10]. Do utworzenia geometrii części użyto narzędzi modułu NX Modeling (rys. 1), natomiast do modelowania obudów wykorzystano moduł NX Sheet Metal (rys. 2).



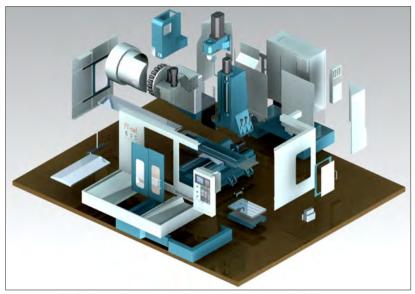
Rys. 1. Części składowe pionowego centrum obróbkowego FV580-A zaprojektowane w module Modeling

Wykonano modele *3D* poszczególnych zespołów: łoża, słupa, sań, prowadnic, silników i obudów. Jest to wystarczające, aby odwzorować przestrzeń roboczą obrabiarki.

Na rysunku 3 przedstawiono widok *3D* złożenia zespołów modelowanej obrabiarki *FV-580A*. Złożenie modelu obrabiarki zostało wykonane w specjalny sposób po to, by możliwe było łatwe zdefiniowanie kinematyki. Poszczególne części pogrupowano w zależności od ruchów jakie będą wykonywać w modelu kinematycznym. Stół obrabiarki został połączony w zespół z każdym elementem poruszającym się w osi X maszyny. Podobnie, sanie osi Y oraz wrzeciennik poruszający się w osi Z, zostały połączone w osobne zespoły ruchowe. Tak przygotowany model posłużył do zbudowania (na jego podstawie) kinematyki w module *MTB*.



Rys. 2. Osłona pionowego centrum obróbkowego FV-580A zaprojektowana w module NX Sheet Metal



Rys. 3. Widok 3D podzespołów pionowego centrum obróbkowego FV-580A

Definiowanie kinematyki obrabiarki w module Machine Tool Builder MTD

Definiowanie kinematyki wirtualnej obrabiarki w konstruktorze obrabiarek *MTB* polega na określeniu relacji między składnikami modelu maszyny oraz określeniu kierunków i ograniczeń ruchu osi sterowanych X, Y, Z. *MTB* opiera się na strukturze drzewa (rys. 4) do reprezentacji modelu tworzonej kinematyki. Drzewo to zawiera wszystkie elementy kinematyki i pokazuje relacje między każdym z tych elementów.

Podobnie jak w module *Assembly* w drzewie *MTN* (*Machine Tool Navigator*) obowiązuje zasada struktury złożenia *Master Model*. Struktura ta polega na ustanowieniu hierarchii części w zespole na zasadzie rodzic – dzieci (*Parent – Children*). Każda część typu rodzic jest nadrzędna w stosunku do dzieci. Przejawia się to tym, że podczas definiowania kinematyki każde dziecko porusza się w zespole ze swoim rodzicem (rys. 4).

Name		Classification	Axis Name	NC Axis	Axis Type	Axis Limits	Junctions
FV-580A							
■ MACHINE_BA	SE	_MACHINE_BASE					MACHINE_ZERO*
□ Z_BASE							
SPINDLE			Z	4	Linear	510	TOOL_MOUNT_JCT
⊕ Y_BASE							
∃ Y_SLIDE			Y	4	Linear	420, 0	
⊕ X_SLIDE			X	4	Linear	580, 0	
É- SETUP		_SETUP_ELEMENT					PART_MOUNT
	BLANK	_WORKPIECE, _SETUP_ELE					
	FIXTURE	_SETUP_ELEMENT					
	PART	_PART, _SETUP_ELEMENT					

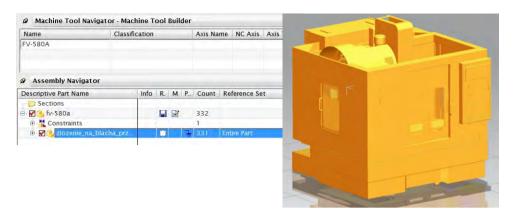
Rys. 4. Drzewo złożenia Machine Tool Navigator pionowego centrum frezarskiego FV-580A

Wykorzystując przygotowany odpowiednio w module *Assembly model 3D*, budowany w strukturze *Master Model*, nadano składniki fizyczne maszyny, nazywane *K- Components*.

K-Components są to części reprezentowane przez zespoły modelowane i są określone w *Machine Tool Builder* jako odniesienia do złożenia w *Assembly*. W budowanej kinematyce w skład *K-Components* wchodzą części złożenia: baz stałych (łoże i słup frezarki), części ruchome osi X (stół, korpusy i obudowy sań), części ruchome osi Y (korpusy i obudowy sań), części ruchome osi Z (wrzeciennik, wrzeciono, obudowy wrzeciona).

Budowę obrabiarki rozpoczęto od nadania jej nazwy FV-580A w MTN i dodania całego złożenia części z modułu Assembly (rys. 5). Jest to ważny krok, ponieważ pod taką nazwą maszyna będzie wywoływana z biblioteki do programu obróbkowego.

Pierwszym z określonych komponentów obrabiarki w drzewie *MTN* była baza maszyny (*MACHINE BASE*), za którą przyjęto łoże obrabiarki. Jest to część modelu 3D w pełni utwierdzona przy pomocy *Assembly Constaints* typu *Fix*.



Rys. 5. Operacja dodania złożenia do modułu MTB

Po określeniu bazy należy określić układ współrzędnych obrabiarki. W tym celu utworzono na bazie maszyny komponent skrzyżowanie – *Junctions*. *Junctions* służy do klasyfikacji układów współrzędnych, przypisania im nazw i funkcji.

Definiuje się układy współrzędnych dla:

układu zerowego maszyny,

Odległość wrzeciona od stołu

- układu automatycznego montażu narzędzi,
- układu montażu przedmiotów obrabianych.

Układy te są także używane do definiowania osi *NC* i są na trwałe związane z poszczególnymi komponentami (poruszają się razem z nimi).

Bazowym nieruchomym układem przy pomocy którego definiowane są osie *NC* i ograniczenia maszyny jest układ zerowy (*MACHINE_ZERO*). Zdefiniowano go dynamicznie przy pomocy umieszczonego w złożeniu punktu i układu absolutnego maszyny. Punkt ten zdefiniowano na podstawie danych z instrukcji dostarczonej przez producenta maszyny o ograniczeniach ruchu obrabiarki (tab. 1).

Punkt zerowy umiejscowiono zgodnie z instrukcją użytkowania [10] w odległości 610mm od płaszczyzny stołu, w odległości 35 mm od krawędzi bocznej, stycznie do krawędzi tylnej stołu (rys. 6).

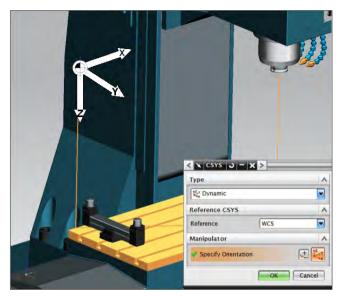
Układ zerowy zdefiniowano w punkcie zerowym przy pomocy *Dynamic CSYS*, następnie obrócono go w celu poprawnego określenia kierunków osi (rys. 6). W na-

Przesuwy	Jednostka	Wartość
Przesuw w osi "X"	mm	580
Przesuw w osi "Y"	mm	420
Przesuw w osi "Z"	mm	510

mm

100-610

Tabela 1. Wielkości charakterystyczne zakresów ruchów centrum frezarskiego FV-580A [15]



Rys. 6. Określenie punktu zerowego układu współrzędnych obrabiarki

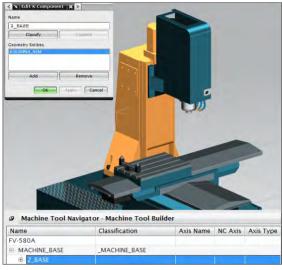
stępnym kroku nadano klasyfikację układu jako *Machine Zero* przez polecenie *Junction Classification* (rys. 7).

Dopiero po klasyfikacji system odnosi się do utworzonego układu jako zerowego wirtualnej obrabiarki. W podobny sposób definiowane są układy współrzędnych montażu narzędzi i przedmiotów obrabianych. W następnym kroku dodano *K-Component* dla osi Z, będącego nieruchomą bazą dla komponentu wrzeciona, poprzez opcję *Insert K-Components* do bazy maszyny *MACHINE_BASE* (rys. 8). Po ustawieniu bazy dla wrzeciona, możliwe było dodanie komponentu wrzeciona (*SPINDLE*). Jako wrzeciono zdefiniowano części pokazane na rysunku 9.

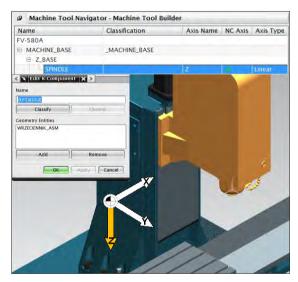
Są to wszystkie elementy poruszające się razem w osi Z. Dodanie osi *NC* przeprowadzono na bazie wrzeciona *Z_BASE* przez użycie *Insert Axis*. Jest to przypisanie do ruchu komponentu wrzeciona. W oknie *Edit Axis* (rys. 10) nadano nazwę osi i ustawiono przynależności osi do układu współrzędnych poprzez *Select Junction*.

Junction Class				
None	○Tool Mount	OLathe Work Plane Z/X OLathe Work Plane X/Y		
Machine Zero	○Tool Tip			

Rys. 7. Okno klasyfikacji zerowego układu współrzędnych



Rys. 8. Klasyfikacja K-Component Z_BASE



Rys. 9. Klasyfikacja K-Component SPINDLE

Określono typ osi jako liniową i zaznaczono *NC Axis* po to, by oś była traktowana jako sterowana w programie NC. Następnie nadano ograniczenia drogi komponentów osi Z do wartości 510 mm, poprzez opcje *Axis Limits* (rys. 10).

Użytkownik ma możliwość sprawdzenia ustawionej kinematyki osi przez *Test Axis*. Animacja ruchu może być wykonywana w ustawionych krokach lub trwać do osiągnięcia punktów granicznych ruchu. Daje to możliwość sprawdzenia poprawność ustawionych kierunków i limitów przesuwu lub obrotu.

Kolejnym krokiem było zdefiniowanie układu współrzędnych automatycznego montażu narzędzi (rys. 11).

Do komponentu *SPINDLE* dodano *Junction* i ustawiono układ współrzędnych przy pomocy *Dynamic CSYS*, centrycznie w płaszczyźnie montażu oprawki narzędziowej. Ważne jest ustawienie układu współrzędnych wymiany narzędzi z kierunkiem osi X zgodnym z osią symetrii narzędzia (rys. 11). System automatycznej wymiany narzędzia pozycjonuje mocowane narzędzie w osi X układu wymiany, dlatego też bardzo ważne jest poprawne zdefiniowanie tego układu. Konieczne jest także sklasyfikowanie układu odniesienia narzędzi, podobnie jak podczas definiowania zerowego układu współrzędnych.

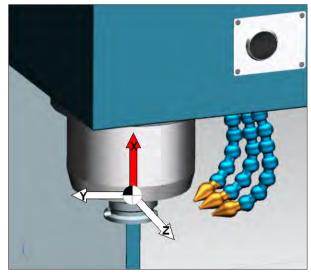
W oknie *Junction Classification* (rys. 12) nadano układowi oznaczenia *Tool Mo-unt*. Wirtualny kontroler *VNC* podczas postprocesingu odnosi się do przypisanych tutaj informacji.

W dalszym etapie konfiguracji wirtualnej obrabiarki przeprowadzono instalację komponentów osi X a następnie osi Y (rys. 13). Proces ten przebiegał w ten sam sposób jak przy konfiguracji komponentów osi Z. Do *MACHINE_BASE* dodano *K-Component* bazę osi Y (*Y BASE*), za które przyjęto łoże wraz z listwami prowadnicowymi (rys.13b).

Następnie do *Y_BASE* dodano *K-Component* zespołu osi Y (*Y_SLIDE*) i zdefiniowano w nim oś Y. W oknie *Edit Axis* przypisano oś do *MACHINE_ZERO* oraz oznaczono oś jako liniową oś NC. Nadano ograniczenie przesuwu 420 mm i sprawdzono poprawność ruchu przez funkcje *Test Axis* (rys.13b).



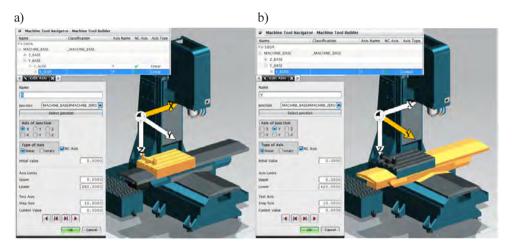
Rys. 10. Okno edytora osi Edit Axis



Rys. 11. Widok zdefiniowanego układu współrzędnych montażu narzędzi



Rys. 12. Okno klasyfikacji układu współrzędnych montażu narzędzi



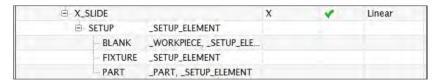
Rys. 13. Klasyfikacja komponentów i ustawień: a) dla osi X, b) dla osi Y

Ostatnią definiowaną osią była oś X (rys. 13a). Konfiguracja osi, w której zamontowany jest stół frezarki, do którego będzie instalowany przedmiot obrabiany przebiega w odmienny sposób. Komponenty osi X nie posiadają własnej bazy ponieważ ich ruch odbywa się wraz z częściami osi Y, więc do bazy osi Y dodano *K-Component* osi X (*X_SLIDE*).

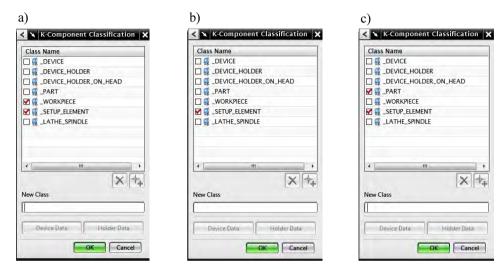
W drzewie nawigatora *MTN* widoczna jest hierarchia komponentów osi X podrzędna osi Y (rys. 13a). Do *K-Component* osi X dodano *Axis* X jako liniową oś *NC* i wprowadzono limit przesuwu na wartość 580mm. Sprawdzono poprawność ruchu przez funkcje *Test Axis*.

Ostatnim etapem definiowania 3-osiowej struktury centrum obróbkowego FV-580A jest konfiguracja komponentów łączących symulację, z programem CAM środowiska Manufacturing NX. Za takie połączenie opowiada K-Component o nazwie SETUP. Został on wstawiony do komponentów osi bezpośrednio współpracujących z obrabianym przedmiotem, w tym przypadku osi X.

Do komponentu *SETUP* dołączono elementy definiujące przygotówkę *BLANK*, uchwyt *FIXTURE* i przedmiot obrabiany *PART* (rys.14). Elementy te sklasyfikowano odpowiednio w oknie *K-Component Classification* w celu przyporządkowania jako elementy instalacyjne (rys. 15).



Rys. 14. Konfiguracja komponentów instalacyjnych SETUP dla osi X



Rys. 15. Klasyfikacja K-Component dla elementów: a) przygotówek, b) uchwytów, c) części obrabianych

Podczas wywoływania z biblioteki wirtualnej obrabiarki elementy typu *SETUP* muszą zostać zdefiniowanie na przedmiocie obrabianym w programie obróbki. Zdefiniowana w przedstawiony sposób wirtualna obrabiarka może być dodana do biblioteki maszyn w programie *NX*. W konstruktorze obrabiarek *MTB* możliwe jest zdefiniowanie magazynu narzędziowego w celu symulacji operacji wymiany narzędzia. W pracy ograniczono się do symulacji wymiany narzędzia prowadzonej bezpośrednio do wrzeciona, ze względu na brak kontrolera *VNC* wykonującego taką operację.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowany proces budowy i symulacji wirtualnej obrabiarki pozwala stwierdzić, że:

- wirtualny model kinematyczny pionowego centrum frezarskiego FV-580A odwzorowuje ograniczenia ruchu osi i przestrzeni obróbkowej,
- zbudowana kinematyka ma możliwość współpracy za pośrednictwem wirtualnego kontrolera z postprocesorem używanym na obrabiarce,
- wykonana symulacja została bezkolizyjnie odwzorowana na rzeczywistej maszynie,

Przeprowadzona symulacja pozwoliła na pełne odwzorowanie rzeczywistego procesu obróbki poprzez obserwację ruchów modelu wirtualnej obrabiarki, wychwycenie kolizji i pomiar czasu obróbki bez fizycznego kontaktu z maszyną rzeczywistą. Porównanie symulacji wirtualnej obrabiarki z rzeczywistym obiektem dało obraz zasadności tworzenia tego typu modeli kinematycznych i pokazało w jaki sposób zaawansowane techniki symulacji umożliwiają odzwierciedlenie rzeczywistego procesu na maszynie. Budowanie wirtualnych parków maszynowych pozwala na projektowanie procesów technologicznych bez konieczności eksperymentowania na maszynie rzeczywistej. Uzyskane rezultaty modelowania i definiowania kinematyki dały możliwości tworzenia wirtualnych laboratoriów, w których prowadzenie działań dydaktycznych jest możliwe bez konieczności zakupu drogich i zajmujących dużo miejsca obrabiarek. Symulacja kinematyczna maszyn o geometrii modeli 3D, pozwala w maksymalny sposób na przybliżenie się do rzeczywistego procesu, realizowanego fizycznie na maszynie.

LITERATURA

- 1. Frączek J., Wojtyra M. Kinematyka układów wieloczłonowych. WNT, Warszawa 2008.
- 2. Habrat W. Obsługa i programowanie obrabiarek CNC. Wydawnictwo i Handel Książkami "KaBe", Krosno 2007.
- 3. Honczarenko J. Elastyczna automatyzacja wytwarzania. WNT, Warszawa 2000.
- 4. Honczarenko J. Obrabiarki sterowane numerycznie. WNT, Warszawa 2008.
- 5. Kosmol J. Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem . WNT, Warszawa 2000.
- 6. Kosmol J. Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie. WNT, Warszawa 1998.
- 7. Sobolewski J. Przekładnie śrubowe kulkowe. WNT, Warszawa 2009.
- 8. Wrotny L.T. Kinematyka i dynamika maszyn technologicznych i robotów przemysłowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
- Szafarczyk M., Niedbała M. Obrabiarki modułowe, przekształcalne, przestawialne. Mechanik, nr 12, 2003.
- 10. Instrukcja użytkowania Centrum obróbkowe pionowe FV-580A MOC MECHANICY Sp. z o.o.
- 11. http://www.siemens.com/plm (2010-09-12).
- 12. http://www.automatyka.siemens.pl/(2010-09-28).

GEOMETRIC AND KINEMATICS MODEL OF VERTICAL CNC MACHINE CENTRE FV580

Summary

In this paper possibilities of NX system as CAD/CAM/CAE software are presented. Geometry and kinematics modelling process of 4-axial vertical CNC machine centre is described. It was carried out with use Machine Tool Builder Software in NX system. Simulation and verification of the correctness of movements were carried out on this model.

Key words: modelling, design, CAD/CAM systems, geometric model, kinematics model, simulation, NX system.

Jerzy Józwik¹⁾, Maciej Włodarczyk¹⁾, Tomasz Ścierka¹⁾

WIRTUALNY KONTROLER VNC PIONOWEGO CENTRUM OBRÓBKOWEGO FV 580A

- symulacja, weryfikacja i analiza porównawcza procesu obróbkl

Streszczenie. W pracy przedstawiono proces generowania wirtualnego kontrolera VNC w aplikacji Post Builder systemu NX z uwzględnieniem typu sterowania maszyny. Skonfigurowano wykonany model kinematyczny wraz z kontrolerem i postprocesorem w bibliotece systemu NX. Przygotowano do obróbki przykładowe modele przy wykorzystaniu Synchronous Technology oraz wykonano program obróbki. Przeprowadzono weryfikację ścieżek i symulację obróbki. W końcowej części pracy porównano zasymulowaną obróbkę z rzeczywistym procesem frezowania podczas prób na maszynie.

Słowa kluczowe: sterownik, obrabiarka CNC, symulacja, system NX, weryfikacja programu, skrawanie.

WPROWADZENIE

Nieodłącznymi narzędziami nowoczesnego inżyniera są programy wspomagające procesy projektowania *CAD/CAM/CAE* [1-5]. Szczególne miejsce w grupie narzędzi tego typu zajmuje system NX firmy *Siemens PLM Software* (rys. 1). Szeroko rozwinięte funkcje modułu *CAM* sytemu *NX* dostarczają inżynierom narzędzi wspomagających wytwarzanie. Technolog programista obrabiarki ma możliwość programowania skomplikowanych ścieżek narzędzi przy pomocy szerokiej gamy metod i strategii obróbki. System *NX* dostarcza zaawansowanych rozwiązań w zakresie programowania maszyn *CNC* oraz symulacji i weryfikacji programowanych ścieżek narzędzi. Daje możliwość budowy wirtualnych obrabiarek, w specjalnie do tego celu przygotowanym środowisku konstruktora obrabiarek *MTB* (*Machine Tool Builder*). Pozwala to na dostosowanie symulowanych procesów technologicznych do własnej maszyny i maksymalną zbieżność symulacji do rzeczywistego procesu obróbki [11–13].

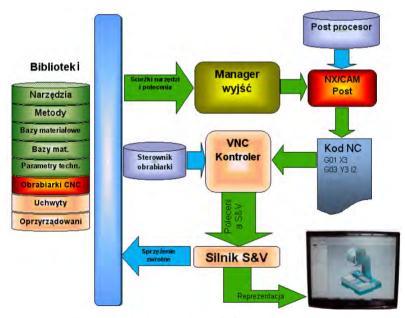
Kompletna symulacja jest możliwa dzięki zastosowaniu techniki posprocesingu odwrotnego. Specjalnie przeznaczone do tego celu komponenty systemu pozwalają na prowadzenie symulacji na podstawie rzeczywistego postprocesora, poprzez zastosowanie do tego celu kontrolera wirtualnego. Środowisko programowe systemu NX oferuje użytkownikowi moduł Manufacturing, a w nim szereg przydatnych narzędzi optymalizujących projektowanie. Programista ma dostęp do baz danych procesów techno-

¹⁾ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

logicznych, baz materiałowych i narzędziowych [1, 11–13]. Schemat działania oraz obiegu informacji w systemie wirtualnej symulacji i weryfikacji przedstawiono na rysunku 2.



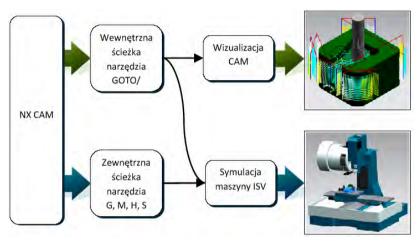
Rys. 1. Możliwości modułu Manufacturing systemu NX [11]



Rys. 2. Schemat działania oraz obiegu informacji w systemie wirtualnej symulacji i weryfikacji [11]

Dostęp do baz informacji technologicznych, materiałowych i narzędziowych oraz obrabiarek skraca proces przygotowania produkcji. Rozbudowany moduł weryfikacji ścieżek i symulacji obróbki, pozwala bezpieczniej i efektywniej wykorzystywać możliwości zastosowanych obrabiarek. Na rysunku 3 przedstawiono schemat sposobów realizacji wizualizacji i symulacji CAM w systemie NX.

Symulacja kinematyczna maszyn o geometrii modeli 3D, pozwala w maksymalny sposób na "przybliżenie" się do rzeczywistego procesu, realizowanego fizycznie na maszynie [6–10].

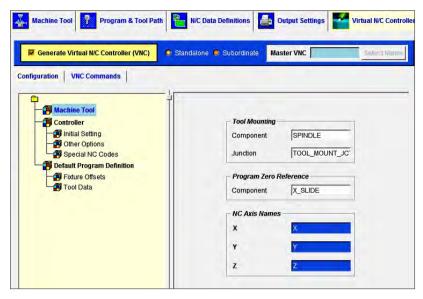


Rys. 3. Schemat sposobów realizacji wizualizacji i symulacji CAM w systemie NX

Generowanie wirtualnego kontrolera VNC w aplikacji Post Builder

System NX zawiera aplikację *Post Builder* umożliwiającą tworzenie postprocesorów dla obrabiarek o wielu osiach sterowanych numerycznie (od 2 do 5 osi). Aplikacja ta funkcjonuje przy wykorzystaniu okien dialogowych i schematów blokowych (rys. 4).

Aplikacja *Post Builder* pozwala na wykorzystanie poszczególnych części dostępnych postprocesorów, w celu zbudowania własnego postprocesora. Na podstawie pliku źródłowego postprocesora centrum frezarskiego *FV-580A* ze sterowaniem *Fanuc 0iMC*, po jego otwarciu w środowisku aplikacji *Post Builder* systemu *NX* wygenerowano kontroler wirtualny. *VNC* kontroler jest odpowiednikiem postprocesora dla rzeczywistej maszyny. Napisany jest w języku skryptowym *tcl*, ale może być również opracowany w językach wyższego poziomu takich jak C++. Podobnie jak postprocesor konwertuje kod generowany przez program *CAM* na kod obsługiwany przez maszynę. *VNC* kontroler generuje kod odczytywany w środowisku wirtualnej obrabiarki. *VNC* kontroler współpracuje bezpośrednio ze sterownikiem *Machine Tool Driver* odwołując się do sklasyfikowanych w konstruktorze obrabiarek komponentów maszyny.



Rys. 4. Okno Post Builder podczas generowania Virtual NC Controller

Jest to działanie nazywane postprocesingiem odwrotnym. Wirtualny kontroler jest programowalnym interfejsem, który uruchamia model obrabiarki generując rzeczywiste ruchy, które są wyświetlane w trakcie symulacji obrabiarki. Wygenerowany kontroler *VNC* zapisano wraz z plikami źródłowymi postprocesora. Posłużyło to do dalszej konfiguracji wirtualnego centrum obróbkowego.

Konfiguracja instalacji obrabiarki w bibliotece maszyn programu NX

Wirtualna maszyna może zostać użyta do symulacji obróbki wyłącznie przez wywołanie jej z biblioteki obrabiarek systemy *NX*. W tym celu dodano zbudowany model kinematyczny wraz z postprocesorem i kontrolerem *VNC* do biblioteki maszyn *NX*. Biblioteki obrabiarek znajdują się w katalogu: \MACH\resource\library\machine\installed_machines. Utworzono nowy katalog pod nazwą "fv-580a", w którym umieszczono wszystkie pliki związane z modelem kinematycznym obrabiarki. W katalogu "graphics" umieszczono złożenie modelu z kinematyką utworzoną w konstruktorze *MTB*. W katalogu o przywoływanej nazwie maszyny muszą znajdować się wszystkie części złożenia obrabiarki. Następnie w katalogu "fanuc_postprocessor" umieszczono pliki postprocesora i kontrolera *VNC*. Wczytywanie obrabiarki jest możliwe po dokonaniu wpisu w zawartości pliku "machine database.dat" w postaci:

DATA|fv-580a|1|tomeksci|None|Ex:|\${UGII_CAM_LIBRARY_INSTALLED_MACHINES_DIR}fv-580a\fv-580a.dat|1.000000|

Przygotowana w ten sposób struktura katalogów i umieszczenie wpisu w plik "machine_database" umożliwia wywołanie utworzonej kinematyki z biblioteki z poziomu projektowanego programu obróbki. Wczytanie odbywa się wraz z geometrią poszczególnych zespołów obrabiarki, postprocesorem i kontrolerem *VNC*.

PRZYGOTOWANIE PROGRAMU OBRÓBKI

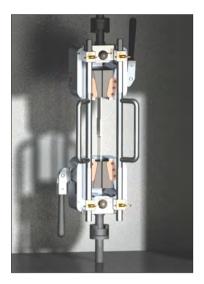
Program NX oferuje szeroki wachlarz narzędzi wspomagających programowanie maszyn sterowanych numerycznie w module *Manufacturing*. Wykorzystując narzędzia służące do frezowania 3-osiowego zaprojektowano obróbkę części uchwytu maszyny wytrzymałościowej, której model *3D* przedstawiono na rysunku 5. Zaprojektowano program obróbki głowicy, w której frezowano kieszeń współpracującą ze szczękami mocującymi próbkę oraz program frezowania mimośrodu blokującego obrót wałka zębatego.

Przygotowanie modeli części do obróbki *CAM* przeprowadzono przy pomocy *Synchronous Technology (ST)*. Narzędzia *ST* pozwalają łatwo usunąć nie obrabiane w danych operacjach geometrie modelu *3D* przygotówki.

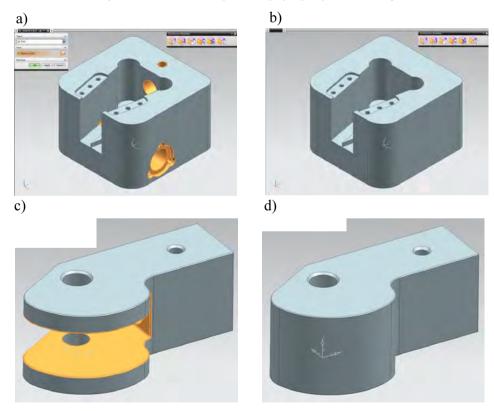
Przygotowanie modelu części do obróbki *CAM* przy wykorzystaniu *Synchronous Technology*

W przygotowaniu modelu głowicy i mimośrodu maszyny wytrzymałościowej do obróbki *CAM* wykorzystano moduł systemu *Synchronous Technology* (*ST*). Moduł ten pozwala programiście na uproszczenie lub usuniecie nieistotnej geometrii modelu przedmiotu obrabianego, optymalizując w ten sposób programowanie. Narzędzia przyśpieszają operacje czyszczenia modeli, które w wyniku importowania z innych formatów mogą zawierać uszkodzoną lub niekompletną geometrię [11]. *Synchronous Technology* (*ST*) posiada narzędzia służące do przesuwania, pochylenia, usuwania, zmian rozmiaru wybranych geometrii. W obrabianych przedmiotach użyto funkcji *Delete Face* w celu usunięcia geometrii obrabianych na innej obrabiarce lub w innym zamocowaniu. Wygenerowanie ścieżek z geometrią tych otworów uniemożliwiłoby dalszą obróbkę. Na rysunku 6 widoczne są w kolorze pomarańczowym lica do usunięcia w przygotowywanych do obróbki modelach *3D*.

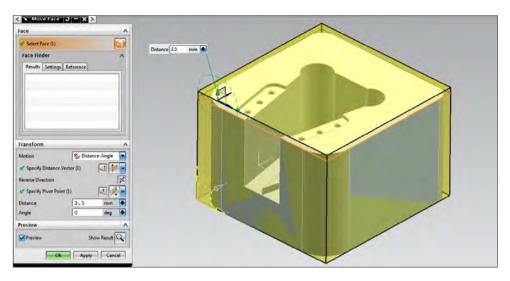
Synchronous Technology (ST) pozwala również w łatwy sposób utworzyć przygotówkę w przypadku obrabiania tylko wybranych powierzchni modelu. Umożliwiają to opcje Move Face, Replace Face, Offset Region, Pull Face używane z zależności od potrzeb, podczas przygotowania naddatków do późniejszej obróbki. W obrabianym przedmiocie ustawiono naddatek na planowanie górnej płaszczyzny poprzez użycie funkcji Move Face na odległość 3,5 mm (rys. 7). W podobny sposób przygotowano półfabrykat mimośrodu zacisku. Wszystkie operacje wykonywane na modelu widoczne są



Rys. 5. Model 3D uchwytu maszyny wytrzymałościowej



Rys. 6. Wykorzystanie modułu Synchronous Technology do usunięcia geometrii nie obrabianych w projektowanych zabiegach: a) przed operacją Delate Face, b) po usunięciu geometrii



Rys. 7. Przygotowanie półfabrykatu obrabianej części głowicy przy pomocy operacji Move Face

w drzewie *Part Navigatora*. Umożliwia to łatwą edycję i wyłączanie wybranych operacji w zależności od potrzeby wykorzystania ich podczas tworzenia programu obróbki.

Dzięki technologii synchronicznej możliwa jest edycja także nieparametrycznych plików pochodzących z innych systemów *CAD*.

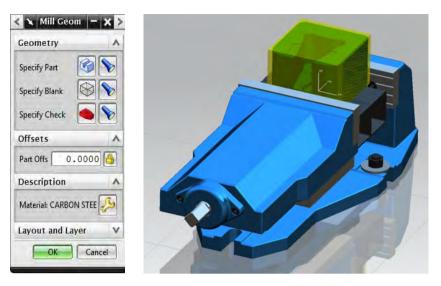
Wykonanie programu frezowania

Program frezowania kieszeni głowicy rozpoczęto od wykonania złożenia przygotówki, przedmiotu obrabianego i imadła z przygotowanych uprzednio modeli 3D (rys 8). Obróbkę wykonano w dwóch zamocowaniach. Na przykładzie pierwszego zamocowania wykonano symulację procesu obróbki. Po ustawieniu układu współrzędnych przedmiotu obrabianego (MCS) zdefiniowano geometrię WORKPIECE wskazując część obrabianą (PART), przygotówkę (BLANK) i uchwyt (FIXTURE).

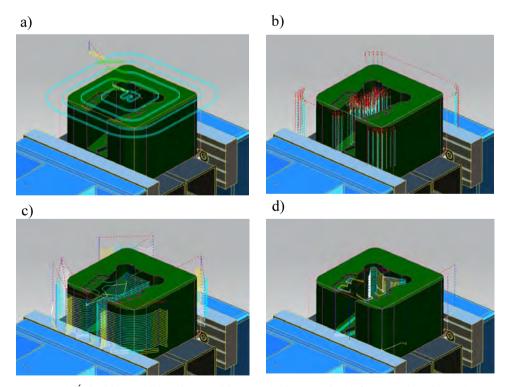
Następnie przystąpiono do definiowania operacji obróbkowych. Przeprowadzono frezowanie w czterech zabiegach:

- a) planowania powierzchni (FACE_MILLING_AREA),
- b) frezowania zgrubnego narzędziem typu plunger (PLUNGE_MILLING),
- c) frezowania kształtowego zgrubnego (CAVITY_MILL),
- d) frezowania wykańczającego (CAVITY_MILL).

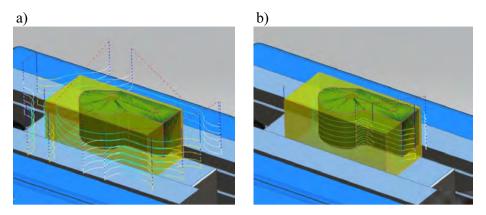
Wygenerowano ścieżki narzędzi widoczne na rysunku 9. Po ustawieniu geometrii obróbki *WORKPIECE* w taki sposób jak w przypadku frezowania głowicy przeprowadzono frezowanie mimośrodu zacisku (rys. 10).



Rys. 8. Złożenie modelu i wskazanie geometrii WORKPIECE



Rys. 9. Ścieżki narzędzi podczas zabiegów: a) planowania, b) frezowania "plunge", c) frezowania kształtowego zgrubnego, d) frezowania wykańczającego



Rys. 10. Ścieżki narzędzi zabiegów: a) frezowania zgrubnego, b) frezowania wykańczającego

Frezowanie przeprowadzono w czterech zabiegach:

- a) frezowania zgrubnego (CAVITY_MILL) (rys. 10a),
- b) frezowania wykańczającego (CAVITY MILL IPW) (rys. 10b),
- c) wiercenia otworu \(\phi \)6 mm (DRILLING),
- d) wiercenia otworu \$\phi 3 \text{ mm (DRILLING)}.

Zastosowane narzędzia i parametry obróbki ustalono wg zaleceń i katalogu firmy Sandvik. W dalszym etapie przeprowadzono proces weryfikacji i symulacji utworzonych programów obróbki.

Instalacja wirtualnej obrabiarki w utworzonym programie obróbki

Po zaprojektowaniu procesu obróbki części w środowisku *CAM* programista ma możliwość przeprowadzenia procesu symulacji na wirtualnej obrabiarce bez konieczności stosowania maszyny rzeczywistej. Po wygenerowaniu programu obróbki należy zainstalować z biblioteki wybraną maszynę, na której tak jak na obiekcie rzeczywistym zostanie przeprowadzona obróbka.

Kolejność poprawnej konfiguracji przeprowadzono na utworzonym centrum frezarskim *FV-580A*. W widoku *Machine Tool View Operation Navigator* wybrano *Edit Generic Machine* po czym wybrano opcje wczytania obrabiarki z biblioteki. Z kategorii maszyn wybrano typ *MILL* a z wyświetlonej listy obrabiarkę *FV-580A* (rys. 11).

W kolejnym kroku dokonano wyboru sposobu pozycjonowania modelu obróbki na maszynie. W zależności od potrzeb programista może pozycjonować przedmiot obrabiany według:

- orientacji układu współrzędnych MCS,
- przez użycie pozycjonowania przez nadanie więzów Assembly Constrain,
- przez synchronizację układu współrzędnych dla przedmiotu obrabianego z wirtualnej maszyny (*Junction*) z układem bieżącym.

Name		Classification	Axis Name	Initial Value	NC Axis
FV-580A					
- MACHINE	BASE	_MACHINE_BASE			
Ē Z_BASE					
SPINDLE			Z	0	4
⊕ Y_BASE					
E Y_SLIDE			Y	0	4
- X_SLIDE			X	0	4
Ē SETUP		_SETUP_ELEMENT			
	BLANK	_WORKPIECE, _SETUP_E	er.		
	FIXTURE	_SETUP_ELEMENT			
	PART	_PART, _SETUP_ELEMENT	0		

Rys. 11. Przypisanie komponentów typu SETUP w oknie MTN

W przeprowadzonej symulacji zastosowano pozycjonowanie przez nadanie więzów *Assembly Constrain*, w celu ustawienia i utwierdzenia przedmiotu wraz z imadłem na stole obrabiarki.

Po ustawieniu modelu obrabianego na stole obrabiarki przypisano w *Machine Tool Navigator – Setup Configurator* elementy instalacyjne *SETUP* (rys. 11). Są to części identyfikowane przez kontroler *VNC* jako: przygotówka (*BLANK*), uchwyt (*FIXTU-RE*) i części obrabiane (*PART*). Wprowadzenie tych komponentów odbywa się poprzez *Edit K-Component* utworzonych wcześniej w *MTB* komponentów.

PROCES WERYFIKACJI I SYMULACJI

Możliwość weryfikacji i symulacji projektowanych procesów obróbkowych jest wyznacznikiem jakości i zaawansowania oprogramowania *CAM*. Rozbudowane struktury maszyn wieloosiowych obrabiarek, w których każda z osi napędzana jest własnym serwonapędem, wymagają stosowania zaawansowanych technik programowania i synchronizacji.

W środowisku programowym systemu NX istnieje wielopoziomowe podejście przeprowadzania weryfikacji i symulacji. Od standardowego - charakterystycznego dla wielu innych systemów CAM (symulacji na podstawie wewnętrznej definicji ścieżki), po zaawansowaną symulację 3D z synchronizacją dla wielowrzecionowych centrów frezarskich [10].

Weryfikacja i wizualizacja podstawowa

Przeprowadzenie symulacji procesu wytwarzania na podstawie wewnętrznej definicji ścieżki, pliku *CL* lub innego rodzaju zdefiniowania kolejnych położeń narzędzia obróbczego należy do standardowych możliwości systemów *CAM*. Programista otrzymuje informację na temat kolejnych położeń narzędzia na poziomach obróbki w kolej-

nych operacjach, sposobie i miejscu wejścia narzędzia w materiał oraz pozostałego jeszcze wielkości naddatku na nieobrobionych ścianach. Stosując narzędzia weryfikacji możliwe jest również wykrycie ewentualnych kolizji narzędzia z elementem obrabianym, szczególnie w przypadku, gdy droga przemieszczenia narzędzia pomiędzy kolejnymi regionami obróbki przebiega poprzez występujące w elemencie występy [1].

System *NX* dysponuje narzędziami do weryfikacji ścieżki narzędzia na poziomie podstawowym umożliwiającymi weryfikację w trzech trybach:

- Replay (rys. 12a) wyświetlanie ścieżki w trybie narzędzia poruszającego się po wygenerowanych ścieżkach bez usuwania materiału. Możliwe jest przy tym dowolne ustawienie ilości poziomów wyświetlanych ścieżek jak również długość wyświetlanych kroków. Narzędzie może być wyświetlane jako osi, punktu lub złożenie. Wyświetlane mogą być również występujące podcięcia lub kolizje zdefiniowanej oprawki z przedmiotem.
- 3D Dynamic (rys. 12b) dynamiczne wyświetlanie 3D w trybie tym narzędzie porusza się po wygenerowanych ścieżkach z usuwaniem materiału. Możliwe jest obracanie i inspekcja obróbki z dowolnego kierunku. Ustawienia wyświetlania narzędzia i wykrywania kolizji są dostępne jak w trybie Replay. Dodatkowo dostępne są funkcje ustawień wizualizacji i wyświetlania pozostałego po obróbce materiału IPW (In Procces Workpiece).



Rys. 12. Tryby wizualizacji podstawowej a) Replay, b) 3D Dynamic, c) 2D Dynamic

 2D Dynamic (rys. 12c) – dynamiczne wyświetlanie 2D – tryb ten jest tożsamy trybem 3D z tą różnicą, że nie możliwa jest zmiana orientacji wyświetlania w trakcie wizualizacji i widoczne są tylko przedmiot obrabiany, przygotówka i narzędzie [1].

Symulacja pracy obrabiarki

Kompletna symulacja pracy obrabiarki pozwala na osiągniecie poziomu weryfikacji najbardziej zbliżonego do rzeczywistej pracy maszyny. Wykorzystując utworzony model wirtualnego centrum frezarskiego FV-580A przeprowadzono symulację procesu frezowania części uchwytu maszyny wytrzymałościowej.

Po utworzeniu programów obróbkowych i zainstalowaniu wirtualnej obrabiarki wywołano panel symulacji poprzez *Tool Path Simulate*. W panelu tym zawarte są wszystkie dostępne funkcje zintegrowanej weryfikacji i symulacji procesu (rys. 13).

Poszczególne człony panelu kontrolnego symulacji odpowiadają za:

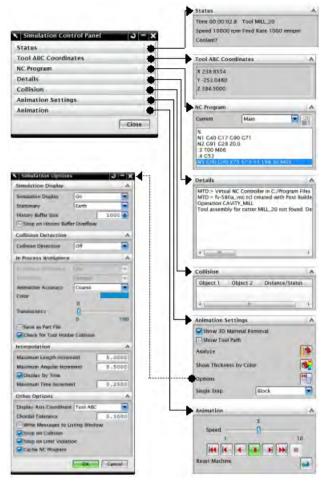
- Status wyświetlanie czasu rzeczywistej obróbki (licznik skalowalny w zależności od prędkości symulacji), aktualnie używanego narzędzia i parametrów technologicznych,
- Tool ABC Coordinates wyświetlanie położenia zera układu współrzędnych narzędzia w stosunki do układu zerowego maszyny,
- NC Program wyświetlanie aktualnie realizowanego bloku programu NC,
- Details wyświetlenie statusu użytego w symulacji postprocesora, kontrolera VNC i poszczególnych narzędzi,
- Collisoin wyświetlanie kolizji obiektów obrabiarki,
- Animation Settings zawiera ustawienia wyświetlania usuwanego materiału, wizualizacji ścieżki narzędzie, opcje wyświetlania pozostałości materiału po obróbce,
- Animation kontrolę symulacji, regulację prędkości i kroku wizualizacji.

Dodatkowo w opcjach Animation Settings użytkownik ma możliwość konfiguracji:

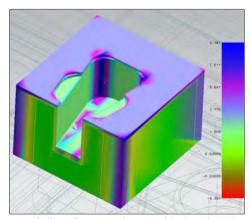
- ustawień wyświetlania i położenia wirtualnej maszyny,
- detekcji wychwytywanych kolizji,
- ustawień związanych z wyświetlanie geometrii IPW,
- ustawień interpolacji,
- ustawień opcji wyświetlania wizualizacji.

Funkcje zintegrowanej weryfikacji i symulacji w NX przedstawiono na rysunku 13. W dowolnym momencie prowadzonej symulacji użytkownik ma możliwość utworzenia mapy konturowej wielkości naddatku i pomiar odległości (*Show Thickness by Color*) w dowolnym punkcie geometrii (rys. 14).

Pozwala to na wizualne określenie ilości pozostałego materiału oraz wychwycenie ewentualnych podcięć materiału.



Rys. 13. Funkcje zintegrowanej weryfikacji i symulacji w NX



Rys. 14. Mapa konturowa wielkości pozostałego naddatku obróbkowego głowicy uchwytu

ANALIZA PORÓWNACZA SYMULOWANEGO PROCESU Z RZECZYWISTYM PROCESEM OBRÓBKI

Porównanie procesu przeprowadzonego na wirtualnej obrabiarce z rzeczywistą obróbką wykonano na przykładzie frezowania części mimośrodu zacisku uchwytu i głowicy uchwytu maszyny wytrzymałościowej. Rzeczywistą obróbkę przeprowadzono na centrum frezarskim FV-580A będącym na wyposażeniu Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej. Proces obróbki monitorowano w celu porównania czasów obróbki detalu. W obu symulowanych programach obróbkowych nie wykryto kolizji pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym i uchwytem jak również zespołami ruchowymi maszyny. Po wykonaniu symulacji wygenerowane programy obróbki przesłano do pamięci obrabiarki i wykonano proces skrawania, w trakcie którego mierzono przybliżony czasy poszczególnych operacji frezowania. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1 i tabeli 2 wraz z wynikami odczytanymi podczas symulacji.

Pomiary czasu przeprowadzano stoperem dla każdej operacji osobno. Różnice czasowe symulacji i rzeczywistego procesu wynikają z powodu braku symulacji wymiany narzędzia na wirtualnej maszynie. Z tego powodu czas obróbki na rzeczywistej maszynie uległ wydłużeniu.

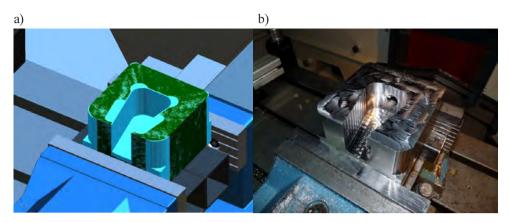
Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono widok frezowanych części uchwytu w zestawieniu modelu z symulacji 3D i zdjęcia rzeczywistego elementu. Widoczne są poszczególne zagłębienia i pozostałości materiału po przejściach narzędzia. Przedstawiona wizualizacja obrabianych elementów pokazuje w jakim stopniu symulowany proces, jest zbliżony do rzeczywistego.

Tabela 1. Czas obróbki głowicy uchwytu

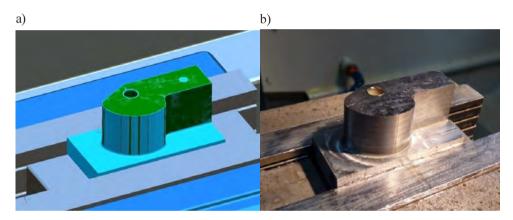
Obrabiany detal	Zabieg	Czas obróbki wirtualnej	Czas obróbki rzeczywistej
	a) planowania powierzchni	8 min 05 s	8 min 55 s
Głowica	b) frezowania zgrubnego narzędziem typu plunger	7 min 55 s	8 min 20 s
uchwytu	c) frezowania zgrubnego	1 h 15 min 30 s	1 h 17 min 10 s
	d) frezowania wykańczającego	23 min 35 s	24 min 15 s

Tabela 2. Czas obróbki mimośrodu zacisku uchwytu

Obrabiany detal	Zabieg	Czas obróbki wirtualnej	Czas obróbki rzeczywistej
	a) frezowania zgrubnego	13 min 10 s	12 min 25 s
Mimośród zacisku	b) frezowania wykańczającego	6 min 45 s	6 min 30 s
uchwytu	c) wiercenia otworu Ø6mm	2 min 10 s	2 min 25 s
	d) wiercenia otworu Ø3mm	1 min 50 s	2 min 10 s



Rys. 15. Widok głowicy uchwytu po częściowej obróbce: a) model z symulacji 3D, b) rzeczywisty element



Rys. 16. Widok mimośrodu zacisku uchwytu po częściowej obróbce: a) model z symulacji 3D, b) rzeczywisty element

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zintegrowane systemy projektowania *CAD/CAM/CAE* zrewolucjonizowały pracę współczesnych inżynierów. Narzędzia wspomagania wytwarzania *CAM* zajmują w grupie tych narzędzi szczególne miejsce. Wprowadzanie zaawansowanych technik projektowaniai symulacji pozwala na zwiększanie możliwości wytwórczych.

Prowadzenie kompletnej symulacji kinematycznej wirtualnych obrabiarek w przestrzeni *3D* techniką postprocesingu odwrotnego jest narzędziem pozwalającym na:

- weryfikację poprawności wygenerowanych ścieżek poprzez analizę kodu NC bez konieczności prowadzenia prób na maszynie,
- obserwację ruchów modelu 3D obrabiarki oraz symulację usuwania materiału,

- identyfikację ewentualnych błędów projektowych już na etapie symulacji,
- detekcję kolizji nie tylko pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym, ale także pomiędzy zespołami ruchowymi maszyny i oprzyrządowaniem, co jest szczególnie ważne w obróbce wieloosiowej,
- efektywne wykorzystanie możliwości obróbkowych maszyny przez uwzględnienie ograniczeń ruchu osi i przestrzeni roboczych,
- optymalizację i synchronizację ruchów w przypadku obróbki wielowrzecionowej,
- pomiar czasów obróbki w większym stopniu zbliżonych do rzeczywistych na obrabiarce,
- skrócenie czasu przygotowania produkcji przez brak konieczności przeprowadzania prób na maszynie,

Budowanie wirtualnych parków maszynowych pozwala na projektowania procesów technologicznych bez konieczności eksperymentowania na maszynie rzeczywistej. Przeprowadzony proces budowy i symulacji wirtualnej obrabiarki pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- wirtualny modelu kinematyczny pionowego centrum frezarskiego FV-580A odwzorowuje ograniczenia ruchu osi i przestrzeni obróbkowej,
- zbudowana kinematyka współpracuje za pośrednictwem wirtualnego kontrolera z postprocesorem używanym na obrabiarce,
- wykonana symulacja procesów obróbki przykładowych elementów została bezkolizyjnie odwzorowana na rzeczywistej maszynie,
- nieznaczne różnice czasu obróbki na podstawie symulacji z czasem zmierzonym podczas rzeczywistego procesu wynikają z braku symulacji wymiany narzędzia), należy przypuszczać, że po ich uwzględnieniu czasy te pokryją się,
- wizualizacja poszczególnych zabiegów obróbkowych odpowiada wyglądowi części obrabianych na centrum frezarskim.

Przeprowadzona symulacja pozwoliła na pełne odwzorowanie rzeczywistego procesu obróbki poprzez obserwację ruchów modelu obrabiarki, wychwycenie kolizji i pomiar czasu obróbki bez fizycznego kontaktu z maszyną. Porównanie symulacji i rzeczywistego procesu frezowania dało obraz zasadności tworzenia tego typu modeli kinematycznych i pokazało jak zaawansowane techniki symulacji umożliwiają odzwierciedlenie rzeczywistego procesu technologicznego. Przedstawiona praca (w połączeniu z drugim artykułem autorów pt.: "Model geometryczny i kinematyczny pionowego centrum obróbczego *CNC FV 580*" może stanowić przewodnik metodyczny tworzenia wirtualnych maszyn technologicznych z uwzględnieniem sterowania nimi jak obiektami rzeczywistymi. W konsekwencji pozwala to na to na tworzenia wirtualnych laboratoriów, w których prowadzenie procesu dydaktycznego jest możliwe bez konieczności zakupu drogich i zajmujących dużo miejsca obrabiarek.

LITERATURA

- 1. Augustyn K. NX CAM. Programowanie ścieżek dla obrabiarek CNC. Helion Gliwice 2010.
- Augustyn K. EdgeCAM. Komputerowe wspomaganie obróbki skrawaniem. Helion Gliwice 2006.
- 3. Habrat W. Obsługa i programowanie obrabiarek CNC. Wydawnictwo i Handel Książkami "KaBe", Krosno 2007.
- 4. Honczarenko J. Obrabiarki sterowane numerycznie. WNT, Warszawa 2008.
- 5. Kolka A., Kosmol J., Słupik H. Programowanie obrabiarek sterowanych numerycznie. Wydawnictwo Politechniki Ślaskiei. Gliwice 2001.
- 6. Kosmol J. Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem. WNT, Warszawa 2000.
- 7. Kráľ Ján et al. Tvorba parametrických 3D plôch v CAD systémoch. In: Acta Mechanica Slovaca, roč. 12, č. 3-a, 2008: 223-228.
- Kwiatkowski W. Podstawy teorii sterowania wybrane zagadnienia. Wydawnictwo BEL 2006.
- 9. Szafarczyk M., Niedbała M. Obrabiarki modułowe, przekształcalne, przestawialne. Mechanik, nr 12, 2003.
- 10. Instrukcja użytkowania Centrum obróbkowe pionowe FV-580A MOC MECHANICY Sp. z o.o.
- 11. http://www.siemens.com/plm (2010-09-12).
- 12. http://www.automatyka.siemens.pl/(2010-09-28).
- 13. http://www.camdivision.pl/(2010-09-16).

VIRTUAL CONTROLLER VNC OF VERTICAL CNC MACHINE CENTER FA-580A

Summary

In this paper generating process of virtual controller is presented. This process is care out with used NX system with Post Builder application and take into type of steering machine system. Kinematics model with controller and postprocessor in NX library was configured. Machining process of geometrical models with used Synchronous Technology and NC program was developed. In this article tool path verification and simulation is presented. Finally, process of machining simulation and real cutting process during tests on CNC machine tool is compared.

Key words: controller, CNC machine tool, NX system, simulation, program verification, cutting.

Dorota Wójcicka-Migasiuk¹⁾

WYKORZYSTANIE ENERGII SŁONECZNEJ WYZWANIEM DLA BADANIA MATERIAŁÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd materiałów wykorzystywanych w energetyce słonecznej z punktu widzenia badań i analiz materiałów nad ich własnościami, które sprzyjają pozyskiwaniu tej formy energii. Omówione zostały materiały z takich grup jak szkła, polimery, metale i gazy. Zakres zastosowań, który został objęty niniejszym opisem zawiera zarówno termiczne kolektory słoneczne, elementy systemów biernych oraz ogniwa fotowoltaiczne. Szczególną uwagę poświęcono rezultatom badań nad materiałami w postaci warstw cienkich oraz struktur wielowarstwowych z nich złożonych, takich jak inteligentne okna, elewacje fotowoltaiczne czy ściany słoneczne. Ponadto przedstawiono zagadnienia badawcze dla struktur wielowarstwowych stosowanych w budownictwie wykorzystujących izolacje przezroczyste i półprzezroczyste w oparciu o badania autorskie prowadzone na Politechnice Lubelskiej.

WSTĘP

Wszystkie materiały aktywne słonecznie spełniają warunek, w którym zdolność do przepuszczania (T), odbicia (R) i pochłaniania (A) każdej długości fal jest równa jedności:

$$T(\lambda) + R(\lambda) + A(\lambda) = 1$$

Ponadto, należy pamiętać, że zdolność do emisyjności ciała możliwa jest wyłącznie w granicach jego absorpcyjności (E(I) \leq A(I)). W przypadku materiałów będących przedmiotem rozważań, zajmujemy się emisyjnością przy długość fali $\lambda > 3$ µm. W opisie zagadnień z nimi związanych dogodnie jest też posługiwać się spektrum uśrednionym względem czułości oka (*opt*), spektrum docierającego promieniowania słonecznego (*slo*) oraz spektrum emisyjności ciała czarnego dla danej temperatury (*temp*) [1]. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony przegląd materiałów wykorzystywanych w rożnych technologiach konwersji promieniowania słonecznego oraz omówione efekty możliwe do uzyskania w takich materiałach, ze szczególnym podkreśleniem tych, które mogłyby znaleźć najefektywniejsze zastosowanie w szerokości geograficznej oraz klimacie naszego kraju.

¹⁾ Katedra Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

Podział materiałów omawianych w literaturze jest różnorodny, związany z ich systematyką lub też przydatnością w określonych zastosowaniach. W artykule skupiono się na aspektach praktycznych.

MATERIAŁY AKTYWNE SŁONECZNIE

Materiały znajdujące zastosowanie w konwersji promieniowania słonecznego można rozpatrywać w następujących grupach głównych: szkła, polimery, metale, półprzewodniki, gazy i jako odrębna grupę materiały nakładane w warstwach cienkich. Jest to podział szczególnie dogodny przy odniesieniach do lokalnych warunków i możliwości wykorzystania.

Szkła stosowane są zarówno w celach ochrony przed wpływami atmosferycznymi bez ograniczania dostępu promieniowania słonecznego (szkło okienne, flotacyjne), jak i w postaci cienkich warstw. Jednym z istotnych składników szkła flotacyjnego są tlenki żelaza, które decydują o ograniczeniu T_{slo} w zakresie określonych długości fali. Szkła o niskiej zawartości tlenków żelaza przy długości fali powyżej 0,4 µm mają równomierny poziom przepuszczalności ok. 80%, natomiast przy wyższych zawartościach przy $\lambda \cong 1$ µm wykazują spadek przepuszczalności T_{slo} do 60% a nawet 30%, natomiast T_{ont} pozostaje na poziomie niezmienionym. Szkła te mają jedynie nieznaczne zielone zabarwienie. Refleksyjność powierzchni granicznej powietrze-szkło wynosi ok. 4% w przedziale 0,4 μ m < λ < 2 μ m, zakładając jednocześnie, że maksymalna przepuszczalność szkła w tym zakresie wynosi 92%. Pamiętamy także, że dla promieniowania cieplnego $\lambda > 3$ µm przepuszczalność spada znacznie, umożliwiając tym sposobem wykorzystanie efektu szklarniowego, kiedy $E_{temp} \cong 85\%$ [5]. Stosowane jest także szkło z warstwą laminatu z polywinylobutyralu, który niemal całkowicie zatrzymuje promieniowanie ultrafioletowe (tj. λ < 0,3 µm) dla warstw o grubości ok. 1 mm. Szkła fotochromowe zaciemniają się pod wpływem promieniowania ultrafioletowego a własność ta nie ulega procesom zużycia, odmiennie jednak niż sama warstwa, którą uzyskuje się poprzez dodanie halogenku srebra w procesie formowania szkła. Nie ma to wpływu na jego refleksyjność ani na emisyjność, E_{temp} .

Polimery o podobnych własnościach przepuszczalności jak szkło, ale szybciej ulegające degradacji, znajdują zastosowanie raczej jako elementy izolacji zwanych transparentnymi (TIM) oraz jako folie zastępujące warstwy cienkie zarówno przepuszczalne jak i refleksyjne. Wykazują większą dynamikę procesu zaciemniania fotochromowego niż szkło, jednakże zanikającą w wyższych temperaturach. Polimery w postaci materiału o strukturze kapilarnej, plastra miodu czy pęcherzykowatej posiadają dobre własności izolacyjne rzędu u = 1 Wm⁻²K⁻¹ dla warstwy o grubości 10 cm. Wyróżniamy cztery główne struktury materiałów przezroczystych (lub raczej półprzezroczystych) stosowanych jako izolacje: folie polimerowe giętkie, materiały sztywne o strukturze kapilarnej lub piankowej, włókna oraz aerożele czyli nieorganiczne materiały mikroporowate. Wśród nich tylko folie i aerożele mogą być tak przezroczyste aby pozostawać

niewidocznymi dla zwykłego obserwatora, natomiast pozostałe powodują odbicia i rozproszenia zmniejszając tym samym przepuszczalność promieniowania świetlnego. Aerożele krzemionkowe powstają w wyniku suszenia żelu koloidalnego w wysokiej temperaturze i pod ciśnieniem, w wyniku czego powstaje materiał składający się z cząstek o średnicy ok. 1 nm wzajemnie połączonych, tworzących luźno upakowaną strukturę o porach do ok. 100 nm, której gęstość stanowi zaledwie kilka procent gęstości materiału. Produkuje się go w postaci półprzezroczystego granulatu lub przezroczystych płytek o niewielkim stopniu zamglenia. Spektralna przepuszczalność tego materiału grubości 4 mm w przedziale od 0,5 do 2 μm wynosi ponad 90%. Wartość współczynnika przenikalności cieplnej u = 1 Wm⁻²K⁻¹ można już osiągnąć przy warstwie o grubości 1 cm umieszczając ją pomiędzy taflami o niskiej emisyjności cieplnej [5, 8].

Metale stosowane głównie dla wzbogacenia zdolności refleksyjnych powierzchni zarówno jako $R_{\rm slo}$ jak i $R_{\rm opt}$ na powierzchniach zwierciadeł (szczególnie srebro oraz aluminium, które charakteryzuje refleksyjność 90% dla $\lambda > 0,5~\mu m$). Metale, jako materiały stanowiące dobre przewodniki ciepła (o współczynniku przewodzenia ciepła powyżej 50 W/mK) znajdują zastosowanie w elementach urządzeń transportu ciepła oraz konstrukcji, zarówno kolektorów służących do termicznej konwersji promieniowania słonecznego jak i fotoelektrycznej, będąc również elementami samych ogniw zwanych fotowoltaicznymi. Należy wspomnieć, że metale o małej korozyjności takie jak platyna czy rod maja niższą refleksyjność. Wszystkie metale maja niską emisyjność termiczną $E_{\rm temp}$.

Półprzewodniki [3, 4, 6] w ogólności powinny umożliwiać generację przepływu nośników prądu na skutek wzbudzenia warstwy podłoża energią fotonów pochodzących z promieniowania słonecznego. Najpowszechniej stosowanym materiałem jest tutaj krzem, materiał nietoksyczny, łatwo dostępny, o długoletniej tradycji zastosowań w mikroelektronice. Wytwarzane są trzy rodzaje krzemu: krystaliczny, polikrystaliczny i amorficzny lub hydrogenizowany, które uformowane w płytki lub powłoki umieszczane są pomiędzy dwoma elektrodami, przednią przezroczystą i tylną metaliczną nieprzezroczystą. Sam krzem jest w tym układzie domieszkowany zarówno typu n jak i p w celu utrzymywania połączenia dla przepływu prądu od p do n. Krzem krystaliczny jest wycinany z pojedynczych kryształów, polikrystaliczny – przygotowany z bloków krystalicznych, a amorficzny stanowi powłoki o grubości ok. 0,3 μm osadzające się na skutek wyładowania jarzeniowego w silanie.

Osiąganie możliwie najwyższej sprawności konwersji fotoelektrycznej wymaga zapewnienia jak najmniejszych strat odbicia. Własność tę uzyskujemy poprzez nakładanie warstw antyrefleksyjnych lub w przypadku materiału krystalicznego z pojedynczych kryształów poprzez trawienie anizotropowe dla uzyskania piramidalnej teksturyzacji powierzchni. Półprzewodniki o składzie złożonym na bazie arsenku galu, indu czy aluminium wykazują zadowalającą sprawność konwersji jak również odporność na promieniowanie jonizujące jednakże ze względu na wysokie koszty wytwarzania zarezerwowane są do specjalnych zastosowań a przez to nie są powszechne. Inne półprze-

wodniki, powstałe jako związki kadmu i telluru przy dobrze opanowanej technologii produkcji są wykorzystywane jako ogniwa na podłożach twardych jednakże z pewnymi ograniczeniami wynikającymi z samego zastosowania kadmu. Inne bardziej złożone materiały ze związków o wieloatomowych cząsteczkach miedzi, indu, selenu, galu wykazują wysoką efektywność konwersji fototermicznej przy potencjalnie niskich kosztach otrzymywania cienkich warstw. Ponadto umożliwiają wykorzystanie zjawiska fotoelektrotermicznego tj. generacji prądu elektrycznego na skutek promieniowania cieplnego, a także w słonecznych zintegrowanych kolektorach fotowoltaiczno-termicznych (PV-thermal), dla których nie powstała nawet jeszcze polska nazwa ze względu na to, że znajdują się jeszcze w stadium badań ośrodków europejskich, w większości poza naszym krajem.

Podobnie aktywne badania prowadzone są nad nanokrystalicznymi półprzewodnikami barwnymi znajdującymi zastosowanie jako okładziny elewacji prądotwórczych. Stanowią one ogniwa absorbujące światło słoneczne w barwnych molekułach zawierających związki rutenu pokrywających podłoża z dwutlenku tytanu. Ogólny problem dla ogniw półprzewodnikowych stanowi obniżenie sprawności konwersji wraz ze wzrostem temperatury ogniwa, co jest nie do uniknięcia przy pożądanej długotrwałej ekspozycji na promieniowanie słoneczne. Rozwiązania projektowe przeciwdziałające temu zjawisku koncentrują się na odprowadzeniu ciepła bezpośrednio do zintegrowanych urządzeń konwersji fototermicznej.

Transport ciepła można natomiast ograniczyć poprzez wprowadzenie warstwy gazu, zarówno powietrza jak innego (np. argon, dwutlenek węgla). Nowoczesne technologie produkcji okien i kolektorów termicznych wykorzystują hermetycznie uszczelnione moduły szklane umożliwiające 10% ograniczenie strat ciepła, a w końcowym rezultacie nawet do 20% jeśli rozwiązania są wzbogacone przez zastosowanie powłoki o niskiej emisyjności. Rozwiązanie będące przeciwieństwem fizycznym proponowanych przestrzeni wypełnionych gazem stanowi wykorzystanie próżni eliminującej całkowicie starty ciepła na drodze konwekcji jednakże stawiając zwiększone wymagania odnośnie konstrukcji urządzenia [1].

Nakładanie cienkich warstw w obszarze wykorzystania energii słonecznej ma na celu zmodyfikowanie optycznych lub innych fizycznych właściwości materiału podkładowego. Technologie powlekania są zróżnicowane w zależności od efektu jaki chcemy uzyskać oraz od materiału, który tę powłokę ma stanowić. Techniki stosowane najpowszechniej są tym samym największym wyzwaniem do badań nad materiałami w celu uzyskania jeszcze większej efektywności lub lepszego dostosowania ich właściwości do konkretnych zastosowań. Na początek dwie uzupełniające się technologie: rozpylanie i odparowanie. Przy odparowaniu surowiec, z którego wykonana jest warstwa zostaje podgrzany w warunkach próżni, gdzie powstająca skondensowana para przenosi materiał na podłoże. Materiał rozpylany tworzy powłoki na szkle, metalu, poliestrze i in. o grubości zazwyczaj od 0,1 do 1 μm. Uogólniając, w metodzie tej plazma obojętnego lub aktywnego chemicznie gazu wprowadzana jest pod niskim ciśnieniem,

a jony tej plazmy wypierają atomy surowca powłoki w stanie stałym zazwyczaj w postaci płyty (tarcza). Atomy te osadzają się na przylegającej powierzchni (podłoże). Inne technologie, nie wykorzystujące technologii próżniowych, obejmują nakładanie poprzez zanurzanie w roztworach, rozpylanie, wiązanie chemiczne na powierzchniach po rozkładzie pod wpływem ciepła pary związków pierwotnych, oraz technologie elektrochemicznego osadzania na katodzie na skutek rozkładu roztworu lub konwersję metalicznej anody w porowatą powierzchnię tlenku.

MATERIAŁY CIENKOWARSTWOWE W ENERGETYCE SŁONECZNEJ

Cienkie warstwy selektywne [2, 3, 4] pokrywające absorbery kolektorów termicznych mają za zadanie zebrać maksymalnie możliwą ilość promieniowania, zatrzymać ją a następnie przekazać do materiału podłoża. Do niedawna najpopularniejsze powłoki z tzw. czarnego chromu lub niklu stosowano w kolektorach płaskich a nakładano je metodami elektrochemicznego osadzania się. Warstwy te w temperaturze ok. 100 °C mają bardzo pożądane zakresy absorpcyjności $A_{slo} \cong 96\%$ oraz niską emisyjność $E_{temp} \cong 15\%$. Jednakże, że względu na to, że wymagają użycia znacznych ilości substancji szkodliwych dla środowiska coraz częściej zastępowane są technologiami wykorzystującymi próżnię. Nakładane techniką napylania warstwy niklu lub materiałów zwanych cermetami będącymi spiekiem metalu i substancji ceramicznej (stali nierdzewnej i azotku metalu, tlenku i azotku chromu) mają nawet niższą emisyjność $E_{temp} \cong 10\%$. Najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem stosowanym w ciepłowniach słonecznych z parabolicznymi odbłyśnikami i kolektorami rurowymi, są wielowarstwowe układy warstw cienkich molibdenowo-tlenkowe, z warstwą antyrefleksyjną (tzw. antyrefleks) oraz obniżające emisyjność powłoki molibdenowe na podłożach z rur stalowych. Układy te charakteryzują się absorpcyjnością $A_{slo} \cong 97\%$, a emisyjnością $E_{temp} \cong 17\%$ przy temperaturze 350 °C.

Selektywne farby nakładane technikami popularnymi warstwami o grubości 2–3 μm, zawierają intensywnie absorbujący pigment (tlenek FeMnCu) w polimerowym spoiwie jak silikon lub siloksan. Chociaż zarówno absorpcyjność jak i emisyjność tych materiałów jest mniej zadowalająca niż dla warstw cienkich, względy estetyczne wynikające z możliwości ich barwienia a także wiązania płatków metalicznych w spoiwie zwiększają ich wizualną atrakcyjność, znajdują one zatem zastosowanie w elementach elewacji, szczególnie w obiektach reprezentacyjnych.

Nowoczesne techniki produkcji okien [2], w odpowiedzi na wymagania stawiane przez budownictwo energooszczędne, wykorzystują cienkie warstwy dla złożonych celów. Przede wszystkim kierując się możliwym ograniczeniem współczynnika przenikania ciepła przez okna do 1 Wm⁻²K⁻¹ przy potrójnym oszkleniu. Warstwy te dążą zatem do osiągnięcia maksymalnej przepuszczalności światła (T_{opt}) przy jednoczesnym niskim poziomie emisyjności. Kolejnym wyzwaniem jest ograniczenie nagrzewania się pomieszczeń przez oszklenia o coraz większej powierzchni w nowoczesnym budow-

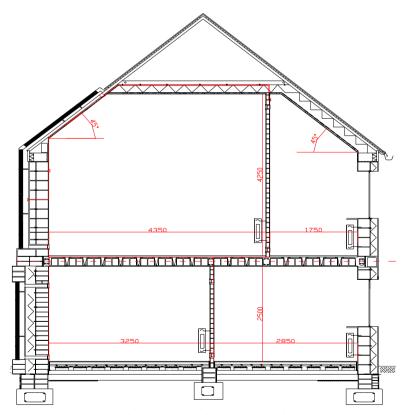
nictwie. Sposobem rozwiązania tego problemu jest powłoka kątowo selektywna tj. przepuszczająca promieniowanie widzialne w linii poziomej – prostopadłej do powierzchni okna, umożliwiając tym samym kontakt wzrokowy pomiędzy wnętrzem i zewnętrzem budynku, a ograniczająca przepuszczalność promieniowania słonecznego padającego skośnie na powierzchnię szyby. Inne wyzwanie dla badań materiałowych stanowi selektywność spektralna, którą uzyskujemy w warstwach o grubościach rzędu 10 nm, a która możliwa jest do uzyskania w powłokach srebra, złota (zastępowanego przez azotek tytanu), miedzi w układach wielowarstwowych przekładanych dielektrykiem (tlenek lub siarczek cynku, dwutlenek tytanu lub cyny) o własnościach antyrefleksyjnych i o równie cienkiej powłoce, nakładanych na szkło. Mogą one zawierać także warstwy zmniejszające podatność na korozję np. Al₂O₃. Alternatywą tych materiałów są powłoki półprzewodnikowe domieszkowane – tlenek cynku domieszkowany aluminium, trójtlenek indu domieszkowany cyną, dwutlenek cyny domieszkowany antymonem oraz inne trójtlenki i czterotlenki lub ich mieszaniny.

Nowe wyzwania do badań materiałów dla złożonych struktur wielowarstwowych stanowia inteligentne okna (smart windows) [2]. Układy te płynnie reguluja dopływ energii zmniejszając tym samym zapotrzebowanie na chłodzenie/ogrzewanie w odpowiednich okresach, co jest ważne gdy mamy do czynienia z elewacjami przeszklonymi. Ich odmianą mogą być także szklane powierzchnie pokryte półprzepuszczalnymi ogniwami fotowoltaicznymi. Wykorzystują one zjawiska elektrochromatyczne modulując składową absorpcji ale nie refleksyjność. Dlatego też strategia regulacji powinna być właściwie dobrana, nie dopuszczając do przeważania tendencji przegrzania szyby w dolnym zakresie przepuszczalności. Układ elektrochromatyczny wykazuje pewną analogię do ogniwa elektrolitycznego. Jego centralną cześć w układzie wielowarstwowym płaskim stanowi przewodnik jonowy, który może być cienkowarstwową powłoką lub laminatem polimerowym, dobrze przewodzącym dla jonów jednowartościowych wodoru lub litu (H⁺ lub Li⁺). Elektrolit ten z jednej strony przylega do warstwy elektrochromatycznej a z drugiej do przeciwnej elektrody, która w przypadku układów przezroczystych musi również pozostać przezroczysta i wykazywać brak absorpcyjności bez względu na zawartość jonów. Ewentualnie, może ona stanowić warstwę o przeciwnych własnościach elektrochromatycznych w stosunku do warstwy głównej. Taki trójwarstwowy układ powinien znajdować się pomiędzy dwoma przezroczystymi przewodnikami elektrycznymi zazwyczaj w postaci domieszkowanych półprzewodników. Najczęściej, całość układu usztywniona jest obustronnie szkłem lub osłonięta folią poliestrową. Działanie takiego elementu rozpoczyna się po przyłożeniu niewielkiego napięcia (pochodzącego np. z ogniw fotowoltaicznych) pomiędzy zewnętrzne warstwy, powodującego obustronny przepływ jonów do i z warstwy (lub warstw) elektrochromatycznej, co powoduje zmianę jej właściwości optycznych. Wizualnie przejawia się barwieniem tafli, a czas takiego przejścia zależy od oporu elektrycznego przezroczystej powłoki przewodzącej przy czym, zwykle wystarczające 30% zaciemnienie 1 m² okna inteligentnego, trwa ok. 10 min. Obecnie najszersze zastosowanie mają powłoki trójtlenku wolframu jako warstwa podstawowa z elektrodą przeciwną z tlenkami ceru, kobaltu, irydu, niklu, wanadu – dla elewacji budynków szczególne znaczenie mają materiały o wyrazistych barwach. Ponadto, dodatek aluminium lub magnezu zwiększa przepuszczalność powłoki w stanie bezbarwnym.

STOSOWALNOŚĆ IZOLACJI TRANSPARENTNYCH

Ograniczenia zastosowania zostaną omówione dla warunków klimatycznych wschodniego regionu naszego kraju. Oznacza to, że istnieje konieczność elastycznego podejmowania zagadnień związanych z wdrażaniem materiałów wspomagających konwersję energii promieniowania słonecznego na użyteczną jej formę zależnie od warunków regionalnych – szczególnie w budownictwie.

Przeprowadzono analizę stanów przejściowych wymiany ciepła przez ściany słoneczne wyposażając je w element izolacji transparentnej uzyskując tym samym układ zaprezentowany na rys. 1.



Rys. 1. Geometryczny układ elementów ścian słonecznych w przekroju poprzecznym przykładowego budynku [7, 8]

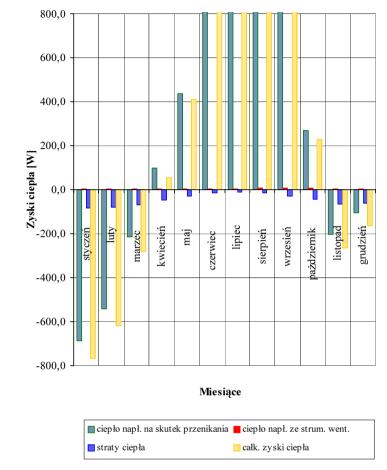
Rysunek przedstawia przykład umieszczenia modułu ściany słonecznej w jednej ze ścian budynku. Od strony południowej jest pomieszczenie ze ściana typu Trombe'a akumulujaca promieniowanie słoneczne, odpowiednio: na parterze – ściana Trombe'a izolowana wentylowana z cegły, na pietrze – ściana Trombe'a nieizolowana wentylowana z betonu. Zarówno na parterze, jak i na piętrze od środowiska zewnętrznego budynek oddzielają 2 szyby wypełnione izolacją typu plaster miodu. Pomieszczenie ze ścianą Trombe'a z cegły ma wymiary $3,25 \times 4,00 \times 2,50$ metra, natomiast pomieszczenie ze ścianą Trombe'a z betonu – 4,35 × 4,00 × 4,25 metra. Parter od piętra oddzielony jest stropem Akermana. Dach nachylony jest do poziomu pod kątem 45°. Dodatkowo na piętrze od strony południowej stosuje się pętlę konwekcyjną. Analizowany moduł składa się z następujących elementów w układzie warstwowym: szyba, izolacja transparentna, szyba, kanał powietrzny z konwekcją swobodną, warstwa farby czarnej matowej, element masywny (cegła, cement), tynk wewnętrzny, farba ścienna jasna. Przeprowadzono badania symulacyjne (MES) oraz pomiary na modelu w pomniejszonej skali dostosowując warunki wg założonych zakresów uznanych za typowe dla klimatu oraz interesujące ze wzgledu na sezon grzewczy szczególnie w okresie przejściowym. Warunki te w postaci wartości natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnie (W/m²) oraz temperatury powietrza atmosferycznego (°C) zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ustalone warunki pogodowe

Okres	Zima noc	Zima dzień	Wiosna noc	Wiosna dzień	Dzień chłodny	Lato dzień	Jesień dzień	Dzień pochmurny
I _{s ol} W/m ²	0	250	0	350	600	850	450	300
T _a ℃	-10	-5	0	10	15	25	15	10

Ponieważ nie wszystkie wartości temperatury możliwe były do uzyskania w trakcie pomiarów na modelu, zastosowano interpolację. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń zysków ciepła na podstawie pomiarów (i interpolacji) przeprowadzonych na modelu w pomniejszonej skali (bez wspomagania ogrzewaniem).

Uogólniając, przedstawione wyniki sugerują nikłe zyski ciepła na skutek konwekcji naturalnej w kanale modułu ściany słonecznej, znaczące zyski w okresach przejściowych prowadzące nawet do rezygnacji z ogrzewania w miesiącach: kwiecień, maj, październik, konieczność współpracy z ogrzewaniem konwencjonalnym w okresie listopad-marzec oraz osłon przeciwsłonecznych w okresie czerwiec-wrzesień. Dlatego też największe znaczenie dla obniżenia energochłonności obiektu mają okresy przejściowe oraz okres zimowy jako najbardziej niekorzystny. Tabela 2 przedstawia wyniki symulacji (MES) zmian temperatury przeprowadzonej dla części parterowej budynku (ogrzewanej) jak na rysunku 1, z podziałem na kolejne powierzchnie graniczne w obszarze analizowanej domeny, na trzech wysokościach uznanych za charakterystyczne



Rys. 2. Wyniki przykładowych obliczeń zysków ciepła na podstawie pomiarów (i interpolacji) przeprowadzonych na modelu w pomniejszonej skali

dla osób przebywających w obiekcie tj.: 0,2 m nad podłogą; 0,8 m – pozycja siedząca; 1,6 m – poziom głowy.

Przedstawione przykładowe wyniki wskazują na konieczność zastosowania w modułach ścian słonecznych elementów izolacji transparentnych, gdyż tylko one zapewniają zachowanie odpowiedniej izolacyjności przegrody przy jednoczesnym utrzymaniu jej zdolności do biernej konwersji promieniowania. Natomiast, moduł może być pozbawiony kanału wentylacyjnego, poza koniecznym zapewnieniem zabezpieczenia przeciwko jego zawilgoceniu. Są to konkretne wskazania dla opracowania projektowego modułów o szerokiej skali możliwości stosowania na terenie naszego kraju. Moduły o podobnych cechach są produkowane ale ich dostępność na rynku jest znikoma, podobnie jak i zainteresowanie potencjalnych inwestorów. Zmiana istniejącego stanu wymaga zintegrowanej współpracy wielu środowisk.

Ściana Ściana Pow. Ściana Ściana Szyba Powierzchnia Szyba Powłoka ściany wew wew zewn zewn zewnętrzna wewnętrzna graniczna/wys. czarna masywnei pow. płd. pow. płn. pow.płd. pow.płn. 0,2 m -4 -3.6 -3 -1 24 20 26 -10

10

10

36

34

34

22

14

0

-10

-10

3

10

Tabela 2. Średnie wartości temperatury na kolejnych powierzchniach granicznych domeny

BIBLIOGRAFIA

0.8 m

1.6 m

-4

-3.9

-2

0

- Beckman J.A., Klein J., Duffie J.A.: Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley & Sons, New York 1996.
- Chwieduk D., Domański R. (red.): Renewable Energy. Innovative Technology and New Ideas. Warsaw 2008.
- 3. Corkish R.: Solar cells. Encyclopedia of Energy Vol. 5. Elsevier 2004: 545–557.
- 4. Yin Y. i in.: Thermal oxidation properties of titanium nitride and titanium—aluminum nitride materials—A perspective for high temperature air-stable solar selective absorber applications, Thin Solid Films 515, 2007: 2829–2832.
- 5. Kaushika N.D., Sumathy K. Solar transparent insulation materials: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 7, 2003: 317–351.
- Wójcicka-Migasiuk D., Janowski T. Silicon Cells in Progress. 2nd International Conference Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO'97, Nałeczów 1997: 183–190.
- 7. Wójcicka-Migasiuk D., Zając A.: Thermal analysis of rooms with solar walls. Archives of Civil Engineering PAN LIII, 1, 2007: 161–173.
- 8. Wójcicka-Migasiuk D.: Wymiana ciepła w ścianach słonecznych. Monografia. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2008.

SOLAR ENERGY AS A CHALLENGE FOR MATERIAL RESEARCH

Summary

The paper defines and describes factors and properties of so called solar materials divided into the following groups: glasses, polymers, metals and gases. The applications aspects have been discussed in most of solar energy conversion forms and devices, i.e.: thermal collectors, photovoltaic cells, thermal passive elements, however, excluding conversion in biological materials because this field deserves separate scientific paper. Some special attention has been paid to thin film materials and laminar systems composed of them. This paragraph describes numerous aspects of applications including the ones emerging in smart windows and photovoltaic elevations. Moreover, the problems of solar walls incorporating TIM elements have been described with the help of the author's research.

Marian Marek Janczarek¹⁾

EFEKTY ENERGETYCZNE UZYSKANE NA PODSTAWIE BADAŃ PROCESÓW CIEPLNYCH W PRZECHOWALNIACH W REGIONIE LUBELSKIM

Streszczenie. W artykule przedstawiona jest analiza przejścia ciepła przez ścianę technicznej komory z uwzględnieniem harmonicznego charakteru atmosferycznych zmian temperatury. Sinusoidalne zmiany wielkości wejściowych na zewnętrznej powierzchni przegrody obiektu budowlanego powodują również sinusoidalny charakter zmian na wewnętrznej ścianie pomieszczenia. Przeprowadzone badania cieplne na rzeczywistym obiekcie pozwoliły na optymalny projekt komory ze względu na energetyczny aspekt przy jej eksploatacji.

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, energia, oszczędność energii w budynkach.

WSTĘP

Projektowanie domu czy też dowolnego obiektu budowlanego pod względem ochrony cieplnej konstrukcji wymaga znajomości zasad i procesów opisywanych przez fizykę budowli. Budowle – komory techniczne powinny spełniać wymagania związane z oszczędzaniem energii przy jednoczesnym zachowaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniach. Nieznajomość procesów cieplnych występujących w obiektach budowlanych a w szczególności nie dotrzymywanie poziomu wartości współczynników przewodzenia ciepła przez przegrody, może doprowadzić do marnotrawienia stale drożejącej energii a tym samum do nadmiernego zanieczyszczania powietrza atmosferycznego.

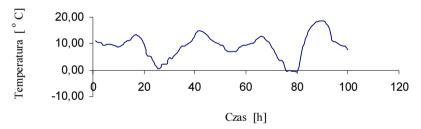
Problem oszczędzania energii na początku XXI wieku staje się jeszcze bardziej istotny niż w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, kiedy to po raz pierwszy pojawił się kryzys energetyczny związany z konfliktem zbrojnym na Bliskim Wschodzie. Konflikt ten trwa do dnia dzisiejszego w różnym stopniu nabrzmiały a dotyczy również kontroli nad źródłami konwencjonalnej energii.

¹⁾ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

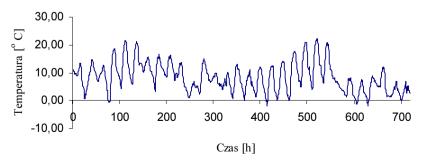
DYNAMIKA ZMIAN TEMPERATURY ATMOSFERYCZNEJ I JEJ WPŁYW NA WYMIANĘ CIEPŁA PRZEZ PRZEGRODY KOMORY

Umiejętność obliczania ilości wymienianego ciepła z otoczeniem oraz utrzymywania temperatury określonego pomieszczenia ma pierwszorzędne znaczenie dla projektowania a następnie prawidłowego eksploatowania urządzeń i obiektów w energetyce cieplnej, chłodnictwie, przemyśle spożywczym i w budownictwie. Dotychczas stosowane metody projektowania zewnętrznych przegród obiektów budowlanych uwzględniają warunki klimatyczne niestety tylko w sposób statyczny – określając średnią temperaturę powietrza w regionie. Tymczasem, jak jest powszechnie wiadomo, zmiany temperatury powietrza atmosferycznego są ze swej natury dynamiczne, występuje w nich składowa zmienna dobowa, dekadowa, miesięczna czy nawet roczna. Na poniższych rysunkach przedstawione są wybrane przebiegi temperatury atmosferycznej zarejestrowane w różnych porach roku w okolicach Lublina w celu wykazania ich oscylacyjnego charakteru w postaci sinusoidalnej zmienności.

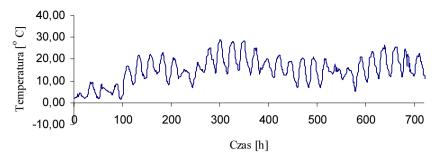
Projektując zatem zewnętrzną kilkuwarstwową przegrodę budynku – komory technicznej, należy wyżej wymienioną dynamikę zmian temperatury powietrza atmosferycznego uwzględnić, ponieważ ma ona znaczący wpływ na oszczędność energii agregatów chłodzących lub ogrzewających obiekt budowlany. Projekt taki miałby zapew-



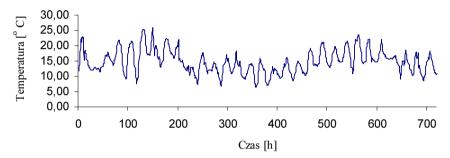
Rys. 1. Przebiegi dobowe temperatury atmosferycznej zarejestrowane w okolicach miasta Lublina w pierwszych trzech dniach miesiaca kwietnia



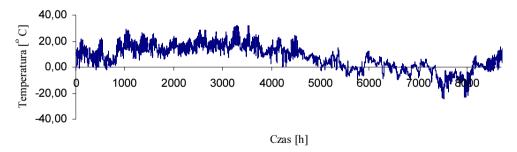
Rys. 2. Przebiegi temperatury atmosferycznej zarejestrowane w okolicach Lublina w miesiącu kwietniu



Rys. 3. Przebiegi temperatury atmosferycznej zarejestrowane w okolicach miasta Lublina w miesiacu maiu



Rys. 4. Przebiegi temperatury atmosferycznej zarejestrowane w okolicach Lublina w miesiącu czerwcu



Rys. 5. Przebiegi temperatury atmosferycznej zarejestrowane w okolicach Lublina w okresie jednego roku (od kwietnia 2007 do marca 2008)

nić taką bezwładność cieplną budynku (uzyskaną poprzez odpowiedni dobór materiałów budowlanych, ich grubości oraz ilości warstw przegrody), która pozwoliłaby dodatkowo wesprzeć energooszczędność zastosowanych w nim urządzeń. Najprościej wyjaśniając to zjawisko – chodzi w nim o tłumienie pojawiającej się amplitudy zmian temperatury we wnętrzu komory na skutek harmonicznych zmian temperatury zewnętrznej. Tak więc tłumienie to jest rezultatem przesunięcia fazowego wektora strumienia

ciepła przenikającego do pomieszczenia. Wielkość tego tłumienia i fazowe przesunięcie można przewidzieć na podstawie modelu matematyczno-fizycznego wykorzystującego na przykład analogię elektryczną w procesach związanych z wymianą ciepła.

W praktyce możemy uzyskać potwierdzenie przedstawionych rozważań dotyczących stabilności cieplnej obiektów chociażby na przykładzie istniejących do dnia dzisiejszego średniowiecznych budowli, np. kościołów, bibliotek czy zamków, w których nie ma potrzeby stosować klimatyzację w upalne dni lata a zimą specjalnego ogrzewania. Tak, więc współcześnie odpowiednio skonstruowana przegroda, zapewniająca inercyjność cieplną komory, pozwoli uzyskać znaczące oszczędności energii niezbędnej do utrzymywania określonej temperatury wewnątrz obiektów budowlanych.

WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA I JEGO ZNACZENIE W BADANYCH KOMORACH

Parametrem określającym przewodność cieplną jest współczynnik przewodzenia ciepła λ [Wm⁻¹K⁻¹], który zależy między innymi od gęstości objętościowej i struktury materiału przegrody, od wilgotności oraz temperatury. Współczynnik przewodzenia ciepła jest informacją o strumieniu energii, jaki przepływa przez jednostkową powierzchnię warstwy materiału o grubości 1 m, przy różnicy temperatur po obydwu stronach tej warstwy, równej 1 K (1°C).

Im większa jest gęstość objętościowa tym większy jest współczynnik, a tym samym materiał ma gorszą izolacyjność. Ponadto w materiałach o tych samych substancjach, lecz różnych gęstościach, występują różne współczynniki przewodzenia ciepła. Wzrost temperatury powoduje wzrost przewodności cieplnej materiałów budowlanych. Dzieje się tak, dlatego że następuje zwiększenie przewodności cieplnej substancji stałej i powietrza zawartego w porach. Jednocześnie w porach występuje przepływ ciepła wskutek promieniowania. Praktyczne zastosowanie tego zjawiska ma znaczenie tylko, gdy materiały są stosowane w wysokich lub niskich temperaturach, tj. np. izolacja gorących zbiorników. W przegrodach budowlanych wahania temperatur są stosunkowo niskie, co pozwala pominąć zmiany przewodności cieplnej. Jednak określając wartość współczynnika ë należy zawsze podawać temperaturę w jakiej został on oznaczony.

Zjawisko przewodzenia ciepła przez ściany zewnętrzne pomieszczeń stanowi największą część wymiany ciepła w komorach. Dominuje ono w całkowitym bilansie cieplnym obiektów budowlanych przeznaczonych zarówno do stałego przebywania w nich osób jak też i obiektów, w których przebywanie pracowników jest krótkotrwałe. Przegrody zewnętrzne spełniają funkcje ochronną nie tylko w stosunku do strat cieplnych lecz jednocześnie regulują warunki wilgotnościowe oraz powietrzne w pomieszczeniach. Ściany zewnętrzne powinny w określonym stopniu umożliwić przenikanie powietrza oraz pary wodnej przy jednoczesnym wchłanianiu wilgoci.

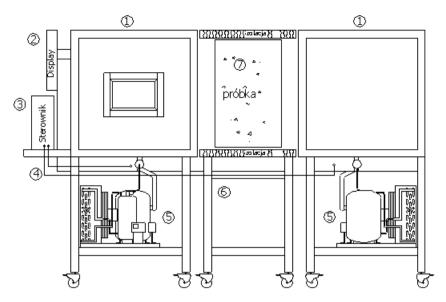
Jak jest powszechnie wiadomo, wartości fizyczne materiałów budowlanych ulegają niekorzystnym dla użytkownika zmianom pod wpływem zawilgocenia ściany.

Wilgoć ujemnie wpływa na jakość izolacji przegrody jak też i na jej trwałość. Celem skutecznej ochrony budynku przed wilgocia jest unikanie negatywnych wpływów jej obecności i wynikających z tego usterek lub szkód. Warunkiem utrzymania w pomieszczeniach budynku komfortowego mikroklimatu sa suche przegrody, otaczające to pomieszczenie. Wilgotne przegrody znacznie uniemożliwiają utrzymanie komfortowych warunków, jest to wręcz niemożliwe, nawet przy bardzo intensywnym ogrzewaniu. W ochronie przed wilgocia bardzo istotny jest także przepływ pary wodnej. Dyfuzja pary wodnej przez przegrody budowlane to proces wyrównywania cząstkowych ciśnień pary wodnej pomiędzy dwoma środowiskami, które rozdziela przegroda. Przepływ pary wodnej odbywa się od środowiska o wyższej koncentracji pary do środowiska o koncentracji niższej, tak więc para wodna będzie zawsze dyfundować w tym kierunku, gdzie powietrze jest bardziej suche. Właściwości materiałów związanych z dyfuzją pary wodnej przez materiały budowlane charakteryzuje współczynnik paroprzepuszczalności [mg/(m·h·Pa)]. Odpowiada on ilości pary wodnej w miligramach, jaka dyfunduje przez 1 m² warstwy materiału o grubości 1 m w ciągu jednej godziny i przy różnicy ciśnień po obydwu stronach tej warstwy równej 1 Pa. Podobnie, jak dla przepływu ciepła przez powłokę zewnętrzną budynku, wprowadzono pojęcie oporu dyfuzyjnego dowolnej warstwy materiału: $Z = d / \delta$, gdzie: d - grubość warstwy [m].

Woda zamknięta w porach ma współczynnik λ ok. 0,56 [Wm-1K-1] a więc około 20 razy większy od współczynnika λ powietrza zamkniętego w porach o średnicy około 0,05 mm materiału budowlanego. Dodatkowy wpływ na proces przewodzenia ciepła ma dyfuzja pary wodnej, z którą połączone jest zwiększone przenoszenie ciepła oraz kapilarne przemieszczanie się wilgoci. Ze wzrostem wilgotności materiałów następuje wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła. I dlatego obniżenie wartości termoizolacyjnych przez wilgoć spowodowane jest tym, że na miejsce powietrza zawartego w porach wchodzi właśnie woda.

Proces ten nie przebiega jednakowo w różnych materiałach, zależny jest od struktury i pochodzenia materiału, np. w betonach komórkowych przyjmuje się, że przyrost współczynnika λ wynosi ok. 4,5% na 1% przyrostu wilgoci.

Celem zweryfikowania tego zjawiska przeprowadzono eksperyment na stanowisku laboratoryjnym (rys. 6.) najpierw dla materiału mokrego a następnie podobny eksperyment powtórzono dla materiału bezpośrednio wyjętego z pieca – suszarki, tzn. dla cegły suchej. Warunki zewnętrzne eksperymentu dla obu przypadków były takie same. Temperatura w komorze ciepłej była zaprogramowana na poziomie +25 °C a temperatura w komorze zimnej na wartość + 1,5 °C. Mierzone wartości temperatur na obu powierzchniach cegły oraz w jej wnętrzu rejestrowane były niezależnie dla każdego z zainstalowanych sensorów, a następnie zapisywane na dysku komputera przy kroku pomiarowym wynoszącym 15 minut. Równolegle z pomiarem temperatury rejestrowana była również przy pomocy programu komputerowego wilgotność cegły. Uzyskane z pomiarów wartości temperatur, gęstości strumieni ciepła oraz wilgotności posłużyły do wyliczeń energetycznych w bilansie ciepła dla różnorodnych komór technicznych.



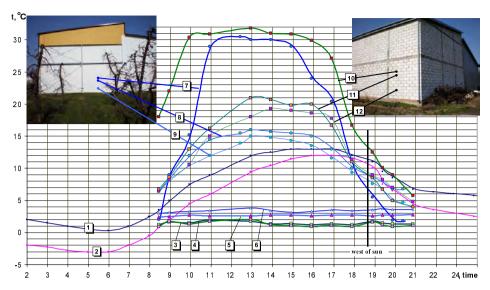
Rys. 6. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania gęstości strumieni ciepła

REZULTATY BADAŃ PROCESÓW CIEPLNYCH W PRZECHOWALNI JABŁEK

Badania dotyczące uzyskania oszczędności energii przeznaczonej na utrzymanie pożądanego mikroklimatu wewnątrz przechowalni owoców rozpoczęły się poprzez przeprowadzenie pomiarów temperatur i strumieni przenikającego ciepła w różnych miejscach ścian jak i podłóg w eksploatowanych komorach cieplnych.

Obiektami przeprowadzanych badań były przechowalnie jabłek i gruszek o pojemności 80 ton owoców każda, składowanych w drewnianych i przewiewnych skrzyniach. Temperatura przechowywania we wnętrzu każdej z komór utrzymywana była na poziomie od około 0^0 C do $+1^0$ C przez cały okres posezonowy owoców.

Pomiary temperatur i strumieni ciepła zostały przeprowadzone w okresie zimowo – wiosennym w roku 2007 na powierzchniach zewnętrznych oraz wewnętrznych na przegrodach obwodowych jak również na podłogach. Przegrody pierwszej komory zbudowane była z warstwy poliuretanu o grubości 12 cm a drugiej komory ze styropianu o grubości 20 cm. Obie ściany zewnętrzne obiektów chłodniczych pokryte były obustronnie powlekaną blachą stalową. Temperatura atmosferyczna powietrza była pobrana z dobowych wykresów zmian temperatury dla tego miejsca, tzn. regionu Radzynia Podlaskiego, dostępnych na stronach internetowych numerycznego prognozowania pogody. Przeprowadzone zostały pomiary gęstości strumieni ciepła w siedmiu odległych od siebie o około 1 metra punktach zewnętrznej warstwy przegrody na wszystkich czterech stronach obu komór przechowalniczych owoców. Podobne pomiary gęstości strumieni ciepła przeprowadzono na wewnętrznych warstwach ścian oraz na



Rys. 7. Dobowe przebiegi rozkładu temperatur na powierzchniach przechowalni owoców

podłogach komór. Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły wskazać miejsca występowania największych strat ciepła w eksploatowanych obiektach chłodniczych. Poza miejscami związanymi z niedostateczną izolacyjnością komór przechowalniczych wskazano również przyczyny pojawiających się strat ciepła ze względu na orientację geograficzną obiektu jak i na umiejscowienie przyległego do przechowalni jabłek i gruszek pomieszczenia technicznego i magazynu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione na powyższym rysunku wyniki pomiarów są fragmentem badań związanych z przepływem ciepła przez przegrody przechowalni i dokonywane były w różnych wariantach zarówno temperaturowych jak i czasowych jak również na rzeczywistych jak i na modelowych obiektach. Przy pomocy różnorodnych sond pomiarowych można było odczytywać wartości temperatur jak i strumieni ciepła w dowolnych miejscach badanej ściany. Na stanowisku laboratoryjnym można było symulować na obu stronach przegrody różne warunki związane z przebiegiem temperatury atmosferycznej jak również z żądanym reżimem cieplnym wnętrza komory. Uzyskane wyniki pozwalają optymalizować konstrukcję przegród komory przechowalniczej uzyskując w związku z tym wymierne efekty ekonomiczne. Możemy się śmiało domyślać, że zapotrzebowanie stale drożejącej energii elektrycznej na utrzymywanie temperatury o wartości jednego stopnia Celsjusza we wnętrzu przechowalni przez okres ponad pół roku w naszym klimacie wymaga znacznych nakładów finansowych. W wyniku współ-

pracy z sadownikami i jednocześnie z właścicielami przechowalni owoców można było stwierdzić aktualny stan zapotrzebowania na energię a jednocześnie wskazać drogę do uzyskania oszczędności energetycznych przy eksploatacji przechowalni jabłek.

PIŚMIENNICTWO

- 1. Carlslaw H., Jaeger J.: Conduction of heat in solids. Oxford University, 1959.
- Janczarek M., Skalski P., Suchorab Z.: Przewodzenie ciepła przez przegrodę w stanach ustalonych i nieustalonych. W: Informatyka w technice, Tom I., Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2006.
- 3. Janczarek M., Skalski P., Bulyandra A., Sobczuk H.: Przewodność cieplna zewnętrznych ścian budynków w aspekcie wilgotności i oszczędności energii Rynek Energii, nr 4 (65) 2006.
- 4. Janczarek M.: Wyznaczanie bilansu cieplnego komór chłodniczych. W: Materiały XII Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Ciepła 2006. Kaprint, Lublin 2006.
- 5. Janczarek M., Bulyandra O.F.: Zbierigannia fruktiw u gazowich serediwiszczach. Harchowa Promislowist, nr 5 UDK 664(04)(082), Kyiv, Ukraine 2007.
- Janczarek M.M., Bulyandra O.F., Szapowalenko O. I., Winogradov-Saltykov W.A.: Osobiennosti rasczieta tiepłowowo balansa tiepłowych kamer chranienia fruktow. Naukowi Praci, wipusk 31, tom 2, Odesska Nacionalna Akademia Charczowych Technologii. Odessa, Ukraine 2007.
- 7. Janczarek M.M.: Determining of coefficient of heat transfer in bricks depended from degree of their moisture. CEEPUS WEB Summer School 2007 "Informatics Systems in Automation", University of Maribor. Maribor, Slovenia 2007.
- 8. Janczarek M.M. The analysis of wall temperatures in a fruit storage in the aspect of transient heat flow. Engineering Mechanics 2009. Svratka, Czech Republic 2009.
- 9. Janczarek M.M.: Technological describtion of heat and mass transfer processes in thermal treatment of fruit storage chambers. Engineering Mechanics 2009. Svratka, Czech Republic 2009.
- Winogradov-Saltykov W.A., Janczarek M.M., Fiedorow W.G., Kiepko O.I.: Tiepłometriczeskije issliedowanie tiepłozaszczitnych swoistw ograżdienij. Industrial Heat Engineering, International Scientific and Applied Journal, Vol. 31., No 4/2009, Kyiv, Ukraine: 116–123.

ENERGETIC EFFECTS IN EXPLOITATION THERMAL TREATMENT CHAMBERS FOR FRUIT IN REGION OF LUBLIN

Summary

In this paper is presented new concept of thermal analysis derived from harmonic character of temperature changes in bilding environment. The analytical approach seems appropriate to obtain established purposes i.e.: the description of temperature changes and heat transfer within the chamber walls and its gaseous environment. The paper presents exemplary measurement results taken in Lublin region during various periods throughout a year. The proper construction of an object with prescribed thermo-stability characteristic can use the phase difference between internal and external temperature and allow to lower costs of energy, necessary for cooling or heating the technical spaces.

Key words: heat exchanges, energy, savings of energy in buildings.

Krystyna Pomorska¹⁾

PROBLEMATYKA OPRACOWYWANIA NORM NA OZNACZANIE PESTYCYDÓW W POWIETRZU ŚRODOWISKA PRACY

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono zasady opracowywania metod analitycznych oznaczania pestycydów w środowisku pracy oraz wytyczne dla opracowywania norm dotyczących oznaczania tych substancji. Zarówno zasady dotyczące metody analitycznej jaki wytyczne do opracowywania projektu Polskiej Normy, oparte są na badaniach autorki, która opracowała 10 Polskich Norm na oznaczanie tych substancji w powietrzu środowiska pracy podczas wykonywania czynności zawodowych przez pracowników. Zawarte w opracowaniu zasady dotyczące przygotowania metody analitycznej na oznaczanie tych substancji w powietrzu dotyczą metody chromatografii gazowej.

Słowa kluczowe: normy, pestycydy, powietrze środowiska pracy.

WPROWADZENIE

W ocenie narażenia zawodowego pracowników wykonujących prace związane z chemiczną ochroną roślin, związanego z obecnością substancji chemicznych w powietrzu środowiska pracy są wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS).

W Polsce istnieje i działa system ustanawiania normatywów higienicznych w tym NDS, zgodnie z postanowieniami dyrektywy UE. Głównym ogniwem tego systemu jest powołana przez prezesa Rady Ministrów Międzyresortowa Komisja do Spraw Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Skład Komisji reprezentowany jest przez przedstawicieli wielu resortów związanych z problematyką ochrony człowieka w środowisku pracy. Należą do nich resorty: zdrowia, pracy, przemysłu, ochrony środowiska, ale także instytucje naukowe, pracodawcy i przedstawiciele związków zawodowych [1].

Rolą tej Komisji jest przedstawianie propozycji wartości NDS ministrowi gospodarki i pracy, które po zatwierdzeniu publikowane są w Dzienniku Ustaw w formie rozporządzenia i stają się normatywami higienicznymi obowiązującymi prawnie na terenie Polski [2, 3].

Wartości Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń (NDS) w Środowisku Pracy służą ocenie warunków pracy a tym samym profilaktyce ochrony pracy. Podstawowym warunkiem przestrzegania obowiązujących NDS jest kontrola powietrza środowiska

¹⁾ Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

pracy w zakresie pomiarów stężeń substancji szkodliwych. Do tego celu niezbędne są metody analityczne pozwalające na oznaczanie tych substancji w powietrzu środowiska pracy na poziomie stężeń niskich rzędu 0,1 mg/m³ a nawet 0,001 mg/m³.

Badania i pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia wykonuje się metodami określonymi w Polskich Normach, które oparte są na opracowaniu opracowania metody analitycznej oznaczania substancji szkodliwych w powietrzu środowiska pracy.

Podstawą do opracowania Polskiej Normy na oznaczanie substancji szkodliwych jest opracowana w oparciu o badania doświadczalne analityczna metoda oznaczania. W oparciu o przedstawioną metodę analityczną powstaje projekt, a następnie Polska Norma przygotowana i zatwierdzona przez odpowiednie Komisje i Polski Komitet Normalizacyjny.

PROGRAM BADAŃ OPRACOWANIA METODY ANALITYCZNEJ OZNACZANIA SUBSTANCJI CHEMICZNEJ W POWIETRZU

Opracowanie takich badań jest zlecane jednostkom naukowo-badawczym. Autorka na podstawie doświadczeń w realizacji badań tego typu, opracowała poniższe zasady, które mają ułatwić prace w przygotowywaniu metody analitycznej odpowiadającej wymogom Polskich Norm.

- 1. Zebranie ogólnych danych na temat oznaczanej substancji:
 - nazwa chemiczna badanego związku (nr. CAS), nazwa zwyczajowa,
 - nazwy preparatów w skład których wchodzi badany związek,
 - klasa toksyczności, działanie toksykologiczne,
 - wartości NDS i NDSCh (Najwyższe Dopuszczalne Stężenie Chwilowe).
- 2. Właściwości fizykochemiczne związku:
 - wzór sumaryczny,
 - ciężar cząsteczkowy,
 - postać występowania,
 - temperatura topnienia, wrzenia,
 - prężność par,
 - rozpuszczalność,
 - trwałość,

W oparciu o zebrane właściwości badanej substancji można wybrać metodę analitycznego oznaczania. Najczęściej stosowaną i efektywną metodą do tego typu oznaczań jest metoda chromatografii gazowej.

Opracowanie metody oznaczania substancji chemicznej w powietrzu składa się z dwóch zasadniczych etapów:

- a) pobierania próbek powietrza,
- b) analitycznego oznaczania substancji w pobranych próbkach.

Zasada pobierania próbek substancji toksycznych z powietrza polega na sorpcji substancji toksycznych z powietrza w odpowiednim medium pochłaniającym. Do tego celu służą aspiratory umożliwiające zasysanie próbek powietrza z określonym żądanym przepływem objętości oraz płuczki, (samplery) wypełnione sorbentem. W przypadku pobierania pestycydów z powietrza stosuje się próbniki wypełnione żelem krzemionkowym z chemicznie związaną fazą oktadecylową (ODS-C18) [4].

Tabela 1. Charakterystyka sorbentu stosowanego do pobierania próbek pestycydów z powietrza

d _p	S _{BET}	-∆S _{BET}	D	V _p	Pokrycie
mm	m²/g	%	nm	cm³/g	%
1	252,7	14,5	11,97	0,8107	5,9

Metoda analitycznego oznaczania substancji występujących w powietrzu musi umożliwiać oznaczanie na poziomie 1/3 wartości NDS, co sprowadza się do wartości 0,1 mg – 0,001 mg/m³. Wymaga to odpowiednio czułych metod oznaczania. Metodą stosowaną w oznaczaniu pestycydów w powietrzu jest metoda chromatografii gazowej.

Uwzględniając właściwości fizykochemiczne oznaczanej substancji dobiera się:

- rodzaj i typ kolumny chromatograficznej,
- rodzaj detektora,
- warunki pracy chromatografu gazowego.

Tabela 2. Rodzaje kolumn chromatograficznych stosowanych w oznaczaniu pestycydów

Lp.	Symbol Helwett Packard	Skład fazy stacjonarnej	Fazy o podobnej polarności *
1.	Hp-1 Hp-101	Polisilikon dimetylowy	DB-1, BP-1, SPB-1, GB-1, CP-sil 5, 0071, RSL-150, Rtx-1, OV-1, SE-30, PE-1
2.	HP-50	(50%)-difenylo – (50%)-dimetylosilikonu	DB-17, Rtx-50, SP-2250, DB-17 ht, SPB-50, 007-17, CP sil 19, RSL-300, AT-50, OV-17
	HP-17	(50%)-fenylo – (50%)-metylosilikonu	OV-17, DB-17, SP-2250, 007-17, CP-sil 19, RSL-300, Rtx-50
3.	HP-35	(35%)-difenylo – (65%)-dimetylosilikonu (copolymer)	DB-35, Rtx-35, SPB-35, AT-35
4.	HP-5 HP-5MS HP-PAS-5 Ultra 2	(5%)-difenylo – (95%)-dimetylosilikonu (copolymer)	DB-5, DB-5 MS, DB-5 ht, DB-5,625, SPB-5, XTI-5, MXT-5, GC-5, CP-sil 8, RSL-200, OV-5, SE-54, 007-2, SE-52, Rtx-5
5.	HP-1701 HP-PAS 1701	(14%)-cyjanopropopylofenulo – (85%)- dimetulosilikonu (copolymer)	DB-1701, Rtx-1701, SPB-7, SPB-1701, BP-10, OV-1701, 007-1701, CP-sil 19CB, MXT-1701

^{*} HP – Hewlett Packard, DB – J & W, Rtx (MXT) – Restek, PE – Perkin Elmer, SPB – Supelco, CP – Chrompack.

Tabela 3. Rodzaje detektorów stosowanych w analityce pestycydów metodą chromatografii gazowej [5]

Grupa chemiczna	Detektor najczęściej stosowany	Detektor stosowany zamiennie
Chloroorganiczne	wychwyt elektronów (ECD)	przewodnictwa elektrolitycznego (ELCD)
Fosforoorganiczne	azotowo-fosforowy (NPD)	płomieniowo fotometryczny(FPD) ^p i ECD
Karbaminiany	spektrometrii mas (MSD)	
Ditiokarbaminiany	płomieniowo-fotometryczny (FPD) ^s	
Pochodne kwasu	wychwyt elektronów (ECD),	
fenoksyoctowego	przewodnictwa elektrolitycznego (ELCD)	
Triazyny	wychwyt elektronów (ECD),	
	azotowo-fosforowy (NPD	
Pyretroidy	wychwyt elektronów (ECD), azotowo-fosforowy (NPD)	przewodnictwa elektrolitycznego (ELCD)

(FPD)^S – detektor selektywny na siarkę.

(FPD)p – detektor selektywny na fosfor.

Warunki pracy chromatografu gazowego polegają na zoptymalizowaniu dla oznaczanej substancji na poziomie wykrywalności 1/3 NDS: temperatury kolumny, temperatury dozownika, temperatury detektora, przepływu gazu nośnego.

Opracowana metoda analityczna oznaczania badanej substancji powinna zawierać następujące dane dowiadczalne:

- oznaczalność metody na poziomie 1/3 NDS,
- współczynnik korelacji charakteryzujący liniowość krzywej wzorcowej,
- współczynnik zmienności dla roztworów wzorcowych,
- współczynnik desorpcji dla roztworów ze średnich wartości na krzywej wzorcowej,
- precyzję metody,
- dane dotyczące przechowywania pobranych próbek (trwałość).

Na podstawie tak przeprowadzonych badań doświadczalnych opracowuje się projekt normy, który następnie przesyłany jest do opublikowania w czasopiśmie Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy i do Komitetu Normalizacyjnego.

PROGRAM OPRACOWANIA PROJEKTU POLSKIEJ NORMY NA OZNACZANIE SUBSTANCJI TOKSYCZNYCH W POWIETRZU ŚRODOWISKA PRACY

Projekt Normy zgodnie z wytycznymi Polskiego Komitetu Normalizacyjnego zawierać powinien:

• zakres stosowania metody (gdzie stosowana oraz najmniejsza możliwa wartość oznaczenia proponowaną metodą,

- normy powołane,
- zasadę metody,
- wytyczne ogólne,
 - czystość odczynników,
 - dokładność ważenia,
 - postępowanie z odczynnikami i substancjami toksycznymi,
- odczynniki i roztwory konieczne do wykonania oznaczania analitycznego,
- roztwory wzorcowe badanej substancji,
- aparaturę, przyrządy i sprzęt pomocniczy,
- metodę pobierania próbek powietrza,
- warunki pracy aparatury pomiarowej,
- opis wykonania krzywej wzorcowej,
- opis wykonania oznaczania,
- opis wykonania współczynnika odzysku,
- obliczanie wyników oznaczania,
- inne informacje.

Przygotowany projekt zgodnie z wypełnionymi powyższymi punktami przedstawiany jest na posiedzeniu Komitetu d.s. Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych w Środowisku Pracy. Po dyskusji nad projektem oraz ewentualnych poprawkach projekt może zostać przyjęty i opublikowany jako Polska Norma.

Autorka opracowała i opublikowała 10 Polskich Norm na oznaczanie pestycydów w powietrzu środowiska pracy [6–15].

PIŚMIENNICTWO

- Rozporządzenie Prezesa rady Ministrów z dnia 13 października 2003 r. w sprawie powołania Międzyresortowej Komisji do Spraw Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy (Dz.U. Nr 178, poz. 1740).
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29. 11. 2002r. w sprawie Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy (Dz.U. N. 217, poz. 1833).
- 3. Rozporządzenie ministra Zdrowia z dnia 20 grudnia 2002 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. z 2003 r. Nr. 21, poz. 180).
- 4. Pomorska K. 1993. A Device to Test Pesticides Sorption from Gas Phase. Chem. Anal., 38: 433–435.
- 5. Lasa J. 1997. Detektory stosowane w chromatografii gazowej. Monografia. Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego, Kraków.
- 6. Pomorska K. 1986. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości 2,4-D. Oznaczanie 2.4-D na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej. PN-86/Z-04175/02.
- 7. Pomorska K. 1987. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie zinebu na stanowiskach pracy metodą kolorymetryczną. PN-87/Z-04182/05.

- Pomorska K. 1986. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości propoksuru. Oznaczanie propoksuru na stanowiskach pracy metodą kolorymetryczną. PN-86/Z-04154/ 01,02.
- Pomorska K. 1987. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie bromfenwinfosu na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej. PN-87/ Z-04182/07.
- Pomorska K. 1987. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie malationu na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej. PN-87/Z-04182/10,
- 11. Pomorska K. 1988. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie diazynonu na stanowiskach pracy metoda chromatografii gazowej. PN-88/Z-04182/12,
- Pomorska K. 1989. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie kwasu trójchlorooctowego na stanowiskach pracy metodą spektrofotometryczną w świetle widzialnym. PN-89/Z-04182/14.
- Pomorska K. 1990. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie metydationu w powietrzu na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej. PN-90/Z-04182/16.
- Pomorska K. 1992. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie deltametryny w powietrzu na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej. PN-92/Z-04182/19.
- Pomorska K. 1994. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie pirymikarbu w powietrzu na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej. PN-94/Z-04182/21.

SCOPE OF PROBLEMS CONCERNING THE DEVELOPMENT OF STANDARDS FOR PESTICIDES DETERMINATION IN THE AIR OF THE WORK ENVIRONMENT

Summary

The report presents the principles for the development of an analytical method in determining pesticides in the work environment, and guidelines for standards concerning the determination of these substances. Both the principles concerning the analytical method, and the guidelines for a Polish Standard, are based on own studies by the author who has already developed 10 Polish Standards for the determination of these substances in the air of the work environment while performing occupational activities by the employees. The principles contained in the report pertaining to the preparation of the analytical method for the determination of these substances in the air concern the method of gas chromatography.

Key words: standards, pesticides, air in the work environment.

Małgorzata Mrozik¹

BADANIA I OCENA PRĘDKOŚCI PORUSZANIA SIĘ PIESZYCH UŻYTKOWNIKÓW RUCHU DROGOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań, które miały na celu określenie prędkości poruszania się pieszych użytkowników ruchu drogowego na drodze w obszarze zabudowanym. Badania przeprowadzono w czterech grupach wiekowych w miejscach dozwolonych zarówno bez jak i z sygnalizacją świetlną. Dodatkowo sprawdzono zależność prędkości pieszego od jego wieku i miejsca przekraczania jezdni. Porównano również rzeczywistą prędkość pieszych użytkowników ruchu drogowego z przyjętymi średnimi wartościami prędkości dla pieszych. Wartości prędkości otrzymane w wyniku przeprowadzonych badań dają możliwość precyzyjnego określenia czasu przebywania pieszego na jezdni. W konsekwencji umożliwiają sprawdzenie możliwości uniknięcia potrącenia pieszego przez kierowcę oraz ich wzajemnego przyczynienia się do zaistniałego wypadku drogowego.

Słowa kluczowe: wypadek drogowy, prędkość, pieszy, przejście dla pieszych

WSTĘP

Obecna cywilizacja stawia ludzi wobec nowych i trudnych zadań wynikających z rozwoju nauki, techniki i technologii a także destrukcyjnej działalności człowieka. Bardzo szybki rozwój transportu drogowego, który obserwujemy w kraju i za granicą, prowadzi do coraz to większej intensywności ruchu samochodowego na drogach. Powoduje to, pomimo wielu starań i zabiegów konstrukcyjnych nad podwyższeniem walorów pojazdu z uwagi na jego bezpieczeństwo czynne i bierne, że problem bezpieczeństwa kierowcy i pasażerów pojazdu a także innych uczestników ruchu drogowego, nie jest w pełni rozwiązany.

Jednym z bardzo ważnych zadań człowieka jest zminimalizowanie ofiar na drogach oraz poprawa jakości życia poprzez skuteczną profilaktykę i edukację w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Szacuje się, ze rocznie na drogach całego świata śmierć ponosi prawie 900 tysięcy osób a rannych zostaje 34 miliony. Analiza danych statystycznych prowadzona w różnych krajach pozwoliła na oszacowanie, że około 85% wypadków jest spowodowanych błędem człowieka lub świadomym podejmowaniem

¹⁾ Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

ryzyka. Prognozy wskazują, że liczba wypadków spowodowanych błędem człowieka może się zwiększyć dlatego też bardzo ważne jest minimalizowanie tych zdarzeń.

Sposób poruszania się pieszych ma istotny wpływ na bezpieczeństwo w ruchu drogowym, a ich prędkość i natężenie na danym przejściu dla pieszych i skrzyżowaniu są niezbędnymi parametrami do zaprojektowania prawidłowo działającej sygnalizacji świetlnej. Według norm minimalny czas trwania zielonego światła, aby pieszy mógł bezpiecznie przejść przez jezdnię, obliczano zależnie od szerokości jezdni, zakładając prędkość przekraczania jezdni przez pieszego na 1,4 m/s [1, 2, 3].

Celem artykułu jest sprawdzenie czy wartość ta pokrywa się z rzeczywistym stanem panującym na szczecińskich ulicach a także analiza sposobów zwiększenia bezpieczeństwa pieszych w ruchu drogowym i ich oddziaływania na zmniejszenie liczby wypadków z ich udziałem.

METODA I WARUNKI BADAŃ

Celem przedstawionych badań było wyznaczenie ruchu pieszych w wieku od 8 do 70 lat, z uwzględnieniem płci i tempa ruchu. Wyniki otrzymane w badaniach stanowią główny czynnik warunkujący możliwość określenie prawdopodobnego czasu przebywania pieszego na jezdni od chwili powstania stanu zagrożenia do chwili wypadku drogowego. W konsekwencji umożliwiają ustalenie możliwości uniknięcia potrącenia pieszego.

Badania zostały przeprowadzone w Szczecinie na przejściach dla pieszych, usytuowanych na różnych typach ulic o różnych natężeniach ruchu pojazdów. Pieszych podzielono na cztery grupy uwzględniając ich płeć i wiek. Badanie polegało na mierzeniu czasu pokonania danego przejścia dla pieszych o danej szerokości. Pomiary dokonywano dla typowego tempa poruszania się pieszego w danym wieku przy użyciu stopera o dokładności pomiaru 0,01 s. Warunki atmosferyczne były bardzo dobre.

Korzystano z zależności:

$$v = \frac{s}{t}$$

gdzie: s - droga, t - czas.

WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań przedstawiono w tabelach 1–5 oraz na rysunkach 1–5.

Tabela 1. Pomiar prędkości poruszania się pieszych na przejściu dla pieszych – Ku Słońcu. Jednokierunkowa dwupasmowa – na światłach

Płeć	Prędkość poruszania się [m/s]				
FIEC	dzieci	osoby starsze			
М	1,163	1,500	1,267	1,019	
K	1,180	1,403	1,210	0,984	

Tabela 2. Pomiar prędkości poruszania się pieszych na przejściu dla pieszych – Ku Słońcu. Jednokierunkowa dwupasmowa – bez świateł

Płeć	Prędkość poruszania się [m/s]				
Fiec	dzieci młodzież dorośli osoby star				
М	1,248	1,387	1,240	1,005	
K	1,378	1,502	1,352	0,934	

Tabela 3. Pomiar prędkości poruszania się pieszych na przejściu dla pieszych – Piastów. Jednokierunkowa trzypasmowa – bez świateł

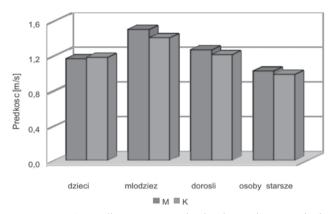
Płeć	Prędkość poruszania się [m/s]				
FIEC	dzieci młodzież dorośli osoby starsze				
М	1,138	1,414	1,524	1,260	
K	1,233	1,496	1,486	1,349	

Tabela 4. Pomiar prędkości poruszania się pieszych na przejściu dla pieszych – Piastów. Jednokierunkowa trzypasmowa – na światłach

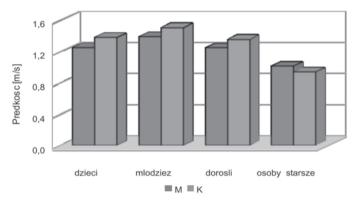
Płeć	Prędkość poruszania się [m/s]				
FIEC	dzieci młodzież dorośli osoby starsze				
М	1,108	1,367	1,504	1,245	
K	1,122	1,226	1,481	1,234	

Tabela 5. Pomiar prędkości poruszania się pieszych – Narutowicza. Dwukierunkowa dwupasmowa – przekraczanie jezdni przez pieszych w miejscu niedozwolonym

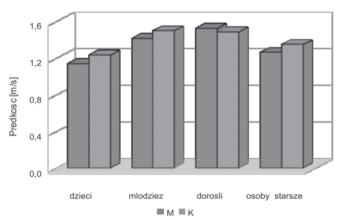
Płeć	Prędkość poruszania się [m/s]				
FIEC	dzieci młodzież dorośli osoby starsz				
М	1,454	1,368	1,255	1,339	
K	1,439	1,393	1,477	1,124	



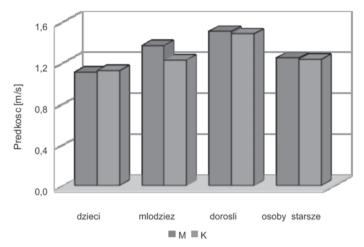
Rys. 1. Prędkość poruszania się pieszych na przejściu – ulica jednokierunkowa dwupasmowa – na światłach



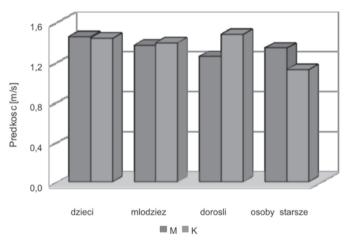
Rys. 2. Prędkość poruszania się pieszych na przejściu – ulica jednokierunkowa dwupasmowa – bez świateł



Rys. 3. Prędkość poruszania się pieszych na przejściu – ulica jednokierunkowa trzypasmowa – bez świateł



Rys. 4. Prędkość poruszania się pieszych na przejściu – ulica jednokierunkowa dwupasmowa – na światłach



Rys. 5. Prędkość poruszania się pieszych w miejscu niedozwolonym – ulica dwukierunkowa dwupasmowa

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wiemy, że koniec XX oraz początek XXI wieku nacechowane są dynamicznym rozwojem nowoczesnej technologii, a w szczególności motoryzacji. Wiąże się z tym bardzo szybki wzrost ruchu drogowego, który pokazał społeczny problem nieprzystosowania się człowieka do bezpiecznego uczestnictwa w tym ruchu. Tak szybkiemu wzrostowi motoryzacji nie towarzyszy dynamiczny rozwój infrastruktury drogowej oraz budowa skutecznego systemu, który ułatwiłby wszystkim uczestnikom ruchu

drogowego dostosowanie się do wymogów bezpiecznego w nim uczestnictwa. Jak widać szczególnie słabym ogniwem w systemie komunikacji drogowej jest pieszy uczestnik ruchu, w której najbardziej narażone są dzieci i młodzież w wieku szkolnym.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Przyjmowana w normach średnia prędkość pieszych na poziomie 1,4 m/s jest adekwatna do warunków panujących na szczecińskich ulicach. Oczywiście, analizujemy średnią arytmetyczną prędkości gdyż widać iż osoby starsze poruszają się znacznie wolniej, a dzieci, młodzież i dorośli znacznie szybciej.
- 2. Średnia prędkość poruszania się zależy także od organizacji ruchu na przejściu dla pieszych. Widać, że na przejściu dla pieszych wyposażonym w światła piesi, czując się zapewne bezpieczniej, poruszają się wolniej, niż na tej samej ulicy sześćdziesiąt metrów dalej na przejściu bez świateł.
- 3. Wejście pieszego na jezdnię i jego zachowanie podczas jej przekraczania zależy m.in. od prędkości nadjeżdżającego pojazdu i odległości od niego. Pieszy, przekraczający jezdnię w miejscu dowolnym lub na przejściu wyznaczonym lecz bez sygnalizacji świetlnej, kieruje się własną oceną sytuacji i ocenia prędkość nadjeżdżającego pojazdu pod kątem możliwości bezpiecznego przejścia.
- 4. Na przejściach w centrum miasta o większym natężeniu pojazdów prędkość poruszania się pieszych jest znacznie większa niż na ulicach o mniejszym natężeniu ruchu.

Na podstawie przeprowadzonych badań i ich oceny oraz analizy statystyk policyjnych można jednoznacznie stwierdzić, że najwięcej osób traci życie i jest rannych w wypadkach drogowych wynikających z nadmiernej prędkości jazdy i niedostosowania jej do warunków panujących na drodze. To stwierdzenie jest jednak nie do końca prawdziwe.

Większość wypadków ma miejsce w wyniku nałożenia się na siebie w jednym czasie więcej niż jednej przyczyny gdyż wiele wypadków ma również miejsce z winy nieprzestrzegania przepisów ruchu drogowego przez pieszych użytkowników np. w wyniku nieprawidłowego przechodzenia pieszych przez przejścia dla pieszych.

LITERATURA

- 1. Wicher J.: Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- 2. Wierciński J.: Wypadki drogowe elementy analizy technicznej i opiniowania. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985.
- Szczuraszek T.: Bezpieczeństwo ruchu miejskiego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.

TESTS FOR SPEED EVALUATION OF PEDESTRIAN TRAFFIC USERS' MOVE

Abstract

The manuscript presents the results of the tests which were conducted to determine the speed of pedestrian traffic users' move on a built-up area road. The tests were carried out within four age groups in spaces allowed, both with traffic lights and without them. Additionally, the dependence of pedestrian's walking speed on his age and a place of crossing the road was checked. Real walking speed of pedestrian traffic users and given average values of pedestrians' walking speed were compared too. The speed values received as a result of tests give possibility of determining the pedestrian's time of residence on the road in a precise way. Consequently they allow to check if it is possible for pedestrians to avoid knocking over by a driver and what way each of them could cause a car crash.

Keywords: car crash, speed, pedestrian, pedestrian crossing

Tomasz Oczkowicz¹⁾

NIEJEDNORODNOŚĆ WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH CIAGNIONYCH RUR KWADRATOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono zalety i zastosowanie rur kwadratowych oraz proces ciągnienia badanych rur. Z kolei przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych tych rur. Badano następujące własności mechaniczne materiału rur kwadratowych: umowna granica sprężystości $R_{0.05}$, umowna granica plastyczności $R_{0.2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m , naprężenie rozrywające R_u , wydłużenie A_{10} , wydłużenie równomierne A_r , przewężenie Z, a także zapas plastyczności $R_{0.2}/R_m$ oraz twardość Vickersa HV5. Własności mechaniczne określone w statycznej próbie rozciągania badano na próbkach wyciętych w takich miejscach charakterystycznych przekroju rury kwadratowej jak naroża i środki długości płaskich ścianek, natomiast twardość badano na przekrojach poprzecznych rur w analogicznych miejscach charakterystycznych jak wyżej i ponadto w płaskich ściankach w pobliżu naroży, przy czym badania twardości prowadzono w trzech warstwach na grubości ścianki rury: w warstwie przyzewnętrznej, w warstwie środkowej i w warstwie przywewnętrznej. Stwierdzono znaczącą niejednorodność własności w badanych miejscach charakterystycznych rur. Stwierdzono również prawidłowości w rozkładach twardości w miejscach charakterystycznych w badanych warstwach ścianek rur.

Slowa kluczowe: rury profilowe, ciągnienie rur, własności mechaniczne.

WSTĘP

Występujący w ostatnich latach wzrost zapotrzebowania na rury profilowe wynika z licznych zalet tych wyrobów w stosunku do wyrobów o przekroju kołowym. Różnorodne warunki pracy elementów konstrukcyjnych, w różnych dziedzinach techniki, wymagają od nich odpowiednich własności, dostosowanych do tych warunków. Tylko w pewnych przypadkach zastosowań najlepsze własności wykazują wyroby okrągłe, np. rury okrągłe do przewodzenia płynów pod ciśnieniem. Jednak w wielu przypadkach zastosowań wyroby okrągłe nie mogą, w sposób właściwy, spełnić żądanych wymagań i własnościami ustępują wyrobom profilowym. Przy analizie cech geometrycznych i materiałowych wyrobów oraz technologii ich wytwarzania należy uwzględnić kryteria techniczne, ekonomiczne, a także ekologiczne. Należy tu uwzględnić np. wła-

Instytut Materiałów inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.

sności wytrzymałościowe, łatwość montażu, a w niektórych przypadkach również walory estetyczne. Szczególnymi zaletami wyróżniają się rury profilowe o przekroju kwadratowym i prostokątnym.

Oprócz zapewnienia wyrobom profilowym odpowiednich cech geometrycznych i materiałowych oraz własności mechanicznych, określonych jako wartości średnie, dla podwyższenia jakości wyrobów i lepszego ich dostosowania do warunków pracy (np. obciążenia, tarcia, przewodności elektrycznej, itp.), czyli polepszenia ich własności użytkowych, należy uwzględnić rozkład własności mechanicznych (np. twardości) na przekroju poprzecznym wyrobów. Z analizy warunków pracy danego elementu maszyny lub urządzenia wynikają różne jego cechy użytkowe. Niekiedy poszczególne części powierzchni lub warstwy przekroju poprzecznego danego wyrobu powinny spełniać odmienne wymagania, a zatem powinny mieć różne własności na przekroju poprzecznym. W niektórych więc przypadkach zastosowań wyrobów pożądany może być niejednorodny rozkład własności (np. twardości) o określonym przebiegu na przekroju poprzecznym.

Dla zapewnienia jakości tych wyrobów należy dobrać lub zaprojektować odpowiedni proces technologiczny wytwarzania. Celem pracy jest określenie wpływu zastosowanego procesu ciągnienia na własności mechaniczne i niejednorodność ich rozkładu na przekroju poprzecznym ciągnionych rur kwadratowych.

ZALETY I ZASTOSOWANIE RUR KWADRATOWYCH

Rury kwadratowe odznaczają się korzystniejszym wskaźnikiem wytrzymałości przekroju poprzecznego na zginanie, w porównaniu z wyrobami o przekroju kołowym o tej samej wartości pola powierzchni przekroju, a zatem o tej samej masie jednostki długości wyrobu. Pozwala to na zmniejszenie masy własnej elementów maszyn i urządzeń lub konstrukcji nośnych, pracujących na zginanie, wykonanych z tych elementów, dzięki czemu uzyskuje się m.in. znaczne oszczędności materiału lub zwiększenie wytrzymałości elementów bez równoczesnego zwiększenia masy.

Szczególnie znaczenie ma zastosowanie rur profilowych kwadratowych i prostokątnych w budowie maszyn transportowych, takich jak np. samochody, ciągniki i samoloty. Uzyskanie, dzięki stosowaniu tych rur, obniżenia masy maszyn transportowych jest źródłem oszczędności paliw, a ponadto pozwala na polepszenie ich parametrów eksploatacyjnych takich jak: prędkość, przyspieszenie i zasięg. Malejące zużycie paliwa, wynikające ze zmniejszenia masy pojazdu, wiąże się bezpośrednio z ograniczoną emisją do otoczenia szkodliwych spalin. Rury te stosowane są więc na ramy autobusów i samochodów osobowych, a także motocykli.

Rury o przekrojach kwadratowych i prostokątnych (dzięki płaskim ściankom) odznaczają się ponadto łatwością montażu, np. przez spawanie lub zgrzewanie, na skutek znacznie prostszego przygotowania łączonych powierzchni i korzystnego ich przylegania. Elementy o takich kształtach przekroju stwarzają szerokie możliwości uzyskania różnych połączeń węzłów konstrukcyjnych.

Oprócz zastosowań rur kwadratowych i prostokątnych wynikających z korzystnych własności wytrzymałościowych na zginanie oraz łatwości montażu, wyroby te znajdują zastosowanie w przypadkach, w których zalety ich kształtu stwarzają także inne, szczególne możliwości. Na przykład rury kwadratowe i prostokątne (zwłaszcza z miedzi) stosuje się w budowie induktorów, gdzie płaskie ścianki tych rur stwarzają korzystne warunki do nagrzewania przedmiotów.

Szczególne wymagania w zakresie rozkładu własności mechanicznych (np. twardości) na przekroju poprzecznym stawiane mogą być rurom profilowanym (np. kwadratowym), przeznaczonym na teleskopy wałów przegubowo-teleskopowych, stosowanych do napędu maszyn. Rury te przenoszą moment napędowy i jednocześnie w trakcie przenoszenia tego momentu narażone są na zużycie ścierne, gdyż osiowo przesuwają się względem siebie. Zatem dla zmniejszenia zużycia ściernego na powierzchniach trących rur pożądane by było, aby rury te miały odpowiedni rozkład twardości na przekrojach poprzecznych. Rury kwadratowe i prostokątne mają ponadto walory estetyczne, co wraz z ich takimi zaletami, jak lekkość konstrukcji i łatwość montażu powoduje, że znajdują one zastosowanie m.in. w przemyśle meblarskim oraz jako elementy konstrukcji ogrodzenia, zastępując deficytowe drewno.

PROCES CIAGNIENIA RUR KWADRATOWYCH

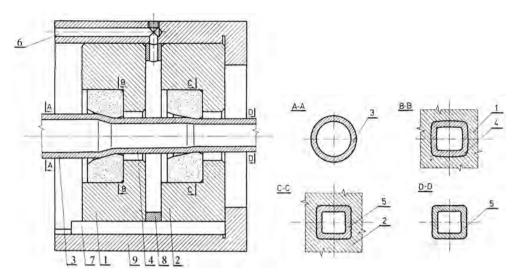
Rury kwadratowe stosowane do badań ciągniono na zimno w jednej z krajowych hut na ciągarce ławowej o sile ciągnienia $P_c = 200 \, \mathrm{kN}$. Ciągarkę wyposażono w zestaw narzędzi do ciągnienia tych rur, zaprojektowany na Politechnice Śląskiej, przedstawiony na rysunku 1.

Przed przystąpieniem do zasadniczej operacji, tj. ciągnienia rur kwadratowych, okrągłe rury wsadowe poddano następującym operacjom pomocniczym: wyżarzanie w atmosferze ochronnej, nagrzewanie końca rury w piecu szczelinowym, zaostrzanie końca rury na kowarce, wytrawianie, płukanie, neutralizacja i smarowanie.

Badane rury o wymiarach $29 \times 31 \times 5$ mm uzyskano przez ciągnienie okrągłych rur wsadowych o wymiarach ϕ 41 × 5 mm w jednym ciągu, w dwóch ciągadłach profilowych bez trzpienia (swobodnie). Tak otrzymane rury powinny być poddane prostowaniu. W dalszej kolejności następowało obcinanie końców, kontrola jakości, konserwacja rur i przygotowanie do wysyłki.

W tak zaproponowanym sposobie ciągnienia zasadnicze odkształcenie odbywa się w pierwszym ciągadle, co wraz utworzonym przez to ciągadło przeciwciągiem powoduje zmniejszenie nacisków jednostkowych w drugim ciągadle. W wyniku tego uzyskuje się zmniejszenie zużycia drugiego ciągadła, co zapewnia wydłużenie partii ciągnionych rur o wąskiej tolerancji kształtu i wymiarów.

Informacje dotyczące technologii i narzędzi stosowanych do ciągnienia badanych rur kwadratowych, a także wyniki badań procesów ciągnienia różnych wyrobów profilowanych oraz badań ich własności przedstawiono w pracach [5] oraz [8–15].



Rys. 1. Narzędzia do ciągnienia rur kwadratowych o wymiarach 31 x 29 x 5 mm: 1 – ciągadło profilowe wstępne, 2 – ciągadło profilowe wykańczające, 3 – okrągła rura wsadowa, 4 – rura wstępnie ukształtowana, 5 – przeciągnięta rura gotowa, 6 – kanał doprowadzający środek smarujący, 7 – wpust ustalający, 8 – pierścień dystansowy, 9 – obejma

Fig. 1. Tools for square tubes drawing with dimensions of 31 x 29 x 5 mm: 1 – roughing profile die, 2 – finishing profile die, 3 – round tube stock, 4 – preformed tube, 5 – final drawn tube, 6 – channel for supplying the lubrication medium, 7 – fixing key, 8 – distance ring, 9 – mounting

BADANIA WŁASNOŚCI RUR KWADRATOWYCH

Program i metodyka badań

Badania własności mechanicznych przeprowadzono na rurach prostokątnych o wymiarach $31 \times 29 \times 5$ mm, ze stali 15. Rury te przeznaczone były na część wewnętrzną teleskopu wału przegubowo-teleskopowego stosowanego do napędu maszyn.

W dalszej części artykułu badane rury prostokątne o wymiarach 31 × 29 × 5 mm, z uwagi na małą różnicę boków, umownie nazwano rurami kwadratowymi. To niewielkie zróżnicowanie wartości wymiarów boków tych rur wynikało z potrzeby zapewnienia rurom jednoznacznego, wzajemnego usytuowania w trakcie montażu z częścią zewnętrzną (odpowiednią rurą kwadratową) teleskopu wału przegubowoteleskopowego. Część teleskopową wału utworzoną z rur kwadratowych, w tym z badanej rury kwadratowej stanowiącej część wewnętrzną teleskopu wału, przedstawiono na rysunku 2. Zbadano następujące własności mechaniczne:

- umowna granicy sprężystości $R_{0,05}$,
- umowna granica plastyczności $R_{0,2}$,



Rys. 2. Teleskop wału przegubowo-teleskopowego utworzony z badanych rur kwadratowych **Fig. 2.** Telescope of the jointed-telescope shaft made from investigated square tubes

- wytrzymałość na rozciąganie R_m
- naprężenie rozrywające R_u,
- wydłużenie A₁₀,
- wydłużenie równomierne A,
- przewężenie Z,
- zapas plastyczności $R_{0,2}/R_m$,

oraz

twardość Vickersa HV5.

Badania własności mechanicznych określonych w próbie rozciągania, w miejscach charakterystycznych przekroju rur

Próbki (minipróbki) przeznaczone do badań własności mechanicznych, określonych w statycznej próbie rozciągania ($R_{0.05}, R_{0.2}, R_m, R_u, A_{10}, A_r, Z$ i $R_{0.2}/R_m$), pobierano z losowo wybranych segmentów (odcinków) rur, otrzymanych w procesie ciągnienia, z charakterystycznych miejsc przekroju poprzecznego danej rury, wzdłuż jej długości. Miejscami charakterystycznymi przekroju rur kwadratowych są naroża i środki długości płaskich ścianek.

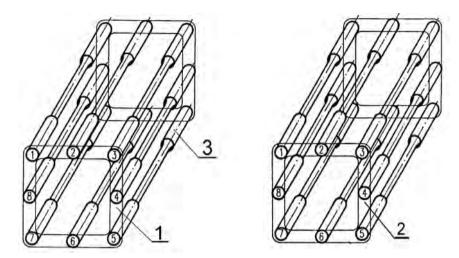
Miejsca pobrania próbek z poszczególnych rur kwadratowych przedstawiono na schemacie (rys. 3). Kształt i wymiary próbek, pobranych z rur kwadratowych, przeznaczonych do badań własności mechanicznych określonych w próbie rozciągania przedstawiono na rysunku 4.

Próby rozciągania przeprowadzono, zgodnie z normą PN-EN 10002-1, na maszynie wytrzymałościowej Instron 1195.

Badania rozkładu twardości na przekrojach rur

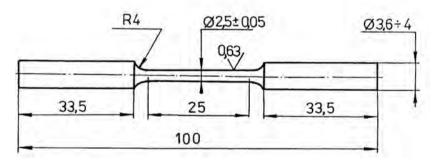
Do badań rozkładu twardości na przekrojach poprzecznych rur kwadratowych użyto próbek w formie pierścieni o grubości ok. 6 mm, wyciętych z tych rur.

Następnie próbki szlifowano obustronnie na szlifierce magnetycznej, celem uzyskania równoległości płaszczyzn. Powierzchnie próbek przeznaczone do badań twardości szlifowano na papierach ściernych o granulacji ziarna od 400 do 1000. Z kolei



Rys. 3. Miejsca pobrania próbek, z rur kwadratowych: 1 – segment pierwszy, 2 – segment drugi, 3 – próbka wraz z numerem miejsca pobrania

Fig. 3. Locations of cutting out the specimens from square tubes: 1 - first segment, 2 - second segment, 3 - specimen with number of sampling location

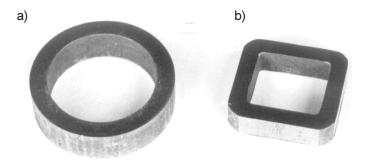


Rys. 4. Kształt i wymiary próbek, z rur kwadratowych, przeznaczonych do badań własności mechanicznych, określonych w próbie rozciagania

Fig. 4. Shape and dimensions of the specimens from square tubes for testing of mechanical properties determined during the tensile test

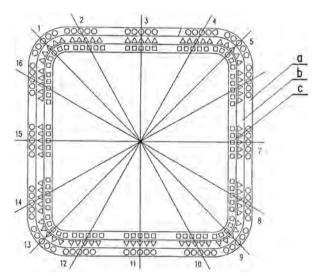
próbki polerowano na polerce metalograficznej, przy użyciu pasty diamentowej o granulacji ziarna 5 μ m. Na tak przygotowanych próbkach prowadzono badania twardości sposobem Vickersa. Badano twardość HV5, zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1.

Na rysunku 5 przedstawiono próbki wycięte z okrągłych rur wsadowych oraz z otrzymanych z nich, w procesie ciągnienia, rur kwadratowych, na których prowadzono badania twardości. Miejsca pomiarów twardości na przekrojach poprzecznych, w miejscach charakterystycznych w badanych warstwach rur kwadratowych przedstawiono na schemacie (rys. 6).



Rys. 5. Próbki na których prowadzono badania twardości: a) okrągłej rury wsadowej, b) uzyskanej rury kwadratowej

Fig. 5. Specimens for carrying out the hardness tests: a) round tube stock, b) obtained square tube



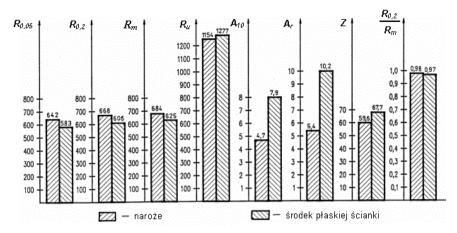
Rys. 6. Miejsca pomiarów twardości HV5 na przekrojach poprzecznych rur kwadratowych: a – warstwa przyzewnętrzna, b – warstwa środkowa, c – warstwa przywewnętrzna

Fig. 6. Measuring points of HV5 hardness on cross-sections of square tubes: a – external layer, b – middle layer, c – internal layer

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Własności mechaniczne materiału rur kwadratowych określone w próbie rozciągania

Wyniki badań własności mechanicznych ($R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m , R_u , A_{10} , A_r , Z i $R_{0,2}/R_m$), określonych w statycznej próbie rozciągania, próbek wyciętych wzdłuż długości rury kwadratowej z charakterystycznych miejsc przekroju poprzecznego, tj. z naroży oraz



Rys. 7. Własności mechaniczne materiału w charakterystycznych miejscach przekroju poprzecznego rury kwadratowej o wymiarach 31 × 28 × 5 mm. Materiał: stal 15
 Fig. 7. Mechanical properties of the material in characteristic parts of cross-section of square tube with dimensions of 31 × 28 × 5 mm. Material: 15 steel

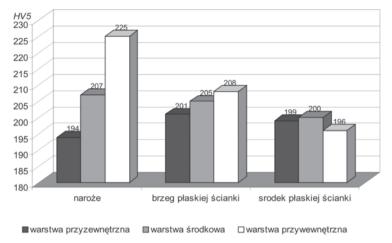
środków długości płaskich ścianek przedstawiono na wykresie (rys. 7). Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że pomiędzy narożami rury a środkami długości boku ich ścianek istnieje znaczące zróżnicowanie wartości badanych własności mechanicznych. Większe wartości $R_{0,05}, R_{0,2}, R_m$ występują w narożach rury niż w jej płaskiej ściance, natomiast wartości wielkości A_{10}, A_r i ZA_{10} w narożach są niższe.

Można więc stwierdzić, że w narożach, badanych rur kwadratowych, w stosunku do płaskich ścianek nastąpiło większe umocnienie materiału odpowiadające wyższym własnościom wytrzymałościowym oraz niższym własnościom plastycznym.

Rozkłady twardości materiału na przekrojach poprzecznych badanych rur kwadratowych

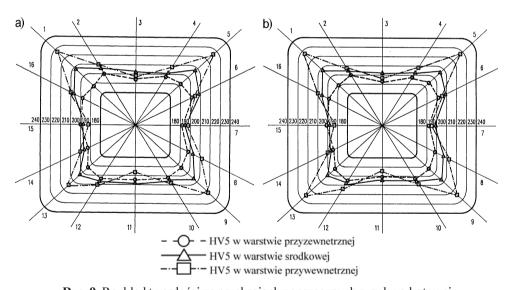
Wyniki badań rozkładu twardości *HV5* na przekrojach poprzecznych rur kwadratowych przeprowadzonych w trzech warstwach na grubości ścianek, tj. warstwie przyzewnętrznej, warstwie środkowej i warstwie przywewnętrznej, w charakterystycznych miejscach przekroju, tj. w narożach, w brzegach płaskich ścianek i w środkach długości płaskich ścianek, przedstawiono na wykresach (rys. 8 i 9).

Analizując rozkład twardości badanych przekrojów tych rur można stwierdzić prawidłowości w uszeregowaniu wartości twardości, w poszczególnych miejscach charakterystycznych i w warstwach przekroju rur. W narożach oraz w płaskich ściankach, w pobliżu naroży (brzegi) występuje wzrost wartości twardości w kierunku od warstwy przyzewnętrznej, przez warstwę środkową ku warstwie przywewnętrznej, przy czym w pobliżu naroży różnice wartości twardości w warstwach są znacznie mniejsze. Najwyższa wartość twardości na przekroju rury występuje w warstwie przywewnętrznej w



Rys. 8. Rozkład twardości na przekroju poprzecznym rury kwadratowej o wymiarach $31 \times 29 \times 5$ mm. Materiał: stal 15

Fig. 8. Hardness distribution on cross-section of square tube with dimensions of $31 \times 29 \times 5$ mm. Material: 15 steel



Rys. 9. Rozkład twardości na przekrojach poprzecznych rury kwadratowej o wymiarach $31 \times 28 \times 5$ mm. Materiał: stal 15: a) przekrój I, b) przekrój II **Fig. 9.** Hardness distribution on cross-sections of square tube with dimensions of $31 \times 28 \times 5$ mm. Material: 15 steel: a) section I, b) section II

narożu rury. Najniższe wartości twardości występują w środkach długości płaskich ścianek, przy czym wartości twardości w poszczególnych warstwach różnią się tu bardzo nieznacznie. Podobnie niska twardość występuje w warstwie przyzewnętrznej naroża rury.

PODSUMOWANIE

W badaniach własności wytrzymałościowych i plastycznych określonych w próbie rozciągania ($R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m , R_u , A_{10} , A_r i Z) oraz w badaniach twardości HV5 stwierdzono znaczącą niejednorodność badanych własności w miejscach charakterystycznych przekroju ciągnionych rur kwadratowych. Określono również prawidłowości rozkładu tych własności.

Stwierdzono m.in., że większe wartości $R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m występują w narożach rur niż w ich płaskich ściankach. Stwierdzono także, że w narożach rur oraz w ich płaskich ściankach w pobliżu naroży występuje wzrost twardości w kierunku od warstwy przyzewnętrznej poprzez warstwę środkową ku warstwie przywewnętrznej.

Znajomość wpływu procesów kształtowania plastycznego wyrobów na własności mechaniczne i ich rozkład na przekroju poprzecznym ma oprócz wartości poznawczych, duże znaczenie utylitarne przy projektowaniu i doborze procesu wytwarzania wyrobów o oczekiwanych własnościach zdeterminowanych warunkami ich pracy.

Szerokie zastosowanie rur kwadratowych w wielu dziedzinach techniki oraz stale rosnące wymagania w zakresie ich jakości wskazują na celowość prowadzenia dalszych badań procesów kształtowania plastycznego tych wyrobów, a także wyrobów o innych kształtach przekroju.

PIŚMIENNICTWO

- Błażewski S., Mikoszewski J.: Pomiary twardości metali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.
- Dobrzański L.A., Nowosielski R.: Metody badań metali i stopów. Badania własności fizycznych. WNT, Warszawa 1987.
- Grochowski E., Grosman F., Oskędra K.: Maszyny ciągarskie. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1976.
- Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M.: Badanie własności mechanicznych metali. WNT, Warszawa 1967.
- Koncewicz S., Oczkowicz T.: Technologia ciągnienia rur kwadratowych na trzpieniu swobodnym. Materiały Ogólnopolskiej Kursokonferencji pt. "Nowe technologie w przeróbce plastycznej metali". SITPH, Politechnika Częstochowska. Częstochowa, 09–11.10.1980: 61–65.
- Łuksza J., Rumiński M.: Zastosowanie pomiarów twardości do analizy procesu ciągnienia. "Hutnik-Wiadomości Hutnicze", nr 5, 1993: 164–170.
- Łuksza J.: Elementy ciągarstwa. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2001.
- 8. Oczkowicz T., Tkaczyk S.: Änderungen in Stahleigenschaften und die Anfälligkeit auf den sich bildenden Bruch beim Ziehen von Quadratrohen. VII. Symposium "Verformung und Bruch". Technische Hochschule "Otto von Guericke" Teil II, Magdeburg (DDR), 3. bis 5. September 1985, s. 60.

- Oczkowicz T., Tyma A.: Taženi obdélníkowých trubek pro klubové teleskopické hřídele náhonů změdělských strojů. Sborník II. Československo-Polskç hutnickç konferencje "Rozvoj technologie výroby přesných ocelowých trubek". Výzkumný ústav hutnictví želaza v Dobré (CSSR), Instytut Metalurgii Żelaza v Gliwicach (PRL), 20. až 22. kvetna 1986, Dobrá (CSSR): 175–183.
- Oczkowicz T., Tkaczyk S.: Badania własności rur kwadratowych otrzymanych przez ciągnienie na trzpieniu swobodnym. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Nowoczesne technologie obróbki plastycznej na zimno". Politechnika Świętokrzyska, Fabryka Samochodów Specjalizowanych "POLMO-SHL", SIMP. Kielce, Cedzyna, 16–17.09.1987: 105–115.
- 11. Oczkowicz T.: Niejednorodność umocnienia stalowych prętów kwadratowych w procesie walcowania w wykroju czterowalcowym. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn nr 1/96, Politechnika Ślaska, Gliwice 1996: 155–168.
- Oczkowicz T., Tkaczyk S.: Heterogeneity of strengthening of the thick-walled copper square tubes in a process of drawing trough a roller die. Proceedings of the 5th International Scientific Conference on "Achievements in Mechanical & Materials Engineering". Polish Academy of Sciences, Silesian Technical University. Gliwice-Wisła, Poland, December 4–6, 1996: 207–210.
- 13. Oczkowicz T., Tkaczyk S.: Heterogeneity of strengthening of the thick-walled copper square tubes in a process of rolling in a four-roll pass. Journal of Materials Processing Technology. ELSEVIER. 1997, vol. 64: 303–310.
- 14. Oczkowicz T.: Combined rolling and drawing of square bars. Proceedings of the International Technical Conference on "Wire and Cable Manufacturing Technologies". The Wire Association International, Inc. Zakopane, Poland, October 10–12, 1999, p. 22.
- 15. Oczkowicz T.: Wpływ procesów walcowania i ciągnienia na niejednorodność umocnienia stalowych prętów kwadratowych. Conference on "Achievements in Mechanical & Materials Engineering". Polish Academy of Sciences, Silesian University of Technology of Gliwice. Gliwice-Cracow-Zakopane, Poland, December 9–13, 2001: 393–398.

HETEROGENEITY OF MECHANICAL PROPERTIES OF DRAWN SQUARE TUBES

Summary

The article discusses the advantages and application of square tubes and the process of drawing steel tubes. In addition results of investigation of mechanical properties of these tubes are presented. Following mechanical properties of square tubes were studied: conventional elastic limit $R_{0.05}$, conventional yield point $R_{0.2}$, tensile strength R_m , breaking stress R_u , elongation A_{10} , uniform elongation A_r , contraction of area Z, and store of plasticity $R_{0.2}/R_m$, and Vickers hardness HV5. The mechanical properties specified in the static tensile test was studied on samples cut out in such specific section of the pipe as square corners and measures the length of flat faces, while the hardness was examined on cross sections of tubes in the same places as above and also in the flat walls near the corners, while hardness testing was performed in three layers on the pipe cross wall thickness: the outer layer, in the middle layer and the inner layer. It was also found in the pattern of distributions of hardness in specific locations in the tested tube wall layers.

Keywords: tubes profile, tubes drawing, mechanical properties.

Mykhaylo Pashechko¹⁾, Mirosław Kindraczuk²⁾

ODPORNE NA ZUŻYCIE POWŁOKI EUTEKTYCZNE UKŁADU Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr OTRZYMANE METODĄ NAPAWANIA Z WYKORZYSTANIEM DRUTÓW PROSZKOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono właściwości tribologiczne powłoki eutektycznej na bazie układu Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr otrzymanej metodą napawania łukowego w osłonie gazowej GMA z użyciem drutu proszkowego. Badanie przeprowadzono dla próbek z powłoką eutektyczną w układzie trzpień-tarcza podczas ruchu ślizgowego na sucho dla prędkości 0,4 m/s przy przyłożonych obciążeniach 3, 7 i 10 MPa. Materiał przeciwpróbki stal C 45. Po tarciu strukturę i rozkład atomów na powierzchni powłoki eutektycznej badano z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM. Na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponowano mechanizm zużycia opracowanych materiałów kompozytowych eutektycznych. W procesie tarcia występuje segregacja atomów C, B i Si na powierzchniu tarcia, spowodowana termodyfuzją, aktywizowana cyklicznym rozgrzewaniem powierzchni tarcia. Wskutek tribosyntezy powstają fazy nanokrystaliczne, które powodują zwiększenie odporności na zużycie kompozytów eutektycznych. Mechanizm tarcia jest utleniający.

WSTĘP

Podwyższenie odporności na zużycie warstw wierzchnich materiałów konstrukcyjnych w istotny sposób zwiększa trwałość elementów maszyn. Najczęściej wykorzystywane powłoki odporne na zużycie na osnowie Co, Ni, Fe, Ti: Ti-Cr-Si [1], Ni-Fe-C-MoS₂ [2], Fe-C-Cr-Si [3], TiC/FeCrBS [4], Ni-Cr-Mo-V [5], Fe-Ti-V-Mo-C [6]. Dla wyjaśnienia mechanizmu zużycia różnego rodzaju materiałów istotne jest określenie intensywności ich zużycia i badania zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących na powierzchni tarcia [7–10].

Kształtowanie eutektycznego pokrycia zachodzi wskutek dyfuzyjnego oddziaływania manganu, boru i krzemu, a także innych pierwiastków stopowych w fazie ciekłej. W zależności od zawartości żelaza, manganu, węgla i boru zachodzi reakcja eutektyczna w układzie Fe-Mn-C, albo Fe-B-C. Przy nagrzewaniu stopu w postaci proszku do 1473 K zachodzi nadtopienie powierzchni i dyfuzja węgla i boru w stal. Podczas ochładzania w pierwszej kolejności zachodzi krystalizacja stopowanego austenitu (ferrytu),

¹⁾ Katedra Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

²⁾ Katedra Maszynoznawstwa, Państwowy Uniwersytet Lotniczy, Kijów.

który rośnie w postaci dendrytów od podłoża, a następnie krystalizuje się w obszarach między dendrytami eutektyka układu Fe-Mn-C.

Zawartość pierwiastków stopowych takich jak Si, Ni, Cr i innych dobiera się uwzględniając możliwość otrzymania stopów ze strukturą eutektyczną oraz podwyższoną odpornością na zużycie biorąc pod uwagę jednocześnie aspekt ekonomiczny.

Własności napawanych warstw wierzchnich zależą nie tylko od składu stopiwa eutektycznego, lecz również od technologii napawania, która może w istotny sposób wpłynąć na zmianę struktury materiału napawanego.

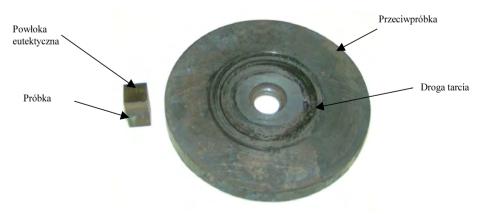
Strukturę i własności eutektycznych warstw wierzchnich można regulować zawartością i wzajemnym stosunkiem pierwiastków w materiale proszkowym oraz technologicznymi parametrami procesu napawania. Właściwości powłok określa skład chemiczny, struktura i skład fazowy. Poprzez ich zmianę można optymalizować własności tribologiczne.

METODYKA BADAŃ

Powłoki otrzymywano z drutu proszkowego o stopiwie eutektycznych układu Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr metodą napawania GMA (MAG osłona CO₂). Jako materiał próbek przyjęto stal SJ 355. Skład pierwiastków wieloskładnikowego stopu eutektycznego (w % masowych) wynosi: Fe 85,1–92,5; Mn 1,6–7,6; C 2,6–7,0; B 0,2–3,5.

Badania odporności na zużycie przeprowadzono na zmodernizowanym tribotesterze typu Amslera przy uwzględnieniu PN-79/H-04329. Przyjęte podstawowe parametry tarcia: układ trzpień – tarcza (kształt próbki – kwadrat o boku 10 mm, średnica tarczy – 90 mm, materiał stal C 45, twardość 52–54 HRC, rys. 1), prędkość 0,4 m/s, czas tarcia 6 godzin. Ubytek masy mierzono metodą wagową z dokładnością 1 mg.

Badania rozkładu pierwiastków na powierzchni przed i po tarciu były prowadzone przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego SEM z przystawką EDS.

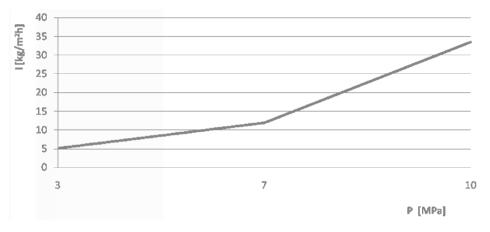


Rys. 1. Widok próbki i przeciwpróbki

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Ubytek masy próbki po tarciu przy obciążeniu 3 MPa wyniósł 5, przy 7 MPa – 11, natomiast przy 10 MPa – 33 kg/m² h (rys. 2). Współczynnik tarcia przy obciążeniu 3 MPa wyniósł 0,48, przy 7 MPa – 0,67 natomiast przy 10 MPa – 0,94.

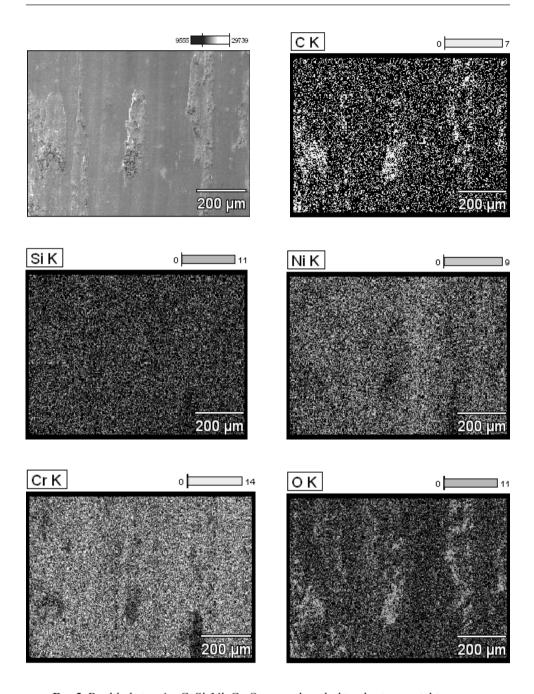
Powłoka eutektyczna składa się z stopowanego austenitu (faza miękka), manganowego węglika żelaza $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$ (faza umacniająca) oraz dyspersyjnych wtrąceń borku żelaza Fe_2B i węglika chromu Cr_7C_3 . Zawartość pierwiastków stopowych Si, Cr, Ni w powłoce wynosi: Si – 2,46%, Cr – 16,24%, Ni – 17,68. Twardość powłoki 49 HRC. Mikrotwardość zmienia się od 473 do 522 HV. Strefa przejściowa ma mikrotwardość 421 HV, a rdzeń 299 HV.



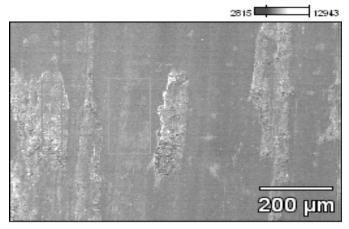
Rys. 2. Intensywność zużycia powłoki eutektycznej układu Fe-Mn-B-C-Si-Ni-Cr przy obciążeniach 3, 7 i 10 MPa

Otrzymano nierównomierny rozkład atomów węgla, krzemu oraz tlenu na powierzchni tarcia (rys. 3). Obecność tlenu może świadczyć o kształtowaniu się tlenków, czyli zużyciu utleniającym. Przebadano skład chemiczny powierzchni przed i po tarciu (rys. 4) przy obciążeniu 3 MPa dla obszarów 1, 2.

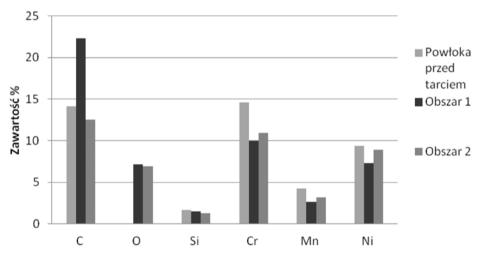
Na powierzchni tarcia (rys. 5) ujawniono wzrost zawartości atomów O oraz C dla obszaru 1 w porównaniu do powierzchni powłoki przed tarciem. Zawartość węgla wzrasta z 14,11 do 22,31 w obszarze 1 i spada do 12,51 w obszarze 2. Zawartość tlenu wzrasta do 7,17 w obszarze 1 i 6,19 w obszarze 2. Natomiast dla Si, Cr, Mn, Ni widoczny jest spadek zawartości tych pierwiastków na powierzchni w porównaniu z próbką przed tarciem.



Rys 3. Rozkład atomów C, Si, Ni, Cr, O na powierzchni tarcia stopu eutektycznego przy obciążeniu 3 MPa



Rys. 4. Powierzchnia tarcia



Rys. 5. Rozkład pierwiastków na powierzchni powłoki Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr przed i po tarciu przy obciążeniu 3 MPa

PODSUMOWANIE

Stopy eutektyczne układu Fe-Mn-C-B-Si-Cr-Ni dają możliwość otrzymywania na powierzchni stali SJ 355 odpornych na zużycie powłok eutektycznych metodą napawania MAG z wykorzystaniem drutów proszkowych.

Badania mikrostrukturalne pokazały, że są one materiałem kompozytowym dyspersyjnie wzmocnionym borkami oraz węglikami żelaza i chromu. Stwierdzono wzrost zawartości pierwiastków C, O, na powierzchni tarcia powłoki eutektycznej w porównaniu z próbką przed tarciem.

Na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponowano mechanizm zużycia opracowanych materiałów kompozytowych eutektycznych. W procesie tarcia występuje segregacja atomów C, B i Si na powierzchniu tarcia, spowodowana termodyfuzją, aktywizowana cyklicznym rozgrzewaniem powierzchni tarcia. Wskutek tribosyntezy powstają fazy nanokrystaliczne, które powodują zwiększenie odporności na zużycie kompozytów eutektycznych. Mechanizm tarcia jest utleniający.

PIŚMIENNICTWO

- 1. Hadad M., Bandyopadhyay P.P., Michler J., Lesage J.: Tribological behaviour of thermally sprayed Ti-Cr-Si coatings. Wear 267, 2009: 1002–1008.
- 2. Jianliang L., Dangsheng X.: Tribological behavior of graphite-containing nickel-based composite as function of temperature, load and counterface, Wear 266, 2009: 360–367.
- 3. Granat K.: Wieloskładnikowe stopy Fe-C-Cr-Si odporne na zużycie przeznaczone na odlewy i warstwy napawane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- 4. Xinhong W., Zengda Z., Sili S., Shiyao Q.: Microstructure an wear properties of insitu TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding. Wear 260, 2006: 705–710.
- 5. Rai D., Singh B., Singh J.: Characterisation of wear behavior of different microstructures in Ni-Cr-Mo-V steel. Wear 263, 2007: 821–829.
- 6. Xinhong W., Fang H., Xuemei L., Shiyao Q., Zengda Z.: Microstructure and wear properties of the Fe-Ti-V-Mo-C hardfacing alloy. Wear 265, 2008: 583–589.
- 7. Garza-Montes-de-Oca N.F., Rainforth W.M.: Wear mechanisms experienced by a work roll grade high speed steel under different environmental conditions. Wear 267, 2009: 441–448.
- 8. Chengxin L., Guixin W., Yandong W., Jingang W., Jianjun Z.: Analysis of wear resistance and its mechanism in an Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy. Materials Science and Engineering, 2006: 804–807.
- 9. Khonsari M.M., Booser E.R.: Applied Tribology. Jon Wiley & Sons, Ltd., Chichaster 2008.
- 10. Pashechko M., Lenik K.: Segregation of atoms of the eutectic alloy Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr at friction wear. Wear 267, 2009: 1301–1304.

WEAR RESISTANCE OF EUTECTIC COATING OF SYSTEM Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr OBTAINED BY WELDING METHOD WITH USE WIRE POWDER

Summary

Wear resistance of eutectic coating of system Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr obtained by welding method with use wire powder was studied. The coating were obtained by gas metal arc welding GMA with use of wire powder. Pin-on-disk dry sliding wear tests at sliding speeds $0,4\,\text{m/s}$ and under loads $3,7,10\,\text{MPa}$ were conducted for pin specimens with eutectic coatings. Material of counter-sample was steel C 45.

After friction structure and distribution of atoms in the eutectic coatings due to wear was studied by scanning electron microscopy (SEM). Segregation of the C, B and Si caused of the thermal diffusion, activated by of the friction heating of the friction surface. Tribosyntese arise as a result of nanocrystalline phase, which increase the wear resistance of composites eutectic. The mechanism of friction is oxidizing.

Piotr Tarkowski¹⁾, Ewa Siemionek¹⁾

UKŁADY NAPĘDOWE POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. Elektroniczne układy sterowania stosowane w napędach elektrycznych zamieniają polecenia kierowcy: kierunek jazdy, przyspieszenie, położenie dźwigni hamowania, na odpowiednie sygnały wejściowe półprzewodnikowego sterownika mocy. Jednocześnie kontrolowane są przy tym parametry dopuszczalne takie jak maksymalna wartość natężenia prądu, napięcia oraz prędkości obrotowej silnika. W artykule przeprowadzono analizę impulsowego sterowania w układach napędowych pojazdów elektrycznych. Scharakteryzowano zakresy pracy silnikowej i generatorowej dla napędu z obcowzbudną maszyną prądu stałego.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, układy napędowe, sterowanie impulsowe.

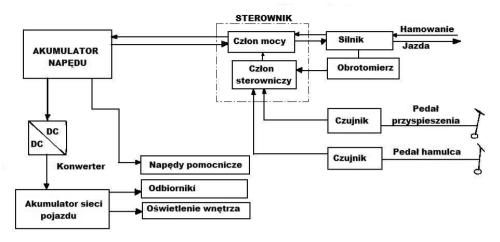
WPROWADZENIE

Układy napędowe elektryczne nadają się szczególnie do pojazdów używanych w ruchu miejskim. Bezstopniowe sterowanie prędkości jazdy oraz momentu obrotowego w całym zakresie warunków ruchu pojazdu jest dokonywane bez przełączania, za pomocą powodującej małe straty regulacji napięcia i natężenia prądu, co pozwala na osiąganie dużych przyspieszeń.

Elektryczne układy napędowe wykazują bardzo niski poziom hałasu i nie wydzielają spalin, dzięki czemu są nieszkodliwe dla otoczenia. Podczas pracy hamowania możliwe jest odzyskiwanie energii i ponowne doprowadzanie jej do akumulatora. Bezstopniowe sterowanie prędkości oraz odzyskiwanie energii podczas hamowania aż do zatrzymania silnika osiągane jest za pomocą bezstykowych, a przez to w dużej mierze nie wymagających zabiegów konserwacyjnych, elementów półprzewodnikowych. Tego rodzaju układy posiadają "sterowanie impulsowe" lub "regulator prądu stałego". Wyposażenie elektryczne obejmuje także urządzenia kontrolne i zabezpieczające. W przypadku zakłóceń wewnętrznych bądź zewnętrznych urządzenia te mogą wyłączyć zasilanie energią w ciągu kilku milisekund [9, 12].

Schemat blokowy napędu elektrycznego pojazdu przedstawia rysunek 1.

¹⁾ Katedra Pojazdów Samochodowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.



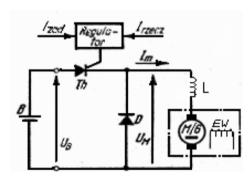
Rys. 1. Schemat blokowy napędu pojazdu elektrycznego

UKŁADY IMPULSOWEGO STEROWANIA NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

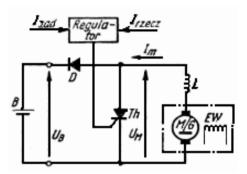
Podstawowe układy połączeń impulsowego sterowania silnika bocznikowego przedstawia rysunek 2 oraz rysunek 3. Układy te stanowią oprócz akumulatora B przełącznik tyrystorowy Th, silnik prądu stałego M/G, dławik pomocniczy L w obwodzie twornika (indukcyjność dodatkowa), bocznikowe uzwojenie wzbudzenia EW oraz dioda D.

Podczas jazdy wskutek okresowego załączania i wyłączania tyrystora *Th*, w silniku powstaje ciąg impulsów napięciowych o różnej szerokości zależnej od czasu załączania tyrystora. Zmiany częstotliwości impulsów oraz czasu ich trwania (szerokości) umożliwiają ciągłe sterowanie wartości średniej napięcia od zera do wartości napięcia na akumulatorze.

W czasie hamowania (rys. 3) tyrystor *Th* zostaje włączony podczas pracy silnika, w wyniku przeciwdziałającego napięcia silnika popłynie prąd w kierunku odwrotnym niż



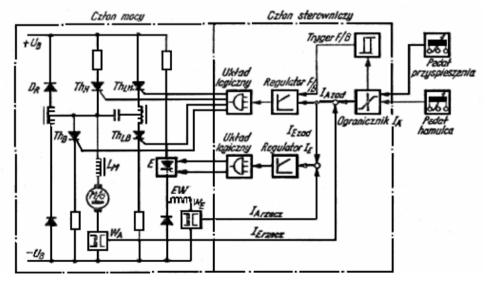
Rys. 2. Układ połączeń sterowania impulsowego podczas jazdy



Rys. 3. Układ połączeń sterowania impulsowego podczas hamowania

podczas jazdy, wskutek czego silnik zacznie pracować jako prądnica i rozwijać moment hamowania. W indukcyjności dodatkowej L zostaje przy tym okresowo zmagazynowana energia. Po wyłączeniu tyrystora obwód indukcyjny zostaje przerwany. Wskutek tego wzrasta napięcie w cewce L i prąd może płynąć przez diodę D do akumulatora.

Na rysunku 4 przedstawiono uproszczony schemat członu mocy sterownika wraz ze schematem blokowym członu sterowniczego. Poza akumulatorem (napięcie UB) i silnikiem trakcyjnym M/G z uzwojeniem wzbudzającym EW, najważniejszymi elementami członu mocy są: człon nastawczy prądu twornika, składający się z tyrystora głównego Th_H , tyrystora pomocniczego hamowania Th_B , tyrystorów wygaszających Th_{LH} i Th_{LB} , dławik dodatkowy L_M w obwodzie twornika, do wygładzania pulsacji prądu, oraz pokazany jedynie w zarysie zasadniczym regulator pola elektromagnetycznego E. Jest on zbudowany jako mostek tyrystorowy, w którego środkowym



Rys. 4. Schemat członu mocy układu sterowania elektrycznego układu napędowego

odgałęzieniu znajduje się uzwojenie wzbudzenia EW. W ten sposób staje się możliwa szybka i bezstykowa zmiana biegunowości w przypadku zmiany kierunku jazdy. Istotnymi elementami członu sterowniczego są: regulator "jazda – hamowanie" (F/B) i znajdujący się pod nim regulator w obwodzie wzbudzenia. Dlatego położenie dźwigni przyśpieszenia (jazdy) jak i dźwigni hamowania ustala wymagany prąd twornika poprzez czujniki indukcyjne. Układ ogranicznika oraz układ wyboru kolejności (pierwszeństwa) – utrzymują wartość zadaną na regulatorze prądu twornika [7, 8]. Układem jazdy i hamowania steruje regulator jazda – hamowanie, a także układ logiczny tyrystora. Nastawnik twornika może w sposób ciągły wpływać na prąd silnika poprzez tyrystory Th_H oraz Th_B podczas pracy silnikowej, jak i podczas pracy generatorowej.

W przypadku napędu pojazdów z obcowzbudną maszyną prądu stałego można rozróżnić cztery podstawowe zakresy dla pracy silnikowej i generatorowej:

Praca silnikowa

- 1. Jazda w zakresie nastawczym twornika.
- 2. Jazda w zakresie nastawczym uzwojenia wzbudzenia.

Praca generatorowa

- 3. Hamowanie w zakresie nastawczym uzwojenia wzbudzenia.
- 4. Hamowanie w zakresie nastawczym twornika.

Jazda w zakresie nastawczym twornika

W zakresie od postoju do jednej trzeciej prędkości maksymalnej sterowanie impulsowe następuje w obwodzie prądowym twornika. W zależności od położenia dźwigni przyspieszenia ustalony jest prąd jazdy dla regulatora prądu twornika. Zostaje on porównany z prądem rzeczywistym przekładnika prądowego *WA*-. Do regulatora prądu twornika jest dołączony dodatkowy regulator dwu-położeniowy o określonej histerezie. Wskutek odpowiedniego nastawienia regulatora oraz w wyniku działania indukcyjności dodatkowej utrzymywana jest mała pulsacja prądu, w wyniku czego zmniejsza się pulsacja momentów na wale napędowym.

Jazda w zakresie nastawczym uzwojenia wzbudzenia

Od chwili osiągnięcia znamionowej prędkości obrotowej maszyny (jedna trzecia maksymalnej prędkości obrotowej) – tyrystor Th_H pozostaje stale włączony. Poprzez regulator IE pole magnetyczne zostaje osłabione tak, że prąd twornika pozostanie stały aż do maksymalnej prędkości obrotowej. Silnik pracuje wówczas w zakresie nastawczym uzwojenia wzbudzenia. Od tej chwili natężenie prądu silnika oraz prędkość obrotowa zmieniają się na sutek zmian prądu wzbudzenia.

Hamowanie w zakresie nastawczym uzwojenia wzbudzenia

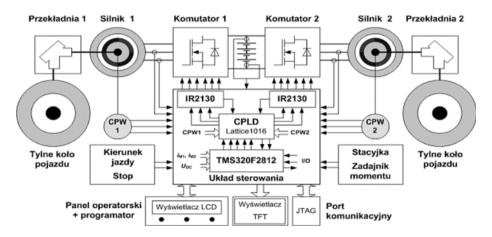
W zakresie nastawczym uzwojenia wzbudzenia można bez przełączania elementów mechanicznych przejść na pracę użyteczną hamowania. Należy zwiększyć natężenie prądu w obwodzie wzbudzenia. Napięcie na zaciskach silnika będzie wówczas większe

niż napięcie akumulatora, dlatego też przez diodę D_R prąd stały popłynie bezpośrednio z prądnicy do akumulatora. Ten rodzaj hamowania użytecznego jest możliwy w przypadku zmniejszenia obrotów aż do znamionowej prędkości obrotowej silnika.

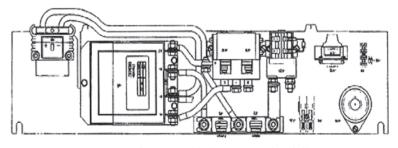
Hamowanie w zakresie nastawczym twornika

Jeżeli prąd hamowania zmniejszy się w chwili osiągnięcia znamionowej prędkości obrotowej poniżej nastawionej wartości wymaganej, włącza się tyrystor Th_B i prądnica zostaje przez dławik L_M zwarta. Wartość prądu prądnicy zwiększa się i doprowadza energię do znajdujących się w obwodzie elementów indukcyjnych. Jeśli prąd zwarciowy osiągnie nastawiony prąd hamowania, tyrystor Th_B zostaje wyłączony po włączeniu się tyrystora Th_{LB} . Wskutek wyłączenia indukcyjności w obwodzie prądowym wzrasta napięcie na dławiku L_M , dioda D_R staje się przewodząca i zmagazynowana energia płynie do akumulatora. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie hamowania użytecznego aż do zatrzymania silnika [4, 6].

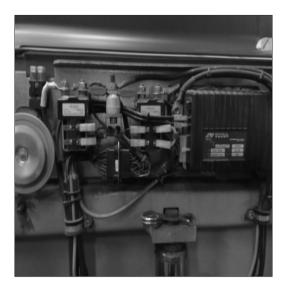
Przykładowe rozwiązania układów sterowania dla samochodów z napędem elektrycznym przedstawiają rysunki 5, 6, 7, 8.



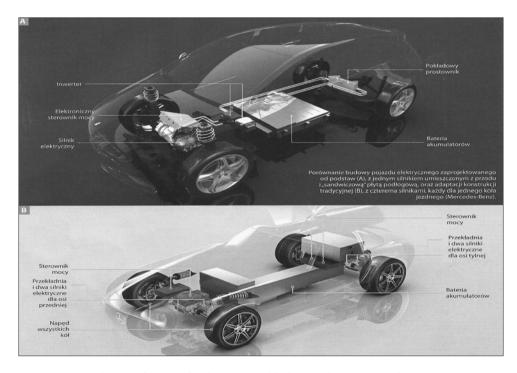
Rys. 5. Schemat blokowy układu napędowego samochodu elektrycznego



Rys. 6. Elementy układu sterowania silnika



Rys. 7. Rozmieszczenie elementów sterowania silnikiem



Rys. 8. Rozmieszczenie elementów układu napędowego współczesnego samochodu elektrycznego [5]

PODSUMOWANIE

Samochody z napędem elektrycznym zyskują wielu zwolenników, szczególnie w kręgach ekologów oceniających możliwe do wykorzystania źródła energii pod kątem ich wpływu na środowisko. Należy zwrócić uwagę, że przy obecnym systemie pobierania energii elektrycznej, łączna emisja $\mathrm{C0}_2$ podczas eksploatacji samochodu osobowego odniesiona do przejechanej drogi wynosi przeciętnie 180 g/km i jest wyraźnie niższa niż w przypadku benzyn (230 g/km), a także olejów napędowych (210 g/km). Energia elektryczna pozwala ponadto na znaczne zredukowanie takich składników szkodliwych jak węglowodory, tlenek węgla i tlenki azotu w porównaniu z innymi paliwami jak gaz naturalny sprężony (CNG), mieszaniny propan-butan (LPG) oraz metanol [2, 15].

Do głównych zalet zastosowania elektrycznych układów napędowych należy:

- wysoka sprawność przetwarzania energii wynosząca około 70–90%, w porównaniu z napędami spalinowymi dla których wynosi 15–30%,
- większy moment obrotowy niż dla napędów spalinowych,
- niska emisja hałasu,
- brak szkodliwych toksyn zawartych w spalinach pojazdów spalinowych,
- zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych [1].

Głównymi wadami pojazdów wykorzystujących napęd elektryczny są:

- ograniczony zasięg i długi czas ładowania baterii akumulatorów,
- duża masa i wysoka cena baterii akumulatorów,
- ograniczona żywotność akumulatorów,
- emisja zakłóceń elektromagnetycznych,
- wrażliwość na warunki atmosferyczne.

PIŚMIENNICTWO

- 1. Dyszy J.: Elektryczne już są. Auto Technika Motoryzacyjna, 11, 2009: 24–25.
- Jakubiec M.: Energooszczędność i kompatybilność w napędach elektrycznych. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, Katowice 2005.
- 3. Karwowski K., Szelag A.: Modern electric traction: vehicles. Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering, Gdańsk 2009.
- 4. Leitman S., Brant B.: Build your own electric vehicle. McGraw-Hill, New York 2009.
- 5. Łęgiewicz J.: Z prądem czasu. 11, 2009: 12–17.
- Merkisz J., Pielecha I.: Alternatywne napędy pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- Ocioszyński J., Michałowski K.: Pojazdy samochodowe o napędzie elektrycznym i hybrydowym. WKŁ 1989.
- 8. Ocioszyński J., Świątek T.: Pojazdy samochodowe z napędem elektrycznym. Auto-Technika Motoryzacyjna 12, 1988: 8–10.

- 9. Rudnicki T.: Pojazdy z silnikami elektrycznymi. Zeszyty Problemowe Maszyny elektryczne nr 80, 2008.
- Sawicki J. Samochód elektryczny utopia czy szansa. Auto-Technika Motoryzacyjna 5, 1992: 35–39.
- 11. Sawicki J., Stegman T.: Nowe generacje samochodów elektrycznych. Auto-Technika Motoryzacyjna 5, 1991: 24–29.
- 12. Sawicki J. Napęd elektryczny o krok bliżej celu. Auto-Technika Motoryzacyjna 1, 1993: 12–14.
- 13. Sawicki J.: Samochody elektryczne: małe średnie i największe. Auto-Technika Motoryzacyjna 9, 1993: 33–35.
- 14. Sawicki J.: Co będzie po ropie naftowej? Auto-Technika Motoryzacyjna 7, 1990: 8–12.
- 15. Szumanowski A. Czas energii. WKŁ 1988.

ELECTRIC VEHICLE DRIVES

Summary

The control electronics in electric drives converts the commands of the driver: direction, accelerator, brake pedal position, into the corresponding control commands input to the power semiconductors, while at the same time observing specified limits: current, voltage, motor speed. The paper presents the analysis of control electronics in electric vehicle drives. The motor and generator operation in DC drives are described.

Keywords: electric vehicle, electric vehicle drives, control electronics.

Informacje dla Autorów publikacji w Postępach Nauki i Techniki

- 1. Redakcja przyjmuje do druku oryginalne prace naukowe w języku polskim lub angielskim. Prace są publikowane po uzyskaniu pozytywnych opinii recenzentów z innych ośrodków naukowych niż autorzy publikacji. Mogą też być publikowane artykuły sponsorowane, przygotowane zgodnie z podanymi wymaganiami, oraz materiały reklamowe.
- 2. Publikacja poza tekstem głównym powinna zawierać; tytuł, nazwiska i tytuły naukowe Autorów, miejsca pracy oraz adresy e-mail. Kolejną częścią pracy powinno być streszczenie w językach polskim i angielskim oraz słowa kluczowe w obu językach. Podpisy tabel i rysunków powinny być także przygotowane w obu językach polskim i angielskim.
- 3. Tekst powinien być zapisany w programie WORD FOR WINDOWS przy standardowych ustawieniach formatowania (1,5 wiersza) i czcionki (Times New Roman 12p). Na nasz adres e-mailowy należy przesłać wersję elektroniczną artykułu, pocztą natomiast kompletny wydruk na papierze formatu A4. Typowy układ pracy jest dostępny na stronie: http://www.ineko.net.pl/czasopismo.htm
- 4. Na końcu pracy powinny być umieszczone pozycje bibliograficzne w kolejności alfabetycznej (wg nazwisk autorów) oraz numerowane kolejno do 20 pozycji. Powołania na piśmiennictwo w tekście podawać w nawiasie kwadratowym.
- Objętość kompletnej publikacji powinna zawierać 8 12 stron znormalizowanego maszynopisu A4. Istnieje możliwość zamieszczenia dłuższych publikacji pod warunkiem poniesienia dodatkowych kosztów oraz akceptację przez recenzentów i Redakcję.
- Do publikacji powinno być dołączone zgłoszenie z oświadczeniem Autora(-ów). W jednym numerze czasopisma mogą być zamieszczone maksymalnie dwie publikacje tego samego Autora.
- 7. Zatwierdzenie publikacji do druku jest możliwe po uzyskaniu pozytywnej recenzji oraz po poniesieniu opłaty za druk w wysokości 240 zł. Zniżkowa opłata dla doktorantów (uczestników studiów doktoranckich) wynosi 200 zł. Dodatkowa opłata za przekroczenie limitu stron wynosi 50 zł (lub 40 zł dla doktorantów) za każdą stronę. Istnieje możliwość druku kolorowych rysunków lub fotografii za dodatkową opłatą 100,- zł za stronę (wszystkie ceny netto).
- 8. Po ustosunkowaniu się do uwag recenzenta Autorzy otrzymają potwierdzenie przyjęcia artykułu do druku.
- 9. Redakcja zastrzega sobie prawo do skracania i adjustacji tekstów. Znaczące zmiany tekstu będą uzgadniane z Autorami. Teksty z niepoprawnym tłumaczeniem na język angielski nie będą przyjmowane do druku lub poprawiane na koszt autorów.
- 10. Autorzy otrzymają bezpłatne egzemplarze czasopisma.